

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

ХЛІЄВА ОЛЬГА ЯКІВНА

УДК 621.564:536

ДИСЕРТАЦІЯ

**НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАНОФЛЮЇДІВ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН**

05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 О. Я. Хлієва

Науковий консультант
Железний Віталій Петрович,
доктор технічних наук, професор

Примірник дисертації ідентичний
за змістом з іншими примірниками

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.088.03
д.т.н., професор



В. І. Мілованов

Одеса – 2019

АНОТАЦІЯ

Хлісва О.Я. Наукове обґрунтування використання нанофлюїдів для підвищення ефективності холодильних машин. – Наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.14 «Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування». – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2019.

Дисертаційна робота присвячена комплексному експериментальному і теоретичному дослідженню процедур створення та теплофізичних властивостей нанофлюїдів, перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл парокompресійних холодильних машин, дослідженню тепловіддачі при їх вимушеній конвекції та кипінні, експериментальному дослідженню енергетичних показників роботи парокompресійної холодильної машини при використанні нанофлюїдів в якості робочих тіл, еколого-енергетичному обґрунтування доцільності їх використання в холодильному обладнанні.

Основна ідея дослідження пов'язана з тим, що добавки нанорозмірних частинок у традиційно застосовувані у холодильних машинах та установках робочі тіла та холодоносії сприяють зміні їх теплофізичних властивостей, інтенсифікації тепловіддачі з участю нанофлюїдів в апаратах холодильних машин та підвищенню показників їх енергетичної ефективності, без внесення змін у їх конструкцію.

Було виконано експериментальні дослідження колоїдної стійкості модельних нанофлюїдів та нанофлюїдів, перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл. Науково обґрунтоване, що застосування комбінованої (ультразвукової і механічної) двоступеневої методики приготування нанофлюїдів з використанням в якості середовища для диспергування наночастинок компонента з найменшою в'язкістю (або проміжної малов'язкої рідини) буде сприяти покращенню колоїдної стійкості нанофлюїдів на основі компресорних мастил або органічних холодоносіїв. Додавання ПАР (у випадку потреби) доцільно здійснювати на першій стадії диспергування з попереднім підбиранням як типу ПАР, так й її концентрації.

Розроблено рекомендації зі створення реальних робочих для тіл парокомпресійних холодильних машин з добавками наночастинок TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} .

В роботі проведено узагальнення та аналіз експериментальних даних з теплофізичних властивостей наступних нанофлюїдів: ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 , R141b/ПАР/наночастишки TiO_2 , тетралін/фулеренів C_{60} , R600a/компресорне масло/фулерени C_{60} .

Показано, що добавки $0,0020 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ фулеренів C_{60} в мінеральне компресорне масло сприяють незначному зниженню поверхневого натягу ($T=283 - 303 \text{ K}$) та в'язкість ($T=253 - 283 \text{ K}$), збільшенню тиску насиченої пари ($T=283 - 354 \text{ K}$) розчинів цього масла в холодоагенті R600a у широкому інтервалі концентрацій. Найбільші ефекти зафіксовано при низьких температурах.

На основі аналізу експериментальної інформації о питомій ізобарній теплоємності нанофлюїду ізопропанолі/ наночастишки Al_2O_3 у широкому інтервалі концентрацій та температур показано, що присутність наночастинок призводить до зниження теплоємності базової рідини яке не прогнозується з використанням правила адитивності. Отримані дані про теплофізичні властивості нанофлюїдів формують базу довідкових даних для розвитку методів моделювання та прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів.

Зроблено висновок, що основною причиною існування надлишкових значень питомої ізобарної теплоємності у нанофлюїді є наявність на поверхні наночастинок структурованого шару з молекул базової рідини - поверхневої фази, яка має властивості, що близький до властивостей твердої фази при температурі плавлення.

Запропоновано метод визначення концентрації молекул базової рідини у поверхневій фазі в нанофлюїді з використанням різноманітної вхідної експериментальної інформації з густини, питомої ізобарної теплоємності, теплоти правлення нанофлюїду та базової рідини. Рекомендовано температурну залежність концентрації поверхневої фази визначати на основі проведення експерименту з дослідження температурної залежності густини нанофлюїду з однією концентрацією наночастинок.

В дисертаційній роботі розроблені методи прогнозування питомої ізобарної теплоємності та динамічної в'язкості нанофлюїдів, які основані на використанні да-

них з температурної залежності концентрації поверхневої фази у нанофлюїді. Проведено верифікацію цих методів з використанням експериментальних даних для нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 . Показане добре узгодження розрахованих значень з експериментальними даними в широкому інтервалі температур та концентрацій. Запропоновані методи є ефективним фізично обґрунтованим інструментом прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів, для яких відсутня експериментальна інформація у широкому діапазоні параметрів стану.

З використанням експериментальних даних для системи R600a/компресорне масло/фулерени C_{60} досліджено можливості застосування методу розширеного скейлінгу щодо прогнозування теплофізичних властивостей робочих тіл з добавками наночастинок. Показано достатнє для практичного застосування збігання експериментальних та прогнозних значень з густини, в'язкості, тиску насиченої пари і поверхневого натягу.

Проведено узагальнення та аналіз експериментальні даних з гідродинамічних та теплообмінних параметрів при течії нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 в каналі круглого поперечного перерізу. Показано, що добавка наночастинок Al_2O_3 в ізопропанол призводить до збільшення як коефіцієнта тепловіддачі, так й до збільшення втрат тиску зі збільшенням числа Рейнольдса приблизно пропорційне концентрації наночастинок при $200 < \text{Re} < 10^5$.

Показано, що з точки зору енергозбереження застосування нанофлюїду ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 не приводить до зміни енерговитрат на перекачування рідини на одиницю переданої кількості теплоти у порівнянні з течією базової рідини при турбулентному режимі, та призводить до збільшення енерговитрат при ламінарному режимі течії. Зроблено висновок, що використання нанофлюїдів в якості тепло- та холодоносіїв є перспективним, коли енерговитрати на перекачування не є досить важливими у порівнянні з інтенсифікацією тепловіддачі, наприклад при охолодженні мікроелектронних елементів. У такому випадку використання нанофлюїдів буде сприяти зменшенню масогабаритних розмірів теплообмінного обладнання.

Показано, що залежності, які запропоновані для розрахунку коефіцієнтів те-

пловіддачі при ламінарному русі однофазних рідин у каналах, а також коефіцієнтів втрат напору по довжині (як при ламінарному, так й при турбулентному режимах течії) придатні для розрахунку цих величин для нанофлюїду ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 в широкому інтервалі концентрацій наночастинок з використанням коректо визначених теплофізичних властивостей нанофлюїду. Але для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при турбулентній течії рівняння, запропоновані для однофазних рідин, потребують модифікації з урахуванням фізичних ефектів впливу наночастинок на ступень турбулентності потоку.

В дисертації наведені результати експериментального дослідження тепловіддачі при кипінні нанофлюїду R141b/ПАР($0,001 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$)/наночастинки TiO_2 ($0,001 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$) у порівнянні з R141b та R141b/ПАР у інтервалі теплових потоків до $60 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ та тисках $0,2-0,4 \text{ МПа}$. Показано, що добавки наночастинок та ПАР призводять до збільшення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі (до 20% у порівнянні з кипінням базової рідини) при теплових потоках до $20 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ та низьких тисках (такі параметри характерні для роботи випарників холодильних машин і теплових насосів). При збільшенні теплового потоку та тиску спостерігається погіршення інтенсивності тепловіддачі при кипінні нанофлюїду. Зроблений висновок, що основним фактором, який визначає вплив наночастинок на інтенсивність процесу кипіння є модифікація поверхні нагріву.

Запропоновано метод прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів та чистих рідин, який оснований на використанні фізично обґрунтованої моделі RPI та внутрішніх характеристик процесу кипіння, визначених при одному зручному для проведення експеримента значенні тиску і двох або декількох значеннях теплового потоку. Проведено верифікацію цього методу з використанням експериментальної інформації о коефіцієнтах тепловіддачі й внутрішніх характеристик процесу кипіння для нанофлюїду R141b/ПАР/ TiO_2 . Використання цього методу буде сприяти коректній оцінці доцільності застосування нанофлюїдів не тільки в випарниках холодильних машин, а й в іншому теплообмінному обладнанні різних галузей промисловості.

Проведено узагальнення експериментальних даних з показників енергетич-

ної ефективності компресорної холодильної системи при використанні в якості робочих тіл R600a/компресорні мастила з добавками наночастинок TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} . Показано, що використання робочих тіл з добавками наночастинок TiO_2 й Al_2O_3 та фулеренів C_{60} призводить до збільшення холодильного коефіцієнту. Найбільший ефект при оптимальній витраті робочого тіла ($0,42 \text{ г}\cdot\text{с}^{-1}$) зафіксований при використанні робочих тіл з домішками наночастинок TiO_2 та фулеренів C_{60} – 5-6 %. Для підвищення енергетичної ефективності парокомпресійних холодильних машин з холодоагентом R600a рекомендовано використання у якості добавки до компресорного масла фулеренів C_{60} з підбором з наявних на ринку масил такого, яке при його в'язкості забезпечить найбільше значення холодильного коефіцієнту при збереженні достатніх змащувальних властивостей.

Отримані експериментальні дані про вплив наночастинок на інтенсивність теплообміну при вимушеній течії нанохолодоносіїв та при кипінні нанохолодоагентів, а також про вплив добавок наночастинок у робочі тіла на показники ефективності парокомпресійної холодильної машини дозволили виділити ключові фактори, що впливають на доцільність впровадження нанофлюїдів у холодильну галузь.

В дисертації розроблений метод еколого-енергетичного аналізу холодильних машин та установок та запропоновано новий індикатор еко-енергетичної ефективності побутових холодильних приладів *IEEE*, заснований на оцінці емісії парникових газів за життєвий цикл обладнання. Запропонований індикатор є альтернативною традиційно використовуваному на практиці індексу енергетичної ефективності *IEE*.

В роботі на основі узагальненої експериментальної інформації з параметрів ефективності роботи парокомпресійної холодильної системи проведений аналіз доцільність використання нанофлюїдів у побутових холодильних приладах. Показано, що розраховані величини *IEEE* та *IEE* для трьох порівнювальних побутових холодильних приладів одного функціонального призначення та близького корисного об'єму мають якісно протилежні значення. Величину *IEEE* рекомендовано використовувати для аналізу при проектуванні та модернізуванні побутових холодильних

приладів сумісно з величиною *IEE*.

Ключові слова: холодоносій, робоче тіло холодильної машини, нанофлюїд, теплофізичні властивості, коефіцієнт тепловіддачі, холодильний коефіцієнт, індекс енергетичної ефективності, індикатор еко-енергетичної ефективності.

ABSTRACT

Khliyeva Olga. Scientific justification of enhancing the refrigeration systems performance by nanofluids application. – Scientific work as a manuscript.

Thesis on degree of Doctor of Technical Sciences (Doctor of Sciences) for specialty 05.05.14 «Refrigeration, Vacuum and Compressor Engineering, Conditioning Systems» – Odessa National Academy of Food Technology, Odessa, 2019.

The thesis is devoted to the complex experimental and theoretical investigation of preparation technologies and thermophysical properties of nanofluids, promising as coolants and working fluids of vapor compression refrigeration systems; the investigation of the heat transfer processes at their flow and boiling; the experimental study the energy performance of vapor compression refrigeration system operated with nanofluids as working fluids, and eco-energy justification of the nanofluids prospects in refrigeration.

The main idea of the study lie that the adding of nanoparticles in the conventional working fluids and coolants contribute to the variation in their thermophysical properties, the intensification of heat transfer processes with nanofluids in the refrigerators heat exchangers and enhance refrigerators performance, without changes in their design.

Experimental investigations of the colloidal stability of model nanofluids and nanofluids considered as coolants and working fluids were performed. It was scientifically explained that the application of a combined (ultrasonic and mechanical) two-step nanofluids preparation method with using a low-viscosity component (or auxiliary low-viscosity liquid) as a medium for nanoparticles dispersing contribute to an increase in the colloidal stability of nanofluids on the basis of compressor oils or organic coolants. Addition of surfactant (if necessary) is expedient in the first stage of dispersion with the preliminary selection both its type and concentration. Recommendations on preparation

methods for working fluids of vapor compression refrigeration systems with nanoparticles TiO_2 , Al_2O_3 and fullerenes C_{60} additives have been developed.

Generalization and analysis of experimental data on thermophysical properties of the nanofluids of isopropanol/ Al_2O_3 nanoparticles, R141b/surfactants/ TiO_2 nanoparticles, tetralin/fullerenes C_{60} , R600a/compressor oil/fullerenes C_{60} have been performed in this study.

It was shown that the additives of $0.0020 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of fullerenes C_{60} in mineral compressor oil contribute to insignificant increase in surface tension ($T=283 - 303 \text{ K}$) and viscosity ($T=253 - 283 \text{ K}$), decrease in saturated vapor pressure ($T=283 - 354 \text{ K}$) of solutions compressor oil with refrigerant R600a at wide range of refrigerant concentration. The maximum effect was registered at low temperatures.

Based on analysis of experimental data on the specific isobaric heat capacity of nanofluid of isopropanol/ Al_2O_3 nanoparticles in a wide range of concentration and temperatures it was shown that the presence of the nanoparticles led to decrease in heat capacity that not predict within additivity rule. Obtained data on thermophysical properties of nanofluids form the database for developing the methods for modeling and predicting of nanofluids thermophysical properties

It was concluded that the main reason for the presence of the excess specific isobaric heat capacity in nanofluid is the existing structured layer of base fluid molecules on the surface of the nanoparticles (surface phase). It was assumed that this phase has properties similar to those of a solid phase at a melting point.

The method of calculating the concentration of base fluid molecules in the surface phase with using the different initial experimental information on nanofluid and base fluid densities, isobaric heat capacities and phase transition enthalpies has been proposed. It was recommended to use the experimental data on the temperature dependence of nanofluid density at one nanoparticle concentration for obtaining the temperature dependence of the surface phase in a nanofluid.

The methods of predicting the isobaric heat capacity and viscosity of nanofluids with using the information on the temperature dependence of the surface phase in nanofluid have been developed. The verification of proposed methods with using the

experimental data for nanofluid of isopropanol/ Al_2O_3 nanoparticles was performed. It was revealed close agreement between the experimental and computed values in a wide range of temperatures and concentration. The proposed methods are the effective physically grounded tool for predicting the nanofluids thermophysical properties with lack of experimental information in a wide range of state parameters.

The capability of appliance the extended scaling method for predicting the thermophysical properties of refrigeration systems working fluids containing nanoparticles has been studied using the experimental data on R600a/compressor oil /fullerenes C_{60} solution. It was revealed close agreement between the experimental and predicted values of density, viscosity, saturated vapor pressure and surface tension.

The generalization and analysis of experimental data on hydrodynamic and heat transfer parameters at nanofluid isopropanol/ Al_2O_3 flow in the channel of the circular cross-section has been performed. It was shown that the additives of Al_2O_3 nanoparticles in the isopropanol contribute to an increase in both the heat transfer coefficient and pressure losses with increase the Reynolds number ($200 < \text{Re} < 10^5$). The increase of mentioned parameters is approximately proportional with the increase the nanoparticles concentration in the fluid.

It was shown that from energy-saving point of view the appliance of nanofluid isopropanol/ Al_2O_3 does not contribute to variation in power consumption on fluid pumping per unit of transferred heat in comparison with flow of base fluid at the turbulent regime. But power consumption on nanofluid pumping per unit of transferred heat is higher at the laminar regime (in compare with the base fluid flow). It was concluded that appliance of nanofluids as coolants and heat transfer agents is promising when the power consumption on the fluid pumping is not an important parameter in comparison with heat transfer enhancement (for example, microelectronics cooling). In this case, the appliance of nanofluid can contribute to the decrease in mass and size of heat exchangers.

It was shown that dependences proposed for calculation of heat transfer coefficient (laminar flow) and friction factor (laminar and turbulent flow) at single-phase flow in tubes can be used for calculating these parameters for nanofluid isopropanol/ Al_2O_3

nanoparticles in a wide range of their concentrations with using of correctly obtained thermophysical properties of nanofluid. But at the calculation of heat transfer coefficient at nanofluid turbulent flow, the equation that proposed for single-phase flow in tubes are needed in modification to taking into account the physical effects of nanoparticles influences on a scale of turbulence.

The results of experimental investigation of heat transfer parameters at pool boiling of nanofluid R141b/surfactant ($0.001 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)/ TiO_2 nanoparticles ($0.001 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) in comparison with R141b and R141b/surfactant in range of heat fluxes up to $60 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ and pressures 0.2-0.4 MPa was presented. It was shown that nanoparticles and surfactant additives contribute to increase in heat transfer coefficient at pool boiling (up to 20 % in comparison with base fluid boiling) at heat fluxes up to $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ and low-pressure values (these parameters is typical for evaporators of refrigerators and heat pumps). The heat transfer deterioration at nanofluid boiling (in comparison with base fluid boiling) while heat flux and pressure increase has been observed. It was concluded that the main factor that explains the nanoparticles effect on heat transfer intensity is heater surface modification.

The predicting method for heat transfer coefficient at nanofluids and pure liquids pool boiling that based on using the physically grounded RPI model and internal characteristics of boiling (obtained at single pressure value and two or several heat fluxes values) has been proposed. The verification of the proposed approach with appliance the experimental information on heat transfer coefficients and internal characteristics of boiling for nanofluid R141b/surfactant / TiO_2 nanoparticles has been performed. The using of this method will contribute to a correct estimate of expediency of nanofluid appliance as in refrigerator evaporators as in heat exchangers of varies industry areas.

The generalization of the experimental data efficiency parameters of vapor compression refrigeration system operated with using as working fluids solution of R600a/compressor oil with additives of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles and fullerenes C_{60} has been performed. It was shown that using the working fluids with additives of TiO_2 and Al_2O_3 nanoparticles and fullerenes C_{60} contribute the increase in the coefficient of performance. The maximum effect at optimal working fluid flow rate ($0,42 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) was

reported while working fluids with additives of TiO₂ nanoparticles and fullerenes C₆₀ were used (up to 5-6 %). It was recommended to use the fullerenes C₆₀ as additives to the compressor oil and also to select the compressor oil from proposed on market (based on its viscosity and obtained at preliminary experiments coefficient of performance, at the same time providing its sufficient lubricity) for energy efficiency enhancement of vapor compression refrigerators with refrigerant R600a.

The obtained experimental data on the influence of nanoparticles on heat transfer intensity both at nanocoolant flowing and nanorefrigerant boiling, as well as the data on influence of nanoparticles additives in working fluids of vapor compression refrigeration system on its efficiency parameters, allow us to reveal the main factors that determine the expediency of nanofluid introduction into refrigeration industry.

Method of eco-energy analysis of refrigerating appliances and systems also as new eco-energy efficiency indicator for domestic refrigerating appliances analysis based on life cycle greenhouse gases emission assessment were developed. The proposed indicator is an alternative of traditionally using in practice energy efficiency index IEE.

Based on the generalization of experimental data on the efficiency parameters of vapor compression refrigeration system the analysis of expediency of nanofluids using in domestic refrigeration appliances has been performed. It was shown that calculated values on *IEEE* and *IEE* for three domestic refrigerating appliances with close functionality and storage volume had qualitatively opposite results. The parameter *IEEE* was recommended to use together with *IEE* for domestic refrigerating appliances analysis at their design or modernization.

Keywords: coolant, working fluid of vapor compression refrigeration system, nanofluid, thermophysical properties, heat transfer coefficient, coefficient of performance, energy-efficient index, eco-energy efficiency indicator.

Публікації за темою дисертації

Монографії

1. Перспективи застосування нанотехнологій у холодильній техніці. Частина 1. Теплофізичні властивості нанофлюїдів: монографія/В.П. Желєзний, Ю.В. Семенюк, О.Я. Хлієва, М.М. Лук'янов, А.Г. Нікулін, А.С. Нікуліна; Під ред. В.П. Желєзного. Одеса: Фенікс, 2019. 313 с. (російською) ISBN 978-966-428-414-3.

Статті у наукових журналах

2. Zhelezny V., Khliyeva O., Lukianov M. Motovoy I., Ivchenko D.A., Faik A., Grosu Ya., Nikulin A., Moreira A.L.N. Thermodynamic properties of isobutane/mineral compressor oil and isobutane/mineral compressor oil/fullerenes C60 solutions // International Journal of Refrigeration. *Входить до БД Scopus*. 2019. Vol.106. P. 153-162. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

3. Zhelezny V., Khliyeva O., Motovoy I., Lukianov N. An experimental investigation and modelling of the thermal and caloric properties of nanofluids isopropyl alcohol - Al₂O₃ nanoparticles // Thermochimica Acta. 2019. Vol. 678. 178296. *Входить до БД Scopus*. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

4. Khliyeva O. New indicator for life cycle greenhouse gases emission assessment of household refrigerating appliances // Environmental Problems. 2019. Vol. 4 (1). P. 39-44.

5. Khliyeva O.Ya., Ivchenko D.A., Khanchych K.Yu., Motovoy I.V., Zhelezny V.P. The relationship between the surface tension and the saturated vapor pressure of model nanofluids // Refrigeration engineering and technology. 2019. № 55 (1). P. 40-46. *Внесок здобувача: аналіз експериментальних даних, висновки.*

6. Nikulin A., Khliyeva O., Zhelezny V., Semenyuk Yu., Lukianov N., Moreira A.L.N. How does change of the bulk concentration affect the pool boiling of the refrigerant oil solutions and their mixtures with surfactant and nanoparticles? // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 Vol. 137. P. 868-875. *Входить до БД Scopus*. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

7. Zhelezny V., Motovoy I., Khliyeva O., Lukianov N. An influence of

Al₂O₃ nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of isopropyl alcohol in solid phase // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 671. P. 170-180.

Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.

8. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Huminic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 130. P. 1032-1044. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: проведення експерименту з визначення розміру наночастинок, участь у аналізі експериментальних даних.*

9. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V. Experimental study of the effect of nanoparticles TiO₂ on the thermophysical properties of the refrigerant R141b// *Eastern European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 6/5 (96). P. 33-41. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, участь у експерименті та аналізі експериментальних даних, висновки.*

10. Івченко Д. О., Мотовий І. В., Хлієва О. Я., Желєзний В. П. Експериментальне дослідження калоричних властивостей розчинів диметилового ефіру (DME) в триетиленгліколі (TEG) // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(5). С.68-76. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

11. Хлієва, О. Я., Лук'янова, Т. В., Семенюк, Ю. В., Желєзний, В. П., Корнієвич, С. Г., Мельник, О. Ю. Дослідження технології приготування робочих тіл парокомпрессионних холодильних систем з добавками наночастинок TiO₂ // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(4). С.49-56. *Внесок здобувача: ідея роботи, проведення експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

12. Мотовой І. В., Желєзний В. П., Хлієва О. Я. Исследование влияния наночастиц на давление насыщенных паров изопропилового спирта // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(3). С. 55-60. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

13. Лук'янова Т. В., Хлієва О. Я., Семенюк Ю. В., Желєзний В. П., Корнієвич С. Г., Альтман Е. І. Експериментальне дослідження коефіцієнтів тепловіддачі

при кипінні нанохолодоагенту R141b/наночастинки TiO_2 на поверхнях з різним ступеням змочування // Холодильна техніка та технологія. 2018. № 54(3). С. 47-54. *Внесок здобувача: ідея роботи, участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

14. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V., Nikulin A. An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process// Eastern European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 4/8 (94). P. 59-66. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

15. Nikulin A., Khliyeva O., Lukianov N., Zhelezny V., Semenyuk, Y. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/ Al_2O_3 nanofluid // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. Vol. 118. P. 746-757. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

16. Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В., Никулин А.Г., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц TiO_2 на процесс кипения хладагента R141b в свободном объеме // Промышленная теплотехника, №5 (39), 2017. С. 37-40. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

17. Khliyeva O., Ryabikin S., Lukianov N., Zhelezny V. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al_2O_3 nanoparticles // Eastern european journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 1/8 (85). P. 4-12. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

18. Zhelezny V., Lukianov N., Khliyeva O., Nikulina A., Melnyk A. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil- Al_2O_3 and R600a-mineral oil- TiO_2 . Thermophysical properties // International Journal of Refrigeration. *Входить до БД Scopus.* 2017. Vol. 74. P. 486-502. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

19. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioner / // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 127-135. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, теоретичний аналіз, висновки.*

20. Khliyeva O.Ya. A.S. Nikulina, M.P. Polyuganich, S.S. Ryabikin, V.P. Zhelezny Viscosity of ternary solutions composed of propylene glycol, ethanol and water // Refrigeration engineering and technology. 2016. № 3 (52). P. 29-35. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

21. Хлиева О. Я., Полюганич М. П., Рябикин С. С., Никулина А. С., Железный В.П. Исследование плотности бинарных и тройных водных растворов этиленгликоля, пропиленгликоля и этанола // Холодильная техника и технология. 2016. № 2 (52). С. 78-86. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

22. Мороз С. А., Хлиева О. Я., Лукьянов Н. Н., Железный В. П. Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C60 в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 41–46. *Внесок здобувача: аналізі експериментальних даних, висновки.*

23. Железный В.П., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л., Лукьянов Н.Н., Мороз С.А. Повышение эффективности парокомпрессорных холодильных машин за счет использования нанотехнологий // Промышленная теплотехника. №7 (37). 2015. С. 94-95. *Внесок здобувача: аналізі експериментальних даних, теоретичні розрахунки.*

24. Лукьянов Н.Н., Мельник А.В., Железный В.П., Хлиева О.Я., Мороз А.С. Влияние примесей компрессорного масла /наночастиц TiO₂ в хладагенте на коэффициент теплоотдачи при кипении в горизонтальной трубе // Холодильная техника и технология. 2015. № 5 (51). С. 59-66. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

25. Железный В. П., Лукьянов Н.Н., Хлиева О.Я., Никулина А.С. Экспери-

ментальное и расчетное исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на теплофизические свойства растворов хладагента R600a с компрессорным маслом // Холодильная техника и технология. 2015. № 4 (51). С. 82-91. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

26. Лукьянов, Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40. *Внесок здобувача: теоретичний аналіз.*

27. Хлієва О.Я., Поберезкін О.А., Крижановський С.С., Оболонський Е.С. Вивчення впливу домішок компресорного мастила в холодоагенті на інтенсивність тепловіддачі за умов кипіння у великому об'ємі // Обладнання та технології харчових виробництв: тематичний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонДУЕТ, випуск 21, 2009. С. 34-40. *Внесок здобувача: теоретичний аналіз, висновки.*

28. Суходольская А.Б., Железный В.П., Хлиева О.Я. Эколого-энергетический анализ перспектив применения альтернативных хладагентов в тепловых насосах // Холодильная техника и технология. 2005. №2 (94). С. 37-45. *Внесок здобувача: теоретичний аналіз.*

29. Железный В. П., Быковец Н. П., Хлиева О. Я., Степанова В. П., Суходольская А. Б. Методика расчета эквивалентной эмиссии парниковых газов в промышленности // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2004. № 6. С. 34-43. *Внесок здобувача: теоретичний аналіз.*

Публікації апробаційного характеру

30. Khliyeva O., Nikulin A., Zhelezny V., Lukianov N., Semenyuk Y., Moreira A.L.N. Prediction of pool boiling heat transfer coefficient for the refrigerant R141b and its solutions with surfactant and nanoparticles using limited set of experimental data //1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019) 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf2019) 26-28 June 2019, Castelló, Spain. *Внесок здобувача: ідея роботи, розробка методики, аналіз отриманих даних, висновки.*

31. Железний В.П., Хлиева О.Я., Мотовой И.В. Роль избыточных термодинамических функций при разработке методов прогнозирования теплоемкости нанофлюидов // Матеріали XVII Всеукраїнської наук.-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», 26-29 вересня 2018 р., Одеса. С. 106-109. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних.*

32. Лукьянова Т.В., Хлиева О.Я., Семенюк Ю.В. Аналіз можливостей інтенсифікації процесу кипіння холодоагентів за рахунок додавання наочастинок та модифікації теплообмінної поверхні // Матеріали XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», 26-29 вересня 2018 р., Одеса. С. 149-152. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

33. Khliyeva O.Ya., Gordeychuk T.V., Semenyuk Yu.V., Zhelezny V.P., Lukianov N.N., Nikulin A.G. The effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the heat transfer at the pool boiling on the different heat surfaces // Proc. X Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 10-13 September, 2018. P. 435- 443. *Внесок здобувача: проведення експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

34. Lukianova T., Lukianov N., Motovoy I., Khliyeva O., Zhelezny V. Experimental investigation of the influence of the nanoparticles TiO_2 additives on thermophysical properties of R141b // Proc. 7th Rostocker International Conference: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 27-28 July 2018, Rostock, Germany. P. 86. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних.*

35. Zhelezny V., Faik A., Khliyeva O., Motovoy I., Ivchenko D., Grosu Y., Nikulin A. Caloric properties of R600a solutions in compressor oil containing fullerenes C_{60} // Proc. the 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants: “Natural refrigerant solutions for warm climate countries”. Valencia, Spain. June 18 to 20, 2018. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних.*

36. Zhelezny V.P., Motovoy I.V., Khanchych K.Yu., Khliyeva O.Ya., Ivchenko D.A. Surface tension and saturated vapor pressure of nanofluids of isopropanol / Al_2O_3 nanoparticles and o-xylene/ C_{60} fullerenes // Proc. 8th International Conference “Physics of liquid matter: modern problems”. Kyiv, Ukraine, 18-22 May, 2018. - P. 111. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних.*

37. Хлієва О.Я., Железний В.П. Аналіз перспектив застосування нанофлюїдів в холодильному устаткуванні // 78 наукової конференції науково-педагогічного складу академії. – Одеса, 23-27 квітня, 2018 р. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, аналіз, висновки.*

38. Nikulin A., Khliyeva O., Moroz S., Lukianov M., Zhelezny V., Moreira A. L. N. An Effect of Fullerenes C_{60} Additives on Thermophysical Properties of Refrigerant/Mineral Oil Solutions and Efficiency of Vapor Compression Machine // Proc. Nanotech France 2017, NanoMaterials for Energy & Environment NanoMatEn 2017 – NanoMetrology 2017, Joint International Conferences and Exhibition, 28 - 30 June, 2017 Paris. France. *Внесок здобувача: аналізі експериментальних даних.*

39. Мороз С.О., Хлієва О.Я., Железний В.П. Експериментальне дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні робочих тіл R600a/компресорне мастило та R600a/компресорне мастило/фуллерени C_{60} у трубі // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». Одеса: ОНАХТ. 21-22 вересня 2017. С. 216-218. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних.*

40. Хлієва О.Я., Гордейчук Т.В., Семенюк Ю.В. Експериментальне дослідження впливу добавок наночастинок TiO_2 на внутрішні характеристики процесу кипіння холодоагенту R141b // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». Одеса: ОНАХТ. 21-22 вересня 2017. С. 213-215. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, проведення експерименту та аналіз експериментальних даних, висновки.*

41. Khliyeva O., Nikulin A., Gordeychuk T., Lukianov N., Semenyuk Y. An

experimental study of heat transfer coefficient and internal characteristics of nucleate pool boiling of nanofluid R141b/TiO₂ //1st European Symposium on Nanofluids (ESNf2017), 8-10 October 2017, Lisboa, Portugal. P. 162-165. *Внесок здобувача: ідея роботи, участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

42. Khliyeva O., Gordeychuk T., Ryabikin S., Zhelezny V. Experimental investigation of the viscosity of propylene glycol based nanofluids with improved thermophysical properties // Proc. 6th Rostocker International Conference: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 17-18 July 2017, Rostock, Germany. P. 64. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

43. Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В., Никулин А.Г., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц TiO₂ на процесс кипения хладагента R141b в свободном объеме // Праці X міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». Промышленная теплотехника, №7 (39), 2017. С. 19. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

44. Zhelezny V., Chen G., Khliyeva O., Ryabikin S., Shestopalov K. Influence of Al₂O₃ nanoparticle additives on the thermophysical properties of aqueous solution of propylene glycol and on the heat transfer coefficient in forced convection flow in a tube // Proc. 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants. 23 - 26 April 2017, Seoul, Republic of Korea. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

45. Железный В.П., Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В. Исследование технологий приготовления нанохладоносителей и нанохладагентов с улучшенными теплофизическими свойствами // Сбор. докл. IV межд. науч.-техн. конф.: Казахстан-Холод 2017. 15-16 марта 2017 г., Алматы: АТУ, 2017. С. 241-250. *Внесок здобувача: ідея роботи, проведення експерименту та аналіз експериментальних даних, висновки.*

45. Khliyeva O.Ya., Nikulina A.S., Polyuganich M.P., Ryabikin S.S., Zhelezny

V.P. The prediction of the density and viscosity of the system water / ethanol / propylene glycol with Al_2O_3 nanoparticles based on a limited number of experimental data // Proc. 7th International Conference “Physics of liquid matter: modern problems”. Kyiv, Ukraine, 27-30 May, 2016. P. 113. *Внесок здобувача: ідея роботи, участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

47. Хлиева О.Я., Мороз С.А., Лукьянов Н.Н., Железний В.П. Оценка перспектив применения компрессорных масел с добавками фуллеренов в бытовом холодильном оборудовании // Сбор. докл. межд. науч.-техн. конф.: Казахстан-Холод 2016. 1-2 марта 2016 г. Алматы: АТУ, 2016. С. 120-126. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, розробка методики та виконання теоретичного аналізу, висновки.*

48. Chen G., Zhelezny V., Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V. A comparative ecological and energy efficiency analysis of vapor compression, absorption and ejector air conditioners operating with “natural” refrigerants // Proc. Heat Powered Cycles Conference 2016, Nottingham University, UK, 28 - 30 June 2016. Paper HPC520. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, розробка методики та виконання теоретичного аналізу, висновки.*

49. Lozovsky T., Motovoy I., Khliyeva O., Zhelezny V. An Influence of the Nanoparticles Al_2O_3 Additives in Isopropyl Alcohol and Propylene Glycol on Heat Capacity in the Liquid and Solid Phases // Proc. 3 rd International Conference On Thermophysical And Mechanical Properties Of Advanced Materials (THERMAM 2016), 1 – 3 September 2016, Izmir, Turkey. P. 111-124. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних*

50. Moroz S. A., Khliyeva O. Ya., Zhelezny V. P., Lukianov N. N. Experimental investigation of the influence of fullerenes additives to the working fluid isobutene/compressor oil on refrigeration system performance // Proc. International conference “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”, 29 September – 01 October, 2016. Chisinau, Republic of Moldova. P. 132 – 136. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

51. Хлиева О.Я., Рябикин С.С., Железний В.П., Гордейчук Т.В. Экспериме-

нтальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц Al_2O_3 // Proc. International conference “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”, 29 September – 01 October, 2016. Chisinau, Republic of Moldova. P. 391 – 399. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

52. Рябікін С.С. Хлієва О.Я. Експериментальне дослідження конвекційного коефіцієнта тепловіддачі й втрат напору при вимушеному русі нанохолодоносія на основі пропіленгліколю в трубі // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 41-42. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

53. Хлієва О.Я. Аналіз можливих шляхів підвищення еколого-енергетичної ефективності холодильного обладнання за рахунок впровадження нанотехнологій // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 43-45.

54. Полюганіч М.П. Хлієва О.Я., Нікуліна А.С. Експериментальне й розрахункове дослідження густини та в'язкості трикомпонентних водних розчинів спиртів // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 59-60. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

55. Мороз С.А., Хлиева О.Я., Железный В.П. Исследование влияния фуллеренов C60 на вязкость компрессорного масла ХФ16-12 и на плотность и давление насыщенных паров растворов хладагента R600a/масло ХФ16-12 // Матеріали 12 Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв. 12- 14 жовтня 2016. С.202-204. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

56. Хлиева О.Я., Рябикин С.С., Полюганич М.П., Гордейчук Т.В., Железный В.П. Экспериментальное исследование теплофизических свойств раствора пропиленгликоль/ вода / этанол с добавками наночастиц Al_2O_3 // Матеріали 12 Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв. 12- 14 жовтня 2016. С.205-209. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту та аналізі експериментальних даних, висновки.*

дної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв. 12-14 жовтня 2016. С.199-201. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

57. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of reasonability application of ejector air conditioner compared to vapor compression equipment // Proc. 24th International Congress of Refrigeration. - Yokohama, Japan, August 16 - 22, 2015. *Входить до БД Scopus. Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, розробка методики та виконання теоретичного аналізу, висновки.*

58. Lukianov M., Melnyk A., Khliyeva O., Zhelezny V., Polyuganich M. An influence of the nanoparticles Al_2O_3 and TiO_2 admixtures on thermophysical properties and flow boiling heat transfer coefficient of the R600a/mineral oil solutions // Proc. of the 8th International Symposium On Turbulence, Heat and Mass Transfer. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 15-18 September, 2015. P. 697 - 700. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

59. Zhelezny V., Semenyuk Yu., Khliyeva O., Shimchuk N., Polyuganich M. Thermophysical properties of propylene glycol / water / TiO_2 nanoparticles mixtures // Proc. International Conference: "Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials" and 4th Rostocker International Symposium: "Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics". Baku, Azerbaijan, 17-18 September, 2015. P. 114. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

60. Zhelezny V., Lukianov M., Khliyeva O., Nikulina A., Polyuganich M. Thermophysical properties of refrigerant R600a/mineral oil solutions with admixtures of the Al_2O_3 nanoparticles // Proc. International Conference: "Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials" and 4th Rostocker International Symposium: "Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics". Baku, Azerbaijan, 17-18 September, 2015. P. 115. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

61. Хлиева О.Я., Рябикин С. С., Геллер В. З. Экспериментальная установка для исследования процесса теплообмена при течении нанофлюидов в трубе //

Представлено на X международной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии». Одесса, 11-12 сентября, 2015. С. 173-175. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту.*

62. Хлиева О.Я., Полюганич М.П., Рябикин С. С. Поиск оптимального состава хладоносителя с добавкой наночастиц CuO. Результаты исследования // Представлено на X международной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии». Одесса, 11-12 сентября, 2015. С. 139-141. *Внесок здобувача: проведення експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

63. Семенюк Ю.В., Никулин А.Г., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л. Применение модели RPI для прогнозирования коэффициента теплоотдачи при кипении чистых жидкостей и наноплюидов // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 281-285. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

64. Хлиева О.Я., Железный В.П., Лукьянов Н.Н., Игнатова Т.Ю., Пустовойтенко С.В. Эколого-энергетический анализ перспектив применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 269-272. *Внесок здобувача: ідея і концепція роботи, теоретичний аналізі, висновки.*

65. Хлиева О.Я., Шимчук Н.А., Рябикин С.С., Полюганич М.П., Железный В.П. Новый класс низкотемпературных нанотеплоносителей с улучшенными теплофизическими свойствами // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 290-293. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

66. Рябикин С.С., Хлиева О.Я., Геллер В.З., Железный В.П. Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвек-

ции нанохладоносителей в трубе // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 273-276. *Внесок здобувача: участь у проведенні експерименту.*

67. Хлиева О.Я., Никулин А.Г., Лозовский Т.Л., Железный В.П. Исследование устойчивости нанофлюидов, перспективных для применения в холодильной технике // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 286-289. *Внесок здобувача: проведення експерименту, аналіз експериментальних даних, висновки.*

68. Железный В.П., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л., Лукьянов Н.Н., Мороз С.А. Повышение эффективности парокomppressorных холодильных машин за счет использования нанотехнологий // Труды IX международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». Промышленная теплотехника. №7 (37), 2015. С. 94-95. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

69. Железный В.П., Хлиева О.Я. Перспективы новых рабочих тел на основе нанофлюидов для повышения энергоэффективности холодильного оборудования // Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв: НУК, 8-10 жовтня 2014 р. С. 307-309. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

70. Крыжановский С.С., Косой Б.В., Хлиева О.Я. Экспериментальное исследование теплофизических свойств компрессорных масел ХМИ Азмол с добавлением наночастиц TiO_2 , AlO , Al_2O_3 // Book of Abstracts of Inter. Conference "Sciences, Engineering, and Humanities for the Energy World". May 27-30, 2009, Odessa, Ukraine. P. 85-86. *Внесок здобувача: участь у аналізі експериментальних даних.*

71. Khliyeva O.Ya., Zhelezny V.P., Kosoy B.V., Stepanova V.P. The End and New the Beginning: Alternative Refrigerants for the New Heat Pump Generation Abstracts 5-th International Conference “Problems of Industrial Heat Engineering”, May 22-27, 2007, Kiev, Ukraine. P. 223-224. *Внесок здобувача: участь у теоретичному аналізі.*

72. Железный В.П., Хлиева О.Я., Степанова В.П. Проблемы существующих методов анализа эколого-энергетической эффективности: от коэффициента полезного действия к новым эколого-энергетическим индикаторам // Труды второй международной конференции по проектам совместного осуществления в Украине "Изменение климата и бизнес", Киев, 23-25 октября 2006. *Внесок здобувача: участь у теоретичному аналізі.*

73. Zhelezny V., Hlieva O., Artemenko S. Assessment of Total Equivalent of Greenhouse Gases Emission in the Industry // CD Proceedings of the 3rd Europeans Congress "Economics and Management of Energy in Industry" ISBN-972-99309-0-2, Lisboa, Portugal. 2004. *Внесок здобувача: участь у теоретичному аналізі.*

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів	31
Вступ.....	37
1 Огляд літературних джерел. Проблематика напряму дослідження	45
1.1 Основні поняття галузі нанотехнологій	45
1.2 Основні напрямки використання нанофлюїдів в холодильній галузі	48
1.2.1 Вимоги до робочих тіл та холодоносіїв холодильних машин й установок	48
1.3 Проблематика впровадження нанофлюїдів у холодильну галузь	50
1.3.1 Проблематика розробки процедури створення колоїдно стійких нанофлюїдів	52
1.3.2 Проблематика експериментального дослідження та моделювання теплофізичних властивостей нанофлюїдів	52
1.3.3 Проблематика експериментального дослідження та моделювання процесів тепловіддачі з участю нанофлюїдів	55
1.3.4 Проблематика експериментального дослідження реального холодильного обладнання з використанням в якості робочих тіл нанофлюїдів та оцінки доцільності їх впровадження в промисловість	59
1.4 Список використаних джерел за розділом	60
2 Дослідження колоїдної стійкості нанофлюїдів перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл парокомпресійних холодильних машин	72
2.1 Вимоги до колоїдної стійкості нанофлюїдів	72
2.2 Короткий огляд існуючих процедур створення нанофлюїдів	74
2.3 Вивчення колоїдної стійкості та розробка процедури створення об'єктів дослідження	76
2.3.1 Методи та обладнання експериментального дослідження	77
2.3.2 Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості нанофлюїдів на основі холодоагенту R141b та наночастинок TiO ₂	78
2.3.3 Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості нанофлюїдів на основі розчинів холодоагенту в компресорному маслі	86
2.3.4 Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості наноф-	92

	люїдів, перспективних в якості холодоносіїв	
2.4	Висновки за розділом	98
2.5	Список використаних джерел за розділом	100
3	Експериментальна апаратура та методики проведення досліджень	106
3.1	Експериментальні установки дослідження теплофізичних властивостей нанофлюїдів	106
3.1.1	Експериментальна установка для дослідження густини	106
3.1.2	Експериментальна установка для дослідження тиску насиченої пари	107
3.1.3	Експериментальна установка для дослідження поверхневого натягу	109
3.1.4	Експериментальна установка для дослідження динамічної в'язкості	110
3.1.5	Експериментальна установка для дослідження калоричних властивостей	111
3.2	Експериментальна установка для дослідження гідродинамічних та теплообмінних параметрів при вимушеній течії нанофлюїдів	114
3.3	Експериментальні установки для дослідження процесів тепловіддачі та внутрішніх характеристик процесу кипіння	118
3.3.1	Експериментальні установки для дослідження процесів тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі	118
3.3.2	Експериментальні установки для дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння	120
3.4	Експериментальна установка для дослідження показників ефективності холодильної компресорної системи	121
3.5	Список використаних джерел за розділом	124
4	Дослідження впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості рідин, перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл холодильних машин: експеримент та моделювання	127
4.1	Дослідження впливу домішок фулеренів C_{60} та наночастинок Al_2O_3 на калоричні властивості модельних рідин	127
4.1.1	Дослідження впливу домішок фулеренів C_{60} на питому ізобарну теплоємність тетраліну	127
4.1.2	Експериментальні дослідження впливу домішок наночастинок	130

Al_2O_3 на питому ізобарну теплоємність ізопропанолу	
4.1.3 Модель прогнозування мольної ізобарної теплоємності нанофлюїдів	135
4.2 Дослідження впливу домішок наночастинок на в'язкість модельних рідин	148
4.2.1 Модель прогнозування в'язкості нанофлюїдів	149
4.3 Дослідження впливу домішок фулеренів C_{60} на теплофізичні властивості розчину холодоагент R600a/мінеральне компресорне масло	158
4.3.1 Аналіз сучасного стану досліджень впливу фулеренів C_{60} на теплофізичні властивості мастил та розчинів холодоагенту в мастилах	158
4.3.2 Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мінеральне масло/фулерени C_{60}	161
4.3.3 Прогнозування теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мінеральне масло/фулерени C_{60}	168
4.4 Висновки за розділом	178
4.5 Список використаних джерел	180
5 Вплив наночастинок на гідродинамічні та теплообмінні параметри при течії нанофлюїдів в каналі круглого поперечного перерізу	188
5.1 Аналіз доцільності застосування нанофлюїдів в якості холодоносіїв в холодильній галузі	188
5.2 Результати експериментального дослідження гідродинамічних та теплообмінних параметрів при течії нанофлюїду ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3	189
5.2.1 Гідродинамічні параметри течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу	190
5.2.2 Теплообмінні параметри при течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинок Al_2O_3	194
5.2.3 Аналіз невизначеності експериментальних даних	195
5.3 Аналіз результатів експериментального дослідження тепловіддачі при течії нанофлюїду ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу	196
5.3.1 Аналіз доцільності застосування нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 в якості холодоносія у промисловому обладнанні	196

5.3.2	Аналіз узагальнених характеристик процесу тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3	201
5.3.3	Аналіз механізмів впливу наночастинок на гідронімічні та теплообмінні характеристики при течії нанофлюїдів	203
5.4	Висновки за розділом	207
5.5	Список використаних джерел за розділом	209
6	Вплив домішок наночастинок на інтенсивність тепловіддачі при кипінні нанохолодоагенту у вільному об'ємі	215
6.1	Проблематика прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів	215
6.2	Результати експериментального дослідження тепловіддачі при кипінні нанофлюїду R141b/наночастилки TiO_2	217
6.2.1	Результати дослідження впливу наночастинок та ПАР на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні холодоагенту R141	218
6.2.2	Результати дослідження впливу наночастинок та ПАР на внутрішні характеристики процесу кипіння холодоагенту R141b	221
6.3	Прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі	224
6.3.1	Аналіз можливостей застосування фізично обґрунтованих підходів щодо моделювання коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів	224
6.3.2	Методика прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів та чистих речовин у вільному об'ємі	232
6.4	Висновки за розділом	237
6.5	Список використаних джерел за розділом	240
7	Дослідження впливу домішок наночастинок у робочі тіла компресорних холодильних машин на їх показники енергетичної ефективності	246
7.1	Аналіз досліджень впливу домішок наночастинок у робочі тіла компресорних холодильних машин на їх показники енергетичної ефективності	246
7.2	Результати експериментальних досліджень впливу домішок наночастинок TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} у компресорні масла на показники енергетичної ефективності холодильної машини	251
7.2.1	Об'єкти дослідження та параметри проведення експерименту	251

7.2.2	Результати експериментального дослідження параметрів роботи холодильної машини при використанні компресорного масла з домішками фулеренів C_{60}	253
7.2.3	Результати експериментального дослідження параметрів роботи холодильної машини при використанні компресорного масла з домішками наночастинок Al_2O_3 та TiO_2	256
7.2.4	Аналіз експериментальних значень холодильного коефіцієнту та можливих механізмів впливу домішок наночастинок у компресорному маслі на його величину	258
7.2.5	Аналіз невизначеності експериментальних даних	261
7.3	Висновки за розділом	262
7.4	Список використаних джерел за розділом	265
8	Еколого-енергетичний аналіз холодильного обладнання	271
8.1	Еколого-енергетичні проблеми холодильної галузі	271
8.2	Методика еколого-енергетичного аналізу продукції або обладнання	276
8.3	Методика розрахунку величини повної еквівалентної емісії парникових газів стосовно еколого-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів	280
8.4	Результати еколого-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів	283
8.4.1	Результати еколого-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів при використанні нанофлюїдів у якості робочих тіл	283
8.4.2	Результати еколого-енергетичного аналізу різних моделей побутових холодильних приладів	289
8.5	Висновки за розділом	292
8.6	Список використаних джерел за розділом	294
	Висновки	300
	Додаток А Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	305
	Додаток Б Довідникові данні, характеристики об'єктів дослідження, додаткові результати експериментальних та розрахункових досліджень	318
	Додаток В Документи про впровадження результатів дисертаційної роботи	341

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

$a, b, c,$

d, e, f – коефіцієнти апроксимаційних рівнянь;

a_0 – критична амплітуда для капілярної сталої, m^2 ;

a^2 – капілярна стала; m^2 ;

a_η, b_η – емпіричні коефіцієнти в рівнянні для в'язкості;

A – значення сталої калориметра при середній температурі фазового переходу, Дж K^{-1} ;

a – коефіцієнт температуропровідності, $m^2 \cdot c^{-1}$;

A, B, C – емпіричні коефіцієнти в моделі для прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні;

B_1 – коефіцієнт (критична амплітуда) для густини ρ' рідини на лінії насичення;

c – собівартість виробництва елемента обладнання або продукції, грош.од;

C_p – питома ізобарна теплоємність, Дж $kg^{-1} K^{-1}$;

$C_{p,m}$ – мольна ізобарна теплоємність, Дж \cdot моль $^{-1} \cdot K^{-1}$;

$C_v^{(2)}$ – питома двофазна ізохорна теплоємність, Дж \cdot $kg^{-1} \cdot K^{-1}$;

\bar{d}_b – середній відривний діаметр, м;

D – діаметр трубки, м;

dev – відносне відхилення, %;

em – питомі викиди ПГ при створенні одиницю матеріалу, $kg CO_2\text{-екв} \cdot (kg \text{ матеріалу})^{-1}$;

em_{UTIL} – питомі викиди ПГ при утилізації одиниці матеріалу, $kg CO_2\text{-екв} \cdot (kg \text{ матеріалу})^{-1}$;

$em^{h.1}$ – еквівалентні викиди ПГ від одиниці людської праці, $kg CO_2\text{-екв} \cdot (\text{люд} \cdot \text{год})^{-1}$;

- e_{GDP} - енергоємність валового внутрішнього продукту (ВВП), кВт·год·(ден.од.)⁻¹;
- em_{GDP} - величина емісії CO₂-екв на одиницю ВВП, CO₂-екв·(ден.од.)⁻¹;
- f - коефіцієнт втрат напору по довжині;
- \bar{f}_b - середня частота відриву бульбашок, с⁻¹;
- G - масова витрата, г·с⁻¹;
- Gr - число Грастгофа;
- GWP - потенціал глобального потепління парникового газу, кгCO₂·кг⁻¹;
- k_{rep} - коефіцієнт відрахувань на ремонт обладнання, рік⁻¹;
- k_{dep} - коефіцієнти відрахувань на амортизацію обладнання, рік⁻¹;
- L - довжина, м;
- L_{annual} - доля витоків холодоагенту з холодильного обладнання, год⁻¹;
- m - маса, кг;
- M - молярна маса, кг·кмоль⁻¹;
- m_k - маса k-го ПГ, що використовується при виготовленні обладнання, кг;
- GWP - потенціал глобального потеплення ПГ газу, (кг CO₂-екв)·(кг ПГ)⁻¹;
- N - потужність, Вт;
- n_b - щільність активних центрів пароутворення, шт·м⁻²;
- Nu - число Нусельта;
- Or - ортохор (молярний об'єм рідини при температурі кристалізації), м³·моль⁻¹;
- P - тиск, Па;
- Pr - число Прандтля;
- T - температура, К;
- t - температура, °С;
- $T^{\text{h.l}}$ - витрати людської праці, люд·год;
- Q - тепловий потік або кількість теплоти, Вт або Дж;
- q - щільність теплового потоку, Вт·м⁻²;
- Q_0 - холодопродуктивність, Вт;

r	– середній радіус наночастинок, який визначено певним методом, нм;
Re	– число Рейнольдса;
u	– швидкість рідини, $m \cdot s^{-1}$;
V	- мольний об'єм, $cm \cdot mоль^{-1}$;
V	– об'єм, m^3 або cm^3 ;
w	– масова концентрація, $kg^3 \cdot kg^{-3}$;
\bar{w}_b	- середня швидкість росту парових бульбашок, $m \cdot s^{-1}$;
x	– мольна концентрація, $mоль^3 \cdot mоль^{-3}$.

Грецьки символи:

α_R	- критерій Ріделя.
α	– коефіцієнт тепловіддачі, $Вт \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$;
β	– викиди ПГ при виробництві 1 кВт·год електроенергії для певної країни, $kg CO_2\text{-екв} \cdot (кВт \cdot год)^{-1}$;
γ_{UTIL}	- доля ПГ, що утилізується після закінчення строку експлуатації обладнання, % від маси заправки холодоагенту;
δ	– товщина, м;
Δh	- теплота фазового переходу, $Дж \cdot kg^{-1}$;
ΔP	- втрати тиску, Па;
$\Delta C_{p,m}$	- надлишкова мольна ізобарна теплоємність, $Дж \cdot mоль^{-1} \cdot K^{-1}$;
ΔT	– зміна температури при фазовому переході, К;
ΔT	– ступень перегріву стінки, К;
ΔV	- надлишковий мольний об'єм; $cm^3 \cdot mоль^{-1}$;
ε	– холодильний коефіцієнт;
η	– коефіцієнт динамічної в'язкості, $Па \cdot c$;
λ	– коефіцієнт теплопровідності, $Вт \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$;
ν	– коефіцієнт кінематичної в'язкості, $m^2 \cdot c^{-1}$;
ρ	– густина, $kg \cdot m^{-3}$;
ρ_0	– коефіцієнт, який має значення критичної амплітуди для різниці орто-

баричних густин, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

σ –поверхневий натяг, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$;

σ_0 – критична амплітуда для поверхневого натягу, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$;

τ – термін експлуатації обладнання, рік;

τ – час, с або год;

φ – об'ємна концентрація, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$.

Верхні індекси:

' – властивість на лінії кипіння;

" – властивість на лінії конденсації;

– псевдокритичні властивості;

add – розраховане за правилом адитивності значення;

calc – розрахункове значення;

eq – обладнання;

exp – експериментально знайдене значення;

fit – апроксимаційні значення;

prod – продукт;

unit – елемент обладнання.

Нижні індекси:

0,1 – властивості речовини при тиску $P=0,1013 \cdot \text{МПа}$;

b – властивості речовини в об'ємі зразка;

BF – базова рідини;

boil – кипіння;

conv – конвекція;

in – зовнішній;

PN – поверхнева фаза (фаза, що складається з молекул базової рідини, сорбованих на поверхні наночастинок);

NB – властивість при температурі кипіння при нормальному тиску (при тиску $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$);

NF	– нанофлюїд;
NP	– наночастинки;
Oil	– компресорне мастило;
out	– внутрішній;
R	– холодоагент;
ROS	– розчин холодоагенту с компресорним маслом;
<i>ROS+C60</i>	– розчин холодоагенту с компресорним маслом та добавками фулеренів C_{60} ;
S	- властивості речовини при насиченні
SURF	– властивості речовини віднесені до концентрації в поверхневому шарі рідкої фази;
Surf	– поверхнево-активна речовина;
W	– стінка, властивості речовини при температурі стінки;
C	– критичні властивості;
<i>C60</i>	– фулерени.

Іноземні скорочення і терміни:

CFA	- методика розрахунку «вуглецевого сліду» (Carbon Footprint Assessment);
EEEI	– індикатор еко-енергетичної ефективності;
EEl	– індекс енергетичної ефективності;
IPR	– Міжнародний інститут холоду (International institute of refrigeration);
LCA	- методика розрахунку екологічного впливу обладнання за його життєвий цикл (Life Cycle Assessment);
LCCP	– величина внеску в глобальне потепління за життєвий цикл обладнання (Life cycle climate performance);
ODP	– потенціал руйнування озонового шару речовиною;
TEGHGE	- повна еквівалента емісія парникових газів;
TEWI	- величина еквівалентного внеску у глобальне потепління (Total Equivalent Warming Impact);

ВВП	- валовий внутрішній продукт;
ВХПК	- внутрішні характеристики процесу кипіння;
КТВ	- коефіцієнт тепловіддачі;
НФ	- нанофлюїд;
НЧ	- наночастинки;
ПАР	- поверхнево активна речовина;
ПГ	- парникові гази;
ПХП	- побутовий холодильний прилад;
РХМ	- розчин холодоагент/масло.

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний технологічний прогрес в холодильній галузі, орієнтований на енергозбереження та зниження емісії парникових газів. Але дотриманням вимог Кіотського протоколу є достатньо складною процедурою. Усі етапи життєвого циклу холодильного обладнання пов'язані зі значними прямими та непрямыми вкладками у глобальні кліматичні зміни. По-перше, холодильна галузі характеризується великим споживанням електроенергії (у відповідності до звіту UNEP (2014 р.) при виробництві штучного холоду в розвинених країнах споживається від 10 до 30 % всієї потрібної країні електроенергії). Тому перехід на використання «натуральних» холодоагентів з низьким потенціалом глобального потеплення та підвищення рівня енергоефективності холодильного обладнання буде сприяти зниженню його вкладу в повну емісію парникових газів у країні. Одним з перспективних засобів підвищення рівня енергоефективності без модернізування обладнання є використання нанофлюїдів (НФ) у якості холодоносіїв та робочих тіл парокомпресійних холодильних машин.

Добавки нанорозмірних частинок у традиційно застосовувані у холодильному обладнанні робочі тіла та холодоносії будуть сприяти зміні їх теплофізичних властивостей, інтенсифікації тепловіддачі в апаратах холодильних установок з участю НФ та підвищенню показників енергетичної ефективності парокомпресійних холодильних машин (ПКХМ), без внесення змін у їх конструкцію. У зв'язку з вищесказаним напрями дослідження є **актуальними**.

Серед вчених, які плідно працювали в рамках зазначеного наукового напрямку, і на публікації яких автор спирався при вирішенні поставлених завдань, слід назвати імена: Buongiorno J., Das S.K., Kakac S., Murshed S.M.S., Choi S.U.S., Timofeeva E.V., Keblinski P., Желєзний В.П., Мазур В.О., Геллер В.З., Рудяк В.Я. та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Робота виконана у відповідності до закону України «Про Енергозбереження» від 01.07.1994 №74/94-ВР та є складовою частиною досліджень, проведених у рамках виконання держ-

бюджетних науково-дослідних робіт: МК 19/01 «Дослідження теплофізичних властивостей нанотеплоносіїв та процесу конвективного теплообміну при їх течії в трубі» (№ держ. реєстр. 0119U002289) (відповід. виконавець); МК 18/01 «Експериментальне дослідження впливу наночастинок на ефективність парокомпресійних холодильних машин і коефіцієнт тепловіддачі у випарниках» (№ держ. реєстр. 0118U000237); МК 18/02 «Дослідження впливу наночастинок на параметри фазових переходів і калоричні властивості рідин, застосовуваних у холодильному обладнанні» (№ держ. реєстр. 0118U000238) (відповід. виконавець); МК 16/03 «Дослідження стабільності та теплофізичних властивостей нанофлюїдів, перспективних для використання в холодильному та енергетичному обладнанні» (№ держ. реєстр. 0116U004683) (відповід. виконавець); МК 16/02 «Експериментальне дослідження та моделювання процесів кипіння нанохолодоагентів» (№ держ. реєстр. 0116U004682); МК 14/01 «Розробка і впровадження нанотехнологій у холодильну промисловість з метою інтенсифікації теплообміну при кипінні робочих тіл» (№ держ. реєстр. 0114U000073) та науково-дослідної теми каф. ТiПЕ ОНАХТ «Комплексні дослідження теплофізичних властивостей речовин, перспективних для використання в холодильній промисловості».

Метою дисертаційного дослідження є: комплексне експериментальне і теоретичне дослідження процедур створення, колоїдної стійкості та теплофізичних властивостей НФ, перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл ПКХМ, дослідження тепловіддачі при їх вимушеній конвекції та кипінні, дослідження енергетичних показників роботи ПКХМ при використанні в якості робочих тіл НФ, еколого-енергетичне обґрунтування доцільності промислового застосування НФ.

Основні задачі дисертаційного дослідження:

Для досягнення зазначеної мети було поставлено такі задачі:

- провести експериментальні дослідження з колоїдної стійкості модельних НФ та НФ, перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл, розробити рекомендації зі створення реальних робочих тіл ПКХМ з домішками наночастинок (НЧ) TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} ;

- провести узагальнення та аналіз експериментальних даних з теплофізичних

властивостей НФ, перспективних в якості холодоносіїв та робочих тіл: ізопропанол/НЧ Al_2O_3 , R141b/поверхнево-активна речовина (ПАР)/НЧ TiO_2 , тетралін/фулерени C_{60} , R600a/компресорне мастило/фулерени C_{60} ;

- розробити методи прогнозування питомої ізобарної теплоємності та в'язкості НФ, та провести верифікацію цих методів з використанням експериментальних даних для НФ ізопропанол/ Al_2O_3 ;

- вивчити можливість застосування методу розширеного скейлінгу щодо прогнозування теплофізичних властивостей робочих тіл ПКХМ з домішками НЧ з використанням експериментальних даних для системи R600a/компресорне мастило/фулерени C_{60} ;

- провести узагальнення та аналіз експериментальних даних з гідродинамічних та теплообмінних параметрів при вимушеній течії НФ ізопропанол/НЧ Al_2O_3 , який є перспективним в якості холодоносія або компонента холодоносія;

- провести експериментальне дослідження тепловіддачі при кипінні НФ R141b/ПАР/НЧ TiO_2 у порівнянні з кипінням R141b та R141b/ПАР, розробити метод прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні, який базується на використанні обмеженої експериментальної інформації з внутрішніх характеристик процесу кипіння, та провести верифікацію цього методу з використанням отриманих експериментальних даних для НФ R141b/ПАР/НЧ TiO_2 ;

- провести узагальнення експериментальних даних по показникам енергетичної ефективності ПКХМ при використанні в якості робочих тіл НФ R600a/компресорні мастила з домішками НЧ TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} та проаналізувати механізми, відповідальні за зміну цих показників;

- розробити метод еколого-енергетичного аналізу холодильного обладнання та на основі узагальненої експериментальної інформації провести аналіз доцільності використання НФ у побутових холодильних приладах (ПХП).

Об'єктом дослідження є перспективні для застосування в холодильній промисловості НФ: тетралін/фулерени C_{60} , ізопропанол/ НЧ Al_2O_3 , холодоагент R141b/ НЧ TiO_2 , реальні робочі тіла ПКХМ R600a/компресорні мастила з домішками НЧ TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} .

Предметом дослідження є закономірності впливу НЧ на: теплофізичні властивості модельних рідин, холодоносіїв та робочих тіл холодильного обладнання; інтенсивність тепловіддачі при вимушеній конвекції та кипінні НФ; показники ефективності ПКХМ при її роботі з використанням робочих тіл з домішками НЧ.

Методи дослідження:

- експериментальні дослідження колоїдної стійкості НФ методом спектротурбідиметрії; теплофізичних властивостей НФ методами адіабатної калориметрії, віскозиметрії та ін.; гідродинамічних та теплообмінних параметрів при вимушеній течії НФ, а також внутрішніх характеристик процесу та коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні НФ з використанням оригінальних установок; показників енергетичної ефективності ПКХМ з використанням компресорної холодильної системи з компресором ПХП;

- теоретична розробка нових та розвиток існуючих методів прогнозування теплофізичних властивостей НФ у широкому діапазоні параметрів стану; теоретичний розвиток методів прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні НФ; теоретичний розвиток методів аналізу еколого-енергетичної ефективності холодильного обладнання.

Наукова новизна одержаних результатів виражена у тому, що:

- вперше отримано та узагальнено експериментальні данні з колоїдної стійкості та теплофізичних властивостей НФ (ізопропанол/НЧ Al_2O_3 , тетралін/фулеренів C_{60} , R141b/НЧ TiO_2 ; R600a/компресорне мастило/НЧ Al_2O_3 або TiO_2 або фулерени C_{60}), які мають науковий інтерес для розробки нових й розвитку існуючих методів прогнозування властивостей НФ та їх верифікації;

- вперше розроблено метод визначення температурної залежності концентрації молекул базової рідини в поверхневій фазі НФ (фазі, що формується на поверхні НЧ у вигляді структурованого шару молекул базової рідини) та з використанням даної залежності вперше розроблено метод прогнозування питомої ізобарної теплоємності НФ та метод прогнозування в'язкості НФ;

- на основі нових експериментальних даних з гідродинамічних та теплообмінних параметрів при течії НФ ізопропанол/ НЧ Al_2O_3 у трубі ($0 \leq w_{NP} \leq 0,0471$ кг·кг⁻¹;

$200 < Re < 10^5$) вперше виявлено, що коефіцієнт втрат тиску на тертя ($200 < Re < 10^5$), а також число Nu при ламінарній течії НФ можуть бути розраховані з використанням залежностей для однофазних рідин та ефективних властивостей НФ, але для турбулентного режиму течії виявлене збільшення числа Nu , яке є пропорційним концентрації НЧ у НФ;

- на основі нових експериментальних даних з теплообмінних параметрів кипіння систем R141b/ НЧ TiO_2 ($0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$)/ПАР Span-80 ($0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$), R141b/ПАР й R141b ($5 < q < 60 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$; $0,2 < P < 0,4 \text{ МПа}$) вперше виявлено, що зміна густини активних центрів пароутворення за рахунок модифікації поверхні нагріву наночастинками робить визначальний вплив на зміну інтенсивності тепловіддачі при кипінні НФ, а також дістало розвитку та апробовано метод прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні як чистих рідин, так й НФ, який заснований на використанні обмеженої експериментальної інформації з внутрішніх характеристик процесу кипіння;

- на основі нових експериментальних даних з параметрів ефективності ПКХМ вперше виявлено принципово різні механізми збільшення холодильного коефіцієнту при використанні НФ у якості робочих тіл: за рахунок зменшення втрат енергії на тертя у компресорі при наявності домішок C_{60} у компресорному мастилі та за рахунок збільшення тиску насиченої пари та, як наслідок, збільшення коефіцієнту подачі компресора, при добавці до мастила НЧ TiO_2 та Al_2O_3 ;

- запропоновано новий еколого-енергетичний індикатор для аналізу ефективності ПХП, який відрізняється від традиційно використововуваного індексу енергетичної ефективності урахуванням етапів створення та утилізації обладнання, та вперше показано можливість підвищення еколого-енергетичної ефективності холодильних машин за рахунок використання у якості робочих тіл НФ на основі розчину R600a з компресорним мастилом та домішками НЧ TiO_2 та Al_2O_3 та фулерену C_{60} .

Обґрунтованість і достовірність результатів проведених у роботі досліджень забезпечується: коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням оригінальних експериментальних установок і сучасних приладів для вимірювань фізичних величин; проведенням тарувальних експериментів і детальним аналізом невизначеності отриманих експериментальних даних; викорис-

танням сучасних математичних методів і програмних засобів обробки даних.

Практичне значення одержаних результатів становить наступне: результати дослідження колоїдної стійкості та рекомендації зі створення НФ з НЧ TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренами C_{60} будуть сприяти впровадженню нового покоління робочих тіл та нанохолодоносіїв у промисловість; отримані дані з теплофізичних властивостей НФ дозволяють підвищити якість оцінки впливу НЧ на властивості реальних робочих тіл та холодоносіїв та формують базу довідкових даних для розвитку методів моделювання та прогнозування теплофізичних властивостей НФ; розроблені методи прогнозування теплоємності та в'язкості НФ можуть використовуватися в практиці проектування нового покоління холодильного обладнання; отримані експериментальні дані з впливу НЧ на інтенсивність теплообміну при вимушеній течії та при кипінні НФ, а також з впливу домішок НЧ у робочих тілах на показники ефективності ПКХМ дозволяють виділити ключові фактори, що впливають на доцільність впровадження НФ у холодильну галузь; метод еколого-енергетичного аналізу та запропонований індекс еколого-енергетичної ефективності ПХП дозволить на практиці оцінювати доцільність впровадження НФ у якості робочих тіл та відповідного модернізування холодильного обладнання.

Особистий внесок автора. Дисертація виконана у рамках співпраці з науковим консультантом та співробітниками лабораторії каф. ТіПЕ ОНАХТ (співавтор публікацій). Особисто автором проведені експериментальні дослідження: процедур створення НФ, параметрів їх колоїдної стійкості, внутрішніх характеристик кипіння холодоагенту R141b та НФ на його основі. При безпосередній участі здобувача проведено експериментальні дослідження: теплофізичних властивостей та коефіцієнтів тепловіддачі при кипіння об'єктів дослідження, параметрів роботи ПКХМ при використанні робочих тіл з домішками НЧ та фулеренів. При безпосередній участі здобувача проведено обробку усіх експериментальних даних з: теплофізичних властивостей НФ тетралін/фулерени C_{60} , R141b/ПАР/ TiO_2 , R600a/мастило/ C_{60} , параметрів тепловіддачі при кипінні НФ R141b/ПАР/ TiO_2 та при течії НФ ізопропанол/ Al_2O_3 ; показників ефективності ПКХМ при використанні в якості робочих тіл НФ. Автором сумісно зі співавторами було розроблено

метод визначення концентрації поверхневої фази НФ та метод прогнозування питомої ізобарної теплоємності НФ. Особисто автором було розроблено метод прогнозування в'язкості НФ, апробовано метод розширеного скейлінгу до прогнозування властивостей розчинів R600a/мастило/C₆₀; розроблено метод еколого-енергетичного аналізу енергоємних виробництв та виконано його адаптацію щодо аналізу холодильного обладнання.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних досліджень доповідалися автором на 22 конференціях, у тому числі: 24th Int. Congress of Refrigeration, Yokohama, Japan, 2015; 13th IIR Gustav Lorentzen Conf. on Natural Refrigerants “Natural refrigerant solutions for warm climate countries”, Valencia, Spain, 2018; 1st & 2nd Europ. Symp. on Nanofluids (ESNf2017 & ESNf2019), Lisboa, Portugal, 2017 & Castelló, Spain, 2019; 5th IIR Int. Conf. on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, Seoul, Republic of Korea, 2017; 4th, 6th & 7th Int. Conf. “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, Baku, Azerbaijan, 2015, Rostock, Germany, 2017 & 2018; 8th Int. Symp. On Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015; 3rd Int. Conf. On Thermophysical And Mechanical Properties Of Advanced Materials, Izmir, Turkey, 2016; Heat Powered Cycles Conference 2016, Nottingham University, UK, 2016; 7th and 8th Int. Conf. “Physics of liquid matter: modern problems”, Kyiv, Ukraine, 2016 and 2018; Nanotech France 2017, NanoMaterials for Energy & Environment NanoMatEn 2017 – NanoMetrology 2017, Joint Int. Conf. & Exhibition, Paris, France, 2017; X Minsk Int. Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 2018; VII Междунар. науч.-техн. конф. «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Санкт-Петербург, Россия, 2015; Int. Conf. “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”, Chisinau, Republic of Moldova, 2016; X та XI Міжн. наук.-техн. конф. «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології», Одеса, 2015 та 2017; Міжн. наук.-техн. конф. «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, Україна, 2014 та 2016; Міжн. наук.-техн. конф. «Казахстан-Холод 2016» та «Казахстан-Холод 2017», Алматы, Казахстан, 2016 та 2017; IX та X міжн. конф. «Проблеми теплофізики та теплоенергетики», Київ,

Україна, 2015 та 2017; XVII та XVI Всеукр. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми енергетики та екології», Одеса, 2016 та 2018.

Публікації. Основний зміст дисертації представлено у 1 монографії, 28 публікаціях в наукових журналах, які відповідають вимогам ВАК України (11 з яких входять до БД Scopus), а також у 20 доповідях у збірниках праць міжнародних конференцій (2 з яких входять до БД Scopus), і 18 роботах, опублікованих у формі тез у збірниках тез доповідей міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 8 розділів, висновків і 3 додатків (на 39 ст.). Робота містить 343 сторінок тексту, включаючи 91 рисунок, 14 таблиць, список використаної літератури - 359 джерел (на 45 ст.).

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ. ПРОБЛЕМАТИКА НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Одним з найважливіших напрямів розвитку промисловості на сьогодні є ресурсо- та енергозбереження. Як відомо, на потреби холодильної галузі (холодильні системи, теплові насоси та системи кондиціонування повітря) витрачається від 10 до 30 % електроенергії, що споживається у розвинутих країнах [1].

Існує кілька перспективних напрямків підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у холодильній галузі. Перш за все це впровадженням тепловикористовуючих холодильних машин (абсорбційних, пароежекторних), що споживають низькопотенційну теплоту різних джерел, або використовують відновлювальні джерела теплової енергії (наприклад, енергію сонячної радіації) [2 – 5]. Проте впровадження таких технологій тягне за собою істотну модернізацію обладнання. Другим перспективним напрямом підвищення ефективності холодильного обладнання є використання нанотехнологій. Стосовно холодильного обладнання це використання нанофлюїдів в якості робочих тіл парокомпресійних холодильних машин та в якості проміжних холодоносіїв [6 – 15]. Оптимальний вибір матеріалу та концентрації наночастинок в якості домішки до холодоносія або робочого тіла буде сприяти контрольованій зміні їх теплофізичних властивостей, інтенсифікації тепловіддачі при вимушеній конвекції та кипінні з участю нанофлюїдів, підвищенню показників енергетичної ефективності парокомпресійної холодильної машини, в якій використовуються робочі тіла – нанофлюїди.

1.1 Основні поняття галузі нанотехнологій

Одна з перших робіт, яка була присвячена дослідженню теплопровідності рідини з додаванням наночастинок та в якій вперше вводиться термін «нанофлюїд» є робота 1995 р. Choi [16]. В наступний час нанофлюїдами (нанорідинами, nanofluids) називають колоїдні розчини твердих частинок нанорозміру (1-100 нм) у базовій рідині [6 -49].

Терміни, які пов'язані з галуззю нанотехнологій нормуються ДСТУ: ISO/TS 80004-1:2015, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms, IDT; ISO/TS 80004-4:2011, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 4: Nanostructured materials, IDT; (ISO/TS 80004-6:2013, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 6: Nano-object characterization, IDT [50-52]. Деякі терміни у відповідності до ДСТУ [50-52] наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Терміни та визначення у відповідності до ДСТУ [50-52]

Термін	Визначення
Нанодіапазон (nanoscale)	Діапазон лінійних розмірів приблизно від 1 до 100 нм. <i>Примітки: Верхню межу цього діапазону прийнято вважати приблизною, оскільки в основному унікальні властивості наноб'єктів за нею не виявляються. Нижнє граничне значення в цьому визначенні (приблизно 1 нм) введено для того, щоб виключити з розгляду в якості наноб'єктів або елементів наноструктур окремі атоми або невеликі групи атомів.</i>
Нанотехнологія (nanotechnology)	Сукупність технологічних методів, які застосовуються для вивчення, проектування і виробництва матеріалів, пристроїв і систем, включаючи цілеспрямований контроль і управління будовою, хімічним складом і взаємодією складових їх окремих елементів нанодіапазону.
Наноматеріал (nanomaterial)	Твердий або рідкий матеріал, який повністю або частково складається із структурних елементів, розмір яких хоча б по одному напрямку знаходиться в нанодіапазоні.
Наноструктура (nanostructure)	Композиція з взаємопов'язаних складових частин різних речовин, одна або кілька з яких мають лінійні розміри в нанодіапазоні. <i>Примітка: межа між складовими частинами визначається границею припинення властивостей.</i>

Нанооб'єкт (nano-object)	Матеріальний об'єкт, лінійні розміри якого по одному, двох або трьох вимірах знаходяться в нанодіапазоні.
Наночастинка (nanoparticle)	Нанооб'єкт, лінійні розміри якого по всіх трьох вимірах знаходяться в нанодіапазоні. <i>Примітка: Якщо по одному або двом вимірам розміри нанооб'єктів значно більше, ніж по третьому виміру (як правило, більш ніж в три рази), то замість терміну "наночастинка" можна використовувати терміни "нановолокно" або "нанопластина"</i>
Частинка (particle)	Дрібна частина речовини з певними фізичними границями. <i>Примітки: Фізична границя може також бути описана як міжфазна область взаємодії. Частинка може переміщатися як єдине ціле. Дане загальне визначення частинки може бути застосовано до нанооб'єктів.</i>
Текуча нанодисперсна система (fluid nanodispersion)	Гетерогенний матеріал, що містить нанооб'єкти або нанофазы, які дисперговані в безперервній рідкій фазі.
Наносуспензія (nanosuspension)	Текуча нанодисперсна система, що містить дисперговану тверду фазу.
Розмір частинки (particle size)	Лінійний розмір частинки, визначений відповідними методами і засобами вимірювань у заданих умовах. <i>Примітка: Різні методи аналізу засновані на вимірюванні різних фізичних характеристик частинок. Незалежно від характеристик частинки завжди можна визначити її лінійні розміри, наприклад, еквівалентний діаметр сферичної частинки.</i>

Як видно з таблиці 1.1, в ДСТУ [50-52] термін «нанофлюїд» або «нанорідиди-

на» відсутній, але він активно використовується в англійських (nanofluid), російськомовних та україномовних наукових роботах [6 – 49].

Найбільш близьким за змістом терміном в ДСТУ є «наносуспензія» (nanosuspension), який теж зустрічається у англійській літературі як синонім терміну «нанофлюїд».

1.2 Основні напрямки використання нанофлюїдів в холодильній галузі

Починаючи з 1990-х років була опублікована велика кількість робіт, присвячених дослідженню перспектив використання нанофлюїдів в різних інженерних галузях. Велика кількість з них була присвячена вивченню зміни теплопровідності та в'язкості базових рідин за рахунок додавання у них наночастинок в контексті перспектив застосування нанофлюїдів у енергетичній галузі [7, 16-29]. Також велика кількість досліджень присвячена оцінці інтенсивності тепловіддачі при вимушеній та природній конвекції [30-35] та кипінні [26, 36-40] з участю нанофлюїдів, ефективності їх використання у теплових трубах та термосифонах [41-43], теплообмінних апаратах [44-46], мікроканалах [47-48], системах зберігання теплової енергії [49], холодильних машинах [6-15].

Нанофлюїди можуть використовуватися у холодильних установках, теплових насосах та системах кондиціонування повітря в якості робочих тіл парокompресійних холодильних машин та в якості проміжних холодоносіїв [6 – 15].

1.2.1 Вимоги до робочих тіл та холодоносіїв холодильних машин й установок

Реальними робочими тілами парокompресійних холодильних машин є речовини холодоагентів з компресорними маслами. Вимоги до холодоагентів, їх фізичні властивості докладно розглянуто, наприклад, в [53, 54]. Останні роки на перший план вийшли екологічні вимоги до холодоагентів, що пов'язано з необхідністю виконання умов Монреальського протоколу та різноманітних законодавчих актів, які приймалися на основі вимог Кіотського протоколу. Але нерозривно з

екологічними вимогами слід розглядати й енергетичні характеристики конкретного холодильного обладнання при роботі з використанням різних холодоагентів.

В таблиці Б.1 додатку Б наведені результати теоретичного розрахунку холодильного коефіцієнта для стандартного холодильного циклу при різних температурах у випарнику та при 303 К у конденсаторі для найбільш розповсюджених холодоагентів [53]. За результатами таких теоретичних розрахунків на першому етапі дослідження можна підібрати холодоагент, який буде забезпечувати найбільшу енергетичну ефективність при конкретних параметрах роботи. Але відомо, що у реальному обладнанні енергетична ефективність може суттєво відрізнятись від теоретично розрахованої (табл. Б.1 додатку Б) через такі фактори як ефективність компресора, властивості компресорного масла, впливу властивостей переносу реального робочого тіла.

Тобто у випадку, коли теоретично обрано найбільш ефективний холодоагент для конкретних параметрів холодильного циклу та конкретного обладнання, одним з найменш затратних способів підвищення енергетичної ефективності холодильної компресорної системи може бути покращення властивостей реального робочого тіла (розчину холодоагенту в компресорному маслі) за рахунок використання нанотехнологій.

В англійській науковій літературі вже широко використовується термін «нанохолодоагент» («nanorefrigerant») [8, 9, 12, 13, 40] та відзначаються перспективи використання нанохолодоагентів для підвищення енергетичної ефективності холодильного обладнання [6-11, 13-15].

Другим напрямком підвищення енергетичної ефективності холодильних машин та установок є використання проміжних холодоносіїв з покращеними теплофізичними властивостями. В наступний час широко використовуються холодильні системи (перш за все аміачні) з проміжним холодоносієм. Як відомо, для підвищення інтенсивності переносу холоду споживачу, а отже для зниження енергетичних витрат на роботу всієї холодильної установки, холодоносій повинен володіти високими значеннями теплоємності та теплопровідності, а також низькою в'язкістю. За оцінкою [55] при температурі мінус 20 °С рекомендовано, щоб холо-

доносій мав теплоємність не менше ніж $2850 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, теплопровідність не менше ніж $0,280 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, динамічну в'язкість не більш ніж 20-22 мПа·с.

Досить інтересним напрямком для покращення теплофізичних властивостей холодоносіїв є використання в якості добавок до них наночастинок, тобто впровадження в промисловість «нанохолодоносіїв» («nanocoolants») [26, 28, 29, 35, 45, 56]. Як відомо, нанофлюїди володіють підвищеною, у порівнянні з базовою рідиною, теплопровідністю [9, 13, 17, 21 - 23, 25, 27 - 29, 56, 57]. Але для нанофлюїдів характерно зниження теплоємності та підвищення в'язкості [9, 13, 17, 21, 22, 25, 29, 56, 57], що не є бажаним фактом для їх використання у якості холодоносіїв. Але який з факторів буде превалюючим з точки зору переносу теплоти сказати без розгляду властивостей конкретного нанофлюїду неможливо. Тому застосування холодоносіїв на основі нанофлюїдів з оптимальною концентрацією наночастинок є перспективним напрямом підвищення енергетичної ефективності холодильних установок, але потребує додаткових досліджень.

1.3 Проблематика впровадження нанофлюїдів у холодильну галузь

На шляху від концепції впровадження нанофлюїдів у холодильну галузь до реальних проектів та систем, в яких використовуються нанофлюїди в якості робочих тіл та холодоносіїв повинна бути проведена багатовекторна науково-дослідна робота. Стосовно впровадження нанофлюїдів у холодильну галузь ця робота повинна складатися з етапів, без виконання яких робити висновок о можливості застосування нанохолодагентів або нанохолодоносіїв неможливо. На думку автора, к таким етапам може бути віднесено:

- розробка технології створення колоїдно стійких робочих тіл з добавками наночастинок та нанохолодоносіїв;
- експериментальне дослідження теплофізичних властивостей модельних нанофлюїдів, для яких підтверджена достатньо висока колоїдна стійкість, з подальшою розробкою методів моделювання теплофізичних властивостей; використання експериментальної інформації по модельним системам для верифікації роз-

роблених моделей прогнозування теплофізичних властивостей; експериментальне та розрахункове дослідження теплофізичних властивостей реальних робочих тіл парокompресійних холодильним машин та нанохолодоносів;

- експериментальне дослідження процесів тепловіддачі при вимушеній конвекції та при кипінні нанофлюїдів, для яких виконане вивчення теплофізичних властивостей та підтверджена їх висока колоїдна стійкість; моделювання процесів тепловіддачі з участю нанофлюїдів з використанням їх теплофізичних властивостей;

- експериментальне дослідження параметрів ефективності роботи парокompресійної холодильної системи з використанням в якості робочих тіл нанофлюїдів, досліджених на попередніх етапах; інтерпретація отриманих експериментальних даних з використанням інформації о теплофізичних властивостях робочих тіл та інтенсивності тепловіддачі з їх участю, отриманої на попередніх етапах;

- аналіз повного життєвого циклу холодильної машини або установки, в якій в якості робочих тіл використовуються нанофлюїди; поряд з традиційним техніко-економічним аналізом доцільним є використання аналізу, оснований на енергетичних та екологічних показниках обладнання.

В дисертаційній роботі було заплановано послідовне виконання усіх цих етапів з використанням модельних речовин та реальних робочих тіл та холодоносіїв. Причому кожен етап, що передує, був основою для вибору об'єктів та предмету дослідження для наступного етапу. На думку автора, відсутність одного з відзначених вище етапів може привести до неможливості інтерпретації результатів, отриманих при подальших дослідженнях, або отриманню негативних очікуваних результатів при затраті великої кількості часу та матеріальних ресурсів на виконання цих етапів.

Далі на основі огляду літературних джерел розглянуто основні проблеми, пов'язані з необхідністю виконання кожного етапу дослідження нанофлюїдів, перспективних в якості робочих тіл холодильних машин та холодоносіїв.

1.3.1 Проблематика розробки процедури створення колоїдно стійких нанофлюїдів

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню технологій створення колоїдно стійких нанофлюїдів [9, 12, 13, 22, 23, 27-29, 56-58], це питання до сьогодні не вивчено у достатній мірі. На сьогодні в літературі відсутні загальні рекомендації з технологій створення певних нанофлюїдів. Деякі автори взагалі не приділяють уваги дослідженню колоїдної стійкості нанофлюїдів при подальшому вимірюванні їх теплофізичних властивостей або дослідженні процесів тепловіддачі з їх участю. Деякі автори проводять дослідження стійкості в досить короткий термін, рівний проведенню експериментального вивчення властивостей, а в подальшому стійкість нанофлюїдів вже не вивчається, що не сприяє визначенню перспектив впровадження в практику досліджуваного об'єкту. Для певних систем вдається підібрати поверхнево-активні речовини таким чином, щоб збільшити час існування нанофлюїду з певним дисперсним складом, але в переважній більшості робіт не розглядаються зміни дисперсного складу та теплофізичних властивостей нанофлюїдів з часом та у процесі їх використання у реальному обладнанні.

1.3.2 Проблематика експериментального дослідження та моделювання теплофізичних властивостей нанофлюїдів

Робіт, присвячених вивченню теплофізичних властивостей нанофлюїдів, досить багато [7, 13, 16-19, 21-29, 27]. Однак експериментальні дані, що наведені у відзначених роботах, досить суперечливі у різних авторів навіть для однакових (на перший погляд) систем. Поясненням цього факту може бути різний дисперсний склад нанофлюїдів (навіть при рівних масових частках наночастинок та однакових компонентах), який часто не досліджується авторами робіт. В оглядових роботах, присвячених дослідженню теплофізичних властивостей нанофлюїдів [9, 29, 56], відзначається, що експериментальні дослідження властивостей нанофлюїдів проводяться переважно одразу після їх приготування, тоді як потрібні додаткові дослідження зміни властивостей з часом. Крім того, у більшості відзначених

робіт наведені данні з окремих теплофізичних властивостей (як правило, це в'язкість та теплопровідність), а даних про вплив домішок наночастинок на калоричні та інші властивості недостатньо. Тобто слід констатувати, що комплексних експериментальних робіт, присвячених вивченню процедури створення нанофлюїду, дослідженню зміни його дисперсного складу з часом та впливу цієї зміни на весь комплекс теплофізичних властивостей в наступний час немає.

Так само можна констатувати, що на сьогодні не розроблені надійні методи моделювання й прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів. На перших етапах дослідження термодинамічних властивостей і властивостей переносу були спроби використання рівнянь, які запропоновані для розрахунку теплофізичних властивостей суспензій [59-62]. Як показала практика їх застосування, ці залежності неадекватно описують теплофізичні властивості нанофлюїдів і не можуть бути рекомендовані для точного прогнозування їх властивостей в широких інтервалах параметрів стану.

Наприклад, для прогнозування густини нанофлюїдів широко використовується рівняння виду [60, 61]

$$\rho_{NF} = \rho_{NP} \cdot \varphi_{NP} + \rho_{BF} (1 - \varphi_{NP}), \quad (1.1)$$

де φ_{NP} - об'ємна частка наночастинок, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$; ρ_{NF} , ρ_{NP} й ρ_{BF} - густина нанофлюїда, наночастинок і базової рідини, відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Найбільш часто для прогнозування теплоємності нанофлюїдів використовується кореляція виду [59-61]

$$C_{P, NF} = C_{P, NP} \cdot \varphi_{NP} + C_{P, BF} (1 - \varphi_{NP}), \quad (1.2)$$

$$C_{P, NF} = \frac{\varphi_{NP} \cdot \rho_{NP} \cdot C_{P, NP} + (1 - \varphi_{NP}) \cdot \rho_{BF} \cdot C_{P, BF}}{\varphi_{NP} \cdot \rho_{NP} + (1 - \varphi_{NP}) \cdot \rho_{BF}}, \quad (1.3)$$

де $C_{P, NF}$, $C_{P, NP}$ й $C_{P, BF}$ - питома ізобарна теплоємність нанофлюїду, наночастинок і базової рідини, відповідно, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; φ_{NP} - об'ємна частка наночастинок,

$\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$; ρ_{NP} й ρ_{BF} - густина наночастинок і базової рідини, відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Огляд методик з прогнозування таких властивостей переносу як теплопровідність і в'язкість представлений у багатьох роботах, наприклад [59-62].

Слід лише зазначити, що стосовно до прогнозування в'язкості нананофлюїдів однією з перших залежностей, яку намагалися застосовувати дослідники, є рівняння Ейнштейна [63] (1.4), яке рекомендується використовувати при концентрації наночастинок в базових рідинах менше ніж 2% об.

$$\eta_{\text{NF}} = \eta_{\text{BF}} (1 + 2,5\varphi_{\text{NP}}), \quad (1.4)$$

де φ_{NP} - об'ємна частка наночастинок, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$; η_{NF} й η_{BF} - кінематична в'язкість нананофлюїду та базової рідини, відповідно, $\text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$.

Стосовно до прогнозування теплопровідності нананофлюїдів такою залежністю є модель Максвелла [64]

$$\lambda_{\text{NF}} = \lambda_{\text{BF}} \frac{1 + 2\beta \cdot \varphi_{\text{NP}}}{1 - \beta \cdot \varphi_{\text{NP}}}, \quad \beta = \frac{\lambda_{\text{NP}} - \lambda_{\text{BF}}}{\lambda_{\text{NP}} + 2\lambda_{\text{BF}}}, \quad (1.5)$$

де λ_{NF} , λ_{NP} й λ_{BF} - теплопровідність нананофлюїду, наночастинок і базової рідини, відповідно, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; φ_{NP} - об'ємна частка наночастинок, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$.

Однак подальші дослідження показали, що залежності, які традиційно використовуються для суспензій, не підходять для розрахунку теплофізичних властивостей нананофлюїдів [59-62]. Багато авторів робіт, що опубліковані за цією тематикою, підкреслюють, що важливим фактором, який робить вплив на величину теплофізичних властивостей нананофлюїдів є наявність на поверхні наночастинок сорбованого шару молекул базової рідини (або молекул ПАР) (interfacial layer) [65, 66]. На поверхні наночастинок молекули базової рідини утворюють упорядкований шар, структура якого подібна до структури твердого тіла (solid-like) [65, 66].

Тому теплофізичні властивості такого шару істотно відрізняються від властивостей базової рідини вдалині від частинок, що має враховуватися при розробці моделей прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів.

Ймовірно, першою статтею, в якій було запропоновано враховувати наявність сорбованого шару на поверхні наночастинок при розрахунку теплопровідності нанофлюїду була робота [67]. Запропонована методика розрахунку коефіцієнта теплопровідності для нанофлюїда була заснована на моделі Максвелла (1.5). На жаль конкретних рекомендацій про оцінку товщини і структури цього поверхневого шару в роботі [67] не було наведено.

Слід констатувати, що до сих пір немає однозначного підходу до оцінки як товщини сорбованого шару молекул на поверхні наночастинок, так і його властивостей [65, 66]. Цією обставиною в значній мірі пояснюється складність в створенні точних моделей для прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів. Необхідна розробка простого методу визначення параметрів поверхневого шару на наночастинках в різних нанофлюїдах, який був би заснований на обмеженому експериментальному дослідженні легко вимірюваних теплофізичних властивостей.

1.3.3 Проблематика експериментального дослідження та моделювання процесів тепловіддачі з участю нанофлюїдів

Є досить багато робіт, присвячених експериментальному дослідженню процесів тепловіддачі з участю нанофлюїдів [9, 19, 26, 30-41, 44-49, 68, 70-80]. Але дані, які наведені у цих роботах, досить суперечливі не тільки з кількісних величин впливу наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі з участю нанофлюїдів, а й з якісної позиції. Тобто дослідники визначають як збільшення так й зменшення коефіцієнту тепловіддачі як при вимушеній конвекції нанофлюїдів, так й при їх кипінні. Залишаються нез'ясованими механізми підвищення або зниження інтенсивності тепловіддачі як при течії нанофлюїдів, так й при їх кипінні.

Наявні в літературі експериментальні данні з інтенсивності процесу тепловіддачі при вимушеній ламінарній течії нанофлюїдів у каналах круглого попереч-

ного перерізу при граничних умовах першого роду (постійний тепловий потік) є досить суперечливими. Наприклад, в роботі [68] відзначається, що число Нусельта Nu при вимушеній ламінарній течії води з домішками 9 мас. % наночастинок Al_2O_3 й TiO_2 не змінюється, та залишається таким же як й для чистої води. Крім того, в [68] відзначається що для зазначених нанофлюїдів число Нусельта досить добре описується відомим рівнянням Шаха (Shah) [69] для локальних коефіцієнтів тепловіддачі на початковій тепловій ділянці при граничних умовах першого роду та збігається з результатами числового моделювання з застосуванням припущення що рідина є однофазною.

В подальшій роботі цих же авторів [70] було виконано дві серії незалежних вимірювань коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній конвекції для ідентичних нанофлюїдів, в яких в якості добавки в воду було використано наночастинок Al_2O_3 , TiO_2 та вуглецеві нанотрубки. Було показано добре узгодження між результатами двох незалежних експериментів та зафіксоване підвищення коефіцієнту тепловіддачі при рівних масових витратах (або швидкостях) потоку в межах експериментальної невизначеності (10 %). Таким чином, автори [70] припустили, що у процесі тепловіддачі при вимушеній конвекції поведінка нанофлюїдів відповідає поведінці однофазній рідині.

Напроти, автори роботи [71] показують суттєве погіршення інтенсивності тепловіддачі при ламінарному русі рідин (етиленгліколю та водного розчину етиленгліколю) при додаванні до них наночастинок SiO_2 (діаметр 15–50 нм) з концентраціями від 0,2 до 2 об. %.

Крім того, дослідники виділяють різноманітні механізми, які сприяють підвищенню інтенсивності тепловіддачі при вимушеному ламінарному русі нанофлюїдів. Наприклад, автори роботи [31] відзначають, що необхідно враховувати неоднорідності в рідині (liquid inhomogeneities). В роботі [72] автори при аналізі факторів, які сприяють підвищенню коефіцієнту тепловіддачі за рахунок добавок наночастинок (вуглецевих нанотрубок) у воду при її вимушеному русі пропонують розглядати не тільки зміни теплофізичних властивостей нанофлюїду (у порівнянні з базовою рідиною), а й додатковий вплив броунівського рух наночасти-

нок. В роботі [73] автори пропонують враховувати наявність локальних перколяційних структур, які вносять вклад в збільшення теплопровідності та коефіцієнту тепловіддачі при вимушеній течії води з добавками нітриду бора.

При аналізі процесу тепловіддачі при вимушеному турбулентному русі нанофлюїдів дослідники також фіксують як позитивний так й негативний ефекти. Іноді дослідники отримують протилежні ефекти (порівнюючи вплив наночастинок на інтенсивність тепловіддачі) при турбулентному та ламінарному русі однакового нанофлюїду. В роботі [74] показано підвищення коефіцієнтів тепловіддачі та втрат тиску при вимушеному турбулентному русі нанофлюїдів на основі водного розчину етиленгліколю з добавками наночастинок Al_2O_3 , CuO та SiO_2 . Автори [74] показали, що ці зміни були пропорційні концентрації наночастинок. Аналогічні результати були отримані в роботах [75-77] для інших нанофлюїдів. Однак, в роботі [78] було зафіксоване погіршення інтенсивності тепловіддачі при турбулентному русі нанофлюїдів з великою концентрацією наночастинок.

Достатньо інтересний результат був отриманий в роботах [79, 80], де показано, що перехід з ламінарного режиму руху нанофлюїдів в турбулентний відбувається при інших числах Рейнольдсу, ніж прийнято вважати при розгляді течії однофазних рідин. В роботі [79] показано ранній перехід з ламінарного к турбулентному режиму, а в [80] результат протилежний.

Таким чином можна констатувати, що отримання якісних експериментальних даних з гідродинамічних та теплообмінних параметрів тепловіддачі при вимушеному русі нанофлюїдів до сих пір є актуальною проблемою. Крім того, виконаний огляд наявної в літературі експериментальної інформації з інтенсивності тепловіддачі переважно присвячений розгляду нанофлюїдів на основі води, а для інших, перспективний в якості холодоносіїв рідин, такої інформації недостатньо.

В даний час активно досліджуються перспективи застосування нанофлюїдів для підвищення інтенсивності процесу кипіння в різному енергетичному обладнанні. Не зважаючи на великий практичний інтерес застосування нанофлюїдів в якості робочих тіл парокомпресійного холодильного обладнання [6-15], більшість робіт, присвячених дослідженню впливу добавок наночастинок на процес кипін-

ня, було проведено з використанням води в якості базової рідини [33, 36, 81]. Таким чином, кількість досліджень, присвячених процесу кипіння нанохолодоагентів як у вільному об'ємі, так і в процесі кипіння при їх течії в каналах теплообмінного обладнання, в даний час небагато [38, 40, 82-95].

Автори численних робіт вказують, що добавки наночастинок сприяють збільшенню значень коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів як у вільному об'ємі, так і при їх течії в каналах у порівнянні з базовими рідинами [40, 83 - 86, 88 - 92]. Незважаючи на це, в ряді робіт було отримано зменшення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні рідин, за рахунок додавання до них наночастинок [82, 87, 93, 95] або були отримані обидва ефекту збільшення і зменшення коефіцієнту тепловіддачі [37, 94].

Слід зазначити, що в процесі створення нанофлюїдів для забезпечення їх колоїдної стійкості часто використовуються ПАР. Наявність домішок ПАР в зразках нанофлюїдів також може суттєво впливати на інтенсивність процесів кипіння [83, 96]. Нажаль в деяких роботах, присвячених вивченню процесу кипіння нанофлюїдів, автори не вказали чи застосовувалося ПАР при створенні досліджуваних зразків [86 - 89]. Аналізуючи опубліковані роботи можна констатувати, що лише деякі автори приділяють належну увагу колоїдної стійкості досліджуваних зразків нанофлюїдів [90 - 93] при вивченні тепловіддачі при їх кипінні.

Аналіз великої кількості робіт [33, 36, 38, 40, 81-95] показав, що стосовно тепловіддачі при кипінні процес набагато складніше, ніж при однофазній конвекції, й механізмів впливу на величину коефіцієнту тепловіддачі досить багато. Але, ймовірно, основний вплив пов'язаний з модифікацією поверхні, на якій відбувається процес кипіння, за рахунок осадження/сорбції/адгезії на неї наночастинок.

Таким чином, суперечливий характер наведених в літературі експериментальні даних не дозволяє зробити однозначний висновок про доцільність використання добавок наночастинок для підвищення інтенсивності процесів тепловіддачі при кипінні.

У зв'язку з відзначеним вище, не розроблено універсальних моделей для оцінювання коефіцієнта тепловіддачі, зокрема, при вимушеній течії нанофлюїдів,

а тим більше при їх кипінні. Наявні емпіричні моделі визначення коефіцієнтів тепловіддачі с участю нанофлюїдів можуть бути використані тільки для досліджених авторами нанофлюїдів та умов проведення експерименту.

1.3.4 Проблематика експериментального дослідження реального холодильного обладнання з використанням в якості робочих тіл нанофлюїдів та оцінки доцільності їх впровадження в промисловість

У низці робіт [6-10, 13-15] відзначається поліпшення енергетичних характеристик парокompресійних холодильних машин при застосуванні у них нанофлюїдів в якості робочих тіл. Але залишаються нез'ясованими механізми підвищення енергетичної ефективності холодильного обладнання. Є роботи [97, 98] в яких показано зниження втрат енергії на тертя при додаванні наночастинок у компресорне масло, але при цьому експериментальних досліджень з застосування цього наномасла у холодильному обладнанні проведено не було. Крім зменшення втрат на тертя у компресорі, ефекти зміни показників енергетичної ефективності парокompресійних холодильних машин можуть бути пов'язані зі зміною калоричних властивостей реальних робочих тіл [99], інтенсифікацією процесів тепловіддачі в випарниках та конденсаторах холодильної машини [37, 38], та з рядом інших факторів, вплив яких на показники ефективності обладнання врахувати неможливо. Тому можна констатувати потребу подальшого експериментального вивчення впливу добавок наночастинок у перспективні для застосування у промисловості робочі тіла парокompресійних холодильних машин та теплових насосів.

Слід зазначити, що висновки про доцільність застосування нанофлюїдів на практиці мають ґрунтуватися не тільки на техніко-економічному, але і на еколого-енергетичному аналізі життєвого циклу машини або установки. Автор цієї дисертаційної роботи має досвід у виконанні еколого-енергетичного аналізу холодильного обладнання на засадах власної методики [2, 3, 100-102]. На сьогодні в літературі відсутні комплексні дослідження перспектив застосування нанофлюїдів у певному холодильному обладнанні з еколого-енергетичним обґрунтуванням доцільності їх впровадження в промисловість.

Проведений аналіз літературних джерел вказує на загальний характерний недолік наявних досліджень, пов'язаний з відсутністю робіт комплексного характеру, які б включали всі об'єктивно необхідні етапи: розробку процедури створення нанохолодоносія або робочого тіла на основі нанофлюїду; вимірювання і моделювання його теплофізичних властивостей з урахуванням сучасних уявлень о структурі нанофлюїду; дослідження процесів тепловіддачі з участю цього нанофлюїду при умовах, характерних для його застосування в промисловості (при вимушеній конвекції для нанохолодоносія або при кипінні для робочого тіла з домішками наночастинок); дослідження робочих процесів у обладнанні з аналізом показників його енергетичної ефективності (дослідження параметрів роботи парокompресійної холодильної машини з використанням в якості робочого тіла нанофлюїду); контроль колоїдної стійкості нанофлюїдів на всіх стадіях експерименту; еколого-енергетичний аналіз перспектив застосування нанохолодоагентів та нанохолодоносіїв у конкретному холодильній машині або установці.

Проведення такого комплексного дослідження буде сприяти впровадженню нового покоління робочих тіл та холодоносіїв у холодильну галузь.

1.4 Список використаних джерел за розділом

1. UNEP 2014. Report of the Refrigeration, air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. 2014 Assessment. http://www.montreal-protocol.org/Assessment_Panels/TEAP/Reports/RTOC/RTOC-Assessment-Report-2014.pdf

2. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioner // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 127-135.

3. Chen G., Zhelezny V., Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V. A comparative ecological and energy efficiency analysis of vapor compression, absorption and ejector air conditioners operating with “natural” refrigerants // Heat Powered Cycles Conference 2016, Nottingham University, UK, 28 - 30 June 2016. Paper HPC520.

4. Goyal P. Baredar, P., Mittal, A., Siddiqui, A. R. Adsorption refrigeration technology—An overview of theory and its solar energy applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 53. P. 1389-1410.

5. Zeyghami M., Goswami D. Y., Stefanakos E. A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 51. P. 1428-1445.

6. Bhattad A., Sarkar J., Ghosh P. Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3656-3669.

7. Patil M., Kim S., Seo J. H., Lee M. Y. Review of the thermo-physical properties and performance characteristics of a refrigeration system using refrigerant-based nanofluids // *Energies*. 2016. Vol. 9. Issue 1. P. 22.

8. Azmi W. H., Sharif M. Z., Yusof T. M., Mamat R., Redhwan A. A. M. Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. P. 415-428.

9. Celen A. Çebi A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A. S., Wongwises S. A review of nanorefrigerants: flow characteristics and applications // *International journal of refrigeration*. 2014. Vol. 44. P. 125-140.

10. Xing M., Wang R., Yu J. Application of fullerene C60 nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors // *Int. J. Refrigeration*. 2014. Vol. 40. P. 398-403.

11. Мороз С. А., Хлиева О. Я., Лукьянов Н. Н., Железный В. П. Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C60 в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы // *Вестник Международной академии холода*. 2016. № 1. С. 41–46.

12. Peng H., Lin L., Ding G. Influences of primary particle parameters and surfactant on aggregation behavior of nanoparticles in nanorefrigerant // *Energy*. 2015. Vol. 89. P. 410-420.

13. Alawi O.A., Sidik N.A.C., Mohammed H.A. A comprehensive review of fundamentals, preparation and applications of nanorefrigerants // *International*

Communications in Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 54. P. 81–95.

14. Кулешов Д. К., Красновский И. Н. Экспериментальное исследование характеристик домашнего холодильника, который использует нанофлюид R600a/TiO₂ // Холодильная техника та технологія. 2014. Т. 50. №. 5. С. 12-16.

15. Sabareesh R.K., Gobinath N., Sajith V., Das S., Sobhan C. Application of TiO₂ nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems—an experimental investigation // Int. J. Refrig. 2012. Vol. 35 (7). P. 1989–1996.

16. Choi S. U. S., Eastman J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles // ASME-Publications-Fed. 1995. Vol. 231. P. 99-106.

17. Zhelezny V., Geller V., Semenyuk Y., Nikulin A., Lukianov N., Lozovsky T., Shymchuk M. Effect of Al₂O₃ nanoparticles additives on the density, saturated vapor pressure, surface tension and viscosity of isopropyl alcohol // Int. J. Thermophys. 2018. Vol. 39 (38).

18. Humnic A., Humnic G., Fleaca C., Dumitrache F., Morjan I., Thermal conductivity, viscosity and surface tension of nanofluids based on FEC nanoparticles // Powder Technol. 2015. Vol. 284. P. 78–84.

19. Godson L., Raja B., Lal D.M., Wongwises S. Enhancement of heat transfer using nanofluids – an overview // Renew. Sustain. Energy Rev. 2010. Vol. 14 (2). P. 629–641.

20. Saidur R., Leong K., Mohammad H. A review on applications and challenges of nanofluids // Renew. Sustain. Energy Rev. 2011. Vol. 15 (3). P. 1646–1668.

21. Yang J. C., Li F. C., Zhou W. W., He Y. R., Jiang B. C. Experimental investigation on the thermal conductivity and shear viscosity of viscoelastic-fluid-based nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55, Issue 11. P. 3160-3166.

22. Fedele L., Colla L., Bobbo S. Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles // International journal of refrigeration. 2012. Vol. 35 (5). P. 1359-1366.

23. Hwang, Y. J., Lee, J. K., Lee, C. H., Jung, Y. M., Cheong, S. I., Lee, C. G., Ku, B.C., Jang S. P. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids //

Thermochim. Acta. 2007. 455 (1). P. 70-74.

24. Zhelezny V., Motovoy I., Khliyeva O., Lukianov N. An influence of Al₂O₃ nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of isopropyl alcohol in solid phase // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 671. P. 170-180.

25. Lee J. H., Hwang K. S., Jang S. P. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51 (11). P. 2651-2656.

26. Kole M., Dey T. K. Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids // *International Journal of Thermal Sciences*. 2012. Vol. 62. P. 61-70.

27. Wu D., Zhu H., Wang L., Liu L. Critical issues in nanofluids preparation, characterization and thermal conductivity // *Current Nanoscience*. 2009. Vol. 5 (1). P. 103-112.

28. Choi C., Yoo H. S., Oh J. M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants // *Current Applied Physics*. 2008. Vol. 8 (6). P. 710-712.

29. Devendiran D. K., Amirtham V. A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. P. 21-40.

30. Murshed S.S., Leong K.C., Yang C., Nguyen N.-T. Convective heat transfer characteristics of aqueous TiO₂ nanofluid under laminar flow conditions // *Int. J. Nanosci.* 2008. Vol. 7 (06). P. 325–331.

31. Minakov A., Lobasov A., Guzei D., Pryazhnikov M., Rudyak V.Y. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel // *Appl. Therm. Eng.* 2015. Vol. 88. P. 140–148.

32. Minakov A., Guzei D., Pryazhnikov M., Zhigarev V., Rudyak V.Y. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 102. P. 745–755.

33. Murshed S.S., De Castro C.N., Lourenço M., Lopes M., Santos F. A review of

boiling and convective heat transfer with nanofluids // *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2011. Vol. 15 (5). P. 2342–2354.

34. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Huminic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2019. Vol. 130. P. 1032-1044.

35. Khliyeva O., Ryabikin S., Lukianov N., Zhelezny V. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al_2O_3 nanoparticles // *Eastern european journal of enterprise technologies.* 2017. Vol. 1/8 (85). P. 4-12.

36. Ciloglu D., Bolukbasi A. A comprehensive review on pool penging of nanofluids // *Applied Thermal Engineering.* 2015. Vol. 84. P. 45–63.

37. Nikulin A., Khliyeva O., Lukianov N., Zhelezny V., Semenyuk, Y. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/ Al_2O_3 nanofluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 2018. Vol. 118. P. 746-757.

38. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V., Nikulin A. An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process// *Eastern European journal of enterprise technologies.* 2018. Vol. 4/8 (94). P. 59-66.

39. Авраменко А. А., Ковецкая М. М., Тыринов А. И. Особенности теплообмена при кипении наножидкостей // *Промышленная теплотехника.* 2017. 39 (3). С. 25-34.

40. Diao Y. H., Li C. Z., Zhao Y. H., Liu Y., Wang S. Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2015. Vol. 89. P. 110–115.

41. Ho C., Liu W, Chang Y., Lin C. Natural convection heat transfer of aluminawater nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study // *Int. J. Therm. Sci.* 2010. Vol. 49 (8). P. 1345–1353.

42. Huminic G., Huminic A., Morjan I., Dumitrache F. Experimental study of the thermal performance of thermosyphon heat pipe using iron oxide nanoparticles // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2011. Vol. 54 (1). P. 656–661.

43. Kang S.-W., Wei W.-C., Tsai S.-H., Yang S.-Y. Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance // *Appl. Therm. Eng.* 2006. Vol. 26 (17). P. 2377–2382.

44. Farajollahi B., Etemad S.G., Hojjat M. Heat transfer of nanofluids in a shell and tube heat exchanger // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010. Vol. 53 (1). P. 12–17.

45. Leong K., Saidur R., Mahlia T., Yau Y. Modeling of shell and tube heat recovery exchanger operated with nanofluid based coolants // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2012. Vol. 55 (4). P. 808–816.

46. Huang D., Wu Z., Sunden B. Pressure drop and convective heat transfer of Al₂O₃/water and MWCNT/water nanofluids in a chevron plate heat exchanger // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 89. P. 620–626.

47. Sohel M., Khaleduzzaman S., Saidur R., Hepbasli A., Sabri M., Mahbubul I. An experimental investigation of heat transfer enhancement of a minichannel heat sink using Al₂O₃–H₂O nanofluid // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. Vol. 74. P. 164–172.

48. Li J., Kleinstreuer C. Thermal performance of nanofluid flow in microchannels // *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2008. Vol, 29 (4). P. 1221–1232.

49. Li T., Lee J.-H., Wang R. Kang Y.T. Heat transfer characteristics of phase change nanocomposite materials for thermal energy storage application // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. Vol. 75. P. 1–11.

50. ГОСТ ISO/TS 80004-1-2014 Нанотехнологии. Часть 1. Основные термины и определения (ISO/TS 80004-1:2015, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 1: Core terms, IDT).

51. ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016 Нанотехнологии. Часть 4. Материалы наноструктурированные. Термины и определения (ISO/TS 80004-4:2011, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 4: Nanostructured materials, IDT).

52. ГОСТ ISO/TS 80004-6-2016 Нанотехнологии. Часть 6. Характеристики нанообъектов и методы их определения. Термины и определения (ISO/TS 80004-

6:2013, Nanotechnologies – Vocabulary – Part 6: Nano-object characterization, IDT).

53. ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineering, Inc. Atlanta: ASHRAE. 2017.

54. Calm J. M. The next generation of refrigerants—Historical review, considerations, and outlook //International Journal of Refrigeration. 2008. V. 31 (7). P. 1123-1133.

55. Кириллов В. В. Теоретические основы создания и оптимизации свойств хладоносителей для систем косвенного охлаждения: автореф.дис. на соискание степени доктора техн. наук: спец.: 05.04.03 «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения». Санкт-Петербург. 2009.

56. Yu W., Xie H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications // Journal of Nanomaterials. 2012. Vol. 2012. P. 1–17.

57. Ghadimi A., Saidur R., Metselaarn H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 54, Issue 17. P. 4051-4068.

58. Haddad Z., Abid C., Oztop H. F., Mataoui A. Review on how the researchers prepare their nanofluids // International Journal of Thermal Sciences. 2014. Vol. 76. P. 168–189.

59. Angayarkanni S. A., Philip J. Review on thermal properties of nanofluids: recent developments //Advances in colloid and interface science. 2015. Vol. 225. P. 146-176.

60. Shahrul I. M., Mahbubul I. M., Khaleduzzaman S. S., Saidur R., Sabri M. F. M. A comparative review on the specific heat of nanofluids for energy perspective //Renewable and sustainable energy reviews. 2014. Vol. 38. P. 88-98.

61. Gupta M., Singh V., Kumar R., Said Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 74. P. 638-670.

62. Murshed S. M. S., Estellé P. A state of the art review on viscosity of nanofluids //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 76. P. 1134-1152.

63. Einstein A. A new determination of molecular dimensions //Ann. Phys. 1906. Vol. 19. P. 289-306.
64. Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism, vol. 1. Clarendon press, 1881.
65. Kotia A., Borkakoti S., Deval P., Ghosh S. K. Review of interfacial layer's effect on thermal conductivity in nanofluid //Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 53. Issue. 6. P. 2199-2209.
66. Tamizi M., Kamalvand M., Namazian M. Dependency of the thermophysical properties of nanofluids on the excess adsorption //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 99. P. 630-637.
67. Yu W., Choi S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model //Journal of nanoparticle research. 2003. Vol. 5. Issue 1-2. P. 167-171.
68. Utomo A. T., Poth H., Robbins P. T., Pacek A. W. Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. Vol. 55, Issue 25-26. P. 7772-7781.
69. London A.L., Shah R., Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data, Academic Press, 1978.
70. Utomo A. T., Haghghi E. B., Zavareh A. I., Ghanbarpourgeravi M., Poth H., Khodabandeh R., Pacek A. W. The effect of nanoparticles on laminar heat transfer in a horizontal tube //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 69. P. 77-91.
71. Feng Z. Z., Li W. Laminar mixed convection of large-Prandtl-number in-tube nanofluid flow, Part I: Experimental study //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 65. P. 919-927.
72. Hussien A.A., Abdullah M.Z., Yusop N.M., Moh'd A A.-N., Atieh M.A., Mehrali M. Experiment on forced convective heat transfer enhancement using MWCNTs/GNPs hybrid nanofluid and mini-tube // Int. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 115. P. 1121–1131.

73. Ilhan B., Ertürk H. Experimental characterization of laminar forced convection of HBN-water nanofluid in circular pipe // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 111. P. 500–507.

74. Vajjha R.S., Das D.K., Kulkarni D.P. Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010. Vol. 53 (21). P. 4607–4618.

75. Sadeghinezhad E., Togun H., Mehrali M., Nejad P.S., Latibari S.T., Abdulrazzaq T., Kazi S., Metselaar H.S.C. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 81. P. 41–51.

76. Sundar L.S., Otero-Irurueta G., Singh M.K., Sousa A.C. Heat transfer and friction factor of multi-walled carbon nanotubes–Fe₃O₄ nanocomposite nanofluids flow in a tube with/without longitudinal strip inserts // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 100. P. 691–703.

77. Sundar L.S., Singh M.K., Sousa A.C. Turbulent heat transfer and friction factor of nanodiamond-nickel hybrid nanofluids flow in a tube: an experimental study // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 117. P. 223–234.

78. Duangthongsuk W., Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010. Vol. 53 (1). P.334–344.

79. Meyer J.P., McKrell T., Grote K. The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 58 (1-2). P. 597–609.

80. Liu D., Yu L. Single-phase thermal transport of nanofluids in a minichannel // *J. Heat Transfer.* 2011. Vol. 133 (3). P. 031009.

81. Fang X., Chen Y., Zhang H., Chen W., Dong A., Wang, R. Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: a comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2016. Vol. 62. P. 924-940.

82. Trisaksri V., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂–

R141b nanofluids //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52. Issue 5. P. 1582-1588.

83. Peng H., Ding G., Hu H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid //Experimental Thermal and Fluid Science. 2011. Vol. 35. Issue 6. P. 960-970.

84. Peng H., Ding G., Jiang W., Hu H., Gao, Y. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube // International Journal of Refrigeration. 2009. Vol. 32 (6). C. 1259-1270.

85. Tazarv S., Saffar-Avval M., Khalvati F., Mirzaee E., Mansoori Z. Experimental Investigation of Saturated Flow Boiling Heat Transfer to TiO₂/R141b Nanorefrigerant //Experimental Heat Transfer. 2016. Vol. 29 (2). C. 188-204.

86. Eid E. I., Khalaf-Allah R. A., Taher S. H., Al-Nagdy A. A. An experimental investigation of the effect of the addition of nano Aluminum oxide on pool boiling of refrigerant 134a //Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 53 (8). P. 2597-2607.

87. Chang T. B., Wang Z. L. Experimental investigation into effects of ultrasonic vibration on pool boiling heat transfer performance of horizontal low-finned U-tube in TiO₂/R141b nanofluid //Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 52 (11). P. 2381-2390.

88. Park K. J., Jung D. Boiling heat transfer enhancement with carbon nanotubes for refrigerants used in building air-conditioning //Energy and Buildings. 2007. Vol. 39, Issue 9. P. 1061-1064.

89. Park K. J., Jung D. Enhancement of nucleate boiling heat transfer using carbon nanotubes //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. Vol. 50, Issue 21-22. P. 4499-4502.

90. Sun B., Yang D. Experimental study on the heat transfer characteristics of nanorefrigerants in an internal thread copper tube //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. Vol. 64. P. 559-566.

91. Sun B., Wang H., Yang D. Effects of surface functionalization on the flow boiling heat transfer characteristics of MWCNT/R141b nanorefrigerants in smooth tube // Experimental Thermal and Fluid Science. 2018. Vol. 92. P. 162-173.

92. Zhang S. Y. Ge Z., Wang H. T., Wang H. Characteristics of flow boiling heat transfer and pressure drop of MWCNT–R123 Nanorefrigerant: experimental investigations and correlations // *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*. 2016. Vol. 20, Issue 2. P. 97-120.

93. Henderson, K., Park, Y. G., Liu, L., Jacobi, A. M. Flow-boiling heat transfer of R-134a-based nanofluids in a horizontal tube // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53(5-6), P. 944-951.

94. Tang X., Zhao Y. H., Diao Y. Experimental investigation of the nucleate pool boiling heat transfer characteristics of δ -Al₂O₃-R141b nanofluids on a horizontal plate // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 52. P. 88-96.

95. Naphon P., Thongjirakul C. Pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant-nanoparticle mixtures // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 52. P. 84-89.

96. Cheng L., Mewes D., Luke A. Boiling phenomena with surfactants and polymeric additives: a state-of-the-art review // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50(13-14). P. 2744-2771.

97. Ku B.C., Han Y.C., Lee J.E., Lee J.K., Park S.-H., Hwang Y.J. Tribological effects of fullerene (C₆₀) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2010. Vol. 11. P. 607–611.

98. Lee K., Hwang Y., Cheong S., Kwon L., Kim S., Lee J. Performance evaluation of nanolubricants of fullerene in refrigeration mineral oil // *Current Applied Physics*. 2009. Vol.9(2). P. 128-131.

99. Zhelezny V., Faik A., Khliyeva O., Motovoy I., Ivchenko D., Grosu Y., Nikulin A. Caloric properties of R600a solutions in compressor oil containing fullerenes C₆₀ // *Natural refrigerant solutions for warm climate countries: proc. the 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants*. Valencia, Spain. June 18 to 20, 2018.

100. Хлієва О. Я. Еколого-енергетичне обґрунтування переведення вітчизняного холодильного обладнання на альтернативні холодоагенти: автореф. дис. на

здобуття наукового ступеня канд. техн. наук: спец.: 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика». Одеса. 2003. 19 с.

101. Суходольская А.Б., Железный В.П., Хлиева О.Я. Эколого-энергетический анализ перспектив применения альтернативных хладагентов в тепловых насосах // Холодильная техника и технология. 2005. №2 (94). С. 37-45.

102. Железный В. П., Быковец Н. П., Хлиева О. Я., Степанова В. П., Суходольская А. Б. Методика расчета эквивалентной эмиссии парниковых газов в промышленности // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2004. № 6. С. 34-43.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛОЇДНОЇ СТІЙКОСТІ НАНОФЛЮЇДІВ ПЕРСПЕКТИВНИХ В ЯКОСТІ ХОЛОДОНОСІЇВ ТА РОБОЧИХ ТІЛ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН

В даному розділі наведено результати аналізу процедур приготування нанофлюїдів, перспективних для застосування в якості холодоносіїв та робочих тіл в холодильному обладнанні. Наводяться результати експериментального дослідження різноманітних факторів, які можуть сприяти отриманню колоїдно стійких нанофлюїдів. Наведено можливі процедури приготування нанофлюїдів, перспективних для застосування в якості холодоносіїв та робочих тіл холодильних машин та установок.

2.1 Вимоги до колоїдної стійкості нанофлюїдів

Приготування колоїдно стійких нанофлюїдів є ключовим питанням при дослідженні перспектив їх застосування в холодильній галузі.

Під колоїдною стійкістю нанофлюїдів розуміють сталість їх властивостей з часом. В першу чергу, це незмінність дисперсності, розподілу за об'ємом нанофлюїда частинок дисперсної фази і міжчастинкової взаємодії [1]. Стосовно до нанофлюїдів мається на увазі стійкість по відношенню до агрегації часток дисперсної фази (агрегативна стійкість) і до їх осадження [1]. Таким чином, при розгляді колоїдної стійкості нанофлюїдів слід виділити два аспекти: *седиментаційну та агрегативну* стійкість наночастинок [1].

У нанофлюїді наночастинок можуть спочатку знаходитись у вигляді агрегатів або агломератів «первинних частинок», або агрегати та агломерати можуть утворюватися в нанофлюїді з часом. Слід зупинитися окремо на розгляді поняття агломерат і агрегат.

Згідно з [2] агломератом наночастинок називається сукупність слабо пов'язаних між собою частинок або їх агрегатів, або тих і інших, площа зовнішньої поверхні яких дорівнює сумі площ зовнішніх поверхонь окремих компонентів. При-

чому сили, що з'єднують агломерат в одне ціле, є слабкими і обумовленими, наприклад, силами взаємодії Ван-дер-Ваальса або простим фізичним переплетінням частинок одна з одною.

Агрегатом називають сукупність сильно зв'язаних між собою частинок, загальна площа зовнішньої поверхні яких може бути значно менше обчисленої сумарної площі поверхні його окремих компонентів. Сили, що утримують частинки в складі агрегату, є більш міцними і обумовленими, наприклад, ковалентними зв'язками, або утвореними в результаті спікання, або складного фізичного переплетіння частинок одна з одною [2].

Агрегати та агломерати також називають «вторинними частинками», а їхні вхідні складові - «первинними частинками» [2].

Агрегативна стійкість нанофлюїдів пов'язана з декількома аспектами. Основні фактори, які визначають стійкість нанофлюїдів наступні:

- Нанофлюїди є багатофазними ультрадисперсними системами з високою поверхневою енергією наночастинок. Ступінь дисперсності наночастинок в рідині може змінюватися з часом унаслідок агрегації наночастинок (об'єднання їх в агломерати) під дією Ван-дер-Ваальсових сил. З цієї причини наночастинки в рідині можуть бути агрегативно нестійкими.

- Дисперговані у нанофлюїді наночастинки беруть участь у броунівському русі, наявність якого перешкоджає їх седиментації, тобто наночастинки в рідині можуть бути седиментаційно-стійкими.

Створення колоїдно стійкого нанофлюїда можливе тільки з використанням нанорозмірних частинок з паралельним використанням технологій, що перешкоджають їх агломерації [3].

Розробка технології приготування й оцінка колоїдної стійкості робочих тіл з добавками наночастинок мають передувати будь-яким дослідженням перспектив застосування нанофлюїдів у реальних холодильних системах. Причому, колоїдну стійкість нанофлюїду необхідно оцінювати не тільки в умовах його зберігання, але і в процесі проведення експериментів з вимірювання теплофізичних властивостей, дослідження процесів теплообміну й енергетичної ефективності холодильної

компресорної системи.

Слід зазначити, що в більшості наукових робіт, присвячених експериментальним дослідженням теплофізичних властивостей або процесів з використанням нанofлюїдів не приділяють належної уваги технології їх приготування. В результаті, навіть одні й ті ж дослідники не завжди отримують відтворювані результати як з теплофізичних властивостей нанofлюїдів, так і з показників ефективності устаткування при їх використанні.

Оглядових робіт, присвячених розгляду процедур створення нанofлюїдів, перспективних в якості теплоносіїв та холодоносіїв досить багато [4 – 15]. Однак робіт, в яких розглядається методика створення робочих тіл парокompресійних холодильних машин з домішками наночастинок, всього декілька [16-18].

2.2 Короткий огляд існуючих процедур створення нанofлюїдів

В даний час виділяють два основні методи створення нанofлюїдів: одноступеневий і двоступеневий.

Одноступеневий метод полягає у формуванні наночастинок безпосередньо в рідині. При цьому можливий хімічний синтез наночастинок у рідині або формування наночастинок шляхом випаровування макроскопічних кількостей речовини з подальшою конденсацією в базовій рідині. Таку методику неможливо використовувати для легкокиплячих базових рідин, до яких належать холодоагенти [6, 19]. У всіх наявних на сьогодні дослідженнях для приготування робочих тіл парокompресійних холодильних систем з добавками наночастинок використовується двоступеневий метод, заснований на диспергуванні сухих наночастинок у базовій рідині. Недоліком цього методу є складність якісного диспергування наночастинок у рідині. Хоча відзначається [6, 19], що ступінь дисперсності, а, отже, й інтенсифікація процесів тепловіддачі за рахунок присутності наночастинок у базовій рідині буде нижчою для нанofлюїдів, приготованих з використанням двоступеневого методу, у порівнянні з нанofлюїдами, приготованими за одноступеневим методом (при рівних концентраціях наночастинок у рідині).

Для диспергування сухих наночастинок у базовій рідині широко використовують ультразвукову обробку. Перевага цієї методики у порівнянні з механічним подрібненням з використанням молоткових елементів обумовлена підвищеною чистотою одержуваних нанофлюїдів і високою якістю диспергування наночастинок. Недоліками є нагрів рідини у процесі диспергування і високі енергетичні витрати на приготування нанофлюїдів. Альтернативою ультразвуковому диспергуванню при створенні нанофлюїдів є механічне подрібнення, здійснюване в кульових (бісерних), вібраційних, планетарних млинах. Недоліками механічного диспергування є тривалість процесу і можливе забруднення нанофлюїдів домішками від молоткових елементів.

Як показав попередній аналіз літературних джерел та власний досвід автора, використання виключно ультразвукової обробки для приготування нанофлюїдів не завжди є доцільним. Так, у власних дослідженнях показано [9], що для деяких систем рідина/наночастинок обробка ультразвуком приводить до укрупнення розміру наночастинок (розмір визначався методом спектротурбідиметрії) у рідині. В роботі [20] стверджується, що при короткочасній ультразвуковій обробці суспензій не вдається досягти потрібного ступеня подрібнення частинок, а при занадто тривалій обробці виникає агрегація тонкодисперсних частинок. У роботі [21] показано, що при тривалій ультразвуковій обробці нанофлюїдів на основі етиленгліколю і наночастинок ZnO подрібнені наночастинок знову починають з'єднуватися в кластери. У роботі [22] показано, що значення дзета-потенціалу для нанофлюїдів на основі води і наночастинок Al_2O_3 після ультразвукової обробки протягом 5 годин різко зростало (тобто колоїдна стійкість збільшувалася). Однак при подальшій ультразвуковій обробці поступово починало знижуватися (що говорить про зниження колоїдної стійкості нанофлюїду). Авторами статті [22] було зроблено висновок про необхідність визначення оптимальної тривалості ультразвукової обробки нанофлюїдів у процесі їх приготування.

У наукових публікаціях до сих пір відсутні матеріали, в яких давалися б достатньо чіткі рекомендації щодо тривалості процедури диспергування наночастинок у базовій рідині. Однак у низці робіт відзначається необхідність контролю ро-

зміру наночастинок у процесі створення нанофлюїдів [23, 24], дзета-потенціалу [22], теплопровідності [25, 26] або в'язкості [25]. Відомо, що розмір наночастинок у рідині визначає такі властивості нанофлюїдів як теплопровідність і в'язкість. Саме ці властивості нанофлюїдів визначають перспективність їх застосування в якості робочих тіл парокомпресійних холодильних машин.

Деякі дослідники пропонують використовувати поєднання ультразвукового і механічного диспергування наночастинок [24, 27]. За такого підходу при механічному дробленні в агрегатах наночастинок утворюються тріщини, через які при подальшій ультразвуковій обробці агрегати руйнуються у результаті кавітаційних явищ у рідині. Результати проведеного попереднього дослідження [9] підтверджують доцільність застосування методики, яка складається з комбінації ультразвукової і механічної обробки (з попереднім ультразвуковим диспергуванням). Доцільність комбінованого підходу до диспергування нанофлюїдів буде сприяти зниженню енерговитрат на здійснення процедури створення нанофлюїдів, оскільки ультразвукова обробка характеризується великою витратою енергії у порівнянні з механічною.

2.3 Вивчення колоїдної стійкості та розробка процедури створення об'єктів дослідження

В даному підрозділі наведено процедури створення нанофлюїдів, досліджуваних у наведеній дисертаційній роботі та розглянути результати експериментального дослідження їх колоїдної стійкості.

Об'єктами дослідження були такі нанофлюїди які є як модельними системами, так й є перспективними для застосування в холодильній техніці речовинами:

- модельна система холодоагент R141b/наночастинок TiO_2 без ПАР і з різним вмістом ПАР різної природи;
- розчини холодоагент R600a / мінеральне компресорне масло / наночастинок TiO_2 або Al_2O_3 / ПАР олеїнова кислота;
- розчини холодоагент R600a / мінеральне компресорне масло / фулерени

C₆₀;

- модельна система ізопропіловий спирт / наночастинки Al₂O₃;
- модельна система тетралин / фулерени C₆₀;
- нанотеплоносії складу пропіленгліколь / вода / речовина, що регулює в'язкість / наночастинки Al₂O₃ (0,4824 / 0,4638 / 0,0485 / 0,0053 кг·кг⁻¹).

2.3.1 Методи та обладнання експериментального дослідження

Для визначення масових концентрацій наночастинок у зразках нанофлюїдів застосовувався гравіметричний метод з використанням аналітичних ваг AND GR-300 з невизначеністю ± 0,5 мг.

Ультразвукова обробка нанофлюїдів проводилася з використанням ультразвукового заглибного генератора УЗГ 13-0.1/22 (частота 22 кГц, потужність 0,1 кВт) (для нанофлюїдів на основі базових рідин з низьким тиском насичених парів при кімнатній температурі) або з використанням ультразвукової ванни Codison CD 4800 (частота 42 кГц, потужність 0,07 кВт) (для нанофлюїдів на основі базових рідин з високим тиском насичених парів при кімнатній температурі).

Для механічного диспергування нанофлюїду використовувався бісерний млин, заповнений кульками з ZrO₂ діаметром 2 мм.

Для визначення середнього розміру наночастинок у нанофлюїді застосовувався метод спектротурбідиметрії [28-30]. Середній розмір наночастинок було прийнято як параметр для контролю якості створених нанофлюїдів. Слід зазначити, що «істинний» розмір наночастинок можна визначити лише методом електронної мікроскопії, який не можна застосувати для дослідження наночастинок у рідинах. На сьогодні для оцінки розміру наночастинок у рідині найбільшого поширення на практиці отримав метод динамічного розсіювання світла (метод фотонної кореляційної спектроскопії). Але певні перспективи є у простішого з позиції апаратного оформлення методу, заснованого на явищі статичного розсіювання світла на неоднорідностях ув рідині - методу спектротурбідиметрії.

Необхідною умовою використання методу спектротурбідиметрії для оцінки розміру наночастинок є відсутність поглинання світла наночастинками, а також

відсутність вторинного світлорозсіювання (цих умов можна дотримуватися при малих концентраціях дисперсної фази). Для багатьох перспективних для застосування в холодильній галузі нанофлюїдів (на основі таких рідин як галоїдопохідні холодоагенти та компресорні мастила з добавками наночастинок оксидів металів, наприклад, TiO_2 , Al_2O_3) необхідні умови дотримуються.

Практична реалізація методу спектротурбідиметрії при дослідженні розміру наночастинок у нанофлюїдах полягала у вимірюванні спектральної залежності коефіцієнта пропускання світла T зразками нанофлюїдів відносно коефіцієнта пропускання світла зразком базової рідини. Вимірювання проводилися з використанням спектрофотометра Shimadzu UV-120-02 у плоскопаралельних оптичних комірках з певною довжиною оптичного шляху при декількох значеннях довжини хвилі λ видимої та ближньої інфрачервоної частини спектру.

2.3.2 Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості нанофлюїдів на основі холодоагенту R141b та наночастинок TiO_2

У представленому дослідженні в якості базова рідина для приготування нанофлюїдів було обрано холодоагент R141b, CAS № 1717-00-6 (виробник Zhejiang mr refrigerant co. Ltd, Китай). В якості добавки використовувалися наночастинок TiO_2 CAS № 1317-70-0 з розміром у порошок менш 25 нм (Sigma-Aldrich) і з середнім розміром 18 нм (Wenzhou Jingcheng Chemical Co).

Вибір матеріалу наночастинок (TiO_2) був обумовлений їхньою хімічною стабільністю, відпрацьованою технологією виробництва і низькою вартістю. Холодоагент R141b було обрано в якості базової речовини з кількох причин. По-перше, цей холодоагент знаходиться в рідкому стані при температурі навколишнього середовища і атмосферному тиску, тому його зручно використовувати при приготуванні нанофлюїду. По-друге, незважаючи на відмінності у фізичних властивостях R141b і тих холодоагентів, що знайшли в даний час широке застосування (R134a, R410A й інші), всі вони належать до однієї групи галоїдопохідних вуглеводнів. Тому закономірності, отримані при дослідженні процедур створення модельної системи R141b/наночастинок, можуть бути поширені й на інші галої-

допохідні холодоагенти, які широко використовуються в холодильній промисловості.

Для забезпечення колоїдної стійкості нанофлюїдів проводився підбір різних за своєю природою поверхнево-активних речовин (ПАР) серед наступних: аніонні ПАР SDBS (Sodium dodecylbenzenesulfonate, CAS № 25155-30-0) і SDS (Sodium dodecyl sulfate, CAS № 151-21-3); катіонна ПАР СТАВ (Cetyl trimethylammonium bromide, CAS № 57-09-0); неіоногенна ПАР Span 80 (Sorbitane monooleate, CAS № 1338-43-8). Усі ПАР виробництва Sigma-Aldrich.

Для приготування усіх зразків нанофлюїдів використовувався двоступеневий метод, який складався з таких етапів:

- ультразвукова обробка суміші наночастинок і холодоагенту в присутності ПАР або без додавання ПАР протягом 30 хвилин;
- механічне диспергування протягом 12 годин;
- ультразвукова обробка протягом 30 хвилин.

Створити колоїдно стійкий нанофлюїд R141b/наночастинки TiO_2 без використання ПАР не вдалося (див. рис. 2.1). Причому про агрегативну нестійкість отриманого флюїду говорить той факт, що рідина над осадом практично не містить наночастинок. Цей результат суперечить інформації, наведеній у роботі [31], де відзначається задовільна колоїдна стійкість (протягом 3-4 тижнів) системи R141b/наночастинки TiO_2 (0,01 - 0,05 об. %, середній розмір наночастинок у порошок 21 нм), приготованої за допомогою ультразвукового диспергування протягом 6 годин без добавок ПАР.

Для забезпечення колоїдної стійкості нанофлюїда було проведено додаткові дослідження з вибору типу і концентрації ПАР [9, 32]. Розглядалися різні за своєю природою ПАР: аніонні SDBS і SDS; катіонна СТАВ; неіоногенна Span 80. При приготуванні усіх зразків нанофлюїдів з добавками ПАР необхідна кількість ПАР додавалася перед останнім етапом приготування - ультразвуковою обробкою. Концентрації ПАР у зразках нанофлюїду R141b/наночастинки TiO_2 наведено у таблиці 2.1.

Фотографії усіх зразків нанофлюїду з наночастинками TiO_2 (Wenzhou

Jingcheng Chemical Co) $0,00088 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ через 20 годин після приготування наведено на рис. 2.2.

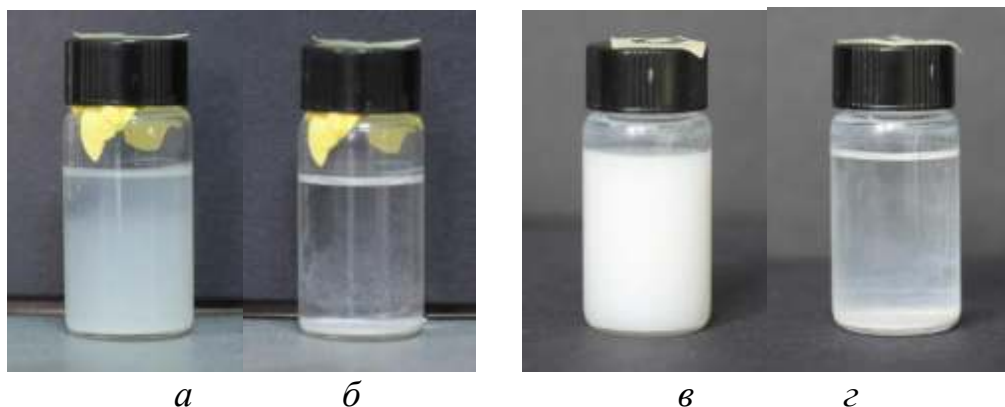


Рисунок 2.1 – Зразки нанофлюїдів R141b/наночастинки TiO_2 : а і б - наночастинки TiO_2 виробництва Sigma Aldrich ($0,00088 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$): фотографії зроблені через 1 годину і через 18 годин після приготування, відповідно; в і г - наночастинки TiO_2 виробництва Wenzhou Jingcheng Chemical Co ($0,0010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$): фотографії зроблені відразу і через 20 годин після приготування, відповідно

Таблиця 2.1 – Концентрації ПАР у зразках нанофлюїду R141b/наночастинки TiO_2

№ зразка	ПАР / $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	№ зразка	ПАР / $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	№ зразка	ПАР / $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	№ зразка	ПАР / $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$
наночастинки TiO_2 (Wenzhou Jingcheng Chemical Co)							
0	Відсутня	5	Span/0,00016	10	SDBS/0,00015	14	SDS/0,00014
1	СТАВ/0,00016	6	Span/0,00038	11	SDBS/0,00045	15	SDS/0,00034
2	СТАВ/0,00042	7	Span/0,00058	12	SDBS/0,00092	16	SDS/0,00063
3	СТАВ/0,00080	8	Span/0,00082	13	SDBS/0,00108	17	SDS/0,00083
4	СТАВ/0,00086	9	Span/0,00118				
наночастинки TiO_2 (Sigma Aldrich)							
0	Відсутня	2	СТАВ/0,00108	4	Span/0,00062		
1	СТАВ/0,00052	3	Span/0,00035	5	Span/0,00103		

Для оцінки впливу добавок ПАР на ступінь дисперсності отриманих нанофлюїдів для зразків з наночастинками TiO_2 (Wenzhou Jingcheng Chemical Co), які виявили достатню колоїдну стійкість, було проведено вимірювання середнього

розміру наночастинок відразу після приготування і через 20 годин. Зразки, для яких спостерігалось осідання наночастинок відразу після приготування (усі зразки з ПАР СТАВ і SDS) для подальших досліджень не використовувалися. Крім того, для оцінки можливості підвищення ступеня дисперсності нанофлюїдів на основі R141b і наночастинок TiO_2 (Wenzhou Jingcheng Chemical Co) стійкі зразки (з добавками ПАР Span 80 і SDBS) піддавалися додатковому ультразвуковому диспергуванню. На першому етапі ультразвукова обробка проводилася протягом 2,5 годин, на другому - протягом 2,0 годин. Після кожного етапу диспергування проводилося вимірювання розміру наночастинок у приготованих зразках.



Рисунок 2.2 – Фотографії нанофлюїду R141b/наночастинок TiO_2 (Wenzhou Jingcheng Chemical Co) ($0,00088/0,99912 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) (Номер на кришці відповідає номеру зразка в таблиці 2.1)

Результати вимірювання розміру наночастинок на різних етапах дослідження зразків нанофлюїдів у залежності від концентрації ПАР наведено на рис. 2.3. Як впливає з наведеного рисунка, високого ступеня дисперсності (менше 100 нм) у досліджуваних зразках отримати не вдалося, навіть з використанням додаткової ультразвукової обробки. Хоча ультразвукова обробка, яка була проведена у присутності ПАР, все ж сприяла зменшенню розміру наночастинок у рідині – рис. 2.3.

Вибір оптимальної концентрації ПАР є дуже складним завданням. Слід врахувати, що надлишок ПАР може сприяти укрупненню наночастинок. А зі зменшенням розміру наночастинок у нанофлюїді (в результаті ультразвукової обробки) збільшується необхідна кількість ПАР для забезпечення колоїдної стійкості (через збільшення питомої поверхні наночастинок). Тому для кожного конкретно-

го зразка нанофлюїдів перед початком дослідження їхніх теплофізичних властивостей або процесів теплообміну необхідно експериментально визначати оптимальну концентрацію ПАР.

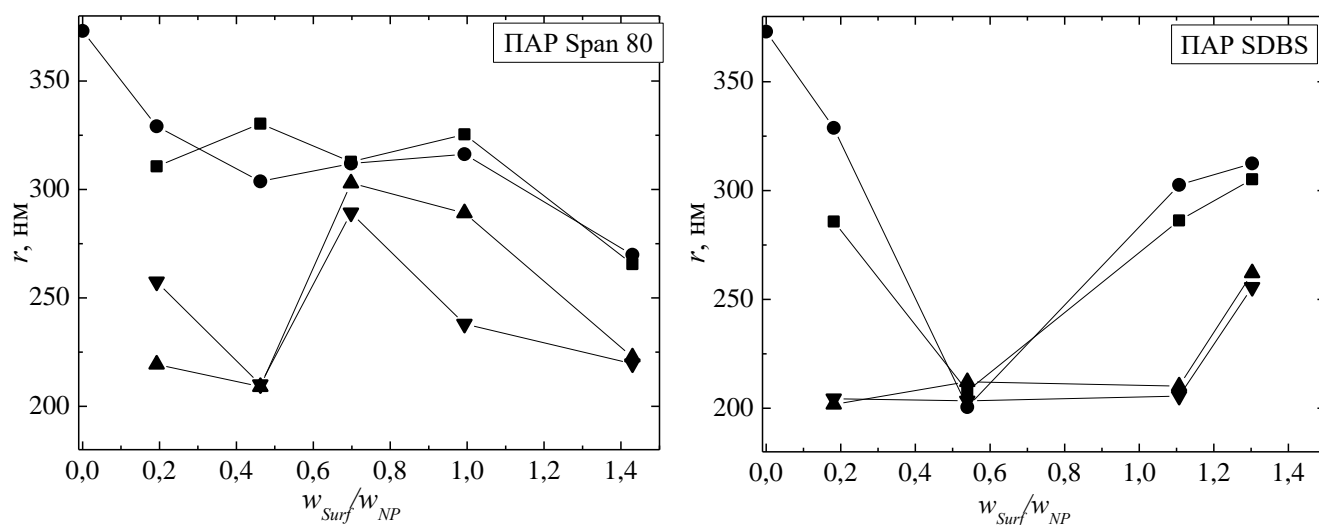


Рисунок 2.3 – Залежність середнього розміру наночастинок (метод спектротурбідиметрії) у нанофлюїдах в залежності від концентрації ПАР: а – ПАВ Span 80; б - ПАВ SDBS: ● – відразу після приготування, ■ – через 20 годин зберігання, ▲ – через 20 годин зберігання та 2,5 години ультразвукової обробки; ▼ – через 20 годин зберігання та 4,5 години ультразвукової обробки

Слід зауважити, що отримані результати щодо вибору типу ПАР не у повній мірі узгоджуються з даними, наведеними в роботах [17, 18]. У роботі [18] для системи R113/наночастинки Cu, приготованої з використанням трьох типів ПАР (катионної, аніонної та неіоногенної) для усіх зразків показано задовільну колоїдну стійкість, яку оцінювалася методом спектрофотометрії, протягом 24 год. Причому автори [18] відзначають, що стійкість нанофлюїдів була порівнянною у присутності усіх ПАР. Такий висновок видається сумнівним. У подальших дослідженнях цих авторів [17] для системи R141b/наночастинки TiO_2 проводилися дослідження колоїдної стійкості при використанні добавок трьох видів ПАР: аніонної, катионної та іоногенної. Автори також стверджували про можливість використання усіх типів ПАР для створення стійких нанофлюїдів. У [17] для усіх розглянутих ПАР експериментально підтверджено наявність оптимальної концентрації, яка забезпечує найменший розмір наночастинок у нанофлюїді після його приготування.

Проведені дослідження показують, що через 20 годин зберігання приготованих нанофлюїдів у статичних умовах навіть у зразках R141b/наночастинки TiO_2 (Wenzhou Jingcheng Chemical Co) з ПАР Span 80 і SDBS спостерігався невеликий щільний осад. При цьому зразки нанофлюїдів мали різну оптичну густину по висоті комірок. Додатково для цих зразків було виміряно середній розмір наночастинок через 20 годин їх зберігання (з попередніми збовтуванням зразків перед заправкою в оптичні комірки). Отримані дані показують, що середній розмір наночастинок у всіх зразках за увесь період зберігання практично не змінився. Слід зазначити, що середній розмір наночастинок у отриманих нанофлюїдах був досить великим для того, щоб усі наночастинки приймали участь у броунівському русі (рис. 2.3). Це є причиною часткового осідання великих частинок у комірках. Разом з тим слід зазначити, що у нанофлюїді, приготованому з використанням ПАР SDBS, при його подальшому зберіганні (протягом місяця) спостерігалось укрупнення (тобто була констатована погана агрегативна стійкість) й осідання наночастинок, чого не спостерігалось у нанофлюїді з ПАР Span 80.

За описаною вище технологією також було приготовано нанофлюїди з використанням наночастинок TiO_2 виробництва Sigma Aldrich. Типи і концентрації використаних ПАР наведено у таблиці 2.1. Створити колоїдно стійкі зразки нанофлюїдів з використанням ПАР СТАВ не вдалося. Для зразків R141b/наночастинки TiO_2 (Sigma Aldrich) з ПАР Span 80 незалежно від концентрації ПАР через 18 годин зберігання візуальні спостереження показали наявність градієнта оптичної густини нанофлюїдів по висоті комірок. Слід зазначити, що осаду наночастинок на дні оптичних комірок не спостерігалось. Розмір наночастинок TiO_2 (Sigma Aldrich) у даних зразках нанофлюїдів відразу після приготування становив 131 ± 3 нм, що істотно нижче, ніж для нанофлюїдів з наночастинками TiO_2 (Wenzhou Jingcheng Chemical Co) при дотриманні однакової процедури створення. Причому залежності отриманого розміру наночастинок від концентрації ПАР виявлено не було (в межах невизначеності вимірювання розміру наночастинок).

Пояснити відмінність розмірів наночастинок у нанофлюїдах при використанні наночастинок різних виробників (з приблизно однаковим початковим розміром

у порошку) можна як невідповідністю заявленого виробником розміру наночастинок реальним розмірам, так і зміною заявленого виробником розміру наночастинок з часом у процесі їх зберігання.

Результати проведених досліджень (див. рис. 2.3) показують, що додаткове ультразвукове диспергування зразків нанофлюїдів з ПАР призводить до суттєвого зменшення розміру наночастинок. На підставі отриманих даних можна зробити висновок про те, що диспергування наночастинок TiO_2 у холодоагенті R141b необхідно здійснювати у присутності ПАР, а не вводити ПАР на останньому етапі приготування нанофлюїдів. На думку авторів, ПАР виконує роль диспергувального агента при створенні нанофлюїдів. Так, при приготуванні зразків нанофлюїдів з наночастинками TiO_2 (Sigma Aldrich) $0,0010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ і ПАР Span 80 $0,0010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (рис. 2.4) для досліджень процесів кипіння ПАР додавалося перед механічним диспергуванням наночастинок в бісерному млині, а не після, як в наведених раніше дослідженнях. У цьому випадку розмір наночастинок, виміряний методом спектротурбідиметрії відразу після приготування нанофлюїдів, склав (100...107) нм (результат багаторазових вимірювань), що менше отриманих раніше розмірів 131 ± 3 нм при однаковій тривалості всіх етапів диспергування.



Рисунок 2.4 – Зображення зразків нанофлюїду R141b/наночастинок TiO_2 $0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ / ПАР Span-80 $0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (ліворуч) і чистого R141 (праворуч) при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ в герметичних оптичних комірках з довжиною оптичного шляху **4,05** мм

Для дослідження колоїдної стійкості нанохолодоагенту при проведенні експериментального дослідження процесів його кипіння і при подальшому його зберіганні використовувався зразок нанофлюїду складу: холодоагент R141b $0,998\%$ $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$, наночастинок TiO_2 (Sigma Aldrich) $0,0010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ і ПАР Span 80

0,0010 кг·кг⁻¹.

Дослідження розміру наночастинок у приготованих зразках проводилися багаторазово протягом двох місяців. Ці вимірювання здійснювалися відразу після приготування нанофлюїду, в процесі проведення експерименту з дослідження тепловіддачі при кипінні (відбір зразків здійснювався безпосередньо з експериментальної установки), а також після закінчення експерименту при зберіганні нанофлюїду в герметичній ємності. Перед відбором нанофлюїдів з ємності зразок піддавався інтенсивному перемішуванню. Результати зміни розмірів наночастинок у нанофлюїді з часом наведено рис. 2.5.

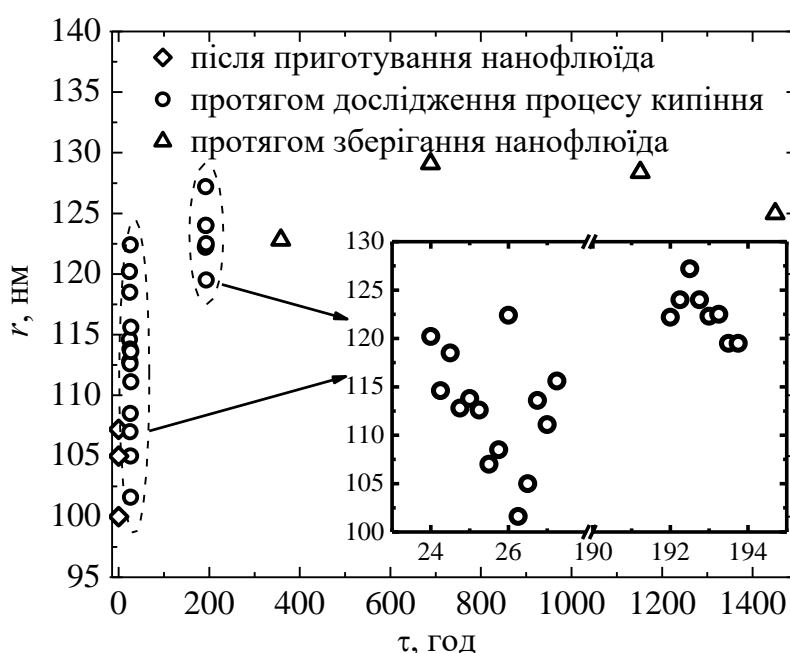


Рисунок 2.5 – Зміна середнього розміру наночастинок (метод спектротурбідиметрії) у нанофлюїді R141b/TiO₂/ПАР Span 80 з часом

Результати проведених досліджень показують, що після приготування зразків нанофлюїдів протягом декількох днів розмір наночастинок збільшується з середнього розміру 104 нм до середнього розміру 125 нм. Подальшого збільшення розмірів наночастинок у досліджуваних нанофлюїдах з часом не спостерігалось.

Розкид значень розмірів наночастинок при кипінні нанохолодоагенту, ймовірно, можна пояснити наявністю тимчасових кластерів, які утворювалися у зонах локальних підвищень концентрацій наночастинок, що виникали внаслідок тепло-

масообмінних процесів.

2.3.3 Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості нанофлюїдів на основі розчинів холодоагенту в компресорному маслі

При дослідженні перспектив застосування нанофлюїдів в якості робочих тіл пароконпресійних холодильних машин слід враховувати, що реальним робочим тілом є розчин холодоагенту в компресорному маслі. З урахуванням факту участі холодоагенту в фазових перетвореннях при здійсненні холодильного термодинамічного циклу, наночастинки доцільно додавати в компресорне масло.

Складність реалізації такої технології полягає в тому, що компресорні масла зазвичай відрізняються високою в'язкістю. Тому ультразвукове і механічне диспергування наночастинок у них буде відносно малоефективним процесом. Використання в якості проміжного агента малов'язкої речовини при приготуванні наномасла сприятиме отриманню високодисперсного нанофлюїда [27].

З урахуванням викладеного, було проведено дослідження процедури приготування робочих тіл пароконпресійних холодильних машин, що містять наночастинки оксидів металів (Al_2O_3 та TiO_2) та фулерени C_{60} .

Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості РХМ з додаванням наночастинок Al_2O_3 та TiO_2

У представленому дослідженні в якості базової рідини для приготування нанофлюїдів було обрано холодоагент R600a (ізобутан) (CAS № 75-28-5) з чистотою 0,998 % $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Характеристики мінерального компресорного масла (в'язкість $8 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$), обраного для створення РХМ, наведено в табл. Б.3 додатку Б. В якості добавки використовувалися наночастинки TiO_2 (CAS № 1317-70-0) з розміром у порошку менш ніж 25 нм (Sigma-Aldrich) і Al_2O_3 (CAS #1344-28-1) з розміром у порошку менш ніж 50 нм (Sigma-Aldrich).

На першому етапі наночастинки піддавалися обробці у бісерному млині в середовищі н-гексану (CAS № 110-54-3) з додаванням ПАР протягом 10-12 годин. Н-гексан виконував роль проміжної рідини з низькою в'язкістю для покращення процесу диспергування сухих наночастинок у рідині. Враховуючи природу обра-

них наночастинок (Al_2O_3 та TiO_2) та базових рідин (мінеральне масло, ізобутан та н-гексан, які відносяться до вуглеводнів), досвід, отриманий при дослідженні стійкості системи R141b/ TiO_2 (попередній підрозділ), та досвід авторів роботи [27] було прийняте рішення використовувати неіоногенну ПАР - олеїнову кислоту (CAS № 112-80). Олеїнова кислота є розчинним в вуглеводнях неіоногенним ПАР, яка може сорбуватися на зарядженій поверхні наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 .

На другому етапі проводилося змішування нанофлюїду н-гексан/наночастинок/ПАР з компресорним маслом. Отриманий нанофлюїд (н-гексан/наночастинок /ПАР /компресорне масло) піддавався ультразвуковому диспергуванню протягом 30 хвилин. На останньому етапі приготування нанофлюїду на основі компресорного масла проводилося видалення н-гексану вакуумуванням. Далі нанофлюїд компресорне масло/наночастинок/ПАР змішувалася з необхідною кількістю холодоагенту R600a.

Для дослідження колоїдної стійкості отриманого нанофлюїду в умовах його постійного перемішування (що імітує умови використання об'єкту дослідження в реальній холодильній машині) та в умовах статичного зберігання (умови простою в роботі холодильної машини) був виконаний наступний експеримент. Для двох зразків масла з наночастинками Al_2O_3 ($0,0052 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) виконувалось вимірювання розміру наночастинок методом спектротурбідиметрії з використанням спектрофотометра Shimadzu UV-120-0. Вимірювання оптичної густини проводилися в оптичних комірках с довжиною оптичного путі 1,10 мм в інтервалі довжин хвиль 500 – 700 нм відносно чистого масла. Вимірювання проводилися протягом 12 днів, при цьому перший зразок масла в оптичній комірці зберігався в статичних умовах, а другий зразок збовтувався в комірці перед кожним вимірюванням оптичної густини.

Фотографія приготованого зразка компресорного масла з наночастинками Al_2O_3 з концентрацією $0,0052 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в оптичних комірках показана на рис. 2.6.

Зміну середнього розміру наночастинок в зразках компресорного масла з наночастинками Al_2O_3 з часом наведено на рис. 2.7. Як слідує з рис. 2.7, середній розмір наночастинок поступово змінювався протягом 12 діб з 130 до 110 нм при

зберіганні зразків в статичних умовах, що пояснюється частковою седиментацією відносно крупних наночастинок. Але для зразка, який піддавався збовтуванню, розмір наночастинок протягом 12 діб оставався приблизно постійним. Цей важливий результат показує, що наночастинок у базовій рідині є агрегативно стійкими й будуть зберігати постійний розмір в умовах роботи холодильної машини. Схожий результат був отриманий в роботі [33], але автори піддавали нанофлюїд (вода/наночастинок оксиду металу) ультразвуковій обробці, що не є можливим в реальних умовах експлуатації енергетичного обладнання.



Рисунок 2.6 – Зображення зразків компресорного масла з наночастинками Al_2O_3 з концентрацією $0,0052 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (ліворуч) і чистого компресорного масла (праворуч) в оптичних комірках з довжиною оптичного шляху 1,1 мм

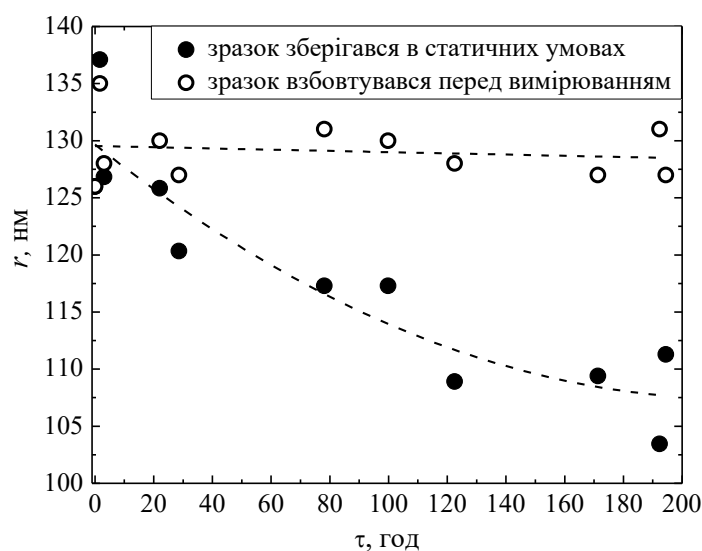


Рисунок 2.7 – Зміна середнього розміру наночастинок (метод спектротурбідиметрії) у нанофлюїді мінеральне компресорне масло/наночастинок Al_2O_3 ($0,0052 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) з часом

Визначити середній розмір наночастинок методом спектротурбідиметрії в нанофлюїді мінеральне компресорне масло/наночастинки TiO_2 ($0,0050 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) було неможливим (наночастинки TiO_2 мають значення коефіцієнта заломлення світла значно вище, ніж для чистого масла, тому такий нанофлюїд характеризувався такими великими значеннями оптичної густини в інтервалі довжин хвиль видимої та ближньої інфрачервоної частини спектру, при яких метод не можливо застосувати). Але було проведено вимірювання оптичної густини двох зразків цього нанофлюїду відносно чистого масла протягом 15 діб при довжині хвилі світла 900 нм. Перший зразок, який піддавався збовтуванню, показав незмінність оптичної густини з часом, а другий зразок, який зберігався в статичних умовах, характеризувався зниженням величини оптичної густини у зв'язку з седиментацією частинок, які не приймають участі у броунівському русі.

Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості РХМ з додаванням фулеренів C_{60}

Великі перспективи в якості добавок до компресорних мастил для пароконпресійного холодильного обладнання мають фулерени C_{60} . Як показують проведені дослідження [34, 35], ці вуглецеві наночастинки сприяють зниженню втрат енергії при терті в деталях компресора холодильних машин.

Фулерени, що знаходяться в рідині, можна розглядати одночасно як наночастинки та як великі молекули (рис. 2.8) [36]. Фулерени відносяться до унікального класу неполярних молекул, що мають замкнуту двовимірну структуру.

Оскільки значення питомої поверхневої енергії взаємодії молекул фулеренів C_{60} одна з однією і з молекулами розчинника незначно відрізняються, фулерени в розчинах виявляють тенденцію до утворення агрегатів і кластерів, що складаються з декількох молекул [37]. Але при невеликих концентраціях частка речовини, що знаходиться у вигляді кластерів, невисока [37]. Виходячи з вищесказаного, процедура створення нанофлюїдів з добавками фулеренів C_{60} не вимагає настільки тривалого диспергування, як для оксидних наночастинок та використання ПАВ. Основною складністю при розробці процедури створення мастил з доміш-

ками C_{60} є визначення концентрації фулеренів C_{60} у базовій рідині, при якій не буде відбуватися утворення кластерів і випадання їх у вигляді осаду. Тобто визначення концентрації, що відповідає стану насичення.

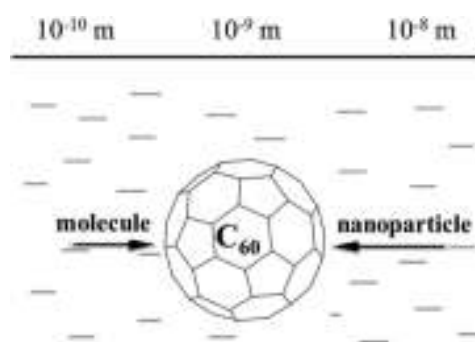


Рисунок 2.8 - Масштаб молекули фулерену C_{60} [36]

Розчинність фулеренів в різних рідинах добре досліджена [36 -38]. Відомо, що неполярні молекули C_{60} добре розчиняються в неполярних рідинах, причому розчинність зростає з ростом молекулярної маси розчинника [36 -38]. Крім того, при близьких значеннях молекулярної маси базових рідин розчинність буде вище в ароматичних вуглеводнях, ніж у лінійних та циклічних. Тому мінеральні масла є підходящою базовою рідиною для створення нанофлюїдів з добавками фулеренів C_{60} . Ряд дослідників у своїх публікаціях [34, 35] вказують на добру розчинність фулеренів в мінеральних маслах. Разом з тим, слід зауважити, що в роботі [39] автори при створенні мастила з домішками C_{60} використовували ПАР (span-40 і tween-60), що на думку автора не є доцільним.

У представленому дослідженні в якості базової рідини для створення нанофлюїдів було обрано холодоагент R600a (ізобутан) (CAS № 75-28-5) з чистотою 0,998 % $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Характеристики мінерального компресорного масла марки ХФ-12-16, обраного для приготування РХМ, наведено в табл. Б.3 додатку Б. В якості добавки використовувалися фулерени C_{60} (CAS № 99685-96-8) з чистотою 0,999 $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Для приготування мінерального компресорного масла з домішками фулеренів, призначеного для використання в парокompресійній холодильній машині, використовувалася обробка компресорного масла зі вмістом певної кількості фуле-

ренів протягом 2 годин з використанням ультразвукової ванни. Проведені дослідження показують, що збільшення часу диспергування не призводить до змін якості диспергування фулеренів C_{60} у маслі. Цей висновок оснований на незмінності коефіцієнту поглинання світла (при довжині хвилі 397), який періодично вимірювався з використанням спектрофотометру Shimadzu UV-120-02 протягом ультразвукової обробки масла. Як показано в роботі [36], пік поглинання світла фулеренами залежить від розчинника, але в [40] показано, що для розчинів C_{60} в мінеральних маслах цей пік відповідає 397 нм. Проведені дослідження з використанням спектрофотометру Shimadzu UV-120-02 підтвердили, що найбільше поглинання світла видимої частини спектру лежить в межах 395-402 нм.

Для визначення концентрації, яка відповідає повній розчинності фулеренів в маслі було підготовано декілька зразків масла з різним змістом C_{60} . Зображення зразків масла з вмістом фулеренів $0,0013$ і $0,0050$ $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ наведені на рисунку 2.9. Слід звернути увагу, що зразки масла, що містили фулерени з концентрацією більш ніж $0,0020$ $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ не були прозорими. В таких розчинах напевно утворювалися кластери з декількох молекул C_{60} . Досить повна розчинність фулеренів в розглянутому компресорному маслі при 20 °С відповідає концентрації $0,0020$ $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ C_{60} та менше – рис. 2.10.

Для розчину фулеренів C_{60} в маслі зміни коефіцієнта поглинання світла з часом (протягом трьох місяців) не спостерігалось. Був зроблений висновок про стійкість розчину з часом.

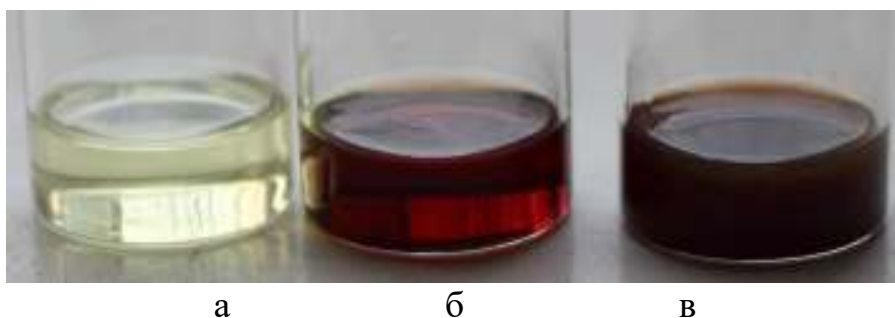


Рисунок 2.9 - Зображення зразків компресорного мінерального масла, що містять фулерени C_{60} при 20 °С: а – мінеральне масло без домішок; б та в – компресорне масло з домішками фулеренів C_{60} $0,0013$ та $0,0050$ $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$, відповідно.

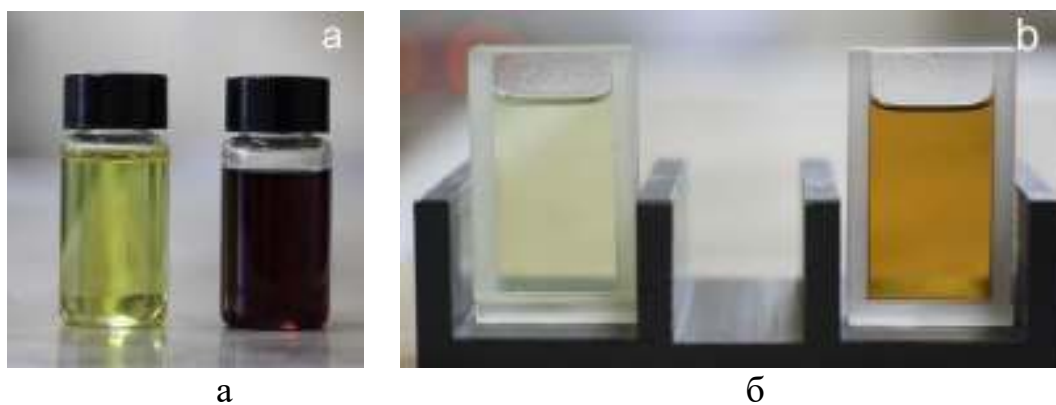


Рисунок 2.10 - Зображення зразків компресорного мінерального масла (базова рідина) та масла зі вмістом $0,0020 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ C}_{60}$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$: а – в лабораторних контейнерах; б – в оптичних комірках з довжиною оптичного путі $3,08 \text{ мм}$.

Розчин холодоагенту в маслі з домішками C_{60} готувався аналогічно процедурі створення нанофлюїду R600a/масло/наночастинки оксиду металу, яка описана у попередньому підрозділі.

2.3.4 Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості нанофлюїдів, перспективних в якості холодоносіїв

При дослідженні перспектив застосування нанофлюїдів в якості холодоносіїв можна розглядати дві процедури їх створення: одноступеневу та двоступеневу.

При наявності відпрацьованої одноступеневої процедури створення нанохолодоносія (або компонента нанохолодоносія) можна отримати систему, яка відрізняється підвищеною колоїдною стійкістю. Але використання такої технології потребує спеціального обладнання та не є метою даного дослідження.

Двоступенева технологія є більш простою в реалізації, але добитися високого ступеня дисперсності наночастинок у рідині достатньо складно.

З урахуванням викладеного, було проведено дослідження процедури створення та колоїдної стійкості холодоносія на основі розчину пропіленгліколю, води та етанолу з добавками наночастинок Al_2O_3 з використанням двоступеневої процедури та дослідження колоїдної стійкості модельної системи ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 , яка була отримана одноступеневим методом та придбана у поставника (SigmaAldrich). Крім того, було розглянуто процедуру створення та

дослідження колоїдної стійкості модельної системи тетралін / фулерени C_{60} .

Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості модельної системи ізопропанол/ Al_2O_3

Зразки нанофлюїдів ізопропанол/ Al_2O_3 готувалися шляхом змішування чистого ізопропанолу з фабричним зразком нанофлюїда (CAS 70-21-29, постачальник SigmaAldrich), що містив $0,80 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ізопропілового спирту і $0,20 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ наночастинок Al_2O_3 , розмір яких не перевищував 50 нм (за даними виробника, метод динамічного розсіювання світла). Таким способом було приготовано декілька зразків нанофлюїдів, в залежності від концентрацій, необхідних для досліджень.

Методика дослідження колоїдної стійкості даного нанофлюїда розглянута в [41]. Для оцінки колоїдної стійкості, аналізувалася зміна величини U_{NF}/U_{BF} . Тут параметр U_{BF} є напругою фотодетектора, який фіксував падаючий на нього світловий потік (створюваний лазером з довжиною хвилі 650 нм), що проходить через оптичну комірку з чистим ізопропанолом, а U_{NF} - через комірку з нанофлюїдом [41]. Як показало дослідження цих нанофлюїдів, вони залишалися агрегатовано стійкими протягом тривалого періоду (близько трьох років). Додаткові дослідження протягом не менше 100 годин в інтервалі температур від 20 до 70 ° C показали стійкість цих нанофлюїдів при підвищених температурах [41].

Крім того, з метою дослідження розміру наночастинок у нанофлюїді ізопропанол/ Al_2O_3 різними методами, за допомогою наявного у лабораторіях співавторів роботи [42] обладнання були виконані додаткові експериментальні вимірювання. Висушені зразки нанофлюїду були досліджені за допомогою скануючого електронного мікроскопу (SEM) та просвічуючого електронного мікроскопу (TEM) (Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Center for Innovation, Technology and Policy Research, Лісабон, Португалія). Отримані зображення сухих наночастинок наведені на рис. 2.11. Як видно з рис. 2.11, форма наночастинок близька до сферичної. Декілька зображень, які отримані за допомогою TEM були використані для оцінки середнього розміру сухих наночастинок – рис. 2.12. Як видно з рис. 2.12, розподіл частинок за розміром близький до лог-нормального з середнім діаметром 23,7 нм. Крім того, данні розподілу наночастинок за розміром у нанофлюї-

їді малої концентрації були отримані методом динамічного розсіювання світла на обладнанні центру CIC Energigune, Алава, Іспанія [42]. Розподіл наночастинок за розміром відповідає лог-нормальному з середнім гідродинамічним радіусом 75 нм. Крім того, розмір наночастинок у слабо концентрованому нанофлюїді було виміряно методом спектротурбідиметрії за допомогою спектрофотометра Shimadzu UV-120-02 (ОНАХТ) та отримано середній радіус 82 нм – рис. 2.12.

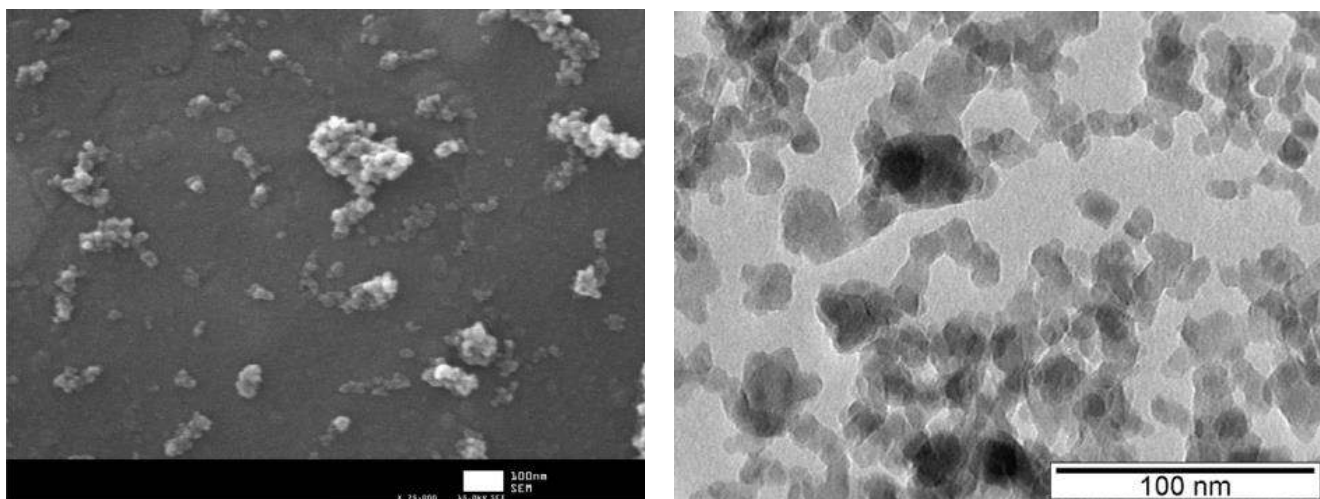


Рисунок 2.11 – Зображення сухих наночастинок нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 , які отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопу (ліве зображення) та просвічуючого електронного мікроскопу (праве зображення)

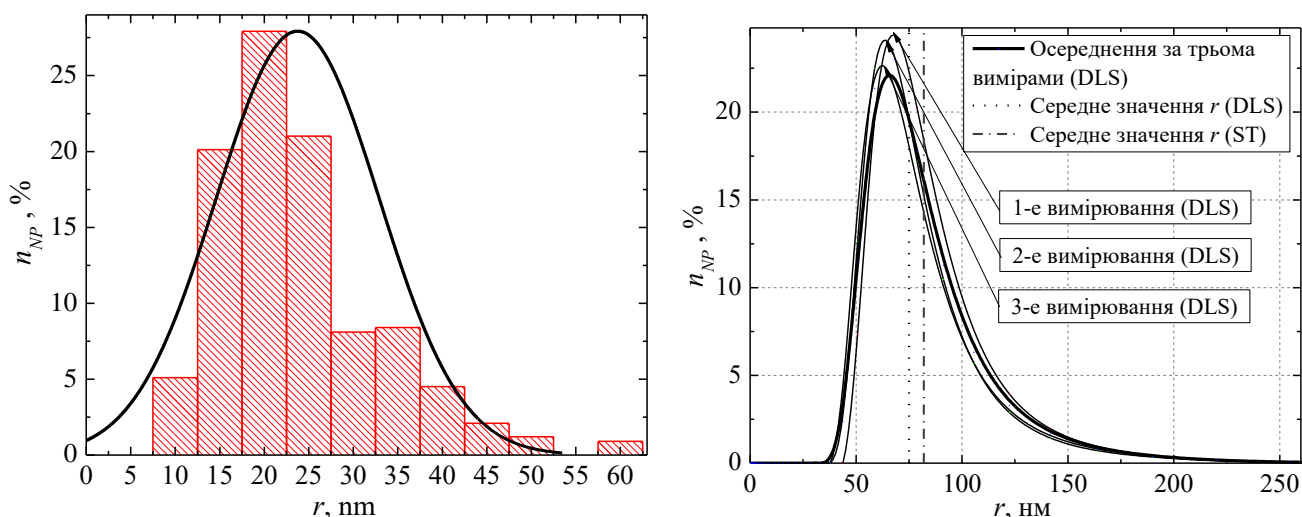


Рисунок 2.12 – Розподіл наночастинок за розміром: сухих наночастинок нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 , отримані за допомогою просвічуючого електронного мікроскопу (стандартна невизначеність еквівалентного діаметра $u(d) = (1.0 - 2.3)$ нм) (ліве зображення) та наночастинок у нанофлюїді ізопропанол/ Al_2O_3 , розмір яких отриманий за допомогою динамічного розсіювання світла DLS та спектротурбідиметрії ST (праве зображення)

Слід зазначити, що гідродинамічний радіус, заявлений виробником нанофлюїду (< 50 нм) декілька нижче, ніж отримано при додаткових дослідженнях (75 нм). Однак, це може бути й в рамках похибки вимірювання гідродинамічного радіусу, для визначення якого потрібно володіти точною інформацією о в'язкості та коефіцієнті заломлення базової рідини при температурах вимірювання.

Крім того, порівняння розмірів сухих наночастинок та наночастинок у рідині говорить о том, що в рідині вони знаходяться у вигляді агрегатів, а не окремих наночастинок. Як відомо, розмір цих агрегатів в рідині визначає транспортні властивості нанофлюїду. Отримані характерні розміри наночастинок планується використовувати при подальшому моделюванні теплофізичних властивостей модельної системи ізопропанол/ Al_2O_3 .

Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості холодоносія на основі водного розчину пропіленгліколю з добавками наночастинок Al_2O_3

В якості об'єктів дослідження розглядався нанохолодоносій складу пропіленгліколь/вода/етанол/наночастинок Al_2O_3 ($0,4824/0,4638/0,0485/0,0053$ кг·кг⁻¹). При створенні нанофлюїда використовувалися наночастинок $\alpha-Al_2O_3$ (Wenzhou Jingcheng Chemical Co) с розміром у порошок 10 ± 5 нм (за даними виробника).

Для приготування нанохолодоносія використовувався двоступеневий метод, відповідно до якого наночастинок у вигляді порошку змішувалися з частиною базової рідини і піддавалися диспергуванню (протягом 24 годин). Процес диспергування здійснювався в бісерному млині, заповненому кульками з ZrO_2 діаметром 2 мм. Додатково кожні 3-4 години нанофлюїд піддавався ультразвуковій обробці протягом 30 хв. Отриманий нанофлюїд з великою концентрацією наночастинок розбавлявся до необхідного складу. Нанохолодоносій був створений без використання поверхових-активних речовин.

Для оцінки процесів агломерації та седиментації наночастинок в нанофлюїді протягом тривалого часу були проведені наступні дослідження. Для двох однакових зразків нанохолодоносія були визначені еквівалентні радіуси наночастинок з використанням методу спектротурбідиметрії. Вимірювання оптичної густини зра-

зків нанохолодоносія (в інтервалі $\lambda = 700-990$ нм) здійснювалося за допомогою спектрофотометра Shimadzu UV-120-02 в герметичних оптичних комірках з довжиною оптичного шляху 4,05 мм. Фотографії оптичних комірок із зразками досліджуваних холодоносіїв через 12 діб після початку проведення експерименту наведено на рисунку 2.13. Оптична густина вимірювалася протягом 30 днів для першого зразка кожний день без попереднього збовтування на певній висоті оптичної комірки. Другий зразок перед кожним вимірюванням збовтувався безпосередньо в оптичній комірці. Таким чином імітувалися умови постійного механічного перемішування холодоносія з наночастинками при його циркуляції в реальних робочих умовах. Зміна розміру наночастинок Al_2O_3 протягом часу в нанохолодоносії показана на рисунку 2.14.

За умови стаціонарного зберігання зразка розмір наночастинок зменшувався від 240 до 145 нм протягом 12 діб. В подальшому розмір наночастинок у зразку залишався майже постійним. Дані результати вказують на встановлення седиментаційно-дифузійної рівноваги в нанофлюїді і про відсутність агрегації наночастинок. Для зразка, що піддавався збовтуванню, розмір агрегатів наночастинок зберігався приблизно постійним - 240 нм.

Слід зазначити, що отримати седиментаційно стійкий нанофлюїд не вдалося, у отриманому нанофлюїді знаходилися як наночастинки, які приймали участь у броунівському русі, так й крупні частинки, які випадали в осад. У подальшому потрібно удосконалення процедур створення таких нанофлюїдів. З рекомендацій для подальшого удосконалення слід зазначити можливість використання для диспергування наночастинок одного з компонентів теплоносія, який відрізняється найменшою в'язкістю з подальшим зменшенням компонентів в потрібних порціях.

Незважаючи на великий розмір агрегатів наночастинок у теплоносії, отримані дані вказують на відсутність агрегації наночастинок в досліджуваному зразку. Цей результат є важливим, оскільки показує, що отримані зразки нанофлюїдів можна використовувати в пристроях з вимушеною циркуляцією холодоносія. Розмір агрегатів наночастинок у нанохолодоносії, оцінений після одного місяця збе-

рігання в стаціонарних умовах і подальшого механічного перемішування зразка, відповідав розміру, зареєстрованому відразу після приготування нанофлюїда.



Рисунок 2.13 - Зображення холодоносія без добавок наночастинок (ліворуч), нанохолодоносія (концентрація наночастинок Al_2O_3 $0,0053 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$), який зберігався в стаціонарних умовах протягом 12 діб (по центру) і нанохолодоносія, який піддавався механічному перемішуванню (праворуч) в герметичних оптичних коірках з довжиною оптичного шляху 4,05 мм

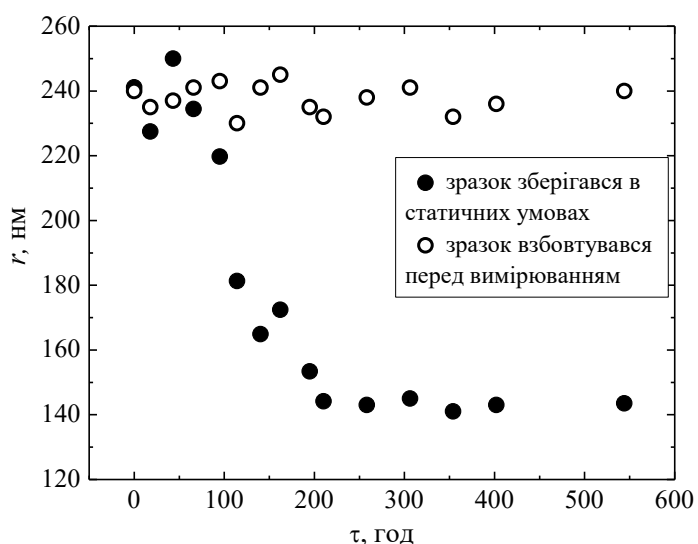


Рисунок 2.14 - Залежність зміни розміру наночастинок Al_2O_3 ($0,0053 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) (метод спектротурбідиметрії) в нанофлюїді пропиленглицоль/вода/регулююча в'язкість речовина від часу

Процедура створення та дослідження колоїдної стійкості модельної системи тетралін/фулерени C_{60} .

Розчинність фулеренів в тетраліні добре досліджена [36-38] та складає $16 \text{ мг} \cdot \text{мл}^{-1}$ при температурі 293-298 К.

У представленому дослідженні в якості базової рідини для приготування

нанофлюїду було обрано тетралін (1, 2, 3, 4 тетрагідронафталін, $C_{10}H_{12}$) (CAS № 119-64-2) з чистотою $0,998\% \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$. В якості добавки використовувалися фулерени C_{60} (CAS № 99685-96-8) з чистотою $0,999 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$.

Для приготування розчину тетраліну з фулеренами використовувалося диспергування протягом 5 часів з використанням ультразвукової ванни.

З метою дослідження розчинності фулеренів було виконано додаткове вимірювання спектральної залежності показника поглинання шістьма зразками розчину C_{60} у тетраліні. Фото зразків з відповідними концентраціями C_{60} у тетраліні наведено на рис. 2.15. Спектральна залежність показника поглинання була визначена за допомогою скануючого спектрофотометру Shimadzu UV-1700 у кварцовій плоскопаралельній кюветі розміром $45 \times 12,5 \times 12,5$ мм з довжиною оптичного шляху 10 мм при температурі 17°C - рис. 2.16 (при побудові залежностей була віднята спектральна залежність показника поглинання кювети з чистим тетраліном).

Всі зразки зберігалися протягом 3 місяців та проведені спостереження не виявили осаду в зразках. Додатково протягом 3 місяців були проведені вимірювання показника поглинання зразками при довжині хвилі 530 нм, та було підтверджено стійкість зразків к агломерації та седиментації фулеренів (величина показника поглинання протягом часу не змінювалася).

2.4 Висновки за розділом

1. На основі проведених експериментальних досліджень зроблений науково обґрунтований висновок про доцільність комбінування механічного та ультразвукового диспергування наночастинок у базових рідинах при створенні нанофлюїдів на основі нелеткої базової рідини двоступеневим методом.

2. Рекомендовано при створенні багатокомпонентних нанохолодоносіїв використовувати для диспергування наночастинок компонент з найменшою в'язкістю з подальшим змішуванням компонентів нанохолодоносія у потрібних пропорціях. Такий підхід забезпечить покращення ступеня дисперсності наночастинок у нанохолодоносії та збільшить його колоїдну стійкість.



Рисунок 2.15 - Зображення зразків чистого тетраліну (базова рідина) та тетраліну з різним вмістом фулурунів C_{60} : 1 - 0,00058; 2 - 0,00177; 3 - 0,00565; 4 - 0,00687; 5 - 0,00836; 6 - 0,00972 $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$

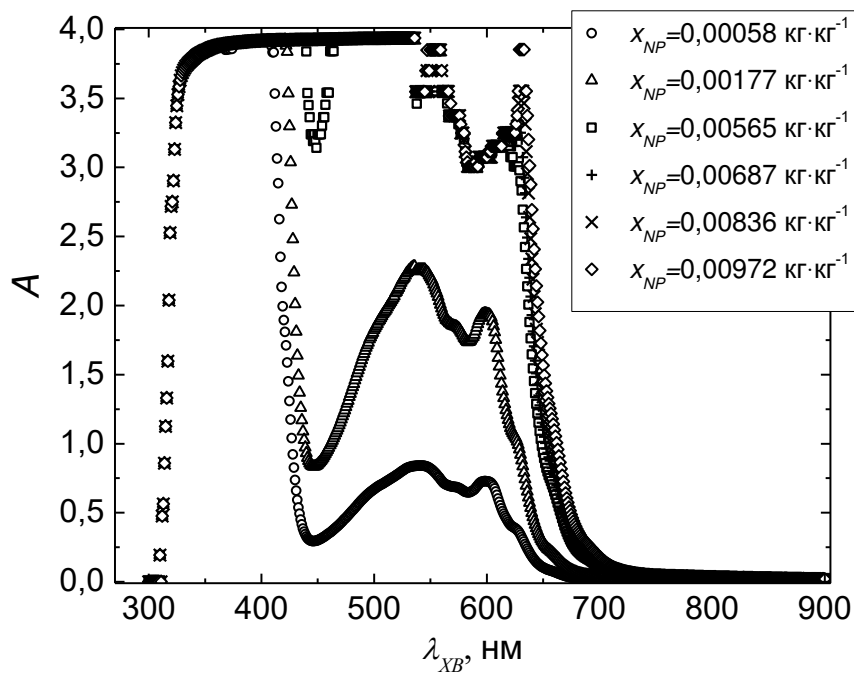


Рисунок 2.16 – Спектральна залежність показника поглинання світла фулеренами C_{60} в тетраліні при різних масових концентраціях

3. Розроблено процедуру створення компресорного масла з домішками наночастинок оксидів металів (TiO_2 та Al_2O_3) двоступеневим методом з використанням проміжної малов'язкої рідини з високим тиском насиченим парів. Використання проміжної рідини сприяє покращенню колоїдну стійкість нанофлюїду.

4. За результатами проведених експериментальних досліджень показано, що

створити нанофлюїди на основі галоїдопохідних холодоагентів та компресорних мастил з додаванням наночастинок металів (TiO_2 та Al_2O_3) можливо лише з використанням ПАР, в якості яких підходять лише неіоногенні ПАР (олеїнова кислота, Span 80).

5. Показано, що процедура визначення оптимальної концентрації ПАР для приготування нанофлюїдів є достатньо складною і залежить від багатьох факторів. Показано, що зі зменшенням розміру наночастинок у нанофлюїді (в результаті ультразвукової обробки) збільшується необхідна кількість ПАР для забезпечення колоїдної стійкості (через збільшення питомої поверхні наночастинок). Тому для кожного конкретного зразка нанофлюїду необхідно експериментально визначати оптимальну концентрацію ПАР.

6. Науково обґрунтований аналіз теоретичних та експериментальних досліджень розчинності фулеренів C_{60} в компресорних маслах показав, що фулерени в розчині можуть знаходитися у вигляді окремих молекул, кластерів малого розміру (які приймають участь у броунівському русі) та кластерів великих розмірів, які випадають у осад. Причому концентрація фулеренів в компресорному маслі, при якій починають формуватися кластери, залежить від групового складу масла. Показано, що для мінеральних компресорних мастил ця концентрація вище, ніж для синтетичних.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [9, 32, 42 - 45].

2.5 Список використаних джерел за розділом

1. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. Учебник для вузов. М.: Химия, 1988. 464 с.
2. ГОСТ ISO/TS 80004-4-2016 Нанотехнологии. Часть 4. Материалы наноструктурированные. Термины и определения (ISO/TS 80004-4:2011, Nanotechnologies — Vocabulary — Part 4: Nanostructured materials, IDT).
3. Wu D., Zhu H., Wang L., Liu L. Critical issues in nanofluids preparation,

characterization and thermal conductivity // *Current Nanoscience*. 2009. Vol. 5, Issue 1. P. 103-112.

4. Devendiran D. K., Amirtham V. A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 60. P. 21-40.

5. Yu W., Xie H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications // *Journal of Nanomaterials*. 2012. Vol. 2012. P. 1–17.

6. Ghadimi A., Saidur R., Metselaarn H. S. C. A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011. Vol. 54, Issue 17. P. 4051-4068.

7. Haddad Z., Abid C., Oztop H. F., Mataoui A. A review on how the researchers prepare their nanofluids // *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. Vol. 76. P. 168–189.

8. Li Y., Zhou J., Tung S., Schneider E., Xi S. A review on development of nanofluid preparation and characterization // *Powder Technology*. 2009. Vol. 196, Issue 2. P. 89-101.

9. Железный В.П., Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В. Исследование технологий приготовления нанохладоносителей и нанохладагентов с улучшенными теплофизическими свойствами // *Казахстан-Холод 2017: Сбор. докл. IV межд. науч.-техн. конф. (15-16 марта 2017 г.)*. Алматы: АТУ, 2017. С. 241-250.

10. Kumar D. D., Arasu A. V. A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. P. 1669-1689.

11. Sezer N., Atieh M. A., Koc M. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids // *Powder technology*. 2018. Vol. 344. P. 404-431.

12. Alawi O. A., Mallah A. R., Kazi S. N., Sidik N. A. C., Najafi G. Thermophysical properties and stability of carbon nanostructures and metallic oxides nanofluids // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 135 (2). P. 1545-1562.

13. Ali N., Teixeira J. A., Addali A. A review on nanofluids: fabrication, stability, and thermophysical properties // *Journal of Nanomaterials*. 2018. Vol. 2018, Article ID 6978130.
14. Mukherjee S., Mishra, P. C., Chaudhuri P. Stability of Heat Transfer Nanofluids—A Review // *ChemBioEng Reviews*. 2018. Vol. 5(5). P. 312-333.
15. Fuskale V., Sarviya R. M. Recent developments in nanoparticles synthesis, preparation and stability of nanofluids // *Materials Today: Proceedings*. 2017. Vol. 4(2). P. 4049-4060.
16. Alawi O.A., Sidik N.A.C., Mohammed H.A. A comprehensive review of fundamentals, preparation and applications of nanorefrigerants // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 54. P. 81–95.
17. Peng H., Lin L., Ding G. Influences of primary particle parameters and surfactant on aggregation behavior of nanoparticles in nanorefrigerant // *Energy*. 2015. Vol. 89. P. 410-420.
18. Peng H., Ding G., Hu H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011. Vol. 35. Issue 6. P. 960-970.
19. Das S. K., Choi S. U., Yu W., Pradeep T. *Nanofluids: science and technology*. John Wiley & Sons, 2007.
20. Агранат Б. А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н. *Основы физики и техники ультразвука*. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.
21. Kole M., Dey T. K. Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids // *International Journal of Thermal Sciences*. 2012. Vol. 62. P. 61-70.
22. Lee J. H., Hwang K. S., Jang S. P. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ nanoparticles // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51, Issue 11. P. 2651-2656.
23. Yu W., Xie H., Chen L., Li Y. Investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluid // *Thermochimica Acta*. 2009. Vol.

24. He Y., Jin Y., Chen H., Ding Y., Cang D., Lu H. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, Issue 11. P. 2272-2281.

25. Suganthi K. S., Rajan K. S. A formulation strategy for preparation of ZnO–propylene glycol–water nanofluids with improved transport properties // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. Vol. 71. P. 653-663.

26. Yang J. C., Li F. C., Zhou W. W., He Y. R., Jiang B. C. Experimental investigation on the thermal conductivity and shear viscosity of viscoelastic-fluid-based nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 55, Issue 11. P. 3160-3166.

27. Choi C., Yoo H. S., Oh J. M. Preparation and heat transfer properties of nanoparticle-in-transformer oil dispersions as advanced energy-efficient coolants // *Current Applied Physics*. 2008. Vol. 8, Issue 6. P. 710-712.

28. Кленин В.И., Щеголев С.Ю., Лаврушин В.И. Характеристические функции светорассеяния дисперсных систем. Изд-во Саратовского университета, 1977. 177 с.

29. Kourti T. Turbidimetry in particle size analysis. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry. Instrumentation and Applications*, Wiley, 2000. P. 5549–5579.

30. Фролов Ю. Г., Гродский А.С. Лабораторные работы и задачи в коллоидной химии. М.: Химия, 1986. 216 с.

31. Trisaksri V., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO₂–R141b nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. Issue 5. P. 1582-1588.

32 Хлієва О. Я., Лук'янова Т. В., Семенюк Ю. В., Железний В. П., Корнієвич С. Г., Мельник О. Ю. Дослідження технології приготування робочих тіл пароконденсійних холодильних систем з добавками наночастинок TiO₂ // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(4). С.58-67.

33. Fedele L., Colla L., Bobbo S. Viscosity and thermal conductivity

measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles //International journal of refrigeration. 2012. Vol. 35 (5). P. 1359-1366.

34. Lee K., Hwang Y., Cheong S., Kwon L., Kim S., Lee J., Performance evaluation of nanolubricants of fullerene in refrigeration mineral oil // Current Applied Physics. 2009. 9(2). P. 128-131.

35. Ku B.C., Han Y.C., Lee J.E., Lee J.K., Park S.H. Tribological effects of fullerene (C60) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity // Int. J. Precis. Eng. Man. 2010. Vol. 11 (4). P. 607-611.

36. Mchedlov-Petrosyan N. O. Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry //Chemical reviews. 2013. Vol. 113. Issue 7. P. 5149-5193.

37. Безмельницын В. Н., Елецкий А. В., Окунь М. В. Фуллерены в растворах //Успехи физических наук. 1998. Т. 168. №. 11. С. 1195-1220.

38. Ruoff R.S., Tse D.S., Malhotra R., Lorents D.C. Solubility of fullerene (C60) in a variety of solvents // J. Phys. Chem. 1993. Vol. 97 (13). P. 3379–3383.

39. Xing M., Wang R., Yu J. Application of fullerene C60 nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors // Int. J. Refrigeration. 2014. Vol. 40. P. 398-403.

40. Hwang, Y. J., Lee, J. K., Lee, C. H., Jung, Y. M., Cheong, S. I., Lee, C. G., Ku, B.C., Jang S. P. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids // Thermochim. Acta. 2007. 455/1. P. 70-74.

41. Zhelezny V., Geller, V., Semenyuk Y., Nikulin A., Lukianov N., Lozovsky, T., Shymchuk, M. Effect of Al₂O₃ Nanoparticles Additives on the Density, Saturated Vapor Pressure, Surface Tension and Viscosity of Isopropyl Alcohol //International Journal of Thermophysics. – 2018. Vol. 39 (3).

42. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Huminic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al₂O₃ nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 130. P. 1032-1044.20.

43. Перспективи застосування нанотехнологій у холодильній техніці. Частина 1. Теплофізичні властивості нанофлюїдів: монографія/В.П. Желєзний, Ю.В.

Семенюк, О.Я. Хлієва, М.М. Лук'янов, А.Г. Нікулін, А.С. Нікуліна; Під ред. В.П. Желєзного. Одеса: Фенікс, 2019. 314 с. (російською) ISBN 978-966-428-414-3.

44. Zhelezny V., Lukianov N., Khliyeva O., Nikulina A., Melnyk A. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil- Al_2O_3 and R600a-mineral oil- TiO_2 . Thermophysical properties // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 486-502.

45. Хлиева О.Я., Никулин А.Г., Лозовский Т.Л., Железный В.П. Исследование устойчивости нанофлюидов, перспективных для применения в холодильной технике // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 286-289.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА АПАРАТУРА ТА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розділ присвячено опису експериментальної апаратури і методик проведення досліджень теплофізичних властивостей нанофлюїдів, тепловіддачі при вимушеній конвекції та кипінні об'єктів дослідження та параметрів роботи парокомпресійної холодильної системи.

3.1 Експериментальні установки дослідження теплофізичних властивостей нанофлюїдів

Методи дослідження теплофізичних властивостей рідин наведено в [1-3].

3.1.1 Експериментальна установка для дослідження густини

Густина рідкої фази об'єктів дослідження вимірювалася пікнометричним методом. Схема експериментальної установки зображена на рисунку 3.1 та в [1, 4].

Основним елементом експериментальної установки є скляна вимірювальна комірка 6 - товстостінна скляна ампула, яка встановлюється в скляний термостат 15. До верхньої частини вимірювальної комірки через коварову трубку припаяний «гарячий» вентиль 7. Термостат оснащений автоматичною системою регулювання температури 12, яка підключена до датчика 9 і нагрівача 14. Для охолодження термостата встановлений теплообмінник 10, через який прокачується холодоносій з холодильної машини 13. Створення однорідного температурного поля в термостаті забезпечує мішалка 3. Температура вимірюється лабораторним ртутним термометром 8 ТЛ-4 з ціною поділки 0,1 °С. Вимірювання рівня рідкої фази в вимірювальній комірці проводиться за допомогою катетометра 2.

Повний об'єм вимірювальної комірки та об'єми при різних положеннях границі розділу парової і рідкої фаз були попередньо визначені за допомогою тарувального експерименту з використанням даних з густини ізопропанолу [5]. Повний об'єм вимірювальної комірки складав $17,04 \pm 0,01 \text{ см}^3$.

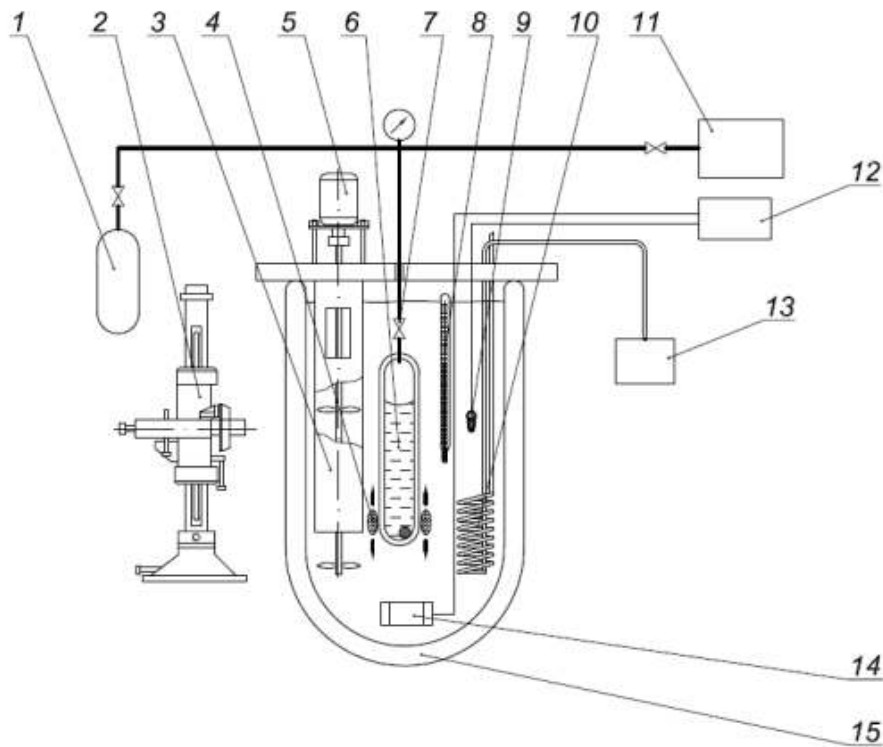


Рисунок 3.1 - Схема експериментальної установки для дослідження густини рідин: 1 - заправний балончик; 2 - катетометри КМ-8; 3 - мішалка; 4 - магнітна мішалка; 5 - двигун мішалки; 6 - скляна вимірювальна комірка; 7 - гарячий вентиль; 8 - лабораторний ртутний термометр; 9 - датчик автоматичної системи регулювання температури; 10 - теплообмінник; 11 - вакуумна система; 12 - автоматична система регулювання температури; 13 - холодильна машина; 14 - регульовальний нагрівач; 15 - скляний термостат

3.1.2 Експериментальна установка для дослідження тиску насиченої пари

Вимірювання тиску насиченої пари базових рідин та нанофлюїдів здійснювалося статичним методом. Схема експериментальної установки представлена на рисунку 3.2, а детальний опис - в роботі [1, 4].

Вимірювальна комірка (п'єзометр постійного об'єму) розташовувалася у термостаті 16. Коливання температури в термостаті не перевищували 0,02 К.

Вимірювання тиску здійснювалося за допомогою п'єзоелектричного перетворювача тиску 10 WIKA S-10, який з'єднувався з вимірювальною коміркою «балансним» капіляром. Перетворювач тиску оснащується стабілізованим джерелом

живлення 8. Вихідний сигнал перетворювача тиску - сила струму (від 4 до 20 мА) - вимірювався мультиметром 11. Межі відхилення значення струму від його оцінки в діапазоні до 20 мА для мультиметра RIGOL DM3064 не перевищує 0,016%. Щоб уникнути конденсації пари досліджуваної рідини в «баластному» капілярі, його перегрівали відносно температури в термостаті за допомогою нагрівача 12. Контроль за температурою «баластного» капіляра здійснювався термопарою 13.

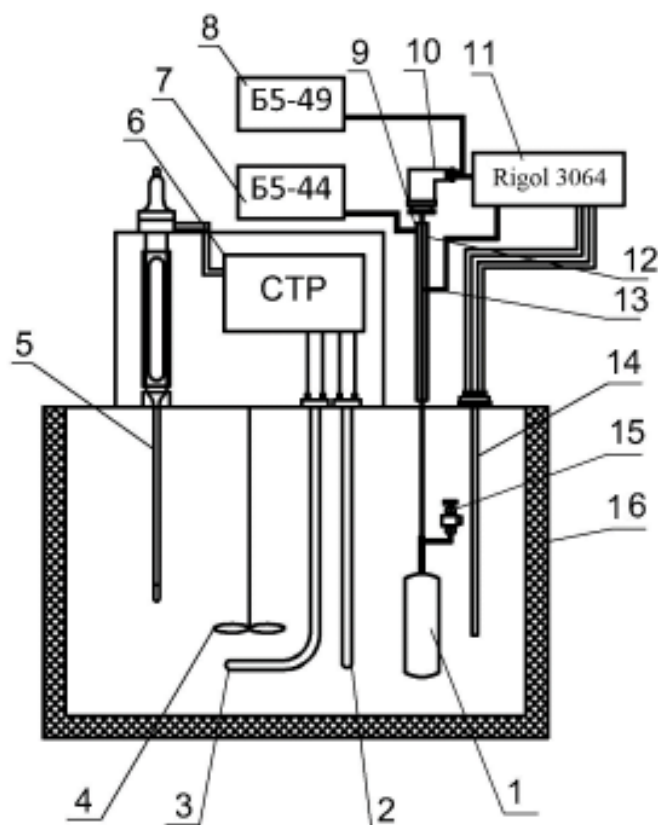


Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки для дослідження тиску насиченої пари рідин: 1 – вимірювальна комірка; 2 - фоновий нагрівач; 3 - розгінний нагрівач; 4 - мішалка; 5 - контактний термометр, 6 - система терморегулювання; 7 - джерело постійного живлення Б5-44; 8 - джерело постійного живлення Б5-49; 9 - нагрівач; 10 - датчик тиску WIKА S-10; 11 - мультиметр Rigol 3064; 12 - нагрівач; 13 - термопара; 14- платиновий термометр опору TR10-A; 15 -вентиль; 16 - термостат

В експерименті використовувалися перетворювачі тиску з двома діапазонами - (0 ... 5) і (-1 ... 1) бар. Межі відхилень від оцінки вимірюваних значень не перевищують 0,25% від максимального значення вказаних діапазонів.

Вимірювання температури здійснювався платиновим термометром опору 14 марки TR10-A. Межі відхилень від оцінки виміряних значень температури не перевищували 0,15 і 0,35 К при температурах 0 і 100 °С відповідно.

Підготовка досліджуваного зразка рідини здійснювалася безпосередньо в вимірювальній комірці 1. Точну кількість заправлених компонентів визначали за допомогою аналітичних вагів марки GR-300 з межами відхилень від оцінки виміряних значень маси $5 \cdot 10^{-7}$ кг. З метою видалення розчинених газів досліджувана рідина піддавалася багаторазовому вакуумуванню після її охолодження нижче температури кристалізації. Масові частки компонентів у рідкій фазі розчину при умовах експерименту визначалися з урахуванням наявності парової фази.

3.1.3 Експериментальна установка для дослідження поверхневого натягу

Дослідження поверхневого натягу рідин здійснювалося модифікованим методом диференціального капілярного підняття [1, 4, 6]. Схема експериментальної установки представлена на рисунку 3.3.

Основним елементом вимірювальної комірки 1 є касета з сімома капілярами 11 різного діаметра, які встановлені в скляній трубці 13. Ущільнення комірки здійснюється фланцями 12. У верхньому фланці вимірювальної комірки встановлений вентиль 14, через який здійснюється вакуумування (з метою видалення розчинених газів) насосом 15 і заправка комірки досліджуваним зразком з балона 16.

Вимірювальна комірка розміщена у рідинному термостаті 5, який оснащений оглядовими віконцями, фоновим і регулюючим нагрівачами 2 і 3, мішалкою 4 і системою автоматичного регулювання температури 9, датчиком якої є контактний термометр 8. Коливання температури в термостаті не перевищували 0,02 К. Вимірювання температури здійснювалося платиновим термометром опору 7 марки TR10-A. Для вимірювання рівнів рідини в капілярах використовувався катетометри 10 марки КМ-8 з межами відхилень виміряного значення висоти до 0,02 мм.

В рамках методу диференціального капілярного підняття проводяться вимірювання різниці висот підняття менісків рідини в парах капілярів з подальшою статистичною обробкою отриманих даних і знаходженням середньозваженого

значення капілярної сталої [6]. Така методика розрахунку дозволяє значно зменшити вплив невизначеності типу А (випадкова складова) на результати експериментів і підвищити їх точність.

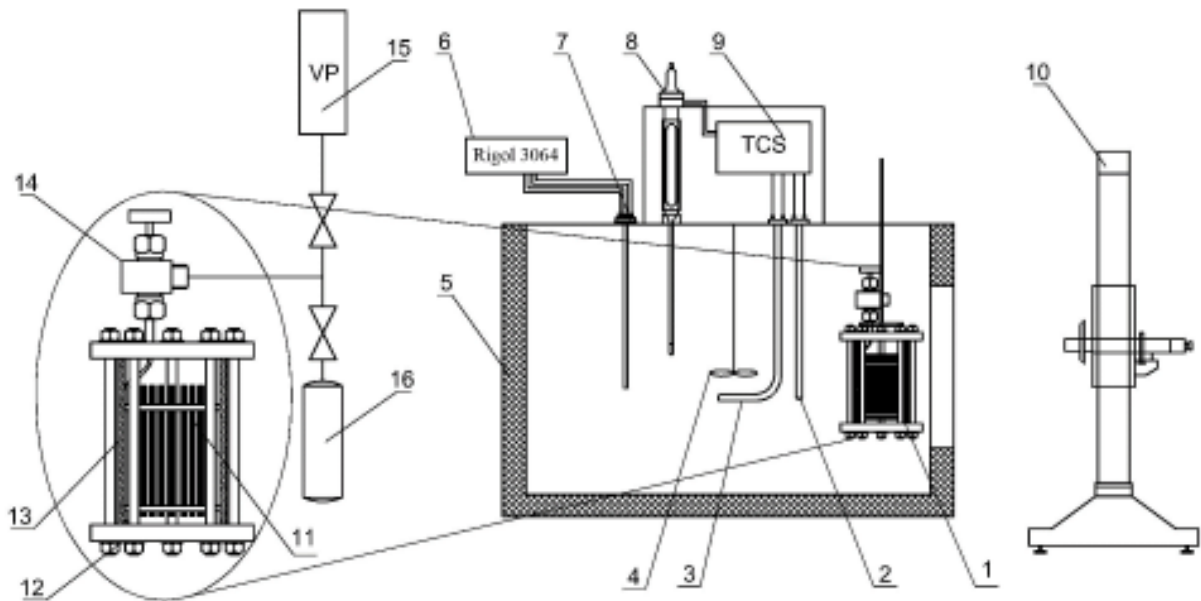


Рисунок 3.3 – Схема експериментальної установки для дослідження поверхневого натягу рідин: 1 - вимірювальна комірка; 2 - фоновий нагрівач; 3 - регулюючий нагрівач; 4 - мішалка; 5 - термостат; 6 - мультиметр Rigol 3064; 7 - платиновий термометр опору TR10-A; 8 - контактний термометр; 9 - система терморегулювання температури; 10 - катетометри КМ-8; 11 - капіляри; 12 - фланець; 13 - скляна труба; 14 - вентиль; 15 - вакуумний насос; 16 - балон з досліджуваною речовиною

Коефіцієнт поверхневого натягу речовини [7]

$$\sigma = (\rho' - \rho'') / (2 \cdot \bar{a}^2 \cdot g), \quad (3.1)$$

де \bar{a}^2 - визначене в експерименті середньозважене значення капілярної сталої, м^2 ;
 ρ' й ρ'' – густина рідкої та парової фази рідини, відповідно, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

3.1.4 Експериментальна установка для дослідження динамічної в'язкості

Експериментальне вимірювання динамічної в'язкості об'єктів дослідження виконано з використанням віскозиметра Геплера методом кульки, що котиться.

Схема експериментальної установки представлена на рисунку 3.4 та в [1].

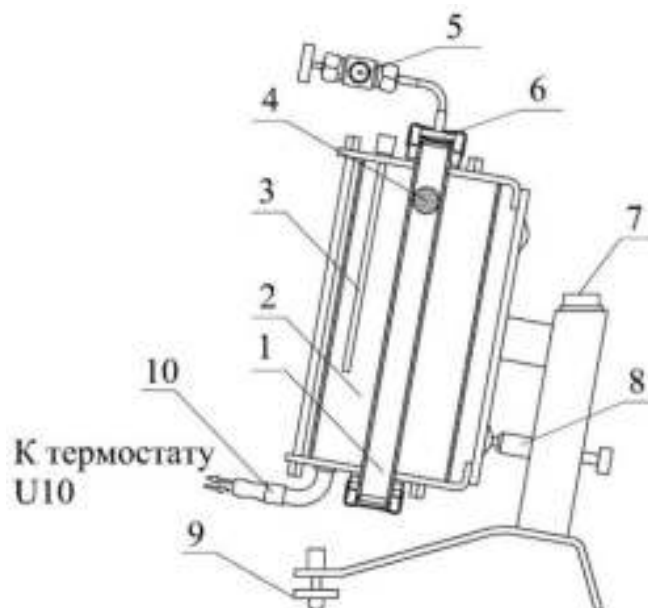


Рисунок 3.4 – Експериментальна установка для дослідження динамічної в'язкості рідин методом кульки, що котиться: 1 - трубка з досліджуваною рідиною; 2 - термостат; 3 - платиновий термометр опору ТЕРА 500Pt; 4 - кулька; 5 - заправний вентиль; 6 - кришка; 7 - рівень; 8 - фіксуєчий шток; 9 - гвинт для установки рівня; 10 - патрубков для з'єднання з термостатом

Основним елементом установки є трубка 1 з кулькою 4, яка заповнена досліджуваною рідиною. Термостатування трубки з об'єктом дослідження здійснюється за допомогою термостата з U10. Температура вимірювалася платиновим термометром опору (ТЕРА 500Pt) 3 з межами відхилень від оцінки виміряних значень температури 0,3 К.

Вимірювання кінематичної в'язкості об'єктів дослідження з невисоким значенням тиску насиченої пари здійснювалося за допомогою капілярних віскозиметрів у термостаті, аналогічному наведеному на схемі для вимірювання густини - рис. 3.1.

3.1.5 Експериментальна установка для дослідження калоричних властивостей

Схема низькотемпературної адіабатної калориметричної установки предста-

влена на рисунку 3.5 і детально описана в [1, 8].

Кріостат зануреного типу являє собою вакуумну камеру 2, яка знаходиться в сосуді Дьюара з рідким азотом 1. Усередині вакуумної камери змонтовані елементи калориметричної системи і контейнер 4 зі зразком досліджуваної речовини 3. Радіаційний теплообмін мінімізувався за рахунок використання електролітичного сріблення внутрішньої поверхні адіабатичної оболонки 6, а також покриття полірованою алюмінієвою фольгою зовнішньої поверхні контейнера 4. Усередині герметичного контейнера об'ємом 72 см^3 розташований калориметричний нагрівач H_4 і термометр опору 5.

Зменшення конвективного теплообміну між контейнером і калориметричною оболонкою досягається за рахунок створення у вакуумній камері тиску 10^{-5} мм. рт. ст. Вакуумна система установки складається з форвакуумного 22 і дифузійного 18 насосів, вакуумних пасток 17 і 19, іонізаційного 16 і термopарного 20 перетворювачів тиску, а також **натікача** 21. Для швидкого досягнення калориметричною системою заданого температурного рівня передбачена можливість заповнення вакуумної камери газоподібним гелієм з балона 15.

Передача теплоти по електричних дротах була максимально знижена за рахунок використання дротів малого діаметра (0,05 - 0,08 мм) і кільця, що терморегулюється 9. Температура кільця 9 підтримується рівною температурі контейнера 4. Зовнішній термостатуючий екран 7 необхідний для забезпечення **сталості умов теплообміну** з адіабатним екраном 6 в широкому діапазоні температур. Занурена в сосуд Дьюара з рідким азотом 1 вакуумна камера 2 оснащена потужним мідним екраном 10, який має **хороший тепловий контакт** з кришкою вакуумної камери 2. Така конструкція вакуумної камери запобігає теплообміну випромінюванням між калориметричною системою та зовнішнім середовищем через вакуумопроводи 11. У конструкції кріостату передбачені екрани 13, які призначені для зменшення променевого теплообміну між рідким азотом і навколишнім середовищем.

Контроль за теплообміном між елементами адіабатичної системи здійснюється за допомогою мідь-константанових диференційних термопар ΔT_1 , ΔT_2 й ΔT_3 . Сигнал від кожної з диференційних термопар фіксується електронним регулято-

ром температури ДРТ-2. Регулятор управляє напругою, що подається на нагрівачі відповідного елемента калориметричної системи через підсилювач потужності (У). Сигнал кожної з термопар вимірюється прецизійним мультиметром Rigol DM3064 з інтервалом 6 секунд. Для вимірювання температури контейнера використовується платиновий термометр опору типу ТСП виробництва фірми ТЕРА (5).

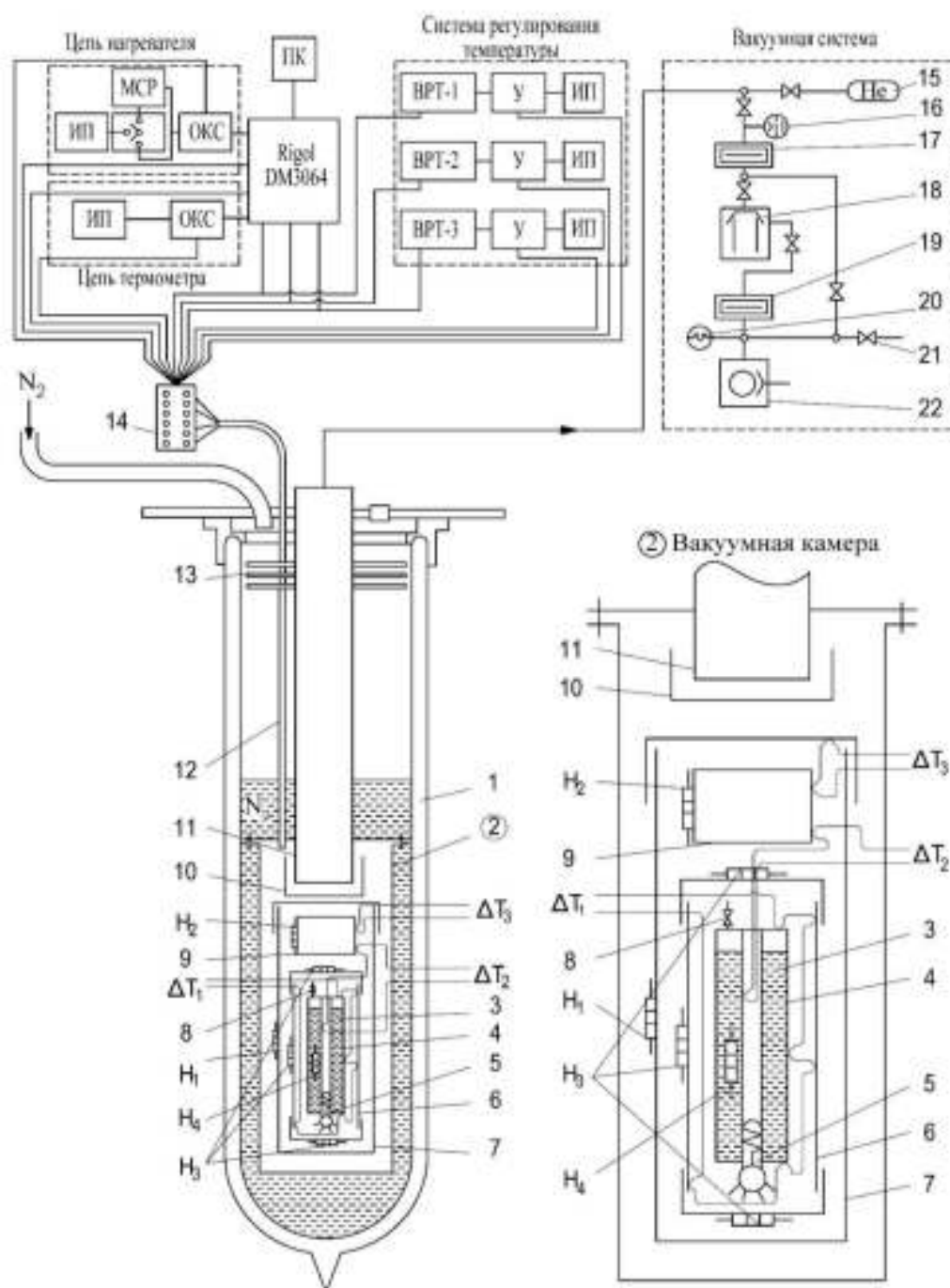


Рисунок 3.5 - Принципова схема низькотемпературної адіабатної калориметричної установки: 1 - посуд Дюара з рідким N_2 ; 2 - вакуумна камера; 3 - досліджуваний

зразок; 4 - контейнер; 5 - платиновий термометр опору (ТС); 6 - внутрішній адіабатичний екран; 7 - зовнішній термостатуючий екран; 8 - заправний мікровентиль; 9 – кільце, що терморегулює; 10, 13 - екрани; 11 - вакуумопроводи; 12 - електровод; 14 - вакуумний електророз'єм; 15 - балон з гелієм; 17, 19 - вакуумні пастки; 18 - дифузійний насос; 16, 20 - іонізаційний і термопарний перетворювачі тиску; 21 - **натікач**; 22 - форвакуумних насос; H_1, H_2, H_3 і H_4 - нагрівачі термостатуючого екрану, кільця, адіабатичного екрану і контейнера зі зразком відповідно; $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ – диференційні термопари; RigolDM3064 - прецизійний цифровий мультиметр; У - підсилювач потужності; ОКС - зразкова котушка опору; ДРТ - блоки регулювання температури; ІП - стабілізовані джерела живлення.

При реалізації методу монотонного нагріву швидкість нагріву досліджуваних зразків в калориметрі не перевищували $10^{-3} \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$. При цьому потужність, що подавалася на калориметричний нагрівач, була не більше 0,5 Вт.

Для визначення питомих теплових втрат і термічної величини калориметра при різних температурах було проведено тарувальні експерименти. З урахуванням термічної величини калориметра формула для розрахунку двофазної теплоємності речовини має вигляд

$$c_V^{(2)} = \frac{Q_{sh} - Q_{hl}}{m \cdot \Delta T} - \frac{A(T)}{m}, \quad (3.2)$$

де Q_{sh} – кількість підведеного до калориметра тепла, Дж; Q_{hl} – теплові втрати при середній температурі експерименту, Дж; m – маса зразка об'єкта дослідження, кг; ΔT – зміна температури в процесі підведення тепла, К; $A(T)$ – термічна величина калориметра при середній температурі експерименту, Дж·К⁻¹.

3.2 Експериментальна установка для дослідження гідродинамічних та теплообмінних параметрів при вимушеній течії нанофлюїдів

Експериментальна установка для дослідження гідродинамічних та теплооб-

мінних параметрів тепловіддачі при вимушеній ламінарній та турбулентній течії нанофлюїдів у каналі круглого поперечного перерізу наведена на рис. 3.6 та в [9].

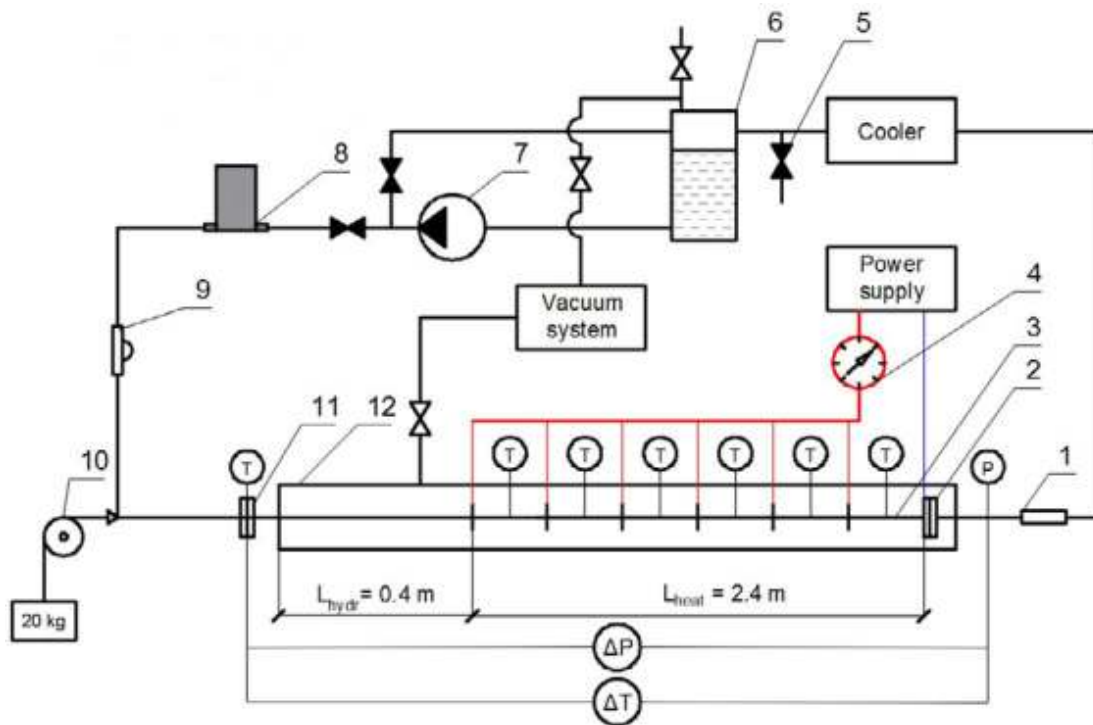


Рисунок 3.6 - Експериментальна установка для дослідження гідродинамічних та теплообмінних параметрів тепловіддачі при вимушеній ламінарній та турбулентній течії нанофлюїдів у каналі круглого поперечного перерізу: 1, 9 – частки візуалізації; 2, 11 - електрична ізоляція; 3 – вимірювана ділянка; 4 - вимикача живлення; 5 – дренажний вентиль; 6 - ресивер; 7 - насос з магнітним приводом; 8 – витратомір; 10 - розтягуючий пристрій; 12 - вакуумна камера;
 (T) - термопара, (ΔT) - диференційна термопара; (P) - датчик тиску; (ΔP) - диференційний датчик тиску.

Робоча рідина (нанофлюїд) прокачується по замкнутому контуру за допомогою насоса з магнітним приводом 7. Витрата робочого тіла може контролюватися за рахунок зміни швидкості насоса, підключеного к перетворювачу частоти й байпасній лінії. Масова витрата вимірюється за допомогою Каріолісова витратоміра (mini CORI-FLOW M15) 8, який працює в інтервалі від 0,2 до 300 кг·год⁻¹ з невизначеністю 0,2 %. Крім того, застосування даного типу витратоміра забезпечує можливість визначення густини робочої рідини з точністю до ± 5 кг·м⁻³. Ви-

пробувальна секція 3 представляє собою трубку з нержавкої сталі (AISI 321), що має зовнішній діаметр 4 мм, товщину стінки 0,25 мм і довжину 2,4 м. Частина труби розміром 0,4 м перед секцією нагрівання служить для гідродинамічної стабілізації потоку. Розтягуючий пристрій 10 використовується для забезпечення прямого і горизонтального положення випробувальної ділянки з використанням ваги 20 кг для отримання сили розтягування. Джерело живлення (HY5050EX) з точністю стабілізації потужності 0,3% використовується для подачі і контролю постійного теплового потоку, який передається від стінки експериментальної ділянки потоку рідини. З'єднання проводилося з використанням мідних дротів високої потужності, які були припаяні до стінки труби. Ділянка труби, яка нагрівається, розділена на шість рівних частин, які можуть перемикатися за допомогою вимикача живлення 4. Секції 2 і 11 використовуються для електричної ізоляції експериментальної ділянки від інших частин експериментальної установки. Щоб запобігти втраті тепла в навколишньому середовищі, тестова секція поміщена у вакуумну камеру 12, де вакуумною системою створюється динамічний вакуум (менше ніж 100 Па).

Всі з'єднувальні труби були ізольовані гумовою ізоляцією (товщиною 8 мм) з теплопровідністю менше $0,04 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Шість мідь-константанових термопар, закріплених на поверхні стінки труби, використовувалися для вимірювання місцевої температури стінки по довжині труби. Крім того, щоб згладити температурне поле вздовж діаметра труби, кожен перехід термопари був з'єднаний зі стінкою труби 0,1 мм мідним дротом, а потім склеєний. Для вимірювання температури на вході використовувався платиновий термометр опору, встановлений у витратомірі 8. Як відомо [10], коефіцієнт тепловіддачі нанофлюїдів при їх течії у трубі залежить від температури на вході. Для підтримки температури на вході в діапазоні $\pm 1 \text{ К}$ використовувався охолоджувач.

Крім того, диференційна термопара та диференційний перетворювач тиску (PX2300) використовувалися в експерименті для вимірювання зміни температури та тиску по довжині робочої ділянки. Для точного вимірювання температури потоку на вході та виході з робочої ділянки були встановлені змішувальні камери.

Всі термопари були калібровані на місті при турбулентному режимі течії. Усі вимірювання здійснювалися мільтиметром RIGOL M300 в сталому режимі. Заповнення експериментальної установки зразком нанофлюїду (біля 1,5 дм³ по об'єму) здійснювалося крізь ресивер 6 при попередньому вакуумуванні усієї системи.

Локальні коефіцієнти тепловіддачі були розраховані за законом Ньютона-Ріхмана

$$\alpha(x) = \frac{q}{(T_w(x) - \Delta T_w - T_b(x))}, \quad (3.3)$$

де $q = G \cdot C_p \cdot \Delta T / F$ - густина теплового потоку, Вт·м⁻²; G – масова витрата рідини, кг·с⁻¹; C_p - питома ізобарна теплоємність, Дж кг⁻¹·К⁻¹; F – площа поверхні робочої ділянки, м²; ΔT - різниця температур потоку між входом та виходом з робочої ділянки, К; $T_w(x)$ - локальна температура стінки, К; ΔT_w - перепад температур по товщині стінки труби

$$T_w(x) = \frac{q(\ln D_{out}/D_{in})}{2\pi\lambda_w L}, \quad (3.4)$$

де D_{out} та D_{in} - зовнішній та внутрішній діаметр труби, відповідно, м; L – довжина робочої ділянки, м; λ_w - теплопровідність матеріалу труби (AISI 321), Вт·м⁻¹·К⁻¹.

Середня по перерізу труби локальна температура рідини $T_b(x)$ розраховувалася наступним чином

$$T_b(x) = t_{in} + \frac{q\pi D_{in} x}{GC_p}, \quad (3.5)$$

де t_{in} - температура рідини на вході в робочу ділянку, К; x – відстань від входу до перерізу, що розглядається, м.

Коефіцієнт втрат напору по довжині

$$f = \frac{2D_{in}\Delta P}{\rho u^2 L}, \quad (3.6)$$

де ΔP - втрати тиску на розглянутій робочій ділянці, Па; u – швидкість рідини, м·с⁻¹; ρ – густина рідини, кг·м⁻³.

Середнє по довжині робочої ділянки значення коефіцієнта тепловіддачі ви-

значалося як середнеінтегральне з використанням отриманих в експерименті локальних (по довжині) значень коефіцієнта тепловіддачі.

3.3 Експериментальні установки для дослідження процесів тепловіддачі та внутрішніх характеристик процесу кипіння

3.3.1 Експериментальні установки для дослідження процесів тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі

Детальний опис схеми і принцип роботи експериментальної установки для дослідження процесів кипіння у вільному об'ємі, обробки експериментальних даних, а також тестові випробування наведені в [11]. Схема експериментальної установки наведена на рис. 3.7.

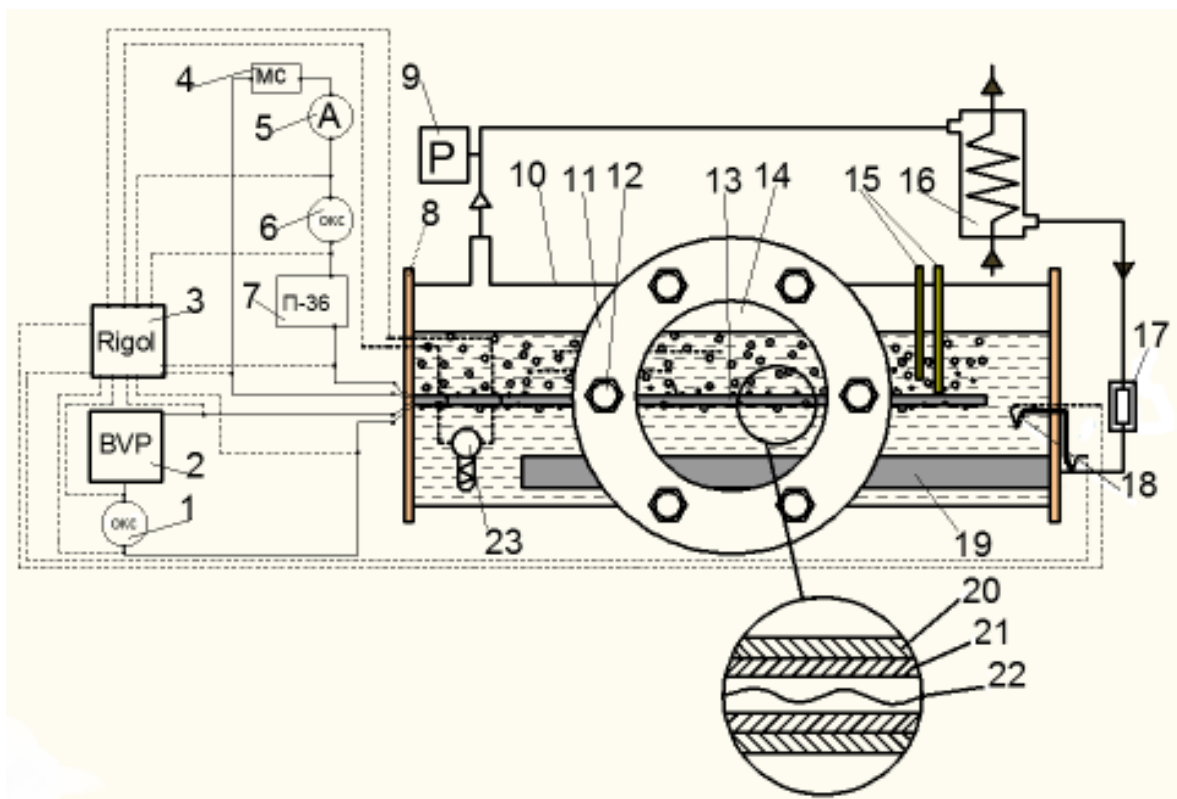


Рисунок 3.7 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження процесів тепловіддачі при кипінні нанofлюїдів у вільному об'ємі: 1, 6 - зразкова котушка опору; 2 - джерело живлення BVP 30V/50A; 3 - мультиметр Rigol 3064; 4 - магазин опорів; 5 - амперметр; 7 - стабілізоване джерело живлення П-36; 8 - фланець бойлера; 9 - п'єзоелектричний перетворювач тиску WIKA A-10;

10 - бойлер; 11 - фланець оглядового вікна; 12 - болти; 13 - робоча ділянка (нагрівач); 14 - оглядове вікно; 15 - система відбору проб рідини з бойлера; 16 - конденсатор; 17 – ділянка, що обігривається; 18 - диференціальна термопара; 19 - колектор; 20 - стінка робочої ділянки; 21 - фторопластова ізоляція; 22 - платиновий дріт; 23 - мідний термометр опору

Установка реалізує метод вільної циркуляції речовини по замкнутому контуру. Кипіння рідини відбувається у циліндричній (діаметр - 70 мм, об'єм - 1 дм³) вимірювальній комірці (бойлері) 10, обладнаному боковими плоскопаралельними кварцовими вікнами 14, через які може здійснюватися зйомка киплячої рідини. Поверхню бойлера було теплоізолювано. При кипінні речовини в бойлері пара через лабіринтовий сепаратор надходить у конденсатор 16, охолоджуваний теплоносієм з допоміжного термостата. Далі конденсат проходить через обігривальну ділянку 17, де набуває температури, близької до температури киплячої в бойлері рідини.

Робочою ділянкою (поверхнею нагріву) є капіляр з нержавкої сталі з товщиною стінки 0,1 мм, діаметром 2 мм, довжиною 730 мм і опором 0,55 Ом при 20 °С. Капіляр зігнутий за М-подібною формою і кріпиться на фторопластовій підставці. Підведення електроенергії від стабілізованого джерела живлення 2 до робочої ділянки здійснювалося через два ізолюваних електровводи, що впаяні у знімний фланець 8. Електрична потужність, що підводилася до робочої ділянки, визначалася компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору 1 марки Р322 класу точності 0,01.

Середня температура робочої ділянки вимірювалася (з розширеною невизначеністю 0,05 К) за опором внутрішнього термометра - протягнутого через капіляр електроізолюваного платинового дроту 22 діаметром 0,1 мм, що має опір 9,5 Ом. Опір платинового дроту визначався компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору 6 марки Р321 класу точності 0,01. Живлення вимірювального ланцюга здійснювалося за допомогою стабілізованого джерела живлення 7. Температура киплячої рідини вимірювалася мідним термометром опо-

ру 19 з розширеною невизначеністю 0,05 К. Тиск в комірці вимірювався за допомогою п'єзоелектричного перетворювача тиску 9 WIKA S-10. Всі вимірювання здійснювалися за допомогою цифрового мультиметра 3 RIGOL DM3064.

Вимірювання параметрів процесу тепловіддачі при кипіння об'єктів дослідження проводилися при постійних температурах кипіння і при різних теплових потоках. Вимірювання на кожній з ізотерм починалися з максимального теплового навантаження на робочій ділянці.

3.3.2 Експериментальна установки для дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння

Незважаючи на можливість візуального спостереження або застосування оптичних методів для дослідження процесу кипіння в описаній в [11] та підрозділі 3.3.1 установці, її не вдалося використати для отримання інформації з внутрішніх характеристик кипіння нанофлюїду R141b/ПАР Span-80/TiO₂ через велику довжину оптичного шляху між оглядовими віконцями, яка становить 90 мм. Використання комірки з невеликою довжиною оптичного шляху було необхідно для дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння цього нанофлюїда, оскільки даний нанофлюїд має велике значення оптичної густини. Для дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння використовувалася оптична комірка з довжиною оптичного шляху 30 мм [12].

Кипіння об'єктів дослідження відбувалося на ніхромовому дроті діаметром 0,20 мм і довжиною 86 мм при атмосферному тиску. Для підведення теплоти використовувався джерело живлення BVP (30 В та 50 А). Точність стабілізації потужності становила 0,01 Вт. Зображення процесу кипіння були виконанні з використання фотокамери (Canon EOS 1100D) та стробоскопу. В якості джерела світла у стробоскопі використовувався набір з 10 світлодіодів (1 Вт) з піком довжини хвилі 650 нм. Слід відзначити, що вибір світлодіодів з піком довжини хвилі 650 нм обумовлений максимумом чутливості матриці фотоапарата (Canon EOS 1100D) в цій області спектра. Оптична комірка в якій відбувався процес кипіння розташовувалася на одній оптичній осі між камерою і джерелом світла стробоскопа. Інші

джерела світла були ізольовані під час проведення експерименту.

Зображення експериментальної комірки для дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння при атмосферному тиску наведено на рис. 3.8. Приклад стробоскопічного ефекту при кипінні розчину R141b/ПАР при густині теплового потоку $29,6 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ наведено на рис. 3.9. На рис. 3.9 тривалість світіння джерела світла становила 50 мкс й інтервал між спалахами був 3 мс . Слід зазначити, що застосування стробоскопічного ефекту дозволяє отримувати цифрові зображення процесів, які швидко змінюються з часом, у високій якості (яка залежить від цифрової камери). Ця якість значно вище ніж при використанні високошвидкісних камер низького цінового діапазону. Однак, недоліком застосування стробоскопа є нашарування зображень один на одне, що ускладнює їх подальший аналіз.

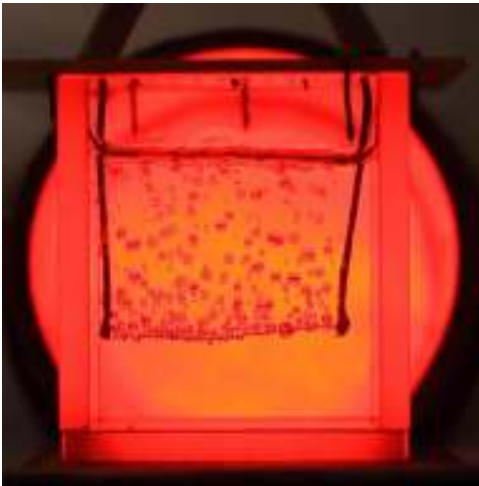


Рисунок 3.8 – Зображення експериментальної комірки для дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння при атмосферному тиску

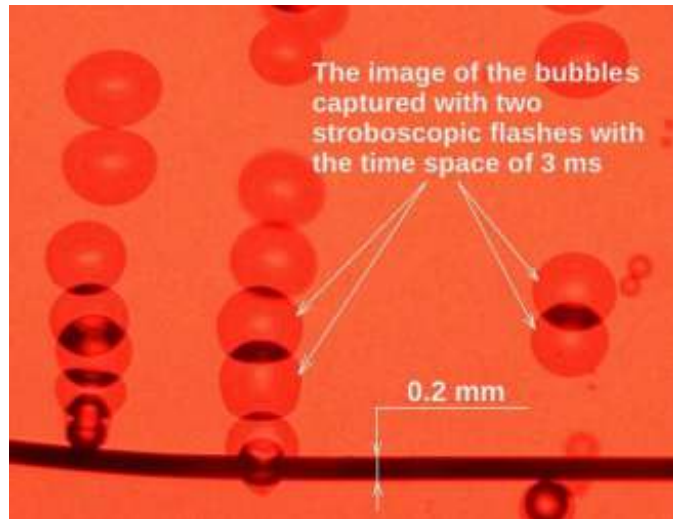


Рисунок 3.9 – Зображення процесу кипіння розчину R141b/ПАР при щільності теплового потоку $29,6 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ (150 пікселів на 1 мм)

3.4 Експериментальна установка для дослідження показників ефективності холодильної компресорної системи

Схема експериментальної установки для дослідження показників ефективності холодильної компресорної системи наведена на рис. 3.10 та в [13]. Для визначення холодопродуктивності холодильної компресорної системи використову-

вався метод калориметра з вторинним холодоагентом відповідно до ISO 917-89 [14].

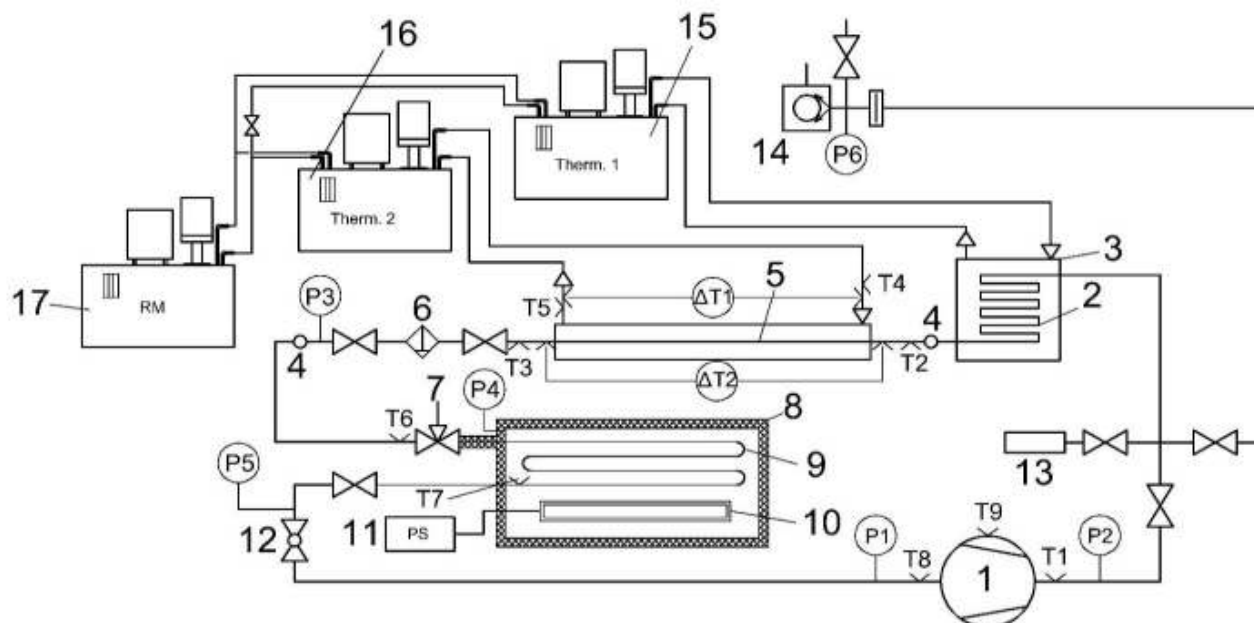


Рисунок 3.10 - Принципова схема експериментальної установки для дослідження показників енергетичної ефективності холодильної компресорної системи: 1 – компресор Atlant СКН 150; 2 – конденсатор; 3 – теплообмінник конденсатора; 4 – оглядове віконце; 5 – калориметричний витратомір; 6 – фільтр осушувач; 7 – дросель-вентиль; 8 – калориметр зі вторинним холодоагентом R134a; 9 – випарник калориметра; 10 – нагрівач; 11 – джерело живлення; 12 – шаровий кран для регулювання тиску кипіння робочого тіла в випарнику; 13 – заправний балон; 14 – вакуумний насос; 15 – термостат для регулювання температури теплоносія в системі охолодження конденсатора; 16 – термостат для регулювання температури теплоносія в системі охолодження калориметричного витратоміру; 17 – холодильна машина

Теплота конденсації робочого тіла відводилася в теплообміннику 3 теплоносієм з термостату 15. Температура теплоносія підтримувалася на заданому рівні в залежності від встановленого тиску в конденсаторі. Після конденсатора робоче тіло в рідкій фазі проходило через калориметричний витратомір 5, оглядове віконце 4 і дроселювалося крізь вентилі тонкого регулювання 7. Витрата робочого тіла розраховувалася з рівняння теплового балансу калориметричного витратоміра.

Після дроселювання робоче тіло кипить у випарнику 9 калориметра 8. Для регулювання тиску кипіння у випарнику використовувався кульовий вентиль 12. До вторинного холодоагенту R134a підводилося тепло від електрообігрівача 10. Все тепло, яке виділялося нагрівачем 10 відводилося за рахунок кипіння робочого тіла у випарнику 9. На випарнику калориметра 8 була встановлена рухома термопара T7, яка дозволяла контролювати фіктивний перегрів робочого тіла в калориметрі. У процесі проведених досліджень перегрів робочого тіла в випарнику калориметра підтримувався рівним 3 °С. Електрична потужність, що підводилася до нагрівача 10, визначалася компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору P322 класу точності 0,01. Тепло, що відводилося робочим тілом в калориметрі, розраховувалося як сума електричної потужності і теплоприпливів з навколишнього середовища. Для визначення теплоприпливів був проведений додатковий експеримент [15].

Експериментальні значення показників ефективності холодильної компресорної системи були отримані при встановленні певних режимів. Ці режими характеризувалися досягненням обраної витрати робочого тіла, тиску кипіння і конденсації, температури перегріву парів холодоагенту в калориметрі і певної потужності нагрівача калориметра.

Споживана потужність компресора вимірювалася ватметром марки Д592 з класом точності 0,1.

Температури холодоагенту в різних точках компресорної системи і води, що охолоджує конденсатор, вимірювалися мідь-константовими термопарами. Для вимірювання тиску в різних точках компресорної системи були встановлені кілька перетворювачів тиску WKA з межами відхилення значень від їх оцінки 0,25 % від діапазону.

Значення ЕРС термопар вимірювалися за допомогою мультиметра Time Electronics 5065. Температура навколишнього середовища вимірювалася за допомогою ртутного лабораторного термометра з ціною поділки 0,1 °С. Температура води в термостатах вимірювалася за допомогою ртутних лабораторних термометрів з ціною поділки 0,1 °С. Витрата води, що подавалася на витратомір, вимірюва-

лася ваговим методом за допомогою вагів з границями відхилення значень маси від її оцінки $5 \cdot 10^{-7}$ кг та секундоміру з границями відхилення значень часу від його оцінки 0,5 с.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1, 4, 6, 8, 9, 11-13, 15-17].

3.5 Список використаних джерел за розділом

1. Перспективи застосування нанотехнологій у холодильній техніці. Частина 1. Теплофізичні властивості нанофлюїдів: монографія/В.П. Железний, Ю.В. Семенюк, О.Я. Хлієва, М.М. Лук'янов, А.Г. Нікулін, А.С. Нікуліна; Під ред. В.П. Железного. Одеса: Фенікс, 2019. 314 с. (російською) ISBN 978-966-428-414-3.

2. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

3. Железний В.П., Геллер В.З., Семенюк Ю.В. Експериментальна теплофізика. Методи дослідження теплофізичних властивостей речовин. Одеса: Фенікс, 2015. 320 с.

4. Zhelezny V., Lukianov N., Khliyeva O., Nikulina A., Melnyk A. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil- Al_2O_3 and R600a-mineral oil- TiO_2 . Thermophysical properties // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 486-502.

5. Stephan P., Kabelac S., Kind M., Martin H., Mewes D., Schaber K. VDI Heat Atlas, Springer, 2010. 1585 p.

6. Железний В.П. Исследование поверхностного натяжения холодильных агентов в широком диапазоне температур, включая окрестность критической точки // Теплофизические свойства веществ и материалов (ГСССД. Сер. «Физические константы и свойства веществ»). 1985. Вып. 20. С. 117–127.

7. Адамсон, А. Физическая химия поверхностей. Пер. с англ. / Под ред. З. М. Зорина, В. М. Миллера М.: Мир. 1979. 568 с

8. Zhelezny V., Motovoy I., Khliyeva O., Lukianov N. An influence of Al_2O_3 nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of isopropyl alcohol in solid phase // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 671. P. 170-180.

9. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Humnic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 130. P. 1032-1044.

10. Minakov A., Guzei D., Pryazhnikov M., Zhigarev V., Rudyak V.Y. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel, *Int. J. Heat Mass Transf.* 102 (2016) 745–755.

11. Nikulin A., Khliyeva O., Lukianov N., Zhelezny V., Semenyuk, Y. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/ Al_2O_3 nanofluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018. Vol. 118. P. 746-757.

12. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V., Nikulin A. An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process// *Eastern European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 4/8 (94). P. 59-66.

13. Лукьянов, Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40.

14. ГОСТ Р 51360-99 (ISO 917-89) Компрессоры холодильные. Требования безопасности и методы испытаний Refrigerating compressors. Safety requirements and methods of testing.

15. Лукьянов Н.Н. Изучение перспектив применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике (теплофизический эксперимент, моделирование, эколого-энергетический анализ): дис. ... кандидата техн. наук: 05.14.06 –Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Одесса, 2015. 198 с.

16. Khliyeva O., Ryabikin S., Lukianov N., Zhelezny V. Experimental study of

heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al_2O_3 nanoparticles // Eastern european journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 1/8 (85). P. 4-12.

17. Рябікін С.С. Хлієва О.Я. Експериментальне дослідження конвекційного коефіцієнта тепловіддачі й втрат напору при вимушеному русі нанохолодоносія на основі пропіленгліколю в трубі // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 41-42.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМІШОК НАНОЧАСТИНОК НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН, ПЕРСПЕКТИВНИХ В ЯКОСТІ ХОЛОДОНОСІВ ТА РОБОЧИХ ТІЛ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН: ЕКСПЕРИМЕНТ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

Розділ присвячено експериментальному дослідженню впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості як модельних рідин (компонентів холодоносіїв), так й реальних робочих тіл парокompресійних холодильних машин. Багато уваги приділяється розробці та апробації (з використанням наявної експериментальної інформації) моделей прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів.

4.1 Дослідження впливу домішок фулеренів C_{60} та наночастинок Al_2O_3 на калоричні властивості модельних рідин

4.1.1 Дослідження впливу домішок фулеренів C_{60} на питому ізобарну теплоємність тетраліну

Об'єктом дослідження була система тетралін ($C_{10}H_{12}$)/фулерени C_{60} , методика приготування якої та дослідження колоїдної стабільності наведено у розділі 2. Обрана система є модельною для дослідження впливу добавок фулеренів C_{60} на питому теплоємність рідин, які є перспективними в якості компресорних мастил для холодильних систем. Крім того, тетралін також розглядається в якості теплоносія для закритих високотемпературних систем.

Вимірювання двофазної теплоємності розчинів тетралін/фулерени C_{60} були виконані методом монотонного нагріву на експериментальній установці, докладний опис якої наведено в розділі 3 і роботі [1].

Вимірювання двофазної теплоємності було виконано в температурному діапазоні 243 - 333 К при концентрації фулеренів C_{60} 0,0050 та 0,010 $кг \cdot кг^{-1}$. При проведенні вимірювання питомої теплоємності зразків, об'єм рідини в вимірювальному контейнері був більш ніж 85 % від об'єму цього контейнера. Виходячи з

цього, а також з урахуванням невисоких значень тиску насиченої пари тетраліну, різниця між питомою теплоємністю двофазного зразка $c_V^{(2)}$, питомою теплоємністю насиченої рідини c_S та питомою ізобарною теплоємністю c_P навіть при високих температурах прийнятого інтервалу досліджень є незначною. Таким чином, далі аналізуються лише значення питомої (масової та мольної) ізобарної теплоємності об'єктів дослідження.

Експериментальні данні з ізохорної двофазної теплоємності розчину тетралін/ C_{60} при двох масових концентраціях фулеренів наведено на рис. 4.1.

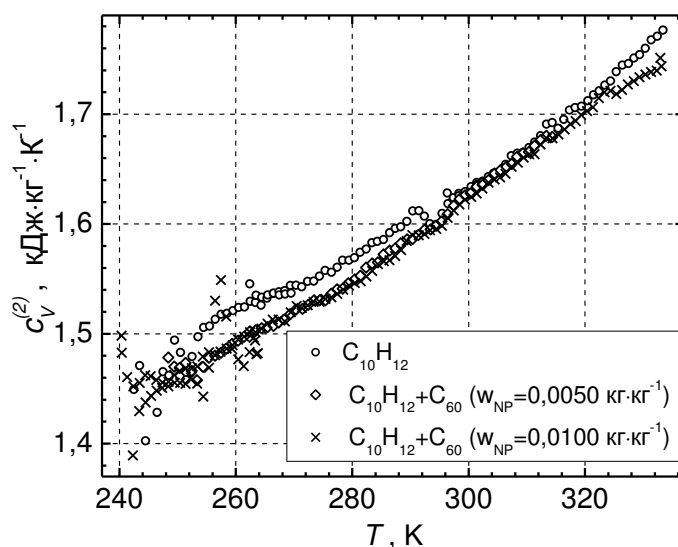


Рисунок 4.1 - Температурна залежність масової ізохорної двофазної теплоємності тетраліну та розчинів C_{60} у тетраліні

Отримані експериментальні данні з масової ізобарної теплоємності c_P були описані рівнянням

$$c_P = a(w_{C60}) + b(w_{C60}) \cdot T^3, \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \quad (4.1)$$

де $a(w_{C60})$, $b(w_{C60})$ - коефіцієнти рівняння, наведені у таблиці 4.1; w_{C60} - концентрація фулеренів, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Теплоємність фулеренів C_{60} у твердій фазі досліджена достатньо повно [2-4]. Показано [4], що у твердому стані в інтервалі температур (100-310) К фулерени

C_{60} утворюють кристалічну структуру з двома типами кристалічної решітки. Фазовий перехід з кристалічної структури першого типу до кристалічної структури другого типу відбувається при температурі приблизно 260 К. У відповідності до [4] для подальших розрахунків була прийнята температурна залежність мольної ізобарної теплоємності фулеренів C_{60} в інтервалі температур (100-310) К

$$C_{P,C60} = -250,64 + 3,16 \cdot T + 0,0190 \cdot T^2, \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}. \quad (4.2)$$

Залежність мольної ізобарної теплоємності для об'єктів дослідження, яка розрахована за рівнянням (4.1) з урахуванням мольної маси розчинів C_{60} у тетраліні наведено на рис. 4.2а. Розраховану за правилом адитивності мольна ізобарна теплоємність розчинів фулеренів в тетраліні наведено на рис. 4.2б.

Таблиця 4.1 – Концентраційна залежність коефіцієнтів рівняння (4.1)

$w_{C60}, \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	0,00	0,0050	0,0100
$a(w_{C60})$	1284,50	1260,99	1237,48
$b(w_{C60})$	$1,3033 \cdot 10^{-5}$	$1,35594 \cdot 10^{-5}$	$1,40854 \cdot 10^{-5}$

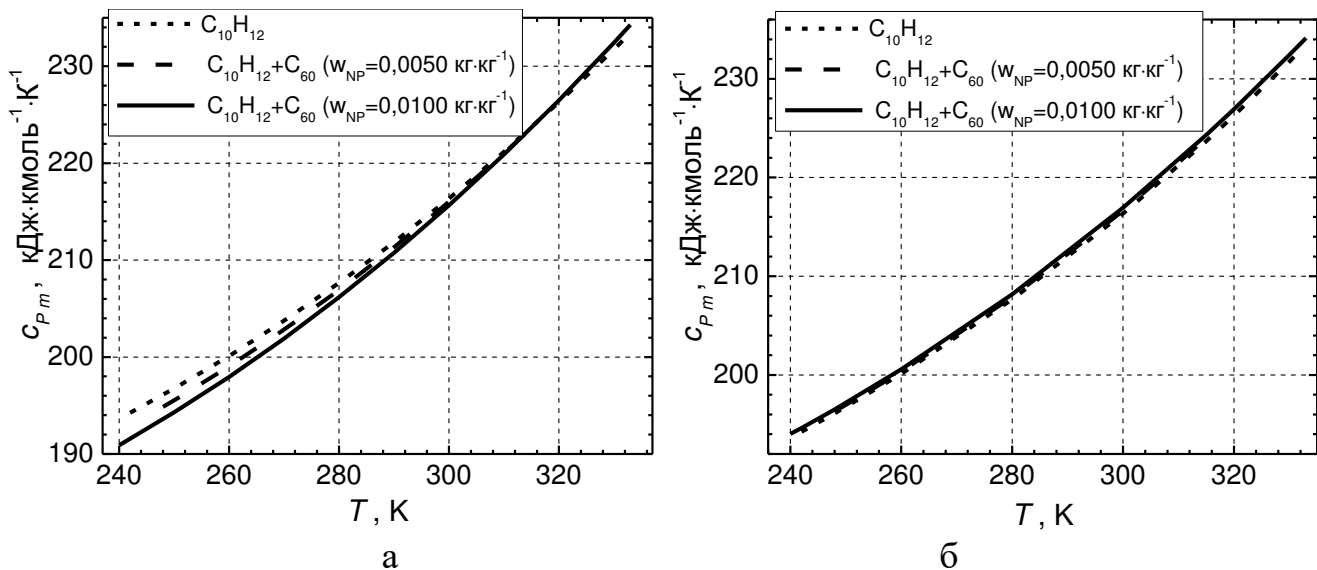


Рисунок 4.2 – Температурна залежність мольної ізобарної теплоємності тетраліну та розчинів C_{60} у тетраліні: апроксимовані рівнянням (4.1) значення (а) та розраховані за правилом адитивності (б)

Слід констатувати, що якісного узгодження експериментальних та розрахункових за правилом адитивності даних не спостерігається у більшому інтервалі досліджених температур. Лише при температурах більш ніж 320 К теплоємність розчину C_{60} у тетраліні приймає значення вище, ніж для чистої базової рідини, що узгоджується з теоретичними значеннями (рис. 4.2б).

4.1.2 Експериментальні дослідження впливу домішок наночастинок Al_2O_3 на питому ізобарну теплоємність ізопропанолу

Об'єктом дослідження був модельний нанофлюїд ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 . Методика приготування об'єкта дослідження, його характеристики, результати вимірювання розмірів наночастинок та дослідження коллоїдної стабільності наведено у розділі 2. Обрана система є модельною для дослідження впливу добавок наночастинок оксидів металів на питому теплоємність рідин, які є перспективними в якості холодоносіїв у холодильних установках.

Вимірювання двофазної теплоємності нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 були виконані методом монотонного нагріву на експериментальній установці, докладний опис якої наведено в розділі 3 і роботі [1].

Вимірювання двофазної теплоємності було виконано в температурному діапазоні 184 - 330 К при концентрації наночастинок Al_2O_3 0,0201, 0,0511 та 0,0996 $кг \cdot кг^{-1}$. Отримані експериментальні дані з двофазної ізохорної теплоємності $c_V^{(2)}$ були описані рівнянням

$$c_V^{(2)} = a(w_{NP}) + b(w_{NP}) \cdot T^2 + c(w_{NP}) \cdot T^4, \quad (4.3)$$

де $a(w_{NP})$, $b(w_{NP})$, $c(w_{NP})$ - коефіцієнти рівняння, наведені у таблиці Б.4 додатку Б; w_{NP} - концентрація наночастинок, $кг \cdot кг^{-1}$.

Для розрахунку калоричних властивостей об'єктів дослідження необхідно мати дані з густини і тиску насиченої пари об'єктів дослідження. З цією метою

додатково були проведені вимірювання тиску насиченої пари нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 при температурах від 297 до 352 К і концентраціях наночастинок 0,0253, 0,0444, 0,0687, 0,0955 $кг \cdot кг^{-1}$ [5]. Тиск насиченої пари було виміряно статичним методом на установці, докладний опис якої наведено в розділі 3 та роботі [6].

Експериментальні дані з величини тиску насиченої пари в дослідженому діапазоні температур та концентрацій були описані рівнянням

$$\ln(P_S) = a(w_{NP}) + b(w_{NP}) \frac{1}{T}, \quad (4.4)$$

де P_S - тиск насиченої пари, 10^5 Па; T - температура, К; w_{NP} - концентрація наночастинок, $кг \cdot кг^{-1}$; $a(w_{NP})$, $b(w_{NP})$ - коефіцієнти рівняння, які наведені у таблиці Б.4 додатку Б.

При температурах нижче параметрів точки нормального кипіння (101 кПа) рівняння (4.4) має хороші екстраполяційні можливості для прогнозуванні тиску насиченої пари досліджуваних зразків.

Результати дослідження густини нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 наведено у [7].

Використовуючи експериментальні дані з двофазної ізохорної теплоємності $c_V^{(2)}$ були розраховані значення теплоємності на лінії насичення - c_S (4.5) [8] та ізобарної теплоємності - c_P (4.6) [9, 10]

$$c_S = c_V^{(2)} - \frac{T}{(\rho_S)^2} \cdot \left(\frac{d\rho_S}{dT} \right)_w \cdot \left(\frac{dP_S}{dT} \right)_w + T \cdot \left(\frac{1}{\rho_S} - \frac{1}{\rho_b} \right) \cdot \left(\frac{d^2P_S}{dT^2} \right)_w, \quad (4.5)$$

$$c_P = c_S + \frac{1}{\rho_S} \cdot \left(\frac{dP_S}{dT} \right)_w, \quad (4.6)$$

де P_S тиск насиченої пари зразка, Па; ρ_S й ρ_b - густина насиченої рідини і зразка в контейнері, відповідно, $кг \cdot м^{-3}$.

Розраховані значення ізобарної теплоємності нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 були апроксимовані рівнянням

$$c_p = a(w_{\text{NP}}) + b(w_{\text{NP}}) \cdot T^2 + c(w_{\text{NP}}) \cdot T^4, \quad (4.7)$$

де $a(w_{\text{NP}})$, $b(w_{\text{NP}})$, $c(w_{\text{NP}})$ - коефіцієнти рівняння, наведені у таблиці Б.4 додатку Б.

В таблиці Б.4 додатку Б наведені розраховані за рівняннями (4.3) і (4.7) значення питомої двофазної теплоємності і мольної ізобарної теплоємності досліджених зразків нанофлюїдів.

Аналіз показав, що сумарна стандартна невизначеність вимірювання масової концентрації наночастинок не перевищує $8.2 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Розширена невизначеність експериментальних даних з тиску насиченої пари та густини нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 (для розрахунку c_p з даних о $c_V^{(2)}$) не перевищувала 0.152 кПа та $0.0010 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, відповідно. В даному випадку розширена невизначеність питомої ізобарної теплоємності в інтервалі температур 185 – 330 К не перевищувала $0.015 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$.

З рисунку 4.3 випливає, що наявність домішок наночастинок Al_2O_3 сприяє зменшенню теплоємності ізопропанолу у всьому інтервалі досліджених температур. Температурні залежності питомої ізобарної теплоємності нанофлюїдів практично еквідистантні температурній залежності чистого ізопропанолу. Різниця між питомою ізобарною теплоємністю нанофлюїдів і чистого ізопропанолу (див. рис. 4.3) залежить від концентрації наночастинок в ізопропанолі і від температури.

Зниження теплоємності нанофлюїда можна пояснити декількома причинами. По перше, зниження теплоємності частково пояснюється наявністю у нанофлюїді наночастинок, теплоємність яких (у розглянутому випадку Al_2O_3) нижче, ніж теплоємність базової рідини (ізопропанолу). Як витікає з отриманих експериментальних даних, вклад наночастинок Al_2O_3 у зниження теплоємності ізопропанолу приблизно складає $0,77 \text{ кДж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ на кожний $0,01 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$ наночастинок у нанофлюїді (або 0,48– 0,60 % на кожний $0,01 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$). Таким чином,

питомий внесок присутності наночастинок в зміну теплоємності ізопропанолу може скласти від 60 % до 80 % від значень різниці теплоємностей ($C_{P,mNF} - C_{P,mBF}$). Крім того, в роботі [11] автори відзначають, що наночастинок Al_2O_3 мають більш високу теплоємність на (6-23) % вище, ніж теплоємність Al_2O_3 у вигляді частинок мікронного й більшого розміру в діапазоні температур 200-370 К (в середньому 10 % для температурного діапазону 200-320 К). Таким чином, питомий внесок присутності наночастинок в зміну теплоємності ізопропілового спирту не може перевищити $0,85 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ на 1 мол. % концентрації наночастинок в нанофлюїді.

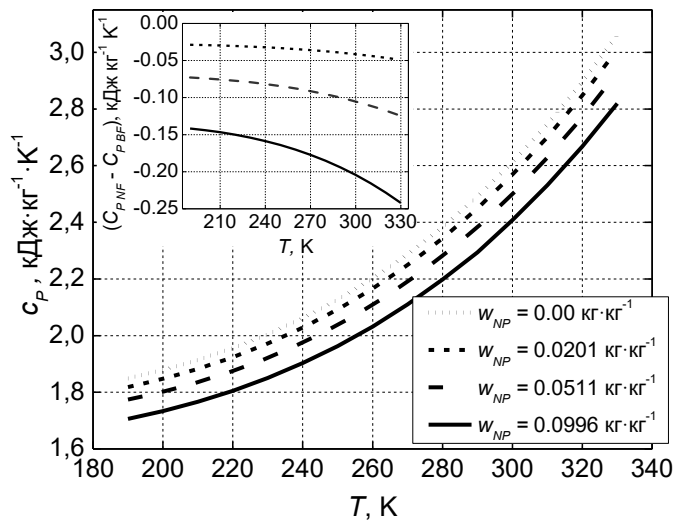


Рисунок 4.3 - Температурні залежності масової ізобарно теплоємності об'єктів дослідження і абсолютних відхилень ізобарної теплоємності нанофлюїда від теплоємності базової рідини ($c_{P,NF} - c_{P,BF}$)

Другим фактором, який впливає на зміну теплоємності нанофлюїдів, є структурні ефекти в базовій рідині навколо наночастинок. Слід відзначити, що на ефект впливу структурних фазових переходів в базовій рідині поблизу наночастинок на її теплофізичні властивості вказують різні автори [1, 7, 12-15].

В роботі [7] було проведено докладне дослідження температурної і концентраційної залежності надлишкового мольного об'єму розглянутого в даному розділі нанофлюїду ізопропанол / наночастинок Al_2O_3 . З використанням експериментальних даних з густини нанофлюїда при декількох концентраціях наночастинок

[7] були розраховані значення надлишкового мольної об'єму. Ці дані були апроксимовані в діапазоні температур 280 - 330 К і концентрації $0 - 0,0665 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($0 - 0,0403 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$) залежністю

$$\Delta V = \left(-0,5273 + 1,341 \cdot 10^{-4} \cdot T \right) \left(1 - \exp \left(\left[169,46 + \frac{-2,18 \cdot 10^6}{T^{1.5}} \right] x_{\text{NP}} \right) \right), \quad (4.8)$$

де $\Delta V = V^{\text{exp}} - V^{\text{add}}$ - надлишковий мольний об'єм (різниця мольного об'єму нанофлюїду, визначеного експериментально і розрахованого за правилом адитивності), $\text{см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$; T - температура, К; x_{NP} - мольна частка наночастинок в нанофлюїді, $\text{моль} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Концентраційні залежності надлишкового мольної об'єму нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 наведені на рисунку 4.4.

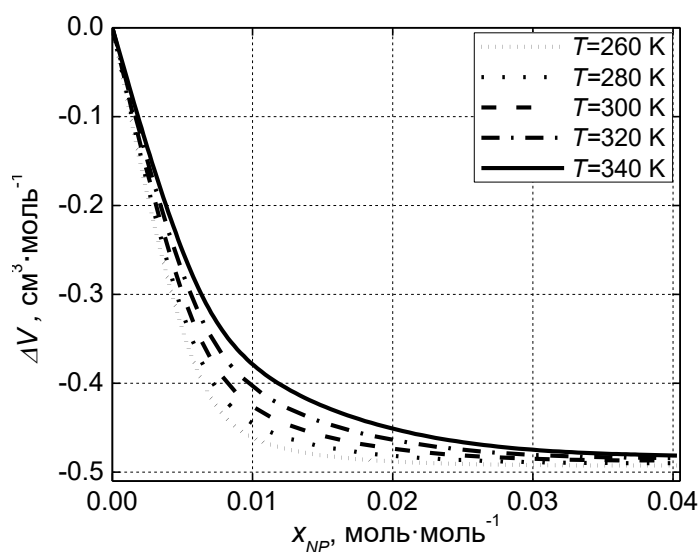


Рисунок 4.4 - Концентраційні залежності надлишкового мольної об'єму нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3

З наведеної на рисунку 4.4 інформації випливає, що надлишковий мольний об'єм в вивченому інтервалі концентрацій наночастинок по абсолютній величині практично лінійно зменшується з ростом температури. Найбільші значення зміни надлишкового мольного об'єму спостерігаються при невеликих концентраціях наночастинок $x_{\text{NP}} < 0,01 \text{ моль} \cdot \text{моль}^{-1}$ (див. рисунок 4.4). Таким чином можна конс-

татувати, що зафіксована зміна мольного об'єму, яка отримана в досить простому і точному з технічної точки зору експерименті з дослідження густини нанофлюїдів, вказує на значний вплив структурних фазових змін в ізопропанолі поблизу поверхні наночастинок на теплофізичні властивості нанофлюїдів.

Наявні в літературі залежності для прогнозування ізобарної теплоємності нанофлюїдів, наприклад, розглянуті в розділі 1 рівняння (1.2) і (1.3), дають завищені значення у порівнянні з експериментальними даними - рис. 4.5. Даний результат є додатковим підтвердженням того, що частина базової рідини в нанофлюїді знаходиться в структурованому стані і цей факт необхідно враховувати при розробці моделей прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів.

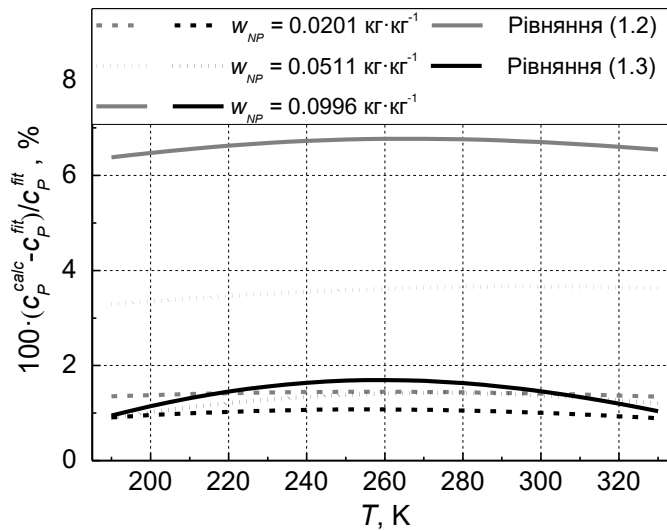


Рисунок 4.5 – Відносні відхилення масової ізобарної теплоємності нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 розрахованої за формулами (1.2) і (1.3) від експериментальних значень $(c_p^{calc} - c_p^{fit})/c_p^{fit}$

4.1.3 Модель прогнозування мольної ізобарної теплоємності нанофлюїдів

Як показує наведений вище аналіз структурні ефекти в базовій рідині поблизу наночастинок визначають наявність величини надлишкової питомої теплоємності $\Delta c_{p,m}$

$$c_{p,mNF} = c_{p,mNP} \cdot x_{NP} + c_{p,mBF} (1 - x_{NP}) + \Delta c_{p,m}, \quad (4.9)$$

де $c_{P,mNF}$, $c_{P,mNP}$ и $c_{P,mBF}$ - мольна ізобарна теплоємність нанофлюїду, матеріалу наночастинок і базової рідини, відповідно, Дж·моль⁻¹·К⁻¹; x_{NP} - мольна частка наночастинок у нанофлюїді, моль·моль⁻¹; $\Delta c_{P,m}$ - надлишкова мольна ізобарна теплоємність нанофлюїда, Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

Надлишкова теплоємність об'єктів дослідження в інтервалі температур 185 - 330 К була апроксимована рівнянням

$$\Delta c_{P,m} = a(T) + b(T) \cdot x_{NP} + c(T) \cdot x_{NP}^4. \quad (4.10)$$

Температурна залежність коефіцієнтів $a(T)$, $b(T)$ й $c(T)$ наведена в таблиці Б.4 додатку Б.

Температурні і концентраційні залежності надлишкової теплоємності нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 наведено на рисунках 4.6.

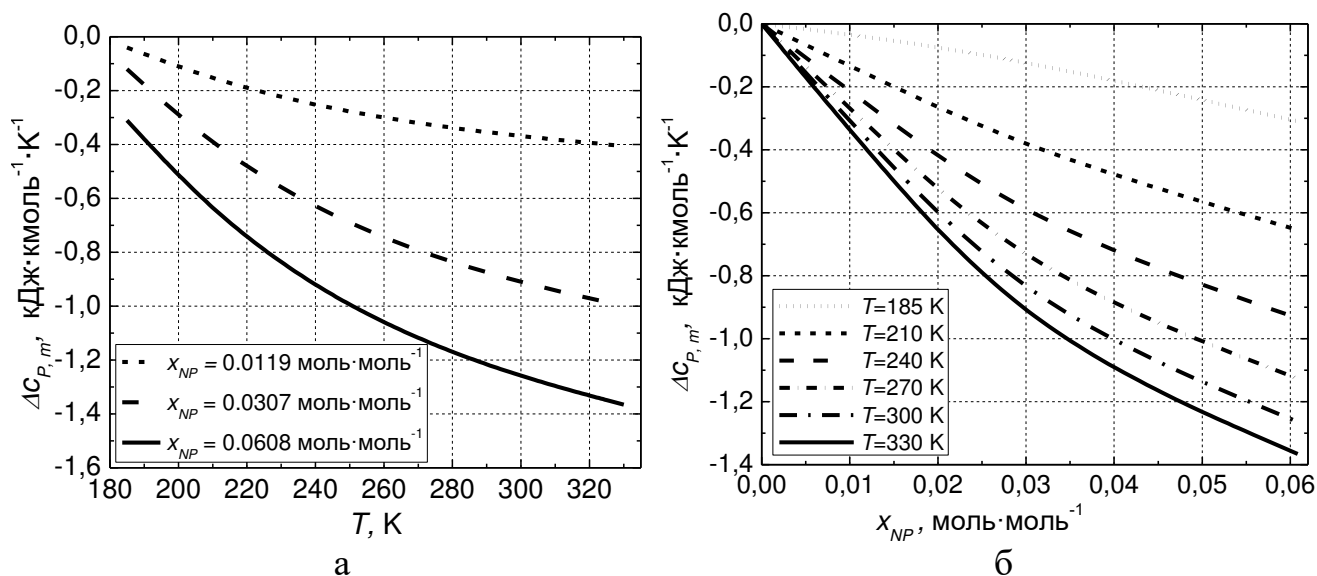


Рисунок 4.6 - Температурні (а) і концентраційні (б) залежності надлишкової теплоємності нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3

Аналізуючи наведену на рисунках 4.6 інформацію можна прийти до висновку, що надлишкова теплоємність при температурах близьких до температури плавлення величина дуже маленька. Слід також зазначити, що зі збільшенням температури і концентрації значення надлишкової теплоємності по абсолютній величині

ні збільшується.

Як вже зазначалося вище, величину надлишкової теплоємності нанофлюїда визначає теплоємність структурованої поверхневої фази навколо наночастинок, що складається з молекул базової рідини. Наявність цієї фази пов'язана з сорбцією молекул ізопропанолу на поверхні наночастинок Al_2O_3 при формуванні міцел в колоїдному розчині. Як показують проведені дослідження теплоємності і мольного об'єму нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 [12], концентрація поверхневої фази залежить як від температури, так й концентрації наночастинок в нанофлюїді. З рисунку 4.6 випливає, що теплоємність структурованої поверхневої фази поблизу температури плавлення дуже близька до теплоємності базової рідини. При збільшенні температури, різниця в теплоємності поверхневої фази і базової рідини збільшується, принаймні до температури 320 - 330 К. Надлишкова теплоємність має від'ємне значення, оскільки створення більш упорядкованої структури в рідкій фазі призводить до зменшення теплоємності.

З урахуванням наведеного вище було запропоновано розглядати нанофлюїд як термодинамічну систему, яка складається з наступних трьох фаз:

- *базової рідини* – дисперсійної фази, теплофізичні властивості якої відповідають властивостям чистої речовини в рідкій фазі при відповідному значенні температури (шар 3 на рис. 4.7);

- *наночастинок* - дисперсної фази, теплофізичні властивості якої в першому наближенні відповідають властивостям матеріалу наночастинок (шар 1 на рис. 4.7);

- *поверхневої фази* - фази, яка складається з сорбованих на поверхні наночастинок молекул базової рідини та має структуру та теплофізичні властивості, які відрізняються від дисперсійної фази (шар 2 на рис. 4.7). Структура цієї фази по товщині не є однорідною. Чітка границя між поверхневою фазою (поверхневим шаром) і базовою рідиною відсутня.

Оскільки поверхнева фаза по структурі близька до структури твердого тіла [13-15], то її теплофізичні властивості будуть незначно залежати від температури. Цей висновок підтверджується результатами дослідження, наведеними в статті

[7]. Крім того, в роботі [14] відзначається, що коефіцієнт об'ємного розширення для структурованої поверхневої фази менше, ніж у базової рідини. Це також вказує на незначну залежність густини поверхневої фази від температури.

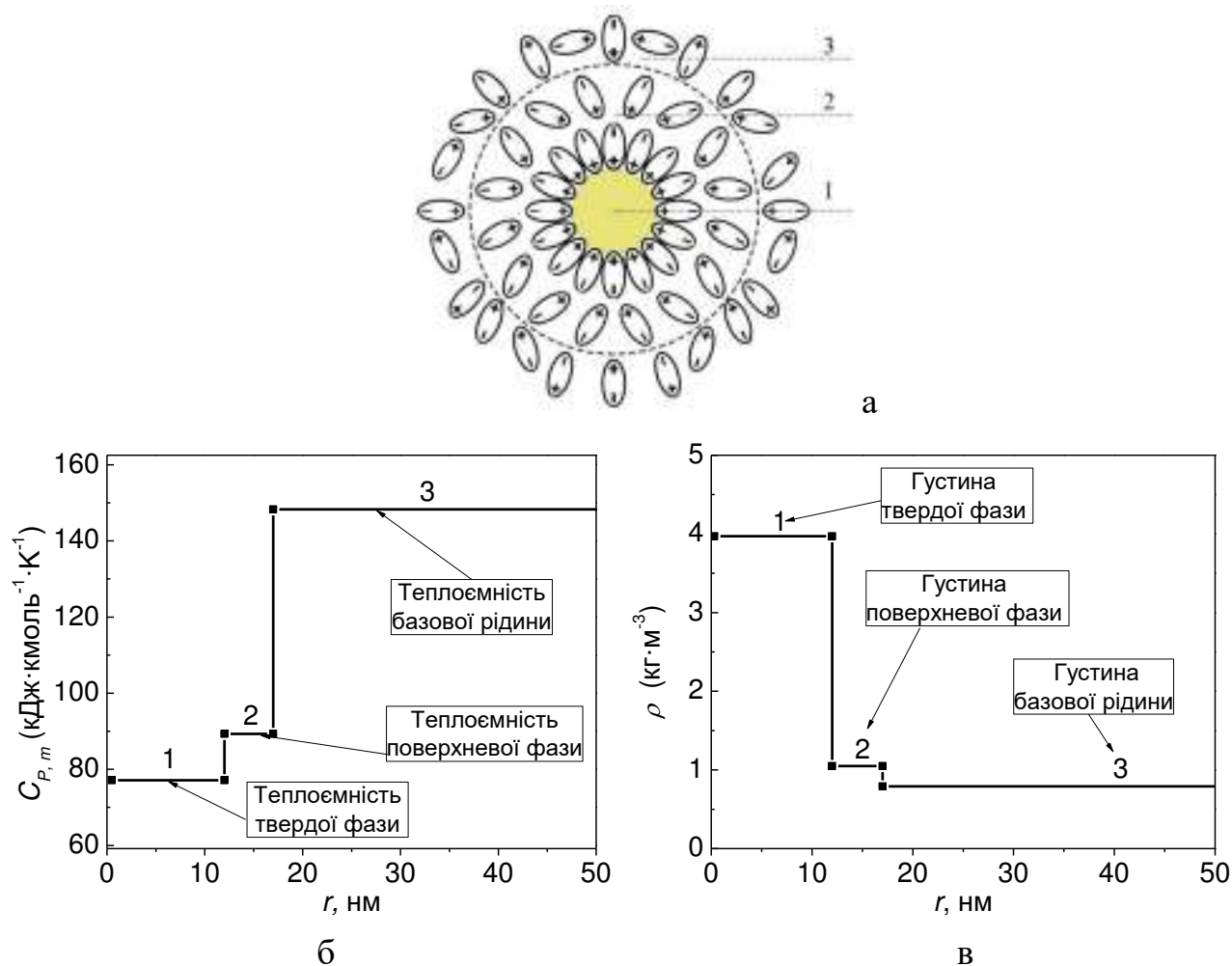


Рисунок 4.7 - «Трьохфазна» модель прогнозування теплоємності нанофлюїдів: а) наночастинки з поверхневим шаром молекул базової рідини; б) і в) залежність теплоємності і густини фаз, відповідно, від радіуса

Таким чином, в рамках запропонованої моделі передбачається (*перше припущення*), що наночастинки з сорбованим шаром базової рідини мають форму, близьку до сферичної і середній діаметр, який буде залежати від температури нанофлюїда.

Проведений аналіз експериментальних даних з густини [7] і теплоємності нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 показує, що між надлишковими величинами мольного об'єму і мольної теплоємності існує залежність. Температурні

і концентраційні залежності відношення надлишкових термодинамічних функцій $\Delta c_{P,m}/\Delta V$ у діапазоні температур 280 – 330 К й концентрацій 0 – 0,0996 кг·кг⁻¹ (0 – 0,0608 моль·моль⁻¹) наведені на рисунку 4.8. Дані з мольного об'єму нанофлюїдів для інтервалу концентрацій від 0,0403 до 0,0601 моль·моль⁻¹ були отримані методом екстраполяції. Така процедура припустима оскільки концентраційна залежність густини нанофлюїдів на ізотермах близька до лінійної.

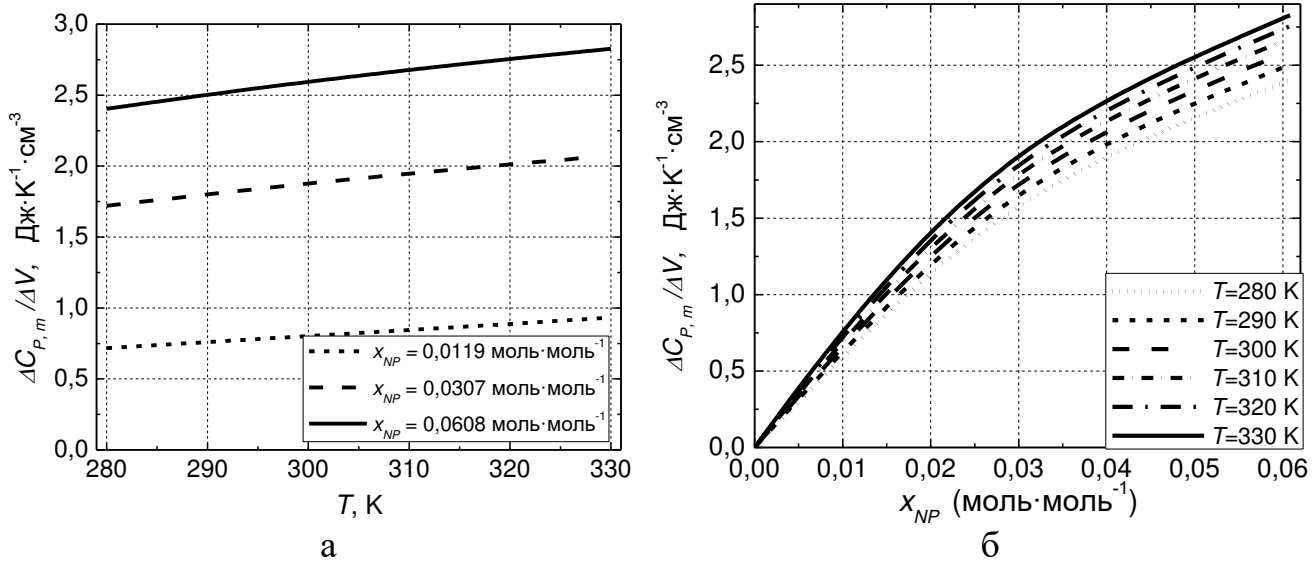


Рисунок 4.8 - Температурні і концентраційні залежності відношення надлишкових термодинамічних функцій $\Delta c_{P,m}/\Delta V$

З наведених рисунків витікає, що відношення $\Delta c_{P,m}/\Delta V$ зростає зі збільшенням температури і концентрації наночастинок Al_2O_3 в ізопропанолі. Причому відношення надлишкових величин $\Delta c_{P,m}/\Delta V$ незначно залежить від температури і суттєво залежить від концентрації наночастинок у нанофлюїді.

Наявність надлишкових термодинамічних функцій в колоїдних розчинах обумовлена відмінністю властивостей структурованої поверхневою фазою базової рідини поблизу поверхні наночастинок від її властивостей в рідкій фазі. З огляду на це зауваження рівняння (4.9) можна переписати у вигляді

$$c_{P,mNF} = c_{P,mBF} (1 - x_{NP} - x_{IPH}) + c_{P,mNP} \cdot x_{NP} + c_{P,mIPH} \cdot x_{IPH}, \quad (4.11)$$

де x_{IPH} - концентрація поверхневої фази навколо наночастинки, моль·моль⁻¹;

$c_{\text{P,mIPH}}$ - теплоємність поверхневої фази, Дж·моль⁻¹·К⁻¹.

Після перетворень з рівняння (4.11) можна отримати формулу для розрахунку надлишкової теплоємності нанофлюїдів

$$\Delta c_{\text{P,m}} = x_{\text{IPH}} (c_{\text{P,mIPH}} - c_{\text{P,mBF}}). \quad (4.12)$$

У цій формулі містяться дві взаємно пов'язані величини $c_{\text{P,mIPH}}$ й x_{IPH} . Одночасне визначення цих величин з даних теплоємності нанофлюїдів неможливо.

Слід зауважити, що точна інформація з властивостей поверхневої фази на поверхні наночастинок і її концентрації в нанофлюїді зазвичай відсутня [13, 14]. Ця обставина ускладнює розвиток моделей розрахунку теплофізичних властивостей нанофлюїдів.

Однак цю інформацію для нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 можна отримати безпосередньо з даних про теплоту фазового переходу тверда фаза - рідина [1]. Тому в рамках *другого припущення* передбачається, що інформацію про концентрацію поверхневої фази в нанофлюїді можна отримати з даних про теплоту плавлення, надлишковий мольний об'єм і надлишкову теплоємність нанофлюїда.

Відповідно до запропонованої вище моделі нанофлюїда, при фазовому переході (кристалічна фаза - рідка фаза) певна кількість молекул ізопропанолу залишається поблизу поверхні наночастинок у вигляді структурованого сорбційного шару і частково структурованого дифузного шару. Таким чином зі збільшенням концентрації наночастинок маса ізопропанолу, яка не бере участі в фазовому переході кристалічна фаза - рідка фаза збільшується. Проведені експериментальні дослідження теплоти плавлення досліджуваних зразків підтверджують цей висновок [1] (див. рисунок 4.9).

Цей рисунок показує різницю між експериментально визначеними значен-

нями теплоти плавлення нанофлюїда Δh_{NF}^{exp} і цією ж величиною, розрахованою без урахування наявності поверхневої фази (наночастинки не беруть участі в фазовому переході) Δh_{NF}^{calc}

$$\Delta h_{NF}^{calc} = \Delta h_{BF} (1 - w_{NP}), \quad (4.13)$$

де Δh_{NF}^{calc} - розрахована без урахування наявності поверхневої фази теплота плавлення нанофлюїда, Дж·кг⁻¹; Δh_{BF} - теплота плавлення базової рідини, Дж·кг⁻¹; w_{NP} - масова частка наночастинок у нанофлюїді, кг·кг⁻¹.

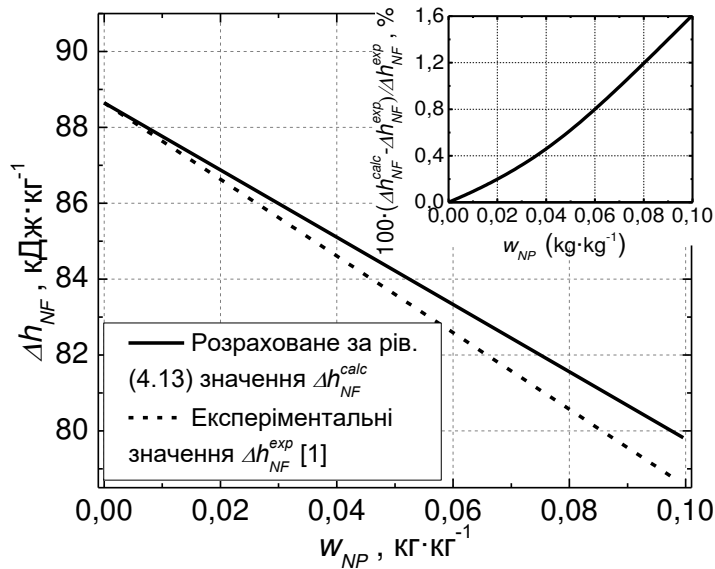


Рисунок 4.9 - Концентраційна залежність теплоти плавлення нанофлюїда ізопропанол/наночастинки Al₂O₃

З огляду на наявність поверхневої фази в нанофлюїді можна записати

$$\Delta h_{NF}^{exp} = \Delta h_{BF} (1 - w_{NP} - w_{IPH}), \quad (4.14)$$

де Δh_{NF} - теплота плавлення нанофлюїда, Дж·кг⁻¹; w_{IPH} - масова частка молекул базової рідини в поверхневій фазі, кг·кг⁻¹.

Отже концентрацію поверхневої фази при температурі плавлення можна ро-

зрахувати використовуючи інформацію про теплоту плавлення ізопропанолу і нанофлюїда ізопропанол/наночастинки Al_2O_3

$$w_{IPH} = 1 - w_{NP} - \Delta h_{NF}^{exp} / \Delta h_{BF}, \quad (4.15)$$

За наявною інформацією про концентрацію поверхневої фази у нанофлюїді w_{IPH} при температурі плавлення та отриманими в експерименті даними про надлишкову теплоємність нанофлюїдів можна визначити теплоємність поверхневої фази при температурі плавлення

$$c_{P,mIPH} = \Delta c_{P,m} / x_{IPH} + c_{P,mBF}. \quad (4.16)$$

Слід зауважити, що похибка розрахунку концентрації поверхневої фази x_{IPH} в нанофлюїді і теплоємності поверхневої фази $c_{P,mIPH}$ буде великою при невеликих концентраціях наночастинок в нанофлюїді. Тому достовірна інформація про теплоємності поверхневої фази може бути отримана тільки при достатньо великих концентраціях наночастинок в нанофлюїді. Виконаний аналіз розрахованих за формулою (4.16) значень $c_{P,mIPH}$ показав, що теплоємність поверхневої фази практично збігається зі значенням теплоємності твердої фази ізопропанолу при температурі плавлення - $89,6 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ [1].

Відповідно до отриманого результату можна стверджувати, що теплофізичні властивості поверхневої фази нанофлюїдів дуже близькі до властивостей твердої фази базової рідини при температурі плавлення. З огляду на порівняно невеликий внесок надлишкових термодинамічних функцій в значення мольного об'єму і теплоємності можна припустити (*третьє припущення*), що теплофізичні властивості поверхневої фази залишаються незмінними зі зміною температури (від температури плавлення до температури при якій втрачається колоїдна стабільність нанофлюїда).

З урахуванням цього припущення, з використанням даних про надлишкову теплоємності за формулою (4.12) може бути отримана інформація про температурну і концентраційну залежності частки базової рідини в поверхневій фазі для вчених нанофлюїдів (рис. 4.10).

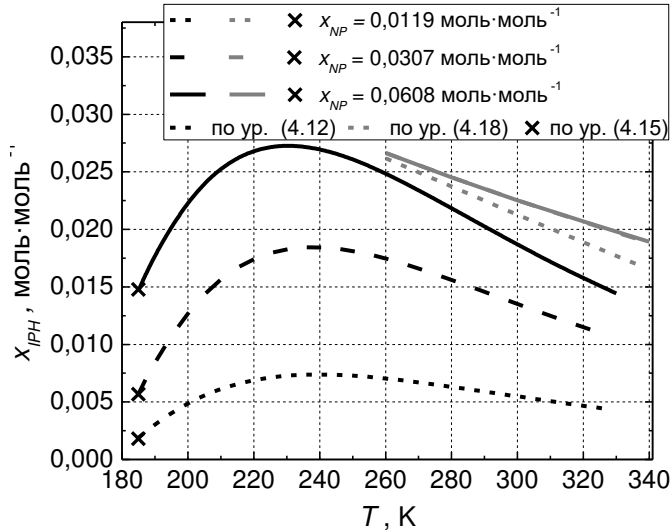


Рисунок 4.10 - Температурна залежність концентрації молекул базової рідини в поверхневій фазі нанофлюїда ізопропанол/наночастинки Al_2O_3

Інформацію про температурну залежність концентрації поверхневої фази можна також отримати з даних про надлишковий мольний об'єм з використанням формули, яка аналогічна за структурою залежності (4.11)

$$V_{NF} = V_{BF} (1 - x_{NP} - x_{IPH}) + V_{NP} x_{NP} + V_{IPH} x_{IPH}; \quad (4.17)$$

$$\Delta V = x_{IPH} (V_{IPH} - V_{BF}), \quad (4.18)$$

де $V_{IPH} = M/\rho_{IPH}$ - мольний об'єм поверхневої фази, $см \cdot моль^{-1}$; x_{IPH} - мольна концентрація базової рідини в поверхневій фазі, $моль \cdot моль^{-1}$.

Однак, для розрахунку концентрації поверхневої фази необхідно мати значення мольного об'єму при температурі плавлення. Як правило, така експериментальна інформація в літературі відсутня. Тому для визначення величини мольного об'єму при температурі плавлення можна скористатися встановленою в [16] залежністю між структурно адитивними величинами

$$V_{IPH} = O_r = 0,788 \cdot V_{NB}, \quad (4.19)$$

де O_r - ортохор (мольний об'єм нанофлюїда при температурі плавлення), $\text{см}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$; V_{NB} - мольний об'єм нанофлюїда при температурі кипіння при нормальному тиску (при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па).

Інформацію про мольний об'єм нанофлюїдів при температурі кипіння легко отримати з точних експериментальних даних про густину нанофлюїдів.

Розраховані за запропонованою методикою значення концентрації молекул базової рідини в поверхневій фазі нанофлюїдів з даних про надлишковий мольний об'єм наведені на рисунку 4.10.

Інформація, наведена на рисунку 4.10, вказує на задовільне узгодження даних про концентрацію молекул базової рідини в поверхневій фазі, які розраховані за формулами (4.12) і (4.18) (для нанофлюїдів з концентрацією наночастинок в нанофлюїді 0,0306 й 0,0608 $\text{моль} \cdot \text{моль}^{-1}$).

Аналіз інформації, наведеної на рисунку 4.10 показує, що температурні залежності концентрації молекул базової рідини в поверхневій фазі мають дві ділянки. При низьких температурах (від температури плавлення до 240 К) є зона формування поверхневої фази на наночастинках (концентрація поверхневої фази збільшується з температурою). При більш високих температурах (від 240 К до температури при якій втрачається колоїдна стабільність нанофлюїда) спостерігається зона зменшення товщини поверхневого шару. Це зменшення відбувається в результаті зниження міжмолекулярних сил взаємодії в поверхневій фазі і збільшення кінетичної енергії броунівського руху наночастинок. Частина молекул базової речовини переходить з поверхневої фази в рідку фазу.

Інтересною є можливість прогнозування надлишкової мольної ізобарної теплоємності з використанням даних про концентрацію молекул базової рідини в поверхневій фазі, яка отримана з даних про надлишковий мольний об'єм ΔV . Результати порівняння розрахованих за формулами (4.11) і (4.18) значень мольної ізобарної теплоємності нанофлюїдів від апроксимованих експериментальних даних (рівняння (4.10)) наведено на рисунку 4.11 і показують добре узгодження екс-

периментальних і розрахункових значень. Найбільші відхилення спостерігаються при невеликих концентраціях наночастинок, що обумовлено високою відносною похибкою визначення невеликих за абсолютною величиною значень ΔV .

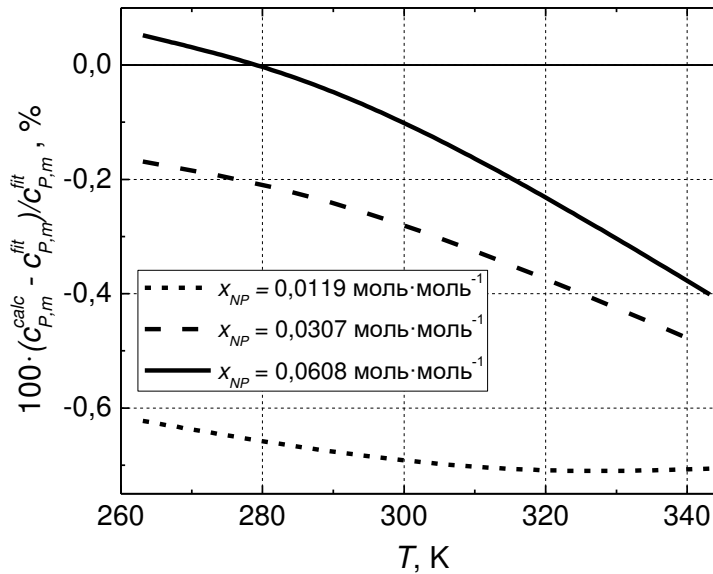


Рисунок 4.11 - Відносні відхилення апроксимованих експериментальних значень питомої ізобарної теплоємності нанофлюїда ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 (рівняння (4.10)) від розрахованих з використанням інформації про концентрацію молекул базової рідини в поверхневій фазі (формули (4.11) і (4.18))

Наявність інформації про величину надлишкового мольної об'єму і надлишкової мольної ізобарної теплоємності для нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 дозволяє розрахувати такі характеристики нанофлюїда: масу молекул базової рідини в поверхневій фазі в зразку нанофлюїда

$$m_{IPH} = m_{NF} - m_{NP} - \frac{Q_{NF}}{\Delta h_{BF}}, \quad (4.20)$$

кількість наночастинок в зразку нанофлюїда

$$n_{NP} = \frac{3 \cdot m_{NP}}{4 \cdot \pi \cdot r_{NP}^3 \cdot \rho_{NP}}, \quad (4.21)$$

середній еквівалентний радіус наночастинок в нанофлюїді - середній гідродинамічний радіус (в рамках моделі, запропонованої в даному дослідженні)

$$r_{IPH} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot m_{IPH}}{4 \cdot \pi \cdot \rho_{IPH} \cdot n_{NP}}} + r_{NP}^3, \quad (4.22)$$

де m_{IPH} - маса молекул базової рідини у поверхневій фазі зразка, кг; m_{NF} - маса зразка нанофлюїда, кг; m_{NP} - маса наночастинок зразку, кг; Q_{NF} - кількість теплоти, необхідної для плавлення зразка нанофлюїда, Дж; n_{NP} - кількість наночастинок в зразку нанофлюїда; r_{NP} - середній радіус наночастинок, м; ρ_{NP} - густина наночастинок, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; r_{IPH} - середній еквівалентний радіус наночастинок з сорбованим шаром молекул базової рідини на їх поверхні, м; ρ_{IPH} - густина базової рідини в поверхневій фазі, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Температурна залежність гідродинамічного діаметра наночастинок, розрахована за формулою (4.22), наведена на рисунку 4.12.

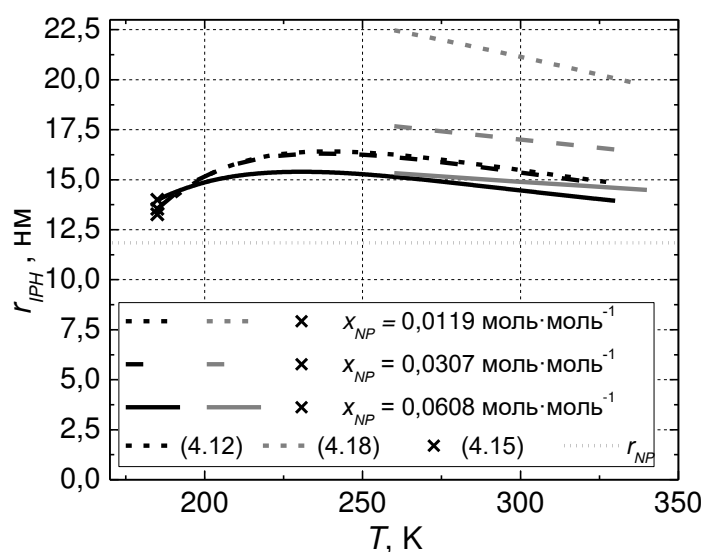


Рисунок 4.12 - Температурна залежність середнього гідродинамічного радіуса наночастинок у нанофлюїді ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 , яка розрахована за формулою (4.22) з використанням інформації про концентрацію молекул базової рідини в поверхневій фазі, що розрахована за формулами (4.12), (4.15) і (4.18)

Наведена на рисунку 4.12 інформація дозволяє сформулювати висновок, що дані про концентрацію молекул базової рідини в поверхневій фазі і про еквівален-

ний діаметр наночастинок зі структурованим шаром молекул базової рідини на поверхні, які були отримані з інформації про надлишкові величини мольного об'єму і питомої ізобарної теплоємності, не є однаковими. Причина цієї відмінності пов'язана як з невизначеністю отриманих значень надлишкового мольного об'єму і питомої ізобарної теплоємності, так з припущеннями, що були прийняті при розрахунку властивостей поверхневої фази нанофлюїдів. Ймовірно, вплив властивостей дифузійного шару на надлишковий мольний об'єм є незначним та цим впливом можна знехтувати. Навпаки, його вплив на значення надлишкової питомої ізобарної теплоємності може бути значним. По міру поступового руйнування поверхневого шару зі збільшенням температури, розраховані дані з концентрації молекул базової рідини в поверхневій фазі і з еквівалентного діаметра добре узгоджуються.

Будь-яка модель розрахунку теплофізичних властивостей повинна мати чітко визначений діапазон параметрів свого застосування. Рівняння, які запропоновані для розрахунку концентрації структурованої рідкої фази поблизу поверхні наночастинок (поверхневої фази) і гідродинамічного діаметра наночастинок також мають обмеження за діапазоном застосовності. По-перше, будь-які колоїдні системи термічно нестабільні. Тому запропонований підхід можна застосовувати тільки в діапазоні температур при яких не втрачається колоїдна стабільність досліджуваних нанофлюїдів. Друге обмеження пов'язане з тим, що при розрахунку концентрації молекул базової рідини в поверхневої фазі в формулах (4.12) і (4.18) при температурах близьких до температури плавлення знаменник наближається до нуля. Таким чином, похибки визначення надлишкових величин мольної об'єму і теплоємності поблизу температури плавлення будуть сильно впливати на точність визначення концентрації поверхневої фази.

Величини еквівалентного гідродинамічного діаметра наночастинок з поверхневою фазою, які були отримані з даних по надлишковому мольному об'єму і надлишкової питомої ізобарної теплоємності узгоджуються задовільно. Зі збільшенням концентрації наночастинок еквівалентний діаметр наночастинок з поверхневою фазою незначно зменшується. Найбільші відхилення спостерігаються для

найменших концентрацій наночастинок в нанофлюїді. Цей ефект продиктований високою невизначеністю вимірювання густини при концентраціях 0,0119 та 0,0308 моль·моль⁻¹.

4.2 Дослідження впливу домішок наночастинок на в'язкість модельних рідин

Підвищений інтерес до дослідження в'язкості нанофлюїдів привів до розробки великої кількості моделей для прогнозування цієї властивості [6, 17 - 24]. Однак, на сьогоднішній день залишаються не розробленими універсальні моделі, які можуть бути застосовані для точного прогнозування в'язкості нанофлюїдів різного складу у широкому інтервалі параметрів стану [17]. Виконаний аналіз літературних джерел показує, що більшість запропонованих моделей або прийнятні для нанофлюїдів з малою концентрацією наночастинок, або є емпіричними та розробленими для нанофлюїдів конкретного складу. Часто дослідники намагаються модифікувати «класичну» модель Ейнштейна (рівняння (1.4)), яка була запропонована для розрахунку в'язкості суспензій з невеликою концентрацією часток. Модифікуючи рівняння Ейнштейна більшість авторів часто використовують коефіцієнти, що враховують, наприклад форму наночастинок [17]. Варто також відзначити, що з'явилися інтересні роботи, в яких автори в «класичній» моделі для в'язкості пропонують враховувати наявність на поверхні наночастинок сорбованої поверхневої фази [25]. Разом з тим слід констатувати, що методи визначення товщини і властивостей цієї поверхневої фази залишаються не розробленими [13].

В роботі [13] зроблено спробу проаналізувати різні підходи до розрахунку товщини шару сорбованих молекул базової рідини на поверхні наночастинок. Слід підкреслити, що ці розрахункові залежності [13] були отримані або для конкретних нанофлюїдів, або не мають однозначного рішення, оскільки основані на використанні температурної залежності теплофізичних властивостей поверхневої фази. Але характеристики поверхневої фази залишаються недостатньо дослідженими і потребують свого подальшого вивчення. Тому одним з можливих простих

варіантів розрахунку товщини поверхневого шару, який пропонується в ряді робіт [13, 26, 27], є використання формули Ленгмюра для абсорбції молекул газів та рідин [28]

$$\delta_{IPH} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{4 \cdot M_{BF}}{\rho_{BF} \cdot N_A} \right)^{0,333}, \quad (4.23)$$

де M_{BF} - мольна маса базової рідини, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$; ρ_{BF} - густина базової рідини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; N_A - число Авогадро.

Численні результати дослідження гідродинамічного діаметра наночастинок методом динамічного розсіювання світла і методом електронної мікроскопії показують, що товщина поверхневого шару молекул базової рідини на поверхні наночастинок має більше значення, ніж розраховані з використанням залежності (4.23). На підставі проведених раніше досліджень можна стверджувати, що на поверхні наночастинок за рахунок багат шарової адсорбції формується шар молекул базової рідини товщиною кілька нанометрів [5].

4.2.1 Модель прогнозування в'язкості нанофлюїдів

Моделі для прогнозування в'язкості нанофлюїдів, що знайшли найбільше застосування на практиці, наведені в таблиці Б.6 додатку Б. З використанням даних по в'язкості нанофлюїда ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 [19], результати дослідження теплоємності якого наведені в розділі 4.1, був виконаний аналіз застосовності деяких моделей для прогнозування в'язкості - рис. 4.13.

Як впливає з наведеної на рисунку 4.13 інформації, розраховані за моделями (1) - (7) таблиці Б.6 додатку Б [29-37] значення в'язкості нанофлюїдів суттєво нижче ніж отримані в експерименті данні [19]. До аналогічного висновку прийшли і автори роботи [17]. Слід зазначити, що більшість моделей, наведених у таблиці Б.6 додатку Б, були первісно запропоновані для суспензій і оперують об'ємною часткою частинок (наночастинок). Разом з тим, необхідно враховувати той

факт, що в базовій рідині у броунівському русі беруть участь наночастинки з сорбованим на них поверхневим шаром молекул базової рідини. Отже, об'ємна концентрація наночастинок у нанофлюїді буде більше на величину об'ємної концентрації поверхневої фази

$$\varphi_{\text{NP+IPH}} = \varphi_{\text{NP}} + \varphi_{\text{IPH}}, \quad (4.24)$$

де φ_{NP} й φ_{IPH} - об'ємна частка наночастинок і молекул базової рідини в сорбованій на наночастинках поверхневій фазі, відповідно, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$.

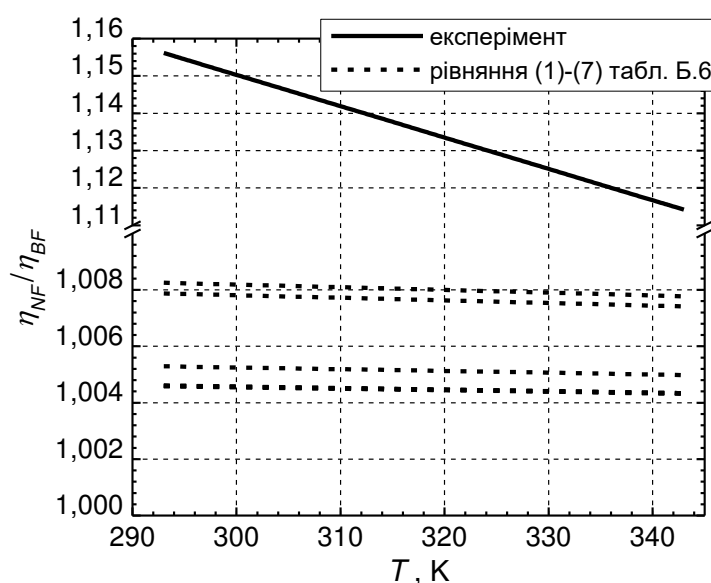


Рисунок 4.13 – Температурна залежність в'язкості нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 при $w_{\text{NP}}=0,00917 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$, розрахована з використанням різних моделей [29-37] (таблиця Б.6 додатку Б) та отримана експериментально [19]

Величина концентрації поверхневої фази φ_{IPH} мала для частинок мікронного розміру, але є досить значною для наночастинок. Ймовірно, цим можна пояснити істотну різницю між розрахованою в'язкістю за моделями, які не враховують об'ємну частку поверхневої фази і експериментальними даними.

Оскільки в нанофлюїдах у броунівському русі беруть участь наночастинки з сорбованою на їх поверхні частиною молекул базової рідини, для прогнозування в'язкості нанофлюїдів запропонована наступна залежність

$$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 + A \cdot \varphi_{NP+IPH}), \quad (4.25)$$

де A – емпіричний коефіцієнт.

Для знаходження емпіричного коефіцієнта A в рівнянні (4.25) були використані експериментальні дані з динамічної в'язкості для нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 [19]. Експериментальні дані з кінематичної в'язкості і густини нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 наведено у таблиці Б.7 додатку Б [19].

Розрахунок залежності коефіцієнта A від температури та концентрації був виконаний з урахуванням товщини поверхневого шару, яка була розрахована з використанням даних про величину надлишкової мольної ізобарної теплоємності (розділ 4.1) [5]. Для спрощення запропонованої моделі розрахунку в'язкості нанофлюїдів було прийнято припущення, що середня товщина поверхневого шару на наночастинках не залежить від концентрації наночастинок і залежить тільки від температури (рис. 4.12). Крім того, при апробації запропонованої моделі прогнозування в'язкості, розрахунок коефіцієнту A в рівнянні (4.25) додатково було виконано з використанням експериментальних даних з в'язкості нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 [19] без урахування наявності поверхневого шару на наночастинках: $\varphi_{NP+IPH} = \varphi_{NP}$. Температурна залежність об'ємної концентрації наночастинок і поверхневої фази в нанофлюїдах ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 при чотирьох масових концентраціях наночастинок наведена на рис. 4.14. Результати розрахунку коефіцієнту A наведено на рисунку 4.15.

Проведені дослідження показали (рис. 4.15), що стосовно нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 в інтервалі температур (293-343) К і концентрацій (0-0,06646) $kg \cdot kg^{-1}$ величина коефіцієнта A в рівнянні (4.24) змінюється незначно. При цьому слід підкреслити, що при відсутності урахування наявності поверхневого шару на наночастинках ($\varphi_{NP+IPH} = \varphi_{NP}$), коефіцієнт A не є величиною постійною (рис. 4.15). Ймовірно, цією обставиною можна пояснити велику кількість мо-

делей для прогнозування в'язкості (див. таблицю Б.6 додатку Б), які відрізняються тільки значеннями коефіцієнтів при величині об'ємної частки наночастинок.

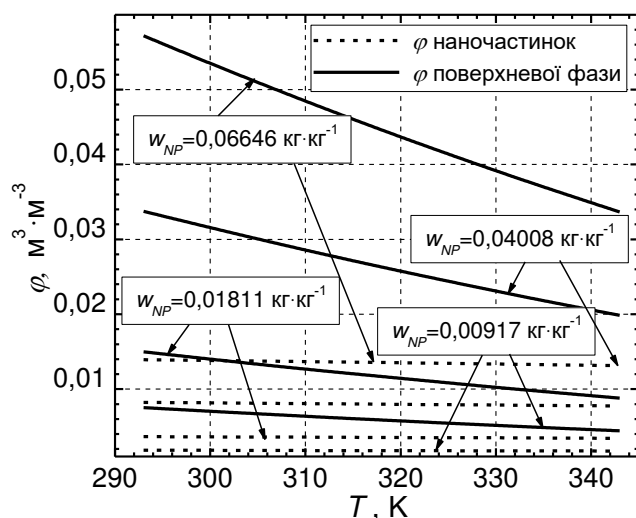


Рисунок 4.14 – Температурна залежність об'ємної концентрації наночастинок та молекул базової рідини у поверхневій фазі для нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 при різних масових частках наночастинок

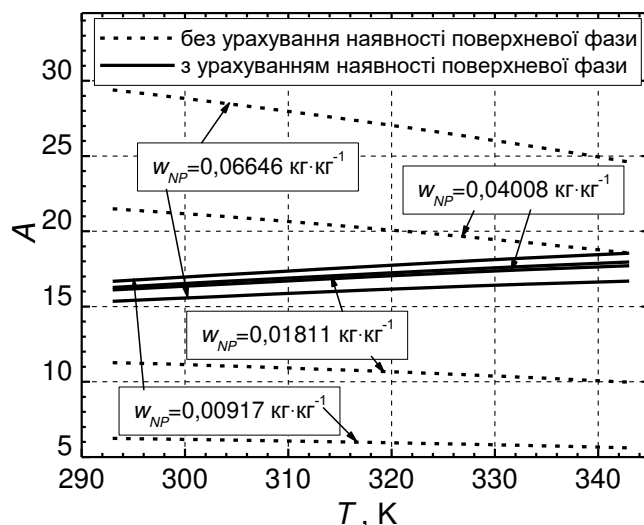


Рисунок 4.15 – Температурна залежність коефіцієнта A в рівнянні (4.25) для нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 при різних масових частках наночастинок

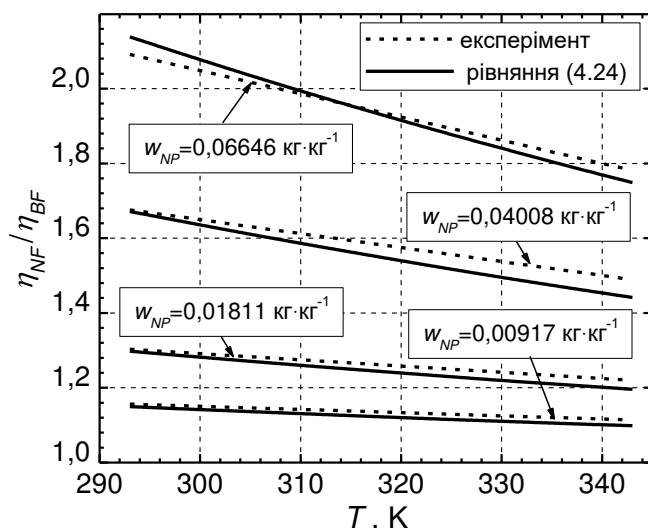


Рисунок 4.16 – Температурна залежність відносної в'язкості $\eta_{\text{NF}}/\eta_{\text{BF}}$ нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3 , яка розрахована за рівнянням (4.25) та визначена експериментально [19]

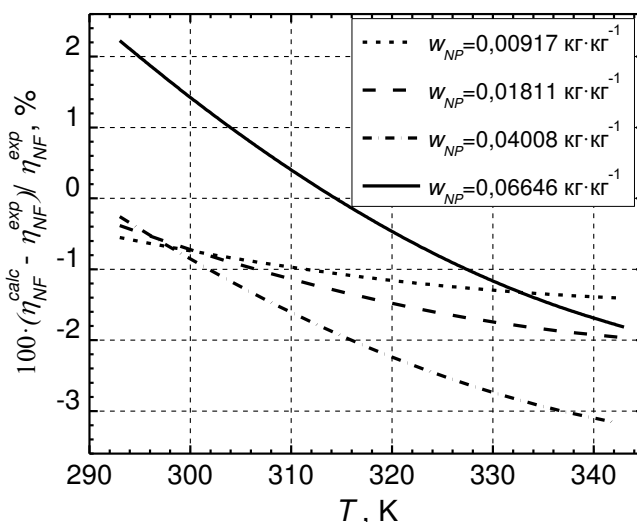


Рисунок 4.17 – Температурна залежність відносних відхилень розрахункової та експериментальної динамічної в'язкості нанофлюїду ізопропанол/ Al_2O_3

На підставі проведеного аналізу можна без значного впливу на точність розрахунку в'язкості нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 прийняти величину коефіцієнта A в рівнянні (4.25) незалежною від температури і концентрації наночастинок та рівною $A = 16,0$. Для досліджуваного нанофлюїда ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 був виконаний розрахунок величини відносної в'язкості. Результати цього розрахунку (рис. 4.16 і 4.17) показують добре узгодження експериментальних і розрахованих за рівнянням (4.24) значень в'язкості нанофлюїда ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 в широкому інтервалі температур і концентрацій.

Отриманий результат дозволяє рекомендувати запропоновану вище модель для прогнозування в'язкості нанофлюїдів при наявності обмеженої експериментальної інформації, необхідної для визначення емпіричного коефіцієнта A в рівнянні (4.25) і температурної залежності об'ємної концентрації поверхневої фази.

Для підтвердження можливості практичного застосування запропонованої моделі була виконана її апробація з використанням експериментальних даних з в'язкості нанофлюїдів, наведених в роботах [18, 38, 39].

Найбільша складність використання запропонованої моделі пов'язана з визначенням товщини поверхневого шару в досліджуваному нанофлюїді (об'ємної концентрації поверхневої фази). Методика визначення товщини поверхневого шару була заснована на вивченні температурної і концентраційної залежності величини надлишкового мольного об'єму для досліджуваних нанофлюїдів з використанням наявних в літературі експериментальних даних про густину нанофлюїдів [18, 38, 39] за залежностями (4.17)-(4.18).

Величина надлишкового мольного об'єму була розрахована для трьох різних нанофлюїдів: водного розчину етиленгліколю ($0,5271 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ етиленгліколю) і наночастинок ZnO (середній діаметр наночастинок у порошку 42,4 нм) [38]; нанофлюїду вода/наночастинки Al_2O_3 (середній діаметр наночастинок в порошку 8 нм) [18] і нанофлюїду етиленгліколь/наночастинки Co_3O_4 (середній діаметр наночастинок в порошку 17 нм) [39]. Концентрація молекул базової рідини в поверх-

невій фазі розраховувалася за рівнянням (4.18). Дані по температурній залежності густини базових рідин, їх молекулярній масі були прийняті за [40]. Густина поверхневої фази для нанофлюїдів на основі етиленгліколю визначалася за рівнянням (4.19), а для нанофлюїдів на основі води приймалася на 5% вище густини води при температурі 4 °С у відповідності до рекомендацій [41, 42], так як вода є речовиною з аномальною поведінкою густини поблизу фазового переходу рідина – тверде тіло.

Визначення товщини поверхневого шару базової рідини на наночастинках $\delta_{\text{РН}}$ виконувалося виходячи з припущення сферичної форми наночастинок та наявного середнього діаметру наночастинок у порошку.

Результати розрахунку температурної та концентраційної залежності величини $\delta_{\text{РН}}$ для розглянутих нанофлюїдів наведено на рис. 4.18.

З рисунку 4.18 можна зробити висновок, що товщина поверхневої фази на наночастинках $\delta_{\text{РН}}$ для всіх розглянутих нанофлюїдів знаходиться в інтервалі від 3 до 10 нм, що збігається з результатами власних досліджень (см. рис. 4.12 розділ 4.1.2) та досліджень інших авторів [13]. Але не є однозначною залежність товщини поверхневого шару від температури та концентрації наночастинок. Виходячи з фізичних уявлень о формуванні поверхневої фази на наночастинках, на думку автора, значної зміни цієї величини від концентрації наночастинок не очікується. Наприклад, на рис. 4.18.в при чотирьох концентраціях нанофлюїду етиленгліколь/ Co_3O_4 товщина $\delta_{\text{РН}}$ є практично однаковою, а суттєве відхилення $\delta_{\text{РН}}$ при найменшій концентрації можна пояснити похибкою вимірювання густини нанофлюїду при малій концентрації наночастинок.

З рисунків 4.18 незрозуміло залежність величини $\delta_{\text{РН}}$ від температури, але найбільш вірогідно, що зі збільшенням температури товщина сорбованого шару повинна зменшуватися (рис. 4.18.в).

Тому в якості рекомендації з визначення товщини фази сорбованої на поверхні наночастинок можна відзначити необхідність застосування даних з густини нанофлюїду, визначених при максимальній концентрації наночастинок у наноф-

лююїді з прийнятих для дослідження, з використання точного методу вимірювання густини.

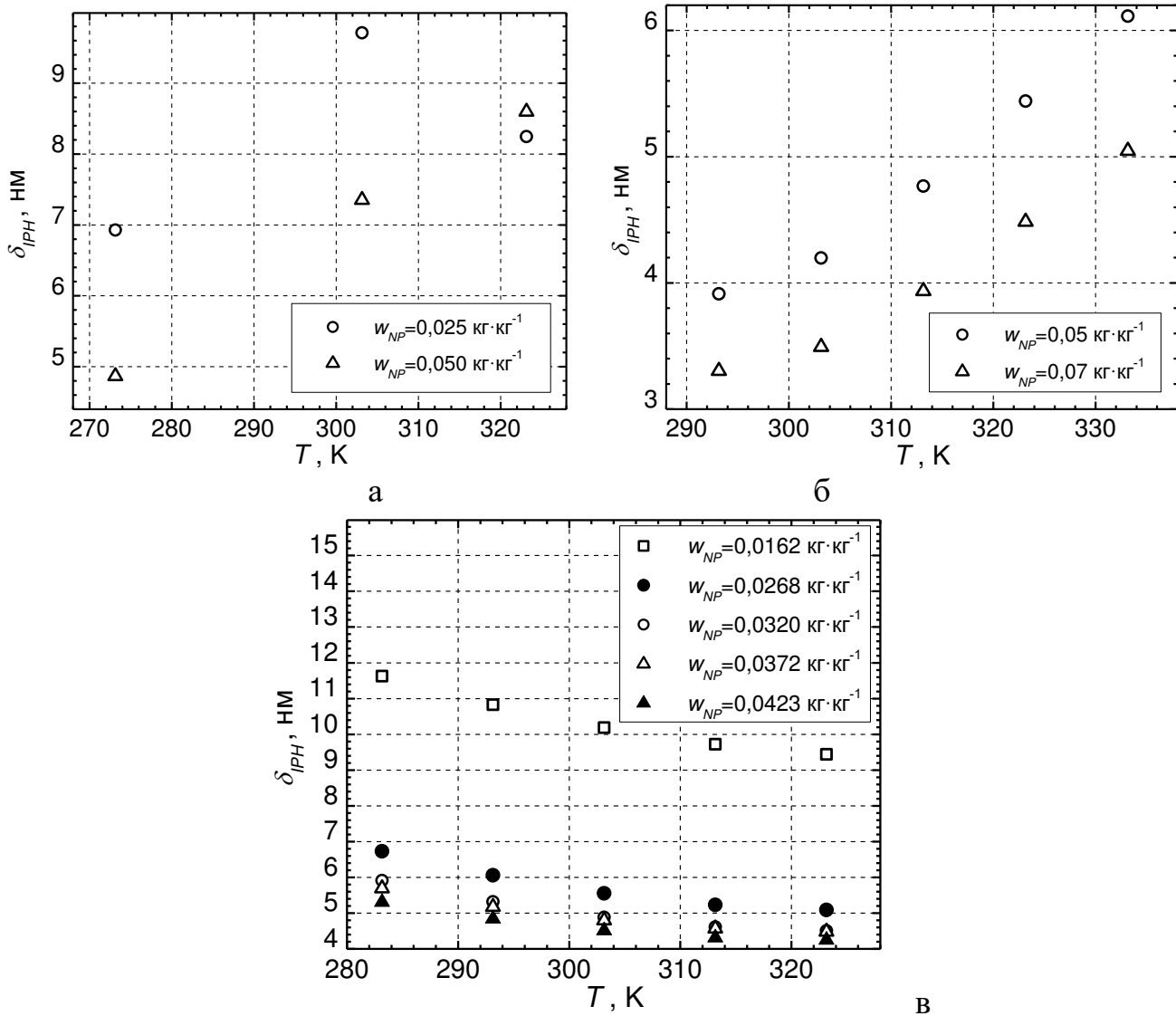


Рисунок 4.18 – Температурна залежність товщини поверхневої фази (сорбованих молекул базової рідини на поверхні наночастинок) при різних концентраціях наночастинок у нанофлюїдах: а – водний розчин етиленгліколю/ ZnO ; б – вода/ Al_2O_3 ; в – етиленгліколь/ Co_3O_4

Для подальших розрахунків коефіцієнту A рівняння (4.24) для визначення об'ємної частки поверхневої фази в нанофлюїді φ_{IPH} приймалося середнє значення товщини поверхневої фази в досліджуваному інтервалі температур та концентрацій.

На рисунках 4.19-4.20 наведена температурна залежність коефіцієнту A в рі-

в'язності (4.24) для деяких нанofлюїдів.

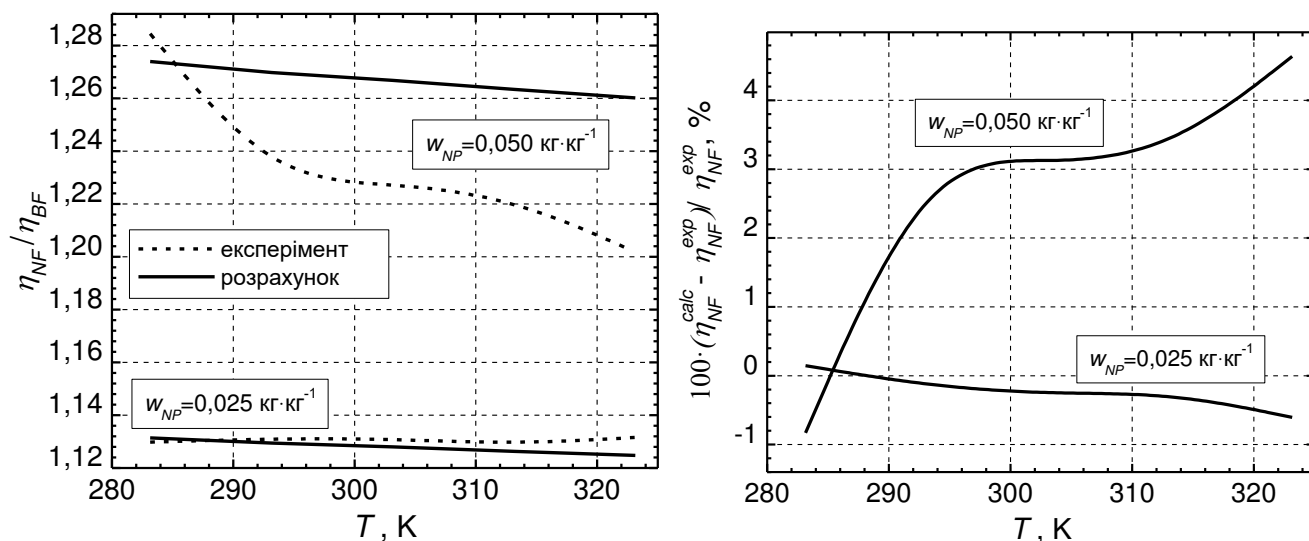


Рисунок 4.19 – Температурна залежність відносної в'язкості η_{NF}/η_{BF} та відносних відхилень розрахункової (рівняння (4.25), $A=5$) та експериментальної [38] динамічної в'язкості нанofлюїду водний розчин етиленгліколю/ ZnO

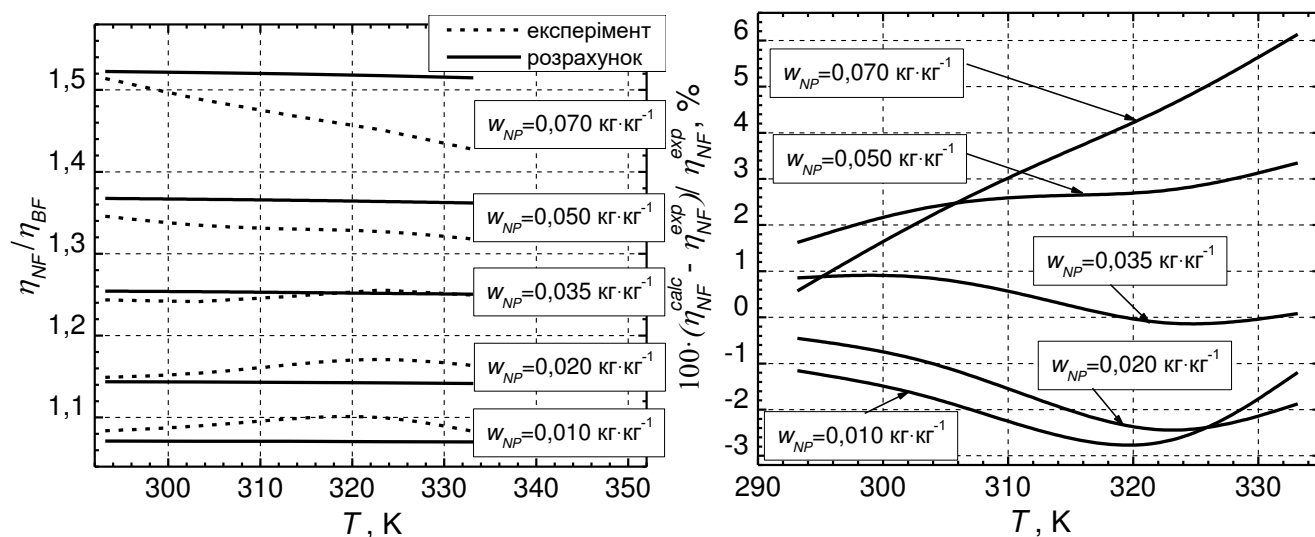


Рисунок 4.20 – Температурна залежність відносної в'язкості η_{NF}/η_{BF} та відносних відхилень розрахункової (рівняння (4.25), $A=3,5$) та експериментальної [18] динамічної в'язкості нанofлюїду вода/ Al_2O_3

Я видно з рисунків 4.19 та 4.20 максимальні відхилення величини динамічної в'язкості при використанні запропонованого рівняння (4.25) знаходяться в межах 5 %. Такі відхилення обумовлені не зовсім коректним визначенням товщини поверхневої фази. Збільшити точності прогнозування можливо при викорис-

танні якісно визначеної залежності товщини поверхневої фази (частки молекул базової рідини в поверхневій фазі) від температури за допомогою вимірювання густини досліджуваного нанофлюїду при одній концентрації наночастинок та двох або більше значеннях температури.

У випадку, коли визначення товщини поверхневої фази з використанням даних з густини неможливо, можна орієнтовно спрогнозувати в'язкість нанофлюїду, розрахувавши товщину поверхневої фази за рівнянням (4.23). Слід зазначити, що рівняння (4.23) дозволяє розрахувати температурну залежність товщини $\delta_{\text{РН}}$ для певної базової рідини, що, виходячи з фізичного уявлення о зменшенні величини $\delta_{\text{РН}}$ з температурою повинно покращити якість прогнозування в'язкості. На рисунку 4.21 наведено температурна залежність відносних відхилень розрахункової та експериментальної динамічної в'язкості нанофлюїду вода/наночастинок Al_2O_3 за рівнянням (4.25) з розрахунком товщини поверхневої фази за рівнянням (4.23).

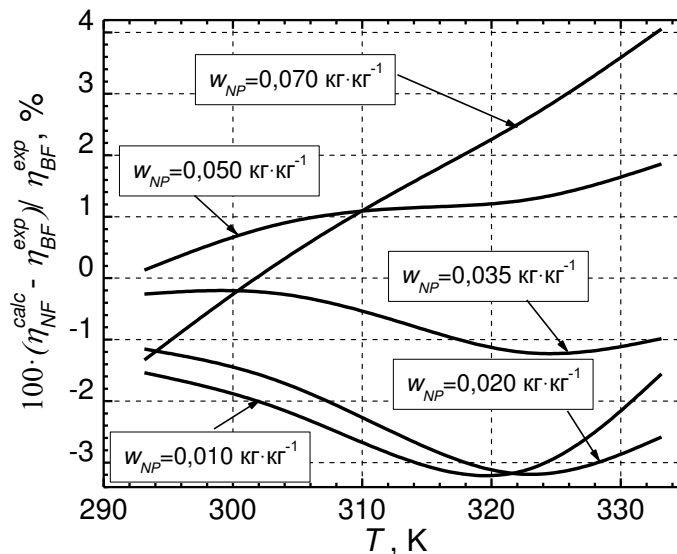


Рисунок 4.21 – Температурна залежність відносних відхилень розрахункової (рівняння (4.25), $A=18$) та експериментальної [18] динамічної в'язкості нанофлюїду вода/ Al_2O_3

Як видно з рис. 4.21, якість прогнозування в'язкості з використанням температурної залежності товщини поверхневої фази, оціненої за рівнянням (4.23) вище (рис. 4.21), ніж з використанням даних з густини нанофлюїду, виміряних з великою невизначенністю (рис. 4.20).

Таким чином, можна зробити декілька висновків. По перше, методика прогнозування в'язкості нанофлюїдів повинна включати в себе не величину об'ємної частки наночастинок, а величину, яка складається з об'ємної частки наночастинок у нанофлюїді та з частки сорбованих молекул базової рідини у поверхневій фазі на поверхні наночастинок. По друге, визначення частки поверхневої фази можливе з використанням якісної інформації з температурної залежності густини нанофлюїду (яку можна отримати з нескладного експерименту), визначеної для однієї (по можливості максимальної) концентрації наночастинок у рідині. Якщо інформація з температурної залежності густини нанофлюїду не є доступною (або не є якісною), то доцільно використовувати залежність для визначення товщини сорбованого на поверхні наночастинок шару базової рідини з використанням рівняння Ленгмюра (4.23). У третій, для прогнозування в'язкості в широкому інтервалі температур та концентрацій для певного нанофлюїду достатньо визначити емпіричний коефіцієнт A рівняння $\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 + A \cdot \varphi_{NP+IPH})$, з наявної величини в'язкості нанофлюїду, визначеної для однієї (по можливості максимальної) концентрації наночастинок у рідині та при однієї температурі.

4.3 Дослідження впливу домішок фулеренів C_{60} на теплофізичні властивості розчину холодоагент R600a/мінеральне компресорне масло

Підрозділ присвячений дослідженню вплив домішок фулеренів C_{60} у реальному робочому тілі парокompресійної холодильної машини (розчині холодоагенту R600a у мінеральному компресорному мастилі) на його теплофізичні властивості.

4.3.1 Аналіз сучасного стану досліджень впливу фулеренів C_{60} на теплофізичні властивості мастил та розчинів холодоагенту в мастилах

В наступний час з'явилася низька наукових робіт, присвячених перспективам впровадження робочих тіл парокompресійних холодильних машин з домішками наночастинок з метою підвищення їх ефективності (збільшення холодильного коефіцієнту, зменшення коефіцієнту робочого часу) [43-49].

Ефективність парокомпресійних холодильних машин залежить від оптимального вибору холодоагенту, компресорного масла та типу й концентрації наночастинок [45, 49]. Як відомо, домішки компресорного масла в холодоагентів наявні у всіх частинах контуру парокомпресійної холодильної машини. Концентрація компресорного масла в холодоагенті може змінюватися від $0,001$ до $0,01 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ на вході в випарник та досягати майже $0,60 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ на виході з випарника [50]. Домішки компресорного масла в холодоагенті суттєво впливають як на холодопродуктивність й холодильний коефіцієнта усієї системи, так й на коефіцієнт тепловіддачі у випарниках холодильних машин. Очевидно, що домішки наночастинок у РХМ сприяють ускладненню прогнозування як поведінки теплофізичних властивостей такої системи, так й оцінки параметрів процесів в холодильних машинах, у яких використовуються РХМ з домішками наночастинок у якості робочих тіл. Таким чином, інформація з впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості розчинів холодоагенту с маслом є необхідною для коректного прогнозування параметрів процесів у холодильних машинах.

Для приготування робочих тіл парокомпресійних холодильних машин зазвичай дослідники використовують в якості домішок наночастинок оксидів металів або фулерени [43-49]. На думку автора, фулерени мають дуже великі перспективи в якості домішок до компресорних мастил завдяки можливості утворювати колоїдно стабільні системи (розділ 2). Крім того, у роботах [20, 51] показано, що присутність фулеренів C_{60} у компресорних масла призводить до зниження втрат енергії на тертя у компресорах. Не зважаючи на такі перспективи, на сьогодні робота, присвячених експериментальному дослідженню впливу фулеренів на теплофізичні властивості технічно важливих рідин, досить мало [20, 21, 51-55].

В роботі [52] показано, що розчини фулеренів в мінеральному маслі мають відмінну колоїдну стабільність. Також показано, що вміст фулеренів в кількості $1,5 \%$ та 5% за об'ємом призводить до збільшення теплопровідності базової рідини на 3% та 6% відповідно.

В роботі [51] показано, що в інтервалі температур $60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$ в'язкість масла зі вмістом фулеренів $0,01 \%$ та $0,1 \%$ за об'ємом близька до в'язкості чистого мас-

ла, але при температурі 20 °С вплив домішок фулеренів на в'язкість значний та досягає 7 %. В роботі [20] не було виявлено впливу фулеренів (0,1 % за об'ємом у мінеральному маслі) на в'язкість масла в досліджуваному інтервалі температур.

Робота [21] була присвячена дослідженню впливу домішок фулеренів C_{60} на в'язкість та теплопровідність масла для двигунів марки SAE 20W50. Була показана відмінна колоїдна стабільність масла зі вмістом C_{60} . Зафіксовано зниження в'язкості при температурі 40 °С для масла з вмістом 0,1 % мас. фулеренів C_{60} , та незначне збільшення в'язкості при вмісті C_{60} 0,2 % мас. Зниження в'язкості для масла зі вмістом фулеренів при температурі 100 °С не спостерігалось. Для масла зі вмістом 0,2 % фулеренів C_{60} за масою спостерігалось збільшення теплопровідності на 3-4 % у порівнянні з чистим маслом.

Робота [53] була присвячена дослідженню деяких теплофізичних властивостей мінерального та синтетичного поліефірного мастил, модифікованих за рахунок введення $100 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ фулеренів C_{60} . Результати дослідження показали незначне (від 1 до 2,5 %) збільшення в'язкості для обох типів масла зі вмістом фулеренів та відсутність впливу фулеренів на теплопровідність у порівнянні з базовими маслами в інтервалі температур 20-80 °С.

В роботах [54, 55] було досліджено вплив малих концентрацій фулеренів на теплофізичні властивості органічних розчинників та показано аномальна зміна цих властивостей при малому вмісті фулеренів у розчині (наприклад, наявність мінімуму густини).

На основі виконаного короткого огляду можна зробити висновок, що вплив фулеренів на властивості переносу (теплопровідність та в'язкість) досить незначний у порівнянні з впливом таких наночастинок як вуглецеві нанотрубки та оксиди металів [17, 18, 21-24]. Крім того, автори робіт [20, 21, 51, 53] указують на суперечність впливу фулеренів на в'язкість: ними зафіксовані ефекти як збільшення, так й зменшення в'язкості у залежності від температури та концентрації фулеренів C_{60} у маслі.

Слід зазначити, що на сьогодні є достатньо багато робіт, присвячених дослідженню впливу наночастинок (у тому числі фулеренів) на теплопровідність та

в'язкість [17, 18, 21-24]. Однак дослідження впливу наночастинок на калоричні властивості, тиск насиченої пари, поверхневий натяг досить незначні, а для розчинів з фулеренами, які мають перспективи для використання в реальному холодильному або енергетичному обладнанні, практично відсутні. С другого боку, розчинність та деякі термодинамічні властивості фулеренів (C_{60} та C_{70}) вивчені досить детально [56-58].

Наявні експериментальні дослідження параметрів роботи парокомпресійних холодильних машин на робочих тілах з домішками фулеренів C_{60} [44-47] показують покращення їх енергетичної ефективності. Однак, дослідження теплофізичних властивостей цих робочих тіл на сьогодні в літературі відсутні. Таким чином, можна констатувати необхідність проведення експериментальних досліджень теплофізичних властивостей перспективних для холодильної галузі робочих тіл, модифікованих введенням в їх склад фулеренів C_{60} .

З урахуванням сказаного вище, метою подальшого дослідження є експериментальне вивчення та прогнозування густини, тиску насиченої пари, поверхневого натягу та в'язкості РХМ, перспективних в якості робочих тіл парокомпресійних холодильних машин: холодоагент R600a/мінеральне компресорне масло та R600a/компресорне масло/фулерени C_{60} .

4.3.2 Експериментальне дослідження теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мінеральне масло/фулерени C_{60}

Дослідження густини РХМ здійснювалося пікнометричним методом на установці, опис якої наведено в [6] (див. розділ 3).

Експеримент проводився в інтервалі температур від 258 до 353 К та масових частках холодоагенту в маслі: 0,6588; 0,4310 і 0,1725 $\text{кг}\cdot\text{кг}^{-1}$. Розширена невизначеність вимірювання густини РХМ не перевищувала 0,3 %. Отримані експериментальні дані з густини РХМ наведені в таблиці Б.8 додатка Б. Виконаний попередній експеримент показав, що вплив на густину домішок фулеренів знаходиться в межах невизначеності вимірювання густини. Густина РХМ з домішками фулеренів C_{60} розраховувалася за правилом адитивності

$$\rho_{\text{ROS+C60}} = \varphi_{\text{C60}} \cdot \rho_{\text{C60}} + (1 - \varphi_{\text{C60}}) \cdot \rho_{\text{ROS}}, \quad (4.27)$$

де $\rho_{\text{ROS+C60}}$, ρ_{C60} та ρ_{ROS} - густина РХМ+С₆₀, фулеренів С₆₀ та РХМ, відповідно, кг·м⁻³; φ_{C60} – об'ємна концентрація фулеренів, м³·м⁻³.

Експериментальні данні з густини РХМ в інтервалі температур проведення експерименту та при концентрації ізобутану від 0 до 1 кг·кг⁻¹ були апроксимовані рівнянням (4.28). Відхилення експериментальних даних від апроксимованих рівнянням (4.28) не перевищували 4,5 кг·м⁻³. Розрахована за рівнянням (4.28) концентраційна залежність густини РХМ наведена на рис. 4.22.

$$\rho_{\text{ROS}} = a + b \cdot T + c \cdot w_{\text{R}} + d \cdot T^2 + e \cdot w_{\text{R}}^2 + f \cdot T \cdot w_{\text{R}}, \quad (4.28)$$

де ρ_{ROS} - густина РХМ, кг·м⁻³; Т – температура, К; а, b, c, d, e, f – коефіцієнти рівняння (4.28), значення цих коефіцієнтів наведено в таблиці 4.2.

Дослідження впливу фулеренів С₆₀ на поверхневий натяг РХМ здійснювалося диференціальним методом капілярного підняття [6]. Перевагою цього методу є використання декількох пар капілярів для вимірювання різниці висот підняття рідини. Капілярна стала a^2 розраховувалася як середньозважене значення. Використання більш ніж одного капіляра значно підвищує точність експериментальних даних.

Розрахунок поверхневого натягу РХМ і РХМ+С₆₀ проводився за формулою [28]

$$\sigma = 0,5 \cdot g \cdot a^2 \cdot (\rho' - \rho''), \quad (4.29)$$

де ρ' і ρ'' – густини рідкої фази і парової фази, відповідно, кг·м⁻³; g – прискорення вільного падіння, м·с⁻²; a^2 – капілярна стала, м².

Данні з густини пара R600a були прийняті з використанням бази даних

RefProp [59] при тиску, який був оцінений відповідно до концентрації ізобутану в рідкій фазі РХМ або РХМ+С₆₀ при температурі експерименту.

Вимірювання капілярної сталої a^2 розчинів холодоагент/масло було проведено при масових частках холодоагенту в компресорному масла 0,246, 0,514 і 0,732 кг·кг⁻¹. Дослідження впливу фулеренів С₆₀ на капілярну сталу розчинів холодоагент/масло здійснювалося при масових частках холодоагенту в маслі: 0,263, 0,497 і 0,749 кг·кг⁻¹. При цьому зміст фулеренів в маслі був постійним та рівним 0,002 кг·кг⁻¹.

Як впливає з інформації, наведеної в таблиці Б.9 додатка Б, дані по капілярній сталій були отримані при різних концентраціях холодоагенту в РХМ і РХМ+С₆₀. Зміна складу рідкої фази РХМ і РХМ+С₆₀ при різних температурах обумовлена великим об'ємом парової фази у вимірювальній комірці [60] і збільшенням маси холодоагенту в паровій фазі. З метою оцінки впливу фулеренів на капілярну сталу і поверхневий натяг РХМ була проведена апроксимація експериментальних даних з урахуванням зміни концентрації холодоагенту в рідкій фазі розчину [60].

Результати виконаного аналізу впливу домішок фулеренів С₆₀ на капілярну сталу РХМ наведено на рисунку 4.23. З інформації, наведеної на рисунку 4.23, впливає, що домішки фулеренів С₆₀ у розчинах холодоагент/мастило сприяють зниженню капілярної сталої до 1,5% при низьких концентраціях холодоагенту і високих температурах.

Значення величини поверхневого натягу РХМ та РХМ+С₆₀, які отримані з використанням експериментальних даних та рівняння (4.29), наведені у таблиці Б.9 додатку Б.

Експериментальні данні з поверхневого натягу РХМ та РХМ+С₆₀ в інтервалі температур проведення експерименту та при концентрації ізобутану від нуля до 1 кг·кг⁻¹ були апроксимовані рівнянням (4.30). Відхилення експериментальних даних від апроксимованих рівнянням (4.30) не перевищували 0,18 мН·м⁻¹

$$\sigma_{\text{ROS(ROS+C60)}} = (a + b \cdot w_R + c \cdot w_R^2) \cdot \left(1 + \frac{T}{d \cdot \exp(-w_R)} \right)^e, \quad (4.30)$$

де $\sigma_{\text{ROS(ROS+C60)}}$ - поверхневий натяг РХМ або РХМ+С₆₀, мН·м⁻¹; w_R - концентрація холодоагенту, кг·кг⁻¹; T - температура, К; a, b, c, d, e - коефіцієнти рівняння (4.30), значення цих коефіцієнтів наведено в таблиці 4.2.

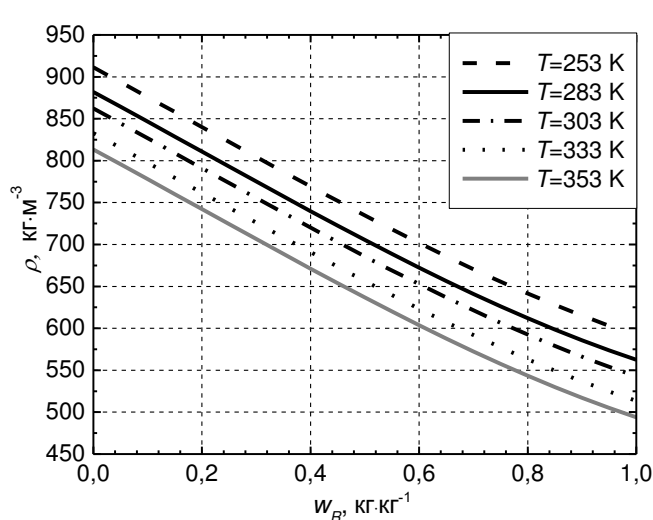


Рисунок 4.22 – Концентраційна залежність густини розчину R600a/мінеральне масло

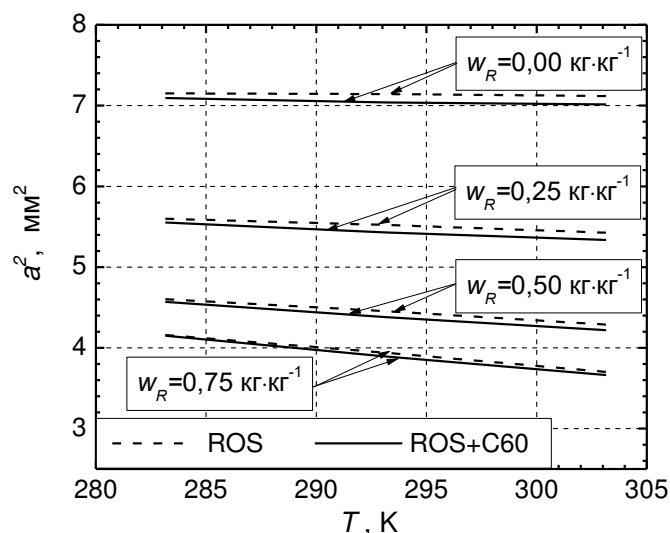


Рисунок 4.23 – Температурна залежність капілярної сталої для розчинів R600a/ мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/С₆₀

Розрахована за рівнянням (4.30) концентраційна залежність поверхневого натягу РХМ та РХМ+С₆₀, а також абсолютні відхилення ($\sigma_{\text{ROS}} - \sigma_{\text{ROS+C60}}$) наведені на рис. 4.24.

Проведене дослідження (табл. Б.9 додатка Б) вказує на те, що домішки фулеренів С₆₀ сприяють зниженню поверхневого натягу РХМ при всіх концентраціях ізобутану у РХМ та температурах експерименту. Найбільше зниження (до 1,6%) було зафіксовано при низьких концентраціях ізобутану та високих температурах.

Визначення тиску насиченої пари РХМ і РХМ+С₆₀ виконано статичним методом на установці, опис якої наведено в роботі [6] (див. розділ 2).

Вимірювання тиску насиченої пари РХМ і РХМ+С₆₀ виконано при масових частках холодоагенту в компресорному маслі: 0,319; 0,418 і 0,653 кг·кг⁻¹ і при масових частках холодоагенту в компресорному масла з домішками фулеренів С₆₀:

0,315; 0,420 та 0,652 кг·кг⁻¹. Похибка вимірювання тиску перетворювачем тиску складала 0,25 % від максимального значення шкали прибору (0 – 2500 кПа).

Результати виконаного дослідження впливу фулеренів C₆₀ на тиск насиченої пари РХМ і РХМ+C₆₀ представлені в таблиці Б.11 додатка Б.

Експериментальні данні з тиску насиченої пари РХМ та РХМ+C₆₀ в інтервалі температур проведення експерименту та при концентрації ізобутану від 0 до 1 кг·кг⁻¹ були апроксимовані рівнянням (4.31). Відхилення експериментальних даних від апроксимованих рівнянням (4.31) не перевищували 12,9 кПа при високих температурах та не перевищували 8,6 кПа при низьких температурах

$$\ln(P_{S_{ROS(ROS+C60)}}) = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2} + \left(d + \frac{e}{T}\right) \cdot \ln(w_R), \quad (4.31)$$

де $P_{S_{ROS(ROS+C60)}}$ - тиск насиченої пари РХМ або РХМ+C₆₀, кПа; w_R - концентрація холодоагенту, кг·кг⁻¹; T – температура, К; a, b, c, d, e – коефіцієнти рівняння (4.31), значення цих коефіцієнтів наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Коефіцієнти апроксимаційних рівнянь (4.28), (4.30) та (4.31) для розрахунку густини ρ , поверхневого натягу σ та тиску насиченої пари P_s

Коефіцієнт	R600a/мінеральне масло			R600a/мінеральне масло / фулерени C ₆₀ ($w_{C60}=0,002$ кг·кг ⁻¹ в маслі)	
	ρ , кг·м ⁻³	σ , мН·м ⁻¹	P_s , кПа	σ , мН·м ⁻¹	P_s , кПа
a	894.80	43,803	13,683	42,912	13,763
b	0.30697	-59,552	-2047,9	-58,100	-2099,4
c	-149.89	59,122	-84914	56,747	-76566
d	$-1.3551 \cdot 10^{-3}$	1198,7	1,2539	1219,2	1,3026
e	63.679	1,284	-330,42	1,284	-347,64
f	-0.77276				

Розрахована з використанням рівняння (4.31) концентраційна залежність тис-

ку насиченої пари РХМ та РХМ+С₆₀, а також абсолютні відхилення ($P_{SROS} - P_{SROS+C60}$) наведені на рис. 4.25.

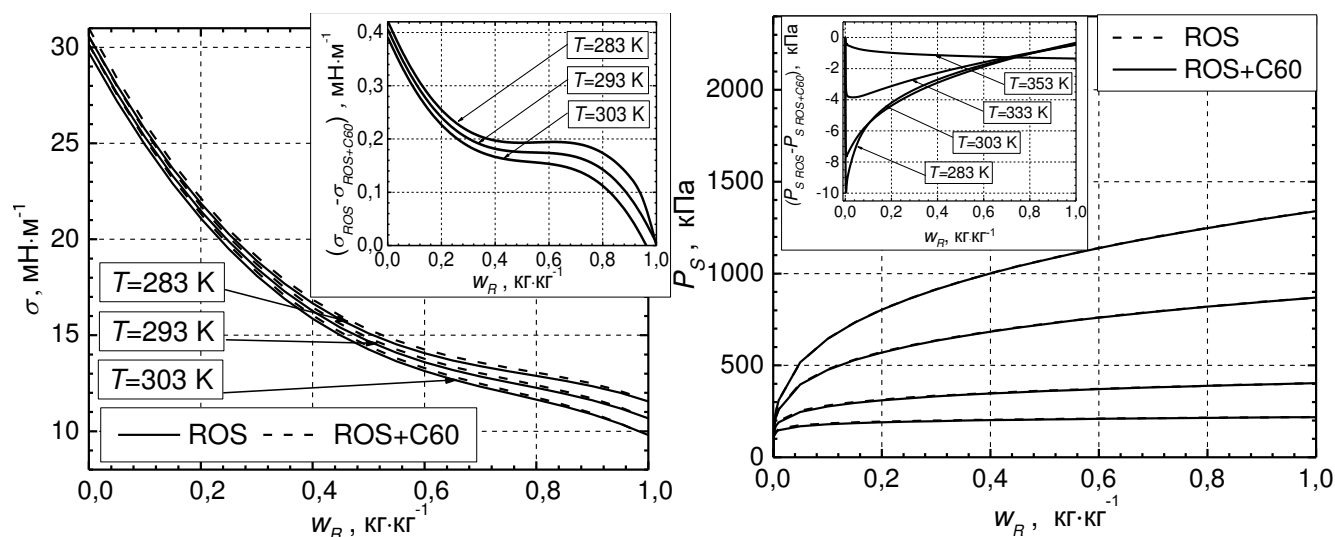


Рисунок 4.24 – Концентраційна залежність поверхневого натягу та абсолютних відхилень ($\sigma_{ROS} - \sigma_{ROS+C60}$) для розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/С₆₀ при різних концентраціях холодоагенту в рідкій фазі РХМ – w_R ($w_{C60}=0,0020$ кг·кг⁻¹ в маслі)

Рисунок 4.25 – Концентраційна залежність тиску насиченої пари та абсолютного відхилення тиску насиченої пари ($P_{SROS} - P_{SROS+C60}$) для розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/С₆₀ ($w_{C60}=0,0020$ кг·кг⁻¹ в маслі)

Отримані результати дозволяють прийти до висновку про те, що домішки фулеренів С₆₀ призводять до підвищення тиску насиченої пари РХМ (див. рисунок 4.25). Таким чином, проведений аналіз отриманих в експерименті даних показує, що відносний вплив фулеренів С₆₀ на тиск насиченої пари РХМ залежить як від складу РХМ, так і від температури. Максимальний вплив фулеренів С₆₀ на тиск насиченої пари (до 7%) спостерігається при низьких температурах.

Експериментальне дослідження динамічної в'язкості РХМ і РХМ+С₆₀ виконано методом кульки, що котиться, на віскозиметрі Гепплера (см. розділ 3). Похибка прибору (за паспортними даними) складала до 1,0 % в усьому інтервалі вимірювань. Вимірювання в'язкості виконані в діапазоні температур від 253 до 283 К і масових частках холодоагенту в маслі: для РХМ 0,3498; 0,4794 і 0,7491 кг·кг⁻¹ и

для РХМ+С₆₀ 0,3514; 0,4812 і 0,7435 кг·кг⁻¹. Кінематичну в'язкість компресорного масла та розчину фулеренів С₆₀ в маслі було також вимірено з використанням капілярних віскозиметрів. Похибка приладу (за паспортними даними) складала до 0,35 % в усьому інтервалі вимірювань. Результати експериментальних даних демонструє табл. Б.11 додатка Б.

Експериментальні данні з динамічної в'язкості РХМ та РХМ+С₆₀ в інтервалі температур та концентрацій проведення експерименту були апроксимовані рівнянням (4.32). Відхилення експериментальних даних від апроксимованих рівняннєм (4.32) не перевищували 1,2 мПа·с для масла та розчину масла з фулеренами при низьких температурах, та не перевищували 6,1 мПа·с при високих температурах. Аналогічно для РХМ та РХМ+С₆₀ відхилення не перевищували 0,050 мПа·с при високих концентраціях масла в РХМ (РХМ+С₆₀), та не перевищували 0,025 мПа·с при низьких концентраціях масла

$$\log(\log(\eta_{S_{ROS(ROS+C60)}} + 0,8)) = a + b \cdot \log(T), \quad (4.32)$$

де $\eta_{ROS(ROS+C60)}$ - динамічна в'язкість РХМ або РХМ+С₆₀, мПа·с; Т – температура, К; А и В – коефіцієнти рівняння (4.32), значення цих коефіцієнтів може бути розраховано з використанням наступних рівнянь

$$a_{ROS} = 10,498 + 7,9459 \cdot w_R, \quad (4.33)$$

$$b_{ROS} = 4,1748 + 4,1212 \cdot w_R, \quad (4.34)$$

$$a_{ROS+C60} = 10,292 + 9,2980 \cdot w_R, \quad (4.35)$$

$$b_{ROS+C60} = 4,0908 + 4,6943 \cdot w_R, \quad (4.36)$$

де w_R - концентрація холодоагенту, кг·кг⁻¹;

Розрахована з використанням рівняння (4.32) концентраційна залежність динамічної в'язкості РХМ та РХМ+С₆₀, а також відносної залежності в'язкості ($\eta_{ROS}/\eta_{ROS+C60}$) наведені на рис. 4.26.

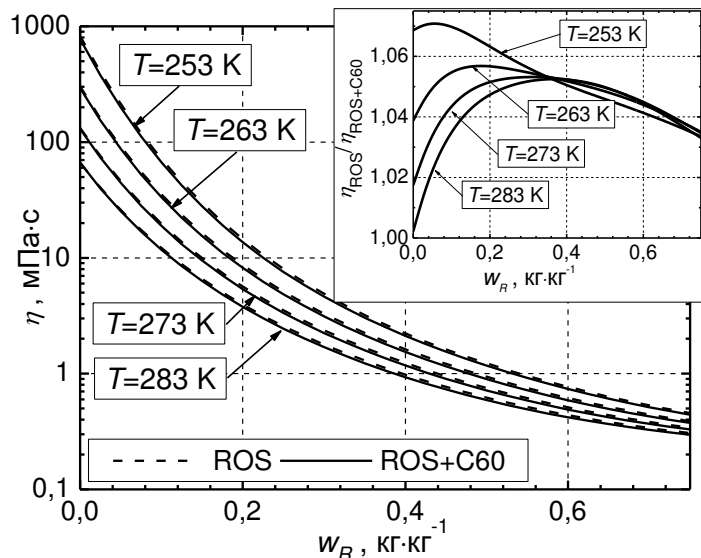


Рисунок 4.26 – Концентраційна залежність динамічної в'язкості та відносної в'язкості ($\eta_{\text{ROS}}/\eta_{\text{ROS+C60}}$) для розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/C₆₀ при різних концентраціях холодоагенту в рідкій фазі РХМ – w_R ($w_{\text{C60}}=0,0020 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ в маслі)

Виконане експериментальне дослідження показує, що домішки фулеренів сприяють зменшенню в'язкості РХМ. Цей ефект проявляється найбільш помітно до 6 % при низьких температурах і високих концентраціях масла в холодоагенті – рисунок 4.26. При високих температурах та низьких концентраціях масла в РХМ вплив фулеренів на в'язкість незначний.

4.3.3 Прогнозування теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мінеральне масло/фулерени C₆₀

Прогнозування властивостей технічно важливих для холодильної галузі багатокомпонентних речовин є важливою задачею. Одним з найбільш достовірних підходів на думку автора є використання методу, який базується на застосуванні обмеженої експериментальної інформації з властивостей багатокомпонентної рідких сумішей. Такий підхід суттєво зменшує затрати часу та матеріальних ресурсів на проведення експериментальних досліджень.

В роботах [6, 16] автори для прогнозування теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/масло (РХМ) на лінії кипіння запропонували використовувати

методику SP-QSPR (Scaling Principles - Quantitative Structure-Property Relationship). В основу цієї методики покладено застосування (для цілей прогнозування властивостей рідких речовин й розчинів) малоконстантних рівнянь (див. рівняння (1)-(6) в таблиці Б.12 додатку Б) і встановлених у роботах [6, 16] залежностей між критичним мольним об'ємом і різними структурно-адитивними комплексами. Але використання цієї методики стосовно прогнозування властивостей РХМ з додаванням малих кількостей фулеренів та чутливість даної методики до зміни властивостей РХМ+С₆₀ до наступного часу не була перевірена.

Тому метою даного підрозділу є перевірка можливостей застосування методики SP-QSPR [6, 16] для задач прогнозування властивостей РХМ+С₆₀.

При реалізації зазначеної моделі прогнозування властивостей РХМ і РХМ+С₆₀ у широкому інтервалі параметрів стану були використані отримані експериментальні дані з теплофізичних властивості розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/С₆₀ (підрозділ 4.3.2). Прогнозування теплофізичних властивостей розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/С₆₀ виконано в інтервалі температур застосування цього робочого тіла в побутових холодильних приладах $253 \leq T \leq 353$ К.

Першим етапом методики прогнозування теплофізичних властивостей РХМ і РХМ+С₆₀ є апроксимація отриманих експериментальних даних з капілярної сталості, густини, тиску насиченої пари і в'язкості: $a^2 = f(T, w_R)$, $\rho = f(T, w_R)$, $P_s = f(T, w_R)$, $\eta = f(T, w_R)$. Ця процедура необхідна для зменшення впливу випадкової складової похибки вимірюваних теплофізичних властивостей.

Другим етапом є визначення псевдокритичних параметрів та коефіцієнтів рівнянь (1) – (6) таблиці Б.12 додатку Б з використанням експериментальної інформації з густини, тиску насиченої пари, в'язкості і поверхневого натягу об'єктів дослідження при двох або декількох температурах.

Показники степеня у кореляціях (1)-(3) і (5) таблиці Б.12 додатку Б були прийняті рівними значенням критичних індексів: $\beta=0,3245$, $\mu=1,2586$, $n=0,9341$ [61].

Володіючи інформацією з величин густини РХМ і РХМ+С₆₀, можна розрахувати значення псевдокритичної температури і значення критичної амплітуди для різниці ортобаричних густин ρ_0 (див. рівняння (2) таблиці Б.12 додатку Б). Ці величини можуть бути отримані при апроксимації даних про різниці густин на лініях кипіння і конденсації з рівняння (2) таблиці Б.12 додатку Б при фіксованих концентраціях РХМ і РХМ+С₆₀. Розраховані значення псевдокритичної температури та критичної амплітуди для ортобаричної густини ρ_0 при різних масових концентраціях холодоагенту в компресорному маслі були апроксимовані рівняннями (4.37) та (4.38)

$$\bar{T}_C = a + b \cdot w_R^2 + c \cdot \exp(w_R) + d \cdot w_R^{0.5}, \quad (4.37)$$

$$\rho_0 = a + b \cdot w_R + c \cdot w_R^2, \quad (4.38)$$

де a , b , c й d - коефіцієнти рівнянь (4.37) та (4.38), для розглянутих об'єктів дослідження їх значення наведені у таблиці 4.3.

Як впливає з отриманих результатів розрахунку, домішки фулеренів С₆₀ не призводять до суттєвої зміни псевдокритичної температури РХМ (таблиця Б.13 додатку Б). Цей висновок знаходиться у відповідності з висновками більш ранньої роботи автора (у співавторстві), присвяченої дослідженню впливу домішок наночастинок TiO₂ і Al₂O₃ на псевдокритичні параметри РХМ [6].

Для визначення псевдокритичної густини об'єктів дослідження було використано залежність між мольним об'ємом рідкої фази $V_0 = M_{\text{ROS(ROS+C60)}} / \rho_0$ при $T = 0$ К і мольним критичним об'ємом $\bar{V}_C(w_R) = 3,942 \cdot V_0(w_R)$ [16]

$$\bar{\rho}_C(w_R) = \rho_0 / 3,942, \quad (4.39)$$

де $M_{\text{ROS(ROS+C60)}}$ - мольна маса РХМ або РХМ+С₆₀, кг·кмоль⁻¹.

Мольна маса РХМ і РХМ +С₆₀ розраховувалася за формулою

$$M_{\text{ROS(ROS+C60)}} = M_{\text{R}} \cdot x_{\text{R}} + M_{\text{Oil}} \cdot x_{\text{Oil}} + M_{\text{C60}} \cdot (1 - x_{\text{R}} - x_{\text{Oil}}), \quad (4.40)$$

де M_{R} , M_{Oil} та M_{C60} - мольна маса холодоагента, масла та фулеренів, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$, відповідно.

Мольна маса компресорного масла ($M_{\text{Oil}} = 252 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$) була розрахована за кореляцією, запропонованою в [65] з використанням інформації о густині масла.

Володіючи інформацією з величин $\bar{\rho}_{\text{C}}(w_{\text{R}})$, $\bar{T}_{\text{C}}(w_{\text{R}})$ та експериментальних даних з $\rho_{\text{ROS(ROS+C60)}}$ при одній температурі РХМ і РХМ+С₆₀, можна визначити невідомий коефіцієнт $B_1(w_{\text{R}})$ у рівнянні (5) таблиці Б.12 додатку Б для густини насиченої рідини.

Розраховані за викладеною методикою значення псевдокритичної густини РХМ і РХМ +С₆₀ та коефіцієнту $B_1(w_{\text{R}})$ при різних концентраціях холодоагента в компресорному маслі наведені в таблиці Б.13 додатку Б. З наведеної у таблиці Б.13 додатку Б інформації випливає, що домішки фулеренів незначно збільшують значення псевдокритичної густини розчинів холодоагент/масло при всіх концентраціях компонентів.

Для розрахунку критичної амплітуди σ_0 для РХМ і РХМ+С₆₀ при різних концентраціях холодоагента (рівняння (3) таблиці Б.12 додатку Б) були використані апроксимовані данні з поверхневого натягу при концентрації холодоагента в поверхневому шарі $w_{\text{SURF R}}$ при одній температурі та рівняння для $\bar{T}_{\text{C}}(w_{\text{SURF R}})$. Слід зазначити, що при розрахунку псевдокритичних параметрів для прогнозування поверхневого натягу і тиску насиченої пари РХМ і РХМ з додаванням фулеренів необхідно враховувати відмінність складу рідкої фази і поверхневого шару (шару рідини біля границі розділу фаз рідина/парова фаза) [6, 62].

Для визначення ефективної концентрації поверхневого шару була використана методика, наведена в роботах [6, 62]. Таким чином експериментальні данні про тиск насиченої пари і поверхневий натяг РХМ і РХМ+С₆₀ були віднесені до кон-

центрації холодоагенту в поверхневому шарі.

Скориговані на ефективну концентрацію поверхневого шару експериментальні дані про поверхневий натяг були використані для розрахунку критичної амплітуди σ_0 при різних концентраціях холодоагенту в маслі або маслі з додаванням фулеренів. Значення коефіцієнта σ_0 при різних концентраціях холодоагенту в поверхневому шарі апроксимовані рівнянням

$$\sigma_0 = a + b \cdot w_{\text{SURF R}}^{1.5} + c \cdot \exp(w_{\text{SURF R}}) + d \cdot w_{\text{SURF R}}^{0.5} \quad (4.41)$$

де коефіцієнти a , b , c та d рівняння (4.41) для РХМ та РХМ+ C_{60} наведено у таблиці 4.3.

Абсолютні відхилення розрахованого за рівняннями (4.41) та (3) таблиці Б.12 додатку Б поверхневого натягу від апроксимованих значень наведено на рис. 4.27. Як видно з рис. 4.27 відхилення не перевищують $0,6 \text{ мНм} \cdot \text{м}^{-1}$.

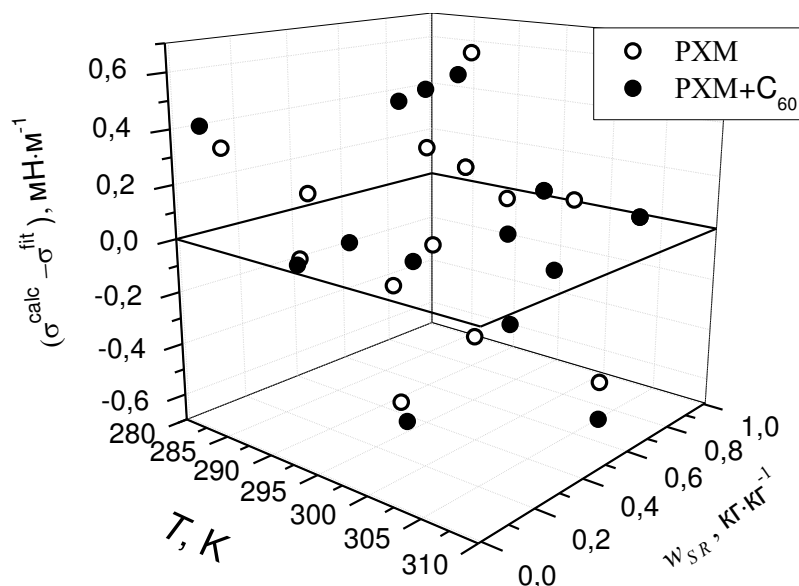


Рисунок 4.27 – Абсолютні відхилення розрахованого за рівняннями (4.41) та (3) таблиці Б.12 додатку Б поверхневого натягу від апроксимованих рівнянням (4.30) значень $(\sigma^{\text{calc}} - \sigma^{\text{fit}})$ для розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/ C_{60}

Псевдокритичний тиск може бути розрахований з використанням мінімальної кількості експериментальної інформації з тиску насиченої пари і поверхневого натягу (перерахованих на ефективну концентрацію холодоагенту в поверхневому

шарі) при двох або декількох температурах. Для прогнозування значень псевдокритичного тиску РХМ і РХМ з додаванням фулеренів була використана кореляцію (6) таблиці Б.12 додатку Б для опису тиску насиченої пари РХМ на лінії кипіння для неасоційованих речовин [6, 62, 63].

Як було показано в роботах [6, 62, 63], при прогнозуванні тиску насиченої пари РХМ (РХМ з додаванням наночастинок) і розрахунку псевдокритичного тиску $\bar{P}_C(w_{SURF R})$ параметр b (рівняння (6) таблиці Б.12 додатку Б) не залежить від концентрації холодоагенту в маслі (слід зазначити, що значення коефіцієнту b для різних речовин змінюються в достатньо вузькому інтервалі значень). Цей параметр можна отримати при апроксимації даних з тиску насиченої пари чистого холодоагенту рівнянням (6) таблиці Б.12 додатку Б. З використанням даних, наведених в [59], було отримано значення коефіцієнту $b = -5,167$ для ізобутану.

Два невідомих параметри у рівнянні (6) таблиці Б.12 додатку Б – псевдокритичний тиск $\bar{P}_C(w_{SURF R})$ і псевдокритичне значення критерію Ріделя α_R . Значення цих коефіцієнтів можуть бути визначені з обмежених за обсягом і скоригованих на концентрацію поверхневого шару рідкої фази РХМ (РХМ+ C_{60}) експериментальних даних про тиск насиченої пари.

Розраховані за викладеною методикою значення коефіцієнтів рівняння (6) таблиці Б.12 додатку Б при різних концентраціях холодоагенту в поверхневому шарі РХМ та РХМ+ C_{60} в інтервалі концентрацій $w_{SURF R}$ від 0,5 до 1,0 $kg \cdot kg^{-1}$ апроксимовані рівняннями:

$$\bar{P}_C = a + b \cdot w_{SURF R}^{1.5} + c \cdot w_{SURF R}^{2.5} + d \cdot w_{SURF R}^3 ; \quad (4.42)$$

$$\alpha_R = a + b \cdot w_{SURF R} + c \cdot w_{SURF R}^2 , \quad (4.43)$$

де коефіцієнти a , b , c та d рівнянь (4.42) та (4.43) для РХМ та РХМ+ C_{60} наведено в таблиці 4.3.

З наведеної на рисунку 4.28 інформації випливає, що домішки фулеренів не-

суттєво впливають на значення псевдокритичного тиску РХМ.

Зіставлення розрахованих за запропонованою методикою значень тиску насиченої пари РХМ і РХМ+С₆₀ представлено на рисунку 4.29. Абсолютні відхилення розрахованого за ріннями (4.42), (4.43) та (6) таблиці Б.12 додатку Б тиску насичених парів від апроксимованих рівнянням (4.31) значень ($P_s^{calc} - P_s^{fit}$) для РХМ і РХМ+С₆₀ наведено на рис. 4.30. Як видно з рис. 4.30 відхилення розрахованих за запропонованою методикою значень тиску насиченої пари не перевищують 20 кПа. Але завдяки низькій концентрації фулеренів в РХМ ефект від домішок фулеренів нижче ніж ($P_s^{calc} - P_s^{fit}$). Але тенденція впливу фулеренів є стійкою в цілому інтервалі температур та концентрацій.

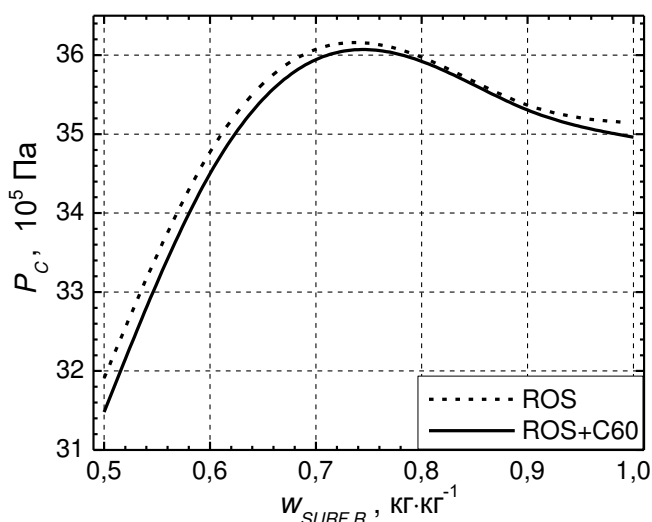


Рисунок 4.28 – Концентраційна залежність псевдокритичного тиску для розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло /C₆₀ ($w_{C60}=0,002 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в маслі)

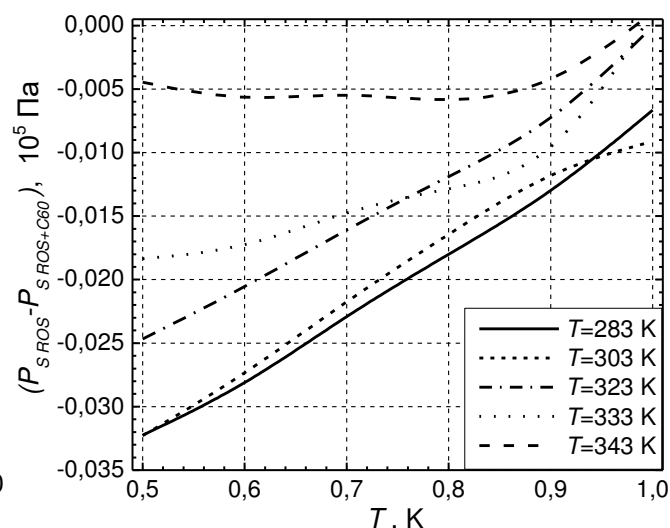


Рисунок 4.29 – Концентраційна залежність абсолютних відхилень тиску насиченої пари ($P_{S \text{ ROS}} - P_{S \text{ ROS+C60}}$) для розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло /C₆₀ ($w_{C60}=0,002 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в маслі)

З інформації, наведеної на рисунку 4.29, випливає, що домішки фулеренів С₆₀ практично у всьому інтервалі концентрацій сприяють підвищенню тиску насиченої пари РХМ. Найменший ефект впливу фулеренів на тиск насиченої пари спостерігається для розчинів з великою концентрацією масла. Найбільший внесок фулеренів у тиск насиченої пари РХМ спостерігається при низьких температурах.

Як показано в роботі [64], пониження поверхневого натягу чистих речовин і РХМ завжди сприяє підвищенню тиску насиченої пари. Виконавши порівняння скоригованих на концентрацію поверхневого шару експериментальних даних, було отримано закономірний результат – домішки фулеренів сприяють зменшенню поверхневого натягу і збільшенню тиску насиченої пари РХМ (див. рисунки 4.25, 4.25 та 4.29).

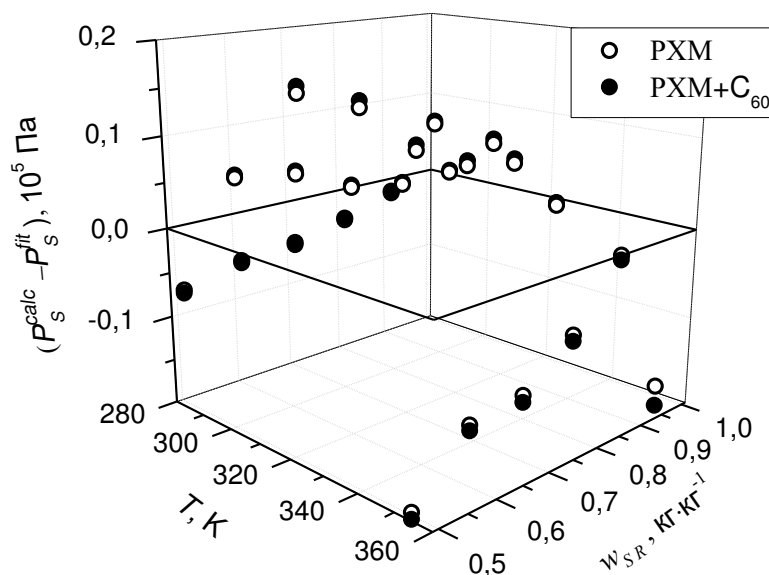


Рисунок 4.30 – Абсолютні відхилення розрахованого за рівняннями (4.42), (4.43) та (6) таблиці Б.12 додатку Б тиску насиченої пари від апроксимованих рівнянням (4.31) значень $(P_s^{\text{calc}} - P_s^{\text{fit}})$ для розчинів R600a/мінеральне масло і

R600a/мінеральне масло/C₆₀

В рамках моделі SP-QSPR для розрахунку в'язкості РХМ та РХМ з домішками фулеренів C₆₀ була використана кореляція (4) таблиці Б.12 додатку Б. Значення ортохора Or (структурно адитивного комплексу) у цій кореляції може бути розраховано в рамках моделі SP-QSPR з використанням залежності між Or и мольним об'ємом V₀ [16]

$$\text{Or} = 1,227 \cdot V_0 = 1,227 \cdot M_{\text{ROS}(\text{ROS}+\text{C}_{60})} / \rho_0 \cdot \quad (4.44)$$

Мольна маса РХМ та РХМ+C₆₀ була розрахована за рівнянням (4.40).

Два коефіцієнта a_η та b_η , що залишилися невідомими в рівнянні (4) таблиці Б.12 додатку Б можна визначити з використанням експериментальної інформації про в'язкість РХМ та РХМ+С₆₀ при двох температурах.

Розраховані за викладеною методикою значення коефіцієнтів рівняння (4) таблиці Б.12 додатку Б при концентраціях холодоагенту в РХМ та РХМ+С₆₀ від 0,5 до 1,0 кг·кг⁻¹ апроксимовані рівнянням

$$a_\eta(b_\eta) = \frac{(a + c \cdot w_R + e \cdot w_R^2)}{(1 + b \cdot w_R + d \cdot w_R^2)}, \quad (4.45)$$

де коефіцієнти a , b , c , d та e рівняння (4.46) для величин a_η та b_η для РХМ та РХМ+С₆₀ наведено у таблиці 4.3.

Абсолютні відхилення розрахованого за рівняннями (4.45) та (4) таблиці Б.12 додатку Б динамічної в'язкості від апроксимованих рівняннями (4.32) – (4.36) значень $(\eta^{\text{calc}} - \eta^{\text{fit}})$ для РХМ і РХМ+С₆₀ наведено на рис. 4.31.

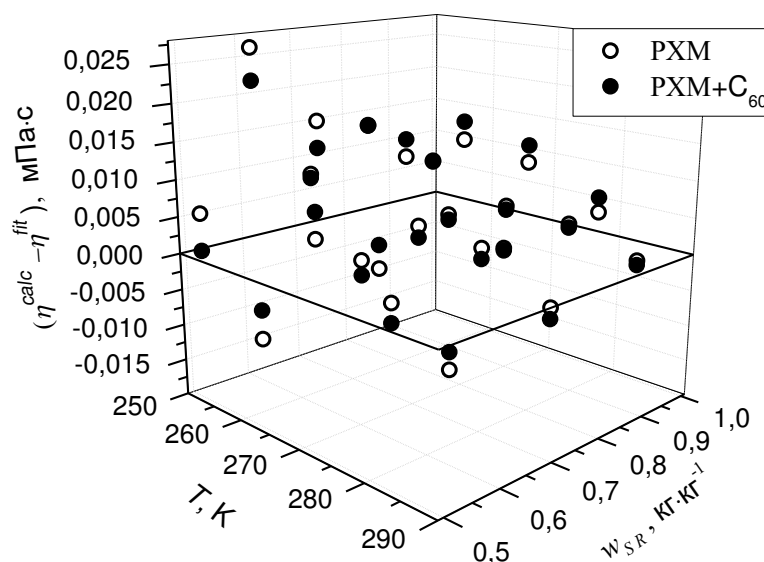


Рисунок 4.31 – Абсолютні відхилення розрахованого за рівняннями (4.45) та (4) таблиці Б.12 додатку Б динамічної в'язкості від апроксимованих рівняннями

(4.32) – (4.36) значень $(\eta^{\text{calc}} - \eta^{\text{fit}})$ для розчинів R600a/мінеральне масло і

R600a/мінеральне масло/С₆₀

Таблиця 4.3 – Значення коефіцієнтів апроксимаційних рівнянь (4.37), (4.38), (4.41), (4.42), (4.43), (4.45)

	a	b	c	d	e
R600a/мінеральне масло					
\bar{T}_C, K	782,32	126,84	-35,844	-403,43	-
$\rho_0, kg m^{-3}$	1088,60	-174,637	-80,761	-	-
$\sigma_0, mN \cdot m^{-1}$	125,011	89,10539	-69,3113	26,12661	-
$\bar{P}_C, 10^5 Pa$	-15,3720	351,856	-762,237	460,877	
α_R	-2,46358	12,4109	-3,44209		
a_η	1084,77	-4,0131	-2093,64	4,16493	1036,43
b_η	3,85520	-0,86734	-6,19667	0,43972	2,57828
R600a/ мінеральне масло /C ₆₀ (W _{C60} =0,002 кг·кг ⁻¹ в маслі)					
\bar{T}_C, K	785,18	128,61	-38,677	-400,47	-
$\rho_0, kg m^{-3}$	1090,59	-175,761	-80,476	-	-
$\sigma_0, mN \cdot m^{-1}$	90,60967	39,08556	-35,7117	19,25699	-
$\bar{P}_C, 10^5 Pa$	-16,0733	349,357	-747,236	448,897	
α_R	-2,57439	12,4833	-3,42083		
a_η	1099,95	-3,98795	-2136,61	4,10207	1062,86
b_η	3,47006	-1,08621	-5,18500	0,82476	2,01402

Як видно з рис. 4.31 відхилення розрахованих за запропонованою методикою значень динамічної в'язкості від апроксимованих не перевищують 0,025 мПа·с. Але завдяки низькій концентрації фулеренів в РХМ ефект від домішок фулеренів нижче ніж $(\eta^{calc} - \eta^{fit})$. Але тенденція впливу фулеренів є стійкою в цілому інтервалі температур та концентрацій.

У таблицях Б.13 та Б.14 додатку Б наведено розраховані при різних концентраціях холодоагенту значення псевдокритичних параметрів та коефіцієнтів рівнянь (1) - (6) таблиці Б.12 додатку Б для об'єктів дослідження R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/C₆₀. Маючи інформацію про псевдокритичні параметри і коефіцієнти рівнянь (1) - (6) таблиці Б.12 додатку Б для об'єктів дослідження, можна виконати розрахунок теплофізичних властивостей в діапазоні параметрів: T=253-330 К та концентраціях холодоагенту від 0,5 до 1,0 кг·кг⁻¹ в РХМ.

Отримана інформація про залежності густини, поверхневого натягу, тиску насиченої пари і в'язкості розчинів R600a/ мінеральне масло і R600a/мінеральне масло/фулерени C₆₀ від температури і концентрації може бути використана при моделюванні теплообмінних процесів у випарниках холодильних машин.

4.4 Висновки за розділом

1. Виконано аналіз експериментальної інформації про вплив наночастинок Al₂O₃ у ізопропанолі (інтервал температур 184 - 330 К, концентрацій 0- 0,0996 кг·кг⁻¹) та фулеренів C₆₀ у тетраліні (інтервал температур 243 - 333 К, концентрацій 0- 0,010 кг·кг⁻¹) на питому ізобарну теплоємність базових модельних рідин. Показано, що вплив наночастинок завжди приводить до зниження теплоємності базової рідини та не прогнозується з використанням правила адитивності. Виконано аналіз експериментальної інформації з впливу домішок 0,0020 кг·кг⁻¹ фулеренів C₆₀ у мінеральне компресорне масло на тиск насиченої пари (інтервал температур 283 - 354 К), поверхневий натяг (інтервал температур 283 - 303 К) та в'язкість (інтервал температур 253 - 283 К) масла та його розчинів у холодоагенті R600a. Показано, що присутність фулеренів сприяє зниженню поверхневого натягу та збільшенню тиску насиченої пари. Крім того, показано, що присутність фулеренів сприяє зниженню в'язкості масла при низьких температурах та практично не впливає на в'язкість при більш високих температурах.

2. Показано, що основною причиною наявності надлишкових значень мольного об'єму та питомої ізобарної теплоємності є наявність на поверхні наночастинок

структурованого шару з молекул базової рідини (поверхневої фази), який має властивості, що відрізняються від властивостей базової рідини при однакових параметрах стану.

3. Запропоновано методику визначення концентрації поверхневої фази в нанофлюїді на основі наявної експериментальної інформації з густини або питомої ізобарної теплоємності або теплоти правління нанофлюїду та базової речовини. Методику апробовано з використанням експериментальних даних з цих властивостей для нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 в інтервалі концентрацій $0 - 0,0996 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

4. Розроблено метод прогнозування питомої ізобарної теплоємності нанофлюїдів, який оснований на врахуванні величини надлишкової теплоємності з використанням даних з температурної залежності концентрації молекул базової рідини в поверхневій фазі нанофлюїду. Метод апробовано з використанням експериментальних даних з густини, питомої ізобарної теплоємності та теплоти правління нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 в інтервалі концентрацій $0 - 0,0996 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ та температур $184 - 330 \text{ К}$. Стосовно нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 оцінена товщина поверхневого шару з сорбованих на наночастинках молекул базової рідини, величина якого добре узгоджується з радіусом наночастинок у рідині, отриманим методом динамічного розсіювання світла.

5. Розроблено метод прогнозування в'язкості нанофлюїдів, який оснований на використанні обмеженої експериментальної інформації з в'язкості нанофлюїду при однієї концентрації наночастинок та однієї температурі та температурної залежності концентрації молекул базової речовини в поверхневій фазі (товщини поверхневого шару). Метод апробовано з використанням експериментальних даних з густини та в'язкості нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 .

6. З використанням отриманої у роботі експериментальної інформації з теплофізичних властивостей розчинів R600a/компресорне масло/ C_{60} в широкому інтервалі температур і концентрацій та принципів розширеного скейлінгу (які основані на застосуванні обмеженої експериментальної інформації з цих властивостей) показано достатнє для практичного застосування збігання експериментальних та прогнозних

значень з густини, в'язкості, тиску насиченої пари і поверхневого натягу.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [1, 5, 6, 66-75].

4.5 Список використаних джерел

1. Zhelezny V., Motovoy I., Khliyeva O., Lukianov N. An influence of Al₂O₃ nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of isopropyl alcohol in solid phase // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 671. P. 170-180.

2. Diky V. V., Kabo G. J. Thermodynamic properties of C₆₀ and C₇₀ fullerenes // *Russian Chemical Reviews*. 2000. Vol. 69, Issue 2. P. 95.

3. Matsuo T., Suga H., David W.I.F., Ibberson R.M., Bernier P., Zahab A., Fabre C., Rassat A., Dworkin A. The heat capacity of solid C₆₀ // *Solid state communications*. 1992. Vol. 83. Issue 9. P. 711-715.

4. Diky V. V. Zhura, L. S., Kabo, A. G., Markov, V. Y., & Kabo, G. J. High-temperature heat capacity of C₆₀ fullerene // *Fullerene science and technology*. 2001. Vol. 9. Iss. 4. P. 543-551.

5. Zhelezny V., Khliyeva O., Motovoy I., Lukianov N. An experimental investigation and modelling of the thermal and caloric properties of nanofluids isopropyl alcohol - Al₂O₃ nanoparticles // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 678. 178296

6. Zhelezny V., Lukianov N., Khliyeva O., Nikulina A., Melnyk A. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil-Al₂O₃ and R600a-mineral oil-TiO₂. Thermophysical properties // *International Journal of Refrigeration*. 2017. Vol. 74. P. 486-502.

7. Zhelezny V., Lozovsky T., Gotsulskiy V., Lukianov N., Motovoy I. Research into the influence of Al₂O₃ nanoparticle admixtures on the magnitude of isopropanol molar volume // *Eastern-European J. Enterp. Technol*. 2017. Vol. 2(5). P. 33–39.

8. Magee J. W. Measurements of molar heat capacity at constant volume (C_v) for 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane (R134a) // *Int.J. Refrig*. 1992. Vol. 15(6). P. 372-380.

9. Сычѐв В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики М.: Издатель-

ский дом МЭИ/ 2010. 251 с.

10. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. Учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ. 2016. 496 с.

11. Wang L., Tan Z., Meng S., Liang D., Li G. Enhancement of molar heat capacity of nanostructured Al₂O₃ // J. Nanoparticle Res. 2001. Vol. 3 (5-6). P. 483-487.

12. Zhelezny V. P., Motovoy I. V., Ustyuzhanin E. E. Prediction of nanofluids properties: the density and the heat capacity // Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 891. 012347.

13. Kotia A., Borkakoti S., Deval P., Ghosh S. K. Review of interfacial layer's effect on thermal conductivity in nanofluid // Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 53(6). P. 2199-2209.

14. Tamizi M., Kamalvand M., Namazian M. Dependency of the thermophysical properties of nanofluids on the excess adsorption // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. Vol. 99. P. 630-637.

15. Li L., Zhang Y., Ma H., Yang M. Molecular dynamics simulation of effect of liquid layering around the nanoparticle on the enhanced thermal conductivity of nanofluids // J. Nanopart. Res. 2010. Vol. 12(3). P. 811-821.

16. Zhelezny V., Sechenyh V., Nikulina A., A new scaling principles—quantitative structure property relationship model (SP-QSPR) for predicting the physicochemical properties of substances at the saturation line // J. Chem. Eng. Data. 2014. Vol. 59. P. 485–493.

17. Murshed S. M. S., Estellé P. A state of the art review on viscosity of nanofluids //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 76. P. 1134-1152.

18. Pastoriza-Gallego M. J., Casanova C., Páramo R., Barbés B., Legido J. L., Piñeiro M. M. A study on stability and thermophysical properties (density and viscosity) of Al₂O₃ in water nanofluid //Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 106 (6). P. 064301.

19. Zhelezny V., Geller V., Semenyuk Y., Nikulin A., Lukianov N., Lozovsky T., Shymchuk M. Effect of Al₂O₃ nanoparticles additives on the density, saturated vapor pressure, surface tension and viscosity of isopropyl alcohol // Int. J. Thermophys. 2018.

Vol. 39 (38).

20. Ku B.C., Han Y.C., Lee J.E., Lee J.K., Park S.-H., Hwang Y.J. Tribological effects of fullerene (C₆₀) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2010. Vol. 11. P. 607–611

21. Rashidi A., Ahmadi H., Mohtasebi S. S., Pourkhalil M. Thermal and rheological properties of oil-based nanofluids from different carbon nanostructures // *Int. Commun Heat Mass Transfer*. 2013, Vol. 48. P. 178–182.

22. Azmi W., Sharma K., Mamat R., Najafi G., Mohamad M. The enhancement of effective thermal conductivity and effective dynamic viscosity of nanofluids—a review // *Renewable Sustainable Energy Rev*. 2016. Vol. 53. P. 1046–1058.

23. Angayarkanni S. A., Philip J. Review on thermal properties of nanofluids: recent developments // *Advances in colloid and interface science*. 2015. Vol. 225. P. 146-176.

24. Gupta M., Singh V., Kumar R., Said Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 638-670.

25. Pal R. A novel method to determine the thermal conductivity of interfacial layers surrounding the nanoparticles of a nanofluid // *Nanomaterials*. 2014. Vol. 4 (4). P. 844-855.

26. Wang B. X., Zhou L. P., Peng X. F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46 (14). P. 2665-2672.

27. Tillman P., Hill J. M. Determination of nanolayer thickness for a nanofluid // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 34 (4). P. 399-407.

28. Adamson A.W., *Physical Chemistry of Surfaces*, 5th ed., Wiley, New York, 1990.

29. Einstein A. A new determination of molecular dimensions // *Ann Phys* 1906. Vol. 4. P. 37–62.

30. Hatschek E. The general theory of viscosity of two phase systems. *Trans Faraday Soc* 1913. Vol. 9. P. 80–92.
31. Brinkman H.C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chem Phys* 1952. Vol. 20. P. 571–81.
32. Roscoe R. The viscosity of suspensions of rigid spheres. *J Appl Phys.* 1952. Vol. 267. P. 3–6.
33. Brenner H., Condiff D.W. Transport mechanics in systems of orientable particles. Part IV. Convective transport. *J Colloid Int Sci* 1974. Vol. 47. P. 199–264.
34. Batchelor G. The effect of Brownian motion on the bulk stress in the suspension of spherical particles. *J Fluid Mech* 1977. Vol. 83. P. 97–117.
35. Graham A.L. On the viscosity of suspensions of solid spheres. *Appl Sci Res* 1981. Vol. 37. P. 275–86.
36. Krieger I.M, Dougherty T. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Trans Soc Rheol* 1959. Vol. 3. P. 137–52.
37. Nielsen L.E. Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. *J Appl Phys* 1970. Vol. 41. P. 4626–7.
38. Cabaleiro D., Pastoriza-Gallego M. J., Piñeiro M. M., Lugo, L. Characterization and measurements of thermal conductivity, density and rheological properties of zinc oxide nanoparticles dispersed in (ethane-1, 2-diol+ water) mixture // *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013. Vol. 58. P. 405-415.
39. Mariano A. Pastoriza-Gallego, M. J., Lugo, L., Mussari, L., Piñeiro M. M. Co₃O₄ ethylene glycol-based nanofluids: thermal conductivity, viscosity and high pressure density // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 85. P. 54-60.
40. Stephan P., Kabelac S., Kind M., Martin H., Mewes D., Schaber K. *VDI Heat Atlas*, Springer, 2010. 1585 p.
41. Дерягин Б.В, Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1987. 398 с.
42. Старостин Е. Г., Лебедев М. П. Свойства связанной воды в дисперсных породах. Часть 1. Вязкость, диэлектрическая проницаемость, плотность, теплоем-

кость, поверхностное натяжение // Криосфера Земли. 2014. Т. 18, №. 3. С. 46-54.

43. Bi S., Guo K., Liu Z., Wu J. Performance of a domestic refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52(1). P. 733-737.

44. Xing M., Wang R., Yu J. Application of fullerene C₆₀ nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors // Int. J. Refrig. 2014. Vol. 40. P. 398–403.

45. Лукьянов, Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40.

46. Wang R., Zhang, Y., Liao Y. Performance of rolling piston type rotary compressor using fullerenes (C₇₀) and NiFe₂O₄ nanocomposites as lubricants additives // Front. Energy. 2017, 1–5.

47. Celen A., Cebi A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A. S., Wongwises S. A Review of nanorefrigerants: flow characteristics and applications // Int. J. Refrig. 2014. Vol. 44. 125–140.

48. Saidur R., Kazi S., Hossain M., Rahman M., Mohammed H. A review on the performance of nanoparticles suspended with refrigerants and lubricating oils in refrigeration systems. Renewable Sustainable Energy Rev. 2011. Vol. 15. P. 310–323.

49. Мороз С. А., Хлиева О. Я., Лукьянов Н. Н., Железный В. П. Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C₆₀ в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 41–46.

50. Handbook, ASHRAE Fundamentals. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Inc.: Atlanta, GA, USA. 2009.

51. Lee K., Hwang Y., Cheong S., Kwon L., Kim S., Lee J., Performance evaluation of nanolubricants of fullerene in refrigeration mineral oil // Current Applied Physics. 2009. Vol.9(2). P. 128-131.

52. Hwang Y.j., Lee J., Lee C., Jung Y., Cheong S., Lee C., Ku B., Jang S.

Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids // *Thermochim. Acta*. 2007. Vol. 455. P. 70–74.

53. Dombek G., Nadolny Z., Przybylek P. The study of thermal properties of mineral oil and synthetic ester modified by nanoparticles TiO₂ and C₆₀. High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference on. 2014; pp 1–4.

54. Ginzburg B.M., Tuichiev S. Tabarov S.H. Formation of Zero Density Regions During the Dissolving of C₆₀ and C₇₀ // *Journal of Macromolecular Science, Part B*. 2013. Vol. 52(6). P.773-787.

55. Содиков Ф. Х., Табаров С. Х., Туйчиев Ш., Акназарова Ш., Туйчиев Л., Шерматов Д. С. Влияние фуллерена C₆₀ на теплофизические свойства ортоксилола // *Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук*. 2016. № 1-2. P. 133-136.

56. Kolker A., Islamova N., Avramenko N., Kozlov A. Thermodynamic properties of C₆₀ fullerene solutions in individual and mixed organic solvents // *J. Mol. Liq.* 2007. Vol. 131. P. 95–100.

57. Semenov K. N., Charykov N. A., Keskinov V. A., Piartman A. K., Blokhin A. A., Kopyrin A. A. Solubility of light fullerenes in organic solvents // *J. Chem. Eng. Data*. 2009. Vol. 55. P. 13–36.

58. Mchedlov-Petrossyan N. O. Fullerenes in liquid media: an unsettling intrusion into the solution chemistry // *Chemical reviews*. 2013. Vol. 113. Issue 7. P. 5149-5193.

59. REFPROP: Reference fluid thermodynamic and transport properties, NIST standard reference database 23, Version 8.0 / E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden. - Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology, 2007.

60. Zhelezny P.V., Zhelezny V.P., Procenko D.A., Ancherbak S.N. An experimental investigation and modelling of the thermodynamic properties of isobutane-compressor oil solutions. Some aspects of experimental methodology // *Int. J. Refrig.* 2007. Vol. 30(3). P. 433-445.

61. Anisimov M. A., *Critical Phenomena in Liquids and Liquid Crystals*, Gordon and Breach Science Publishers: New York, 1991.

62. Zhelezny, V.P., Semenyuk, Yu.V., Lozovsky, T.L., Ivchenko, D.A. Application of scaling principles for prediction of pseudocritical parameters of refrigerant/oil solutions. // In Proc. 23rd IIR International Congress of Refrigeration, 2011, Prague, Czech Republic, ID195.

63. Medvedev O.O., Zhelezny P.V., Zhelezny V.P. Prediction of phase equilibria and thermodynamic properties of refrigerant/ oil solutions, Fluid Phase Equilib. 2004. Vol. 215. P. 29-38.

64. Zhelezny V., Sechenyh V., Ivchenko D., Semenyuk Yu. Prediction of the surface tension for refrigerants and refrigerant-oil solutions (ROS) // Int. J. Refrig. 2014. Vol. 40. P. 241-245.

65. Григорьев Б. А., Богатов Г. Ф., Герасимов А. А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций. М.: Изд-во МЭИ, 1999.

66. Перспективи застосування нанотехнологій у холодильній техніці. Частина 1. Теплофізичні властивості нанофлюїдів: монографія/В.П. Желєзний, Ю.В. Семенюк, О.Я. Хлієва, М.М. Лук'янов, А.Г. Нікулін, А.С. Нікуліна; Під ред. В.П. Желєзного. Одеса: Фенікс, 2019. 314 с. (російською) ISBN 978-966-428-414-3.

67. Zhelezny V., Khliyeva O., Lukianov M. Motovoy I., Ivchenko D.A., Faik A., Grosu Ya., Nikulin A., Moreira A.L.N. Thermodynamic properties of isobutane/mineral compressor oil and isobutane/mineral compressor oil/fullerenes C60 solutions // International Journal of Refrigeration. 2019. [Available online 12 June 2019](#)

68. Khliyeva O.Ya., Ivchenko D.A., Khanchych K.Yu., Motovoy I.V., Zhelezny V.P. The relationship between the surface tension and the saturated vapor pressure of model nanofluids//Refrigeration engineering and technology. 2019. № 55 (1). P. 40-46.

69. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V. Experimental study of the effect of nanoparticles TiO_2 on the thermophysical properties of the refrigerant R141b// Eastern European journal of enterprise technologies. 2018. Vol. 6/5 (96). P. 33-41.

70. Івченко Д. О., Мотовий І. В., Хлієва О. Я., Желєзний В. П. Експериментальне дослідження калоричних властивостей розчинів диметилового ефіру

(DME) в триетиленгліколі (TEG) // Холодильна техніка та технологія. 2018. № 54(5). С.68-76.

71. Мотовой И. В., Железный В. П., Хлиева О. Я. Исследование влияния наночастиц на давление насыщенных паров изопропилового спирта // Холодильна техніка та технологія. 2018. № 54(3). С. 55-60.

72. Khliyeva O.Ya. A.S. Nikulina, M.P. Polyuganich, S.S. Ryabikin, V.P. Zhelezny Viscosity of ternary solutions composed of propylene glycol, ethanol and water // Refrigeration engineering and technology. 2016. № 3 (52). P. 29-35.

73. Хлиева О. Я., Полюганич М. П., Рябикин С. С., Никулина А. С., Железный В.П. Исследование плотности бинарных и тройных водных растворов этиленгликоля, пропиленгликоля и этанола // Холодильная техника и технология. 2016. № 2 (52). С. 78-86.

74. Железный В. П., Лукьянов Н.Н., Хлиева О.Я., Никулина А.С. Экспериментальное и расчетное исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на теплофизические свойства растворов хладагента R600a с компрессорным маслом // Холодильная техника и технология. 2015. № 4 (51). С. 82-91.

75. Zhelezny V., Faik A., Khliyeva O., Motovoy I., Ivchenko D., Grosu Y., Nikulin A. Caloric properties of R600a solutions in compressor oil containing fullerenes C_{60} // Proc. the 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants: "Natural refrigerant solutions for warm climate countries". Valencia, Spain. June 18 to 20, 2018.

5 ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ГІДРОДИНАМІЧНІ ТА ТЕПЛООБМІННІ ПАРАМЕТРИ ПРИ ТЕЧІЇ НАНОФЛЮЇДІВ В КАНАЛІ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

В даному розділі наводяться результати експериментального дослідження гідродинамічних та теплообмінних параметрів при вимушеній ламінарній та турбулентній течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу.

5.1 Аналіз доцільності застосування нанофлюїдів в якості холодоносіїв в холодильній галузі

Як було показано в розділі 1, нанофлюїди є досить перспективними рідинами в якості тепло- та холодоносіїв. Незважаючи на це, робіт, присвячених комплексному дослідженню як гідродинамічних та теплообмінних параметрів при течії нанохолодоносіїв, так й параметрів ефективності теплообмінного обладнання або цілої холодильної установки з їх використанням не так багато. Але наявні дослідження [1, 2] говорять, що не тільки застосування ефективного робочого тіла, а й проміжного холодоносія з домішками наночастинок буде сприяти підвищенню енергетичної ефективності цілої холодильної установки.

Наприклад, в роботі [1] експериментально показано, що при застосуванні нанохолодоносія вода/наночастинки Al_2O_3 у повітряному кондиціонері час досягнення потрібної температури в охолоджуваному приміщенні знижується (у порівнянні з використанням води). Крім того, показано збільшення холодильного коефіцієнта приблизно на 5% й 17% при застосуванні нанохолодоносія з 0,1 й 1% мас. наночастинок Al_2O_3 , відповідно.

В роботі [2] експериментально показано, що при застосуванні нанохолодоносія вода/етиленгліколь/наночастинки Al_2O_3 у повітряному кондиціонері також було показано збільшення холодильного коефіцієнту при використанні нанохолодоносія зі змістом 0,75 % наночастинок Al_2O_3 (у порівнянні з холодоносієм без до-

мішок) та при оптимальній його швидкості.

В інших дослідженнях доцільності застосування нанофлюїдів в якості проміжних холодоносіїв у холодильній галузі [3, 4] вже не аналізується загальна ефективність холодильної установки, а лише відзначається інтенсифікація тепловіддачі у порівнянні з використанням базової рідини. Слід зазначити, що за рахунок збільшення коефіцієнта тепловіддачі у випарнику з боку холодоносія можна знизити температурний напір в теплообмінному апараті (різницю температур між киплячим холодоагентом та середньою температурою холодоносія). Цей факт може сприяти збільшенню температури кипіння холодоагенту (при фіксованій температурі холодоносія на виході з випарника), та, як наслідок, к збільшенню холодильного коефіцієнта усієї холодильної машини.

Крім того, на сьогодні в науковій літературі є досить багато досліджень, в яких розглядається доцільності застосування нанофлюїдів в якості охолоджуючих рідин для автомобільних радіаторів або для інших застосувань [5-7]. Тому дослідження механізмів впливу наночастинок на гідродинамічні та теплообмінні параметри при вимушеній течії нанофлюїду з урахуванням при аналізі отриманих ефектів його експериментально визначених теплофізичних властивостей, є актуальною задачею.

5.2 Результати експериментального дослідження гідродинамічних та теплообмінних параметрів при течії нанофлюїду ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3

Експериментальні данні були отримані при течії зразків нанофлюїду ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 при наступних концентраціях наночастинок W_{NP} : 0,00387; 0,00992; 0,0312 й 0,0471 $кг \cdot кг^{-1}$. Характеристики даного нанофлюїду розглянуто у розділі 2. Температура рідини на вході в робочу ділянку t_{in} підтримувалася приблизно рівною 15; 25 й 35 °С. Детальний опис експериментальної установки та методики експерименту наведено у розділі 3.

Проведені дослідження відрізняються широким інтервалом параметрів екс-

периментального дослідження (концентрації наночастинок, температури рідини на вході в робочу ділянку, широкий інтервал гідродинамічних режимів течії), а також комплексним підходом (наявність інформації о колоїдній стабільності нанофлюїду, його теплофізичних властивостях в широкому інтервалі температур та концентрації наночастинок).

5.2.1 Гідродинамічні параметри течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу

На установці, описаній в [8] та розділі 3, були отримані експериментальні данні з втрат тиску при течії чистого ізопропанолу. Залежності коефіцієнту втрат тиску при течії ізопропанолу була розрахована за рівнянням (5.1)

$$f = \frac{2 \cdot d_{\text{вн}} \cdot \Delta P}{\rho \cdot v^2 \cdot L}, \quad (5.1)$$

де $d_{\text{вн}}$ - внутрішній діаметр каналу, м; ΔP - виміряні втрати тиску на ділянці довжиною L , м, Па; ρ – густина рідини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; v - швидкість течії рідини, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Додатково був виконаний розрахунок коефіцієнтів втрат тиску на тертя по довжині за наступними рівняннями [9]:

рівняння Пуазейля для ламінарного режиму течії

$$f = 64/\text{Re}, \quad (5.2)$$

рівняння Блазиуса для турбулентного режиму течії

$$f = 0,316/\sqrt[4]{\text{Re}}. \quad (5.3)$$

Густина та в'язкість чистого ізопропанолу були прийняти за експеримента-

льними даними, представленими у [10], та наведені у таблиці Б.7 додатку Б.

Залежність визначених з експериментальних даних значень коефіцієнту втрат тиску по довжині f від числа Рейнольдса при течії ізопропанолу у каналі круглого поперечного перерізу та розраховані за рівняннями (5.2) та (5.3) значення f наведені на рис. 5.1. З інформації, наведеної на рис. 5.1 можна зробити висновок о достатньо хорошому збіганні отриманих в експерименті значень та розрахункових за рівняннями (5.2) та (5.3).

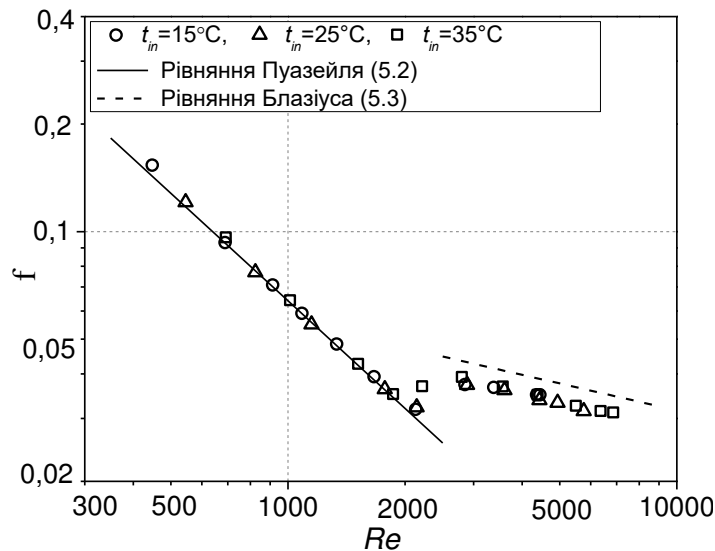


Рисунок 5.1 – Залежність коефіцієнту втрат тиску на тертя по довжині при вимушеній течії чистого ізопропанолу у каналі круглого поперечного перерізу

Результати експериментального дослідження втрат тиску при течії об'єктів дослідження на робочій ділянці установки (розділ 3) при течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 з різною концентрацією наночастинок та ізопропанолу (базової рідини) в залежності від числа Рейнольдса при трьох різних температурах рідини наведено на рис. 5.2. Температура рідини підтримувалася приблизно постійною.

З використанням отриманих експериментальних даних з втрат тиску за рівнянням (5.1) були розраховані значення коефіцієнту втрат тиску по довжині f при течії чистого ізопропанолу та нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 - рис. 5.3.

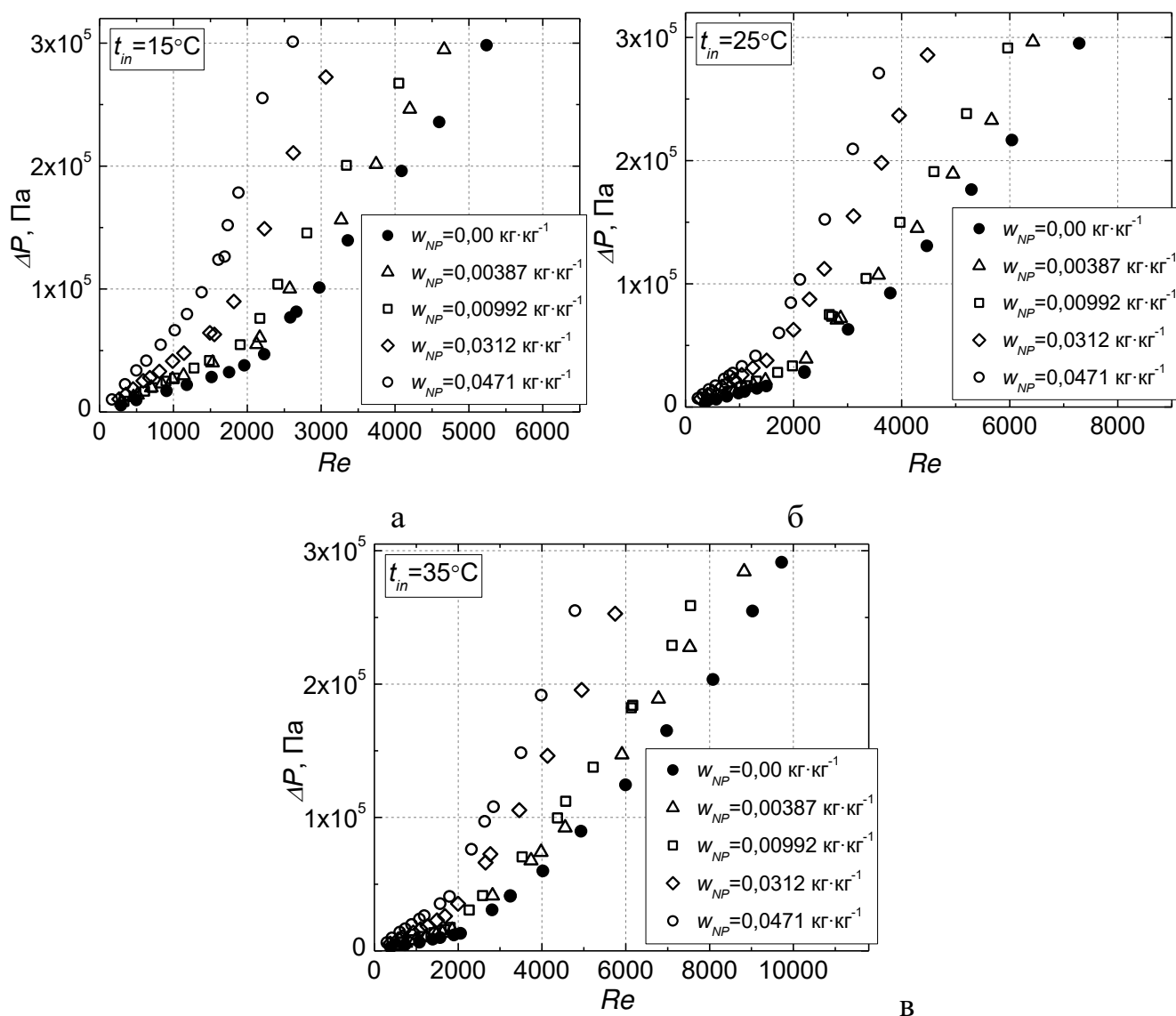


Рисунок 5.2 – Залежність втрат тиску при течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу від числа Рейнольдса та масової частки наночастинок та різних температурах рідини:

а - $t_{in}=15\text{ }^\circ\text{C}$; б - $t_{in}=25\text{ }^\circ\text{C}$; в - $t_{in}=35\text{ }^\circ\text{C}$

Як видно з інформації на рис. 5.2, втрати тиску збільшуються зі збільшенням концентрації наночастинок (при рівних числах Рейнольдса) як при ламінарному, так й при турбулентній течії рідини. В тій же час залежність коефіцієнту втрат тиску по довжині f від числа Рейнольдса для нанофлюїдів при усіх концентраціях наночастинок є такою же, як для ізопропанолу – рис. 5.3. Таким чином можна зробити висновок, о загальному механізмі втрат тиску як в однофазних рідинах, так й в нанофлюїдах. Отримані ефекти збільшення втрат тиску зі збільшенням

концентрації наночастинок пояснюються збільшенням в'язкості нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 приблизно пропорційно концентрації наночастинок у них [10]. Тобто для розглянутого нанофлюїда ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 розрахунок втрат тиску можна виконувати з використанням залежностей для однофазної рідини та ефективних властивостей (густини та в'язкості) нанофлюїду так як ніяких додаткових ефектів впливу наночастинок Al_2O_3 на коефіцієнт f в проведеному експерименті не спостерігалось. Як видно з наведеної на рисунку 5.3 інформації, при течії нанофлюїдів спостерігається більш ранній перехід ламінарного режиму течії в перехідний ($2300 < Re$) і потім в турбулентний, ніж для однофазної рідини (у даному випадку для ізопропанолу) при рівних параметрах експерименту. Отриманий ефект збігається з результатами, отриманими іншими дослідниками [11, 12]. Хоча є дослідження з протилежним результатом [13].

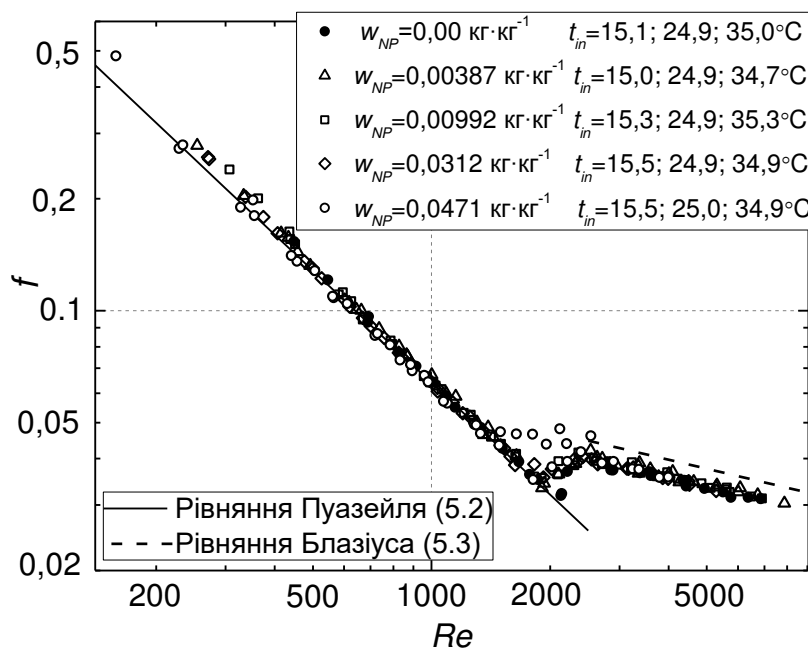


Рисунок 5.3 – Залежність коефіцієнту втрат тиску на тертя при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу

Як видно з рис. 5.3, ламінарний режим течії припиняє існування при тім менших числах Рейнольдса, чім вище концентрація наночастинок у рідині. Наприклад, перехід з ламінарного к перехідному режиму течії для чистого ізопропанолу в проведеному експерименті відбувався при $Re=2150$, в той час як для нано-

флюїда с $0,0471 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ наночастинок Al_2O_3 при температурі $15 \text{ }^\circ\text{C}$ перехід відбувся вже при $\text{Re}=1500$.

В роботі [12] спостерігалось не тільки більш ранній перехід з ламінарного до турбулентного режиму течії нанофлюїдів, а й зміна максимуму амплітуди пульсацій тиску (maximum amplitude of the pressure pulsations), які становяться меншими при збільшенні концентрації наночастинок у рідині при турбулентному режимі течії, та незначно збільшуються при ламінарному. Таким чином, наявність наночастинок впливає на ступень турбулентності (intensity of turbulence) в нанофлюїдах, у порівнянні з базовою рідиною.

5.2.2 Теплообмінні параметри при течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинок Al_2O_3

Данні, які отримані за результатами проведення експериментальних досліджень процесу теплообміну при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу наведено у таблиці Б.15 додатку Б.

Залежність експериментальних значень середнього по довжині робочої ділянки коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії об'єктів дослідження від числа Рейнольдса при різних температурах рідини на вході в робочу ділянку наведено на рис. 5.4.

Виходячи з аналізу залежності коефіцієнтів тепловіддачі від числа Рейнольдса (рис. 5.4), наявність наночастинок приводить до збільшення інтенсивності тепловіддачі приблизно пропорційно концентрації наночастинок як при ламінарному так й при турбулентному режимах течії. З цього рисунку також можна зробити висновок про більш ранній перехід з ламінарного до турбулентного режиму течії для нанофлюїдів, у порівнянні з базовою рідиною.

Слід відзначити, що аномально великого збільшення коефіцієнтів тепловіддачі не спостерігалось.

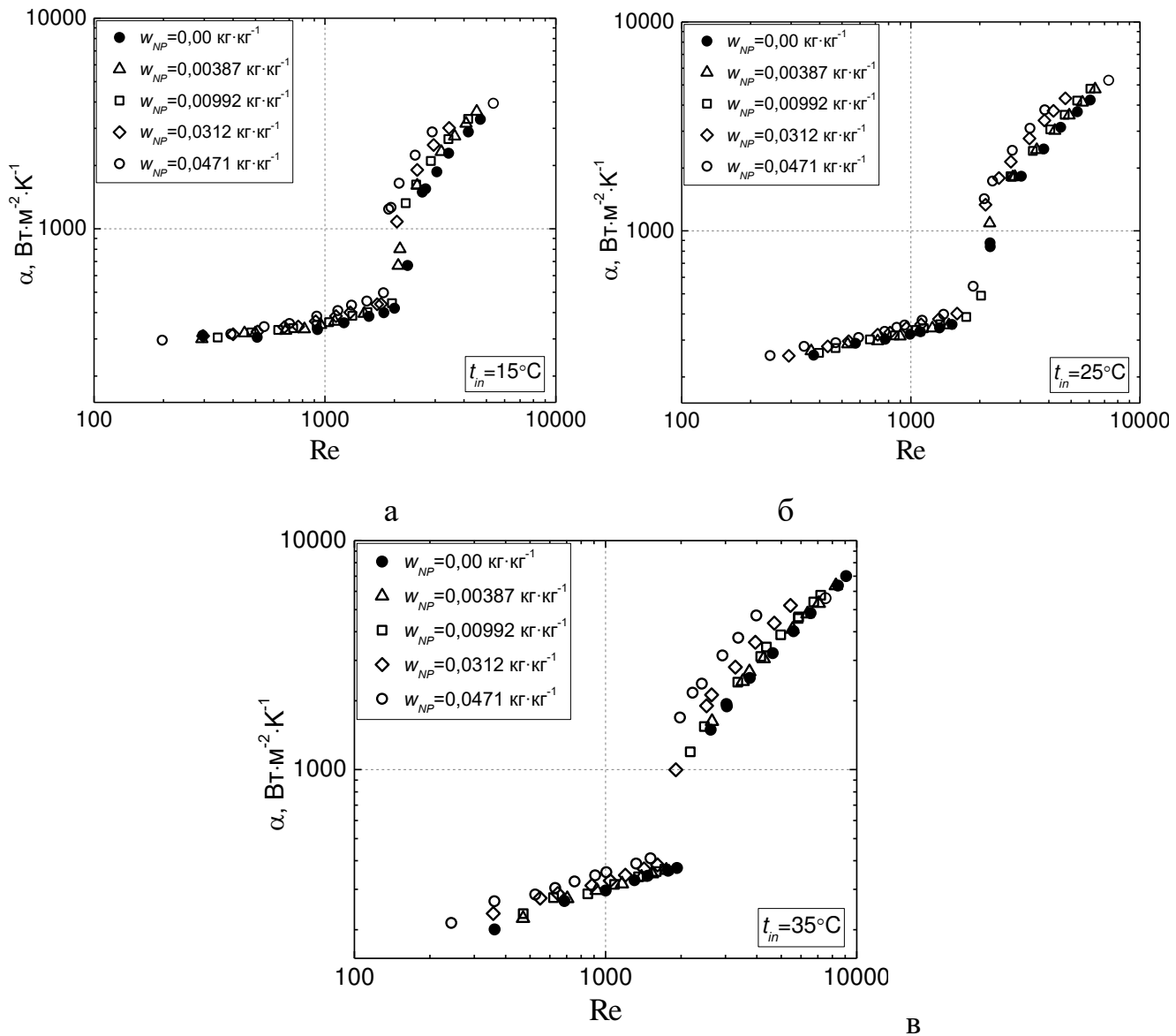


Рисунок 5.4 – Залежність середнього по довжині робочої ділянки коефіцієнту тепловіддачі при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанofлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу від числа Рейнольдса

5.2.3 Аналіз невизначеності експериментальних даних

Аналіз невизначеності виконувався у відповідності до рекомендацій [14-16]. При цьому враховувалися два типи невизначеності: невизначеності типу А «випадкова складова» та типу В «систематична складова». Кінцеві результати розрахунку за методикою [14-16] з урахуванням характеристик вимірювального обладнання, наведених у розділі 3, наведено в таблиці. 5.1.

Таблиця 5.1

Результати виконаної оцінки невизначеностей вимірювань гідродинамічних та теплообмінних параметрів при течії нанофлюїдів у трубі

Параметр	Розширена невизначеність
ΔP (інтервал 0-68947,6 Па), Па	200
ΔP (інтервал 0-689476 Па), Па	2005
f	0,0073
Re, %	8,6
α , %	9,8
Nu, %	11,5

5.3 Аналіз результатів експериментального дослідження тепловіддачі при течії нанофлюїду ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу

5.3.1 Аналіз доцільності застосування нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 в якості холодоносія у промисловому обладнанні

В попередньому підрозділі за результатами проведених експериментальних досліджень показано збільшення коефіцієнту тепловіддачі при течії нанофлюїдів у порівнянні з течією базової рідини при рівних числах Рейнольдса.

Але для практичного застосування нанофлюїдів в якості холодоносіїв важливим є не тільки інтенсифікації теплообміну, а й величина енерговитрат на циркуляцію холодоносія в теплообмінних апаратах. Тобто для висновків про доцільність застосування нанофлюїдів на практиці потрібний детальний аналіз різних аспектів, які характеризують як інтенсивність процесів тепловіддачі, так й втрат напору при течії нанофлюїдів у порівнянні з базовою рідиною.

Різні автори використовують різні критерії для порівняння характеристики процесу теплообміну з участю нанофлюїдів [17-31]. Зазвичай о покращенні інтенсивності процесу тепловіддачі роблять висновок на основі порівняння коефіцієн-

тів тепловіддачі для базової рідини та для нанофлюїду при рівних числах Рейнольдса [20, 27-31]. Але в роботі [17] відзначається, що ступень підвищення інтенсивності тепловіддачі за рахунок добавок наночастинок CuO в воду залежить від того, який критерій обраний для аналізу. Так, при рівних числах Рейнольдса коефіцієнт тепловіддачі при течії розглянутого нанофлюїду може підвищитися на 40 %, при однаковій швидкості - на 13 %, а при однаковій споживаній потужності насосу – на 6 %.

В роботах [18-20] були показані різні ефекти впливу наночастинок на інтенсивність тепловіддачі при турбулентній течії в залежності від того, якій критерій (число Рейнольдса або масова витрата рідини) обирався для порівняння коефіцієнтів тепловіддачі або числа Нусельта. В роботі [20], наприклад, доцільності добавок наночастинок SiO_2 до води оцінювалася з використанням коефіцієнту, в якому враховувалося число Нусельта та коефіцієнт втрат тиску по довжині.

В роботі [21] порівняння числа Нусельта при вимушеній течії двох нанофлюїдів на основі води та етиленгліколю при додаванні до них різних видів наночастинок проводилося в залежності від добутку об'ємної витрати рідини на втрати напору, тобто від втрат енергії при течії рідини на певній ділянці каналу. На основі такого аналізу показано, що інтенсифікація тепловіддачі при течії нанофлюїдів, не є таке суттєве, як визначалося на перших етапах дослідження перспектив використання нанофлюїдів в якості тепло- та холодоносіїв [22, 23]. Не приймачу до уваги нанофлюїди з вуглецевими нанотрубками (де максимальне збільшення тепловіддачі було зафіксоване на рівні 300 % [22]), деякі дослідники не показували досить суттєвого збільшення інтенсивності тепловіддачі при малому вмісті наночастинок у рідині. Наприклад, в роботі [34] показано збільшення коефіцієнту тепловіддачі на 40% для нанофлюїду на основі води при вмісті наночастинок Cu 0.3 vol% та на в [35] – на 31% для нанофлюїду на основі води при вмісті наночастинок MgO 0.12 vol.%. Такі результати, на думку автора, потребують перевірки достовірності.

Так як нанофлюїди розглядаються в якості теплоносіїв та холодоносіїв в різноманітному теплообмінному обладнанні, то на думку автора найбільш доцільно

аналізувати залежність коефіцієнту тепловіддачі від добутку масової витрати рідини на питому ізобарну теплоємність $G \cdot c_p$ (так званого водяного еквіваленту), тому що цей параметр безпосередньо впливає на ефективність теплообмінного апарату.

На рисунку 5.5 наведено залежність коефіцієнту тепловіддачі при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастики Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу від величини $G \cdot c_p$.

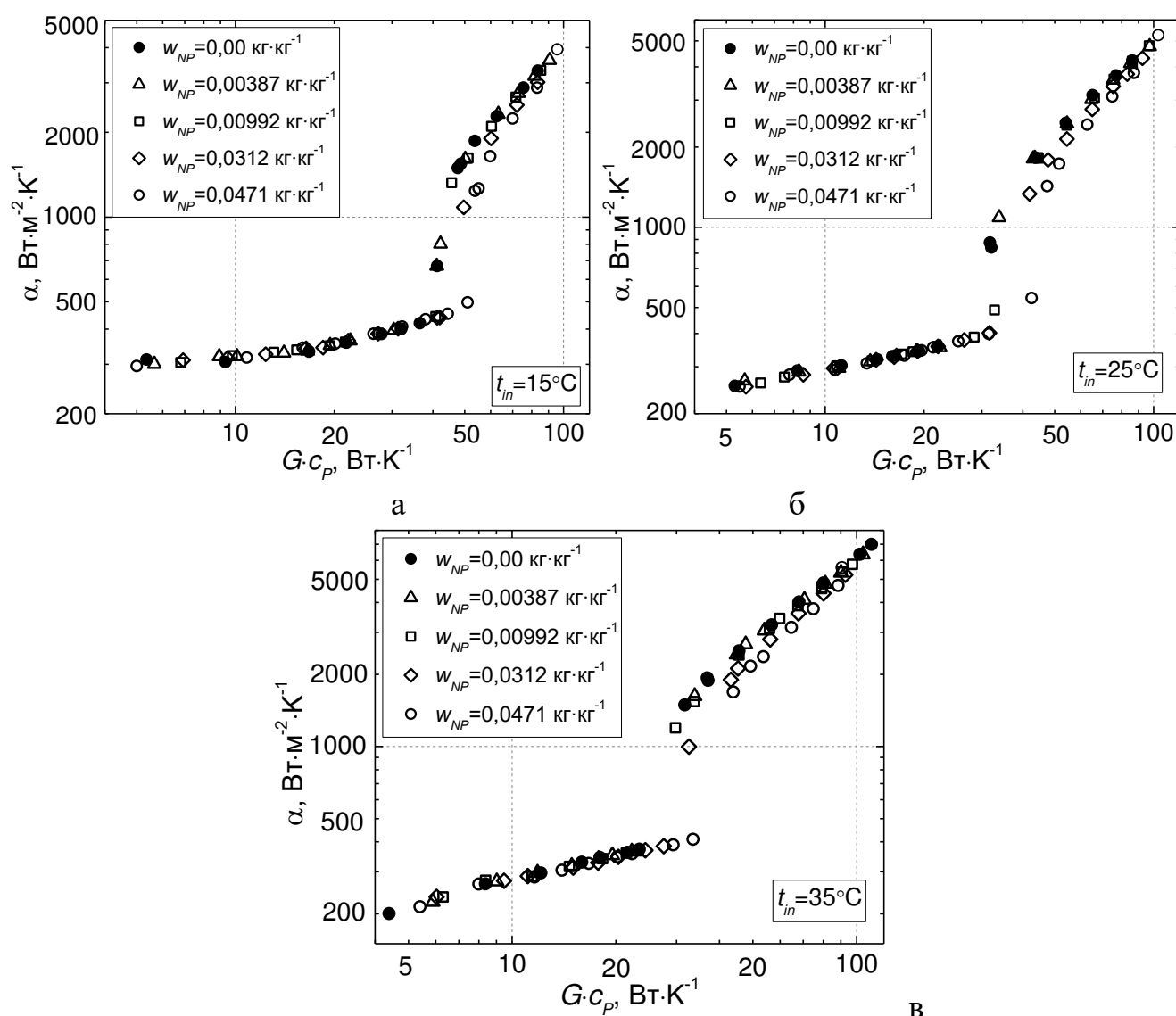


Рисунок 5.5 – Залежність коефіцієнту тепловіддачі при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастики Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу від добутку масової витрати рідини на питому ізобарну теплоємність (водяного еквіваленту)

Аналізуючи представлені на рис. 5.5 залежності, можна констатувати отримання якісно протилежних результатів (з точки зору доцільності використання нанофлюїдів в якості тепло- та холодоносіїв) у порівнянні з результатами, наведеними на рис. 5.4. На цю залежність ефекту інтенсифікації теплообміну від обраного критерію для порівняння звертають увагу різні дослідники [11, 17, 18, 26], які виконують порівняння коефіцієнту тепловіддачі або числа Нусельта при рівних швидкостях потоку або масових витратах.

Таким чином, можна зробити висновок, що використання нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 не є доцільним з точки зору інтенсифікації тепловіддачі як при ламінарному, та й при турбулентній течії (де ефект від домішок наночастинок Al_2O_3 навіть негативний) при рівних значеннях $G \cdot c_p$.

Отриманий результат добре узгоджується з результатами дослідження [12], в якому аналізуються величини пульсацій тиску при течії нанофлюїдів. Запропонована гіпотеза, що наночастинки практично не впливають на пульсації тиску при ламінарній течії нанофлюїду, та суттєво знижують пульсації тиску при турбулентній течії. Тобто, можна припустити, що наявність наночастинок у рідині приводить до зниження ступеня турбулентності потоку, що призводить до зміни інтенсивності тепловіддачі у турбулентному режимі течії.

Додатково для оцінки доцільності застосування нанофлюїдів в реальному теплообмінному обладнанні був виконаний аналіз залежності кількості переданої рідиною теплоти від втрат енергії на тертя (для ділянки каналу певної довжини) при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 – рис. 5.6.

Аналізуючи наведену на рис. 5.6 інформацію можна прийти до висновків, що з точки зору підвищення енергетичних характеристик холодильних установок зі вторинним холодоносієм використання нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 не є доцільним. Інтенсифікація процесу тепловіддачі призводить до збільшення кількості переданої теплоти Q . Але при цьому збільшуються втрати тиску при течії розглянутого нанофлюїду та, як наслідок, збільшуються енерговитрати на перекачування нанофлюїду N . З аналізу співвідношення Q/N можна зробити

висновок, що з точки зору енергозбереження застосування розглянутих нанофлюїдів не приведе до суттєвої зміни енерговитрат на перекачування рідини на одиницю переданої кількості теплоти у порівняння з течією базовою рідини при турбулентній течії, та навіть призведе до збільшення енерговитрат при ламінарній течії – рис. 5.6.

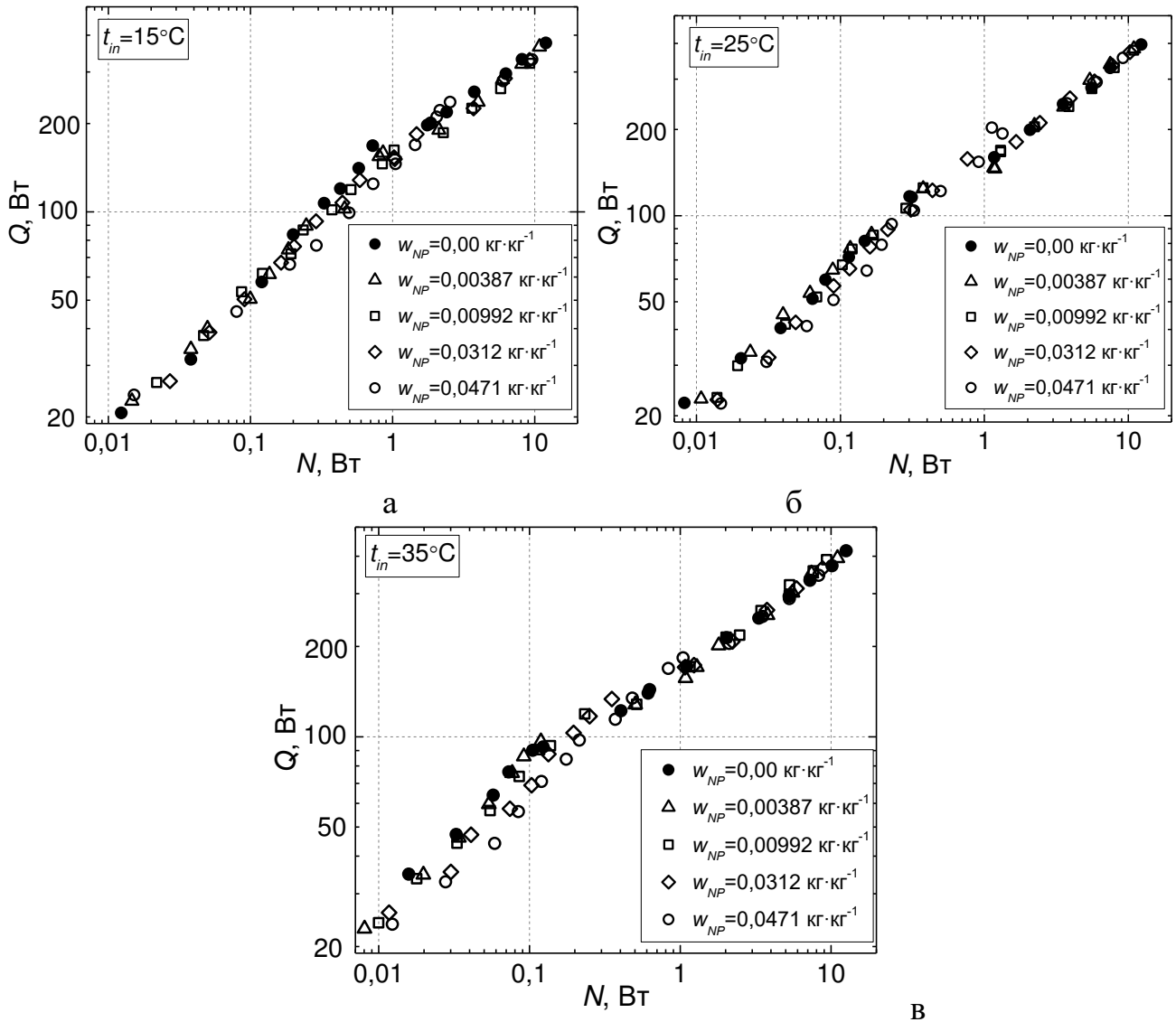


Рисунок 5.6 – Залежність кількості переданої теплоти від витрат енергії на перекачування рідини при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастики Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу довжиною 2,4 м та внутрішнім діаметром 0,0035 м

Висновок про недоцільність використання нанофлюїду ізопропанол/наночастики Al_2O_3 з точки зору енергозбереження відноситься тільки до ви-

конаного дослідження даного нанофлюїду при його течії в робочій ділянці експериментальній установці. Для реального теплообмінного обладнання слід проводити детальний аналіз величин кількості переданої теплоти Q та потужності на перекачування нанофлюїду N з урахуванням конкретних робочих параметрів та геометричних характеристики теплообмінного обладнання.

Отриманий висновок не робить використання нанофлюїдів в якості тепло- та холодилоносіїв неперспективним. Суттєва інтенсифікація тепловіддачі в виконаному дослідженні була зафіксована, що говорить о перспективах використання нанофлюїдів у тих випадках, коли енерговитрати на перекачування не є досить важливими у порівнянні з інтенсифікацією тепловіддачі, наприклад при охолодженні електронних елементів різних систем, у воєнній техніці. У такому випадку використання нанофлюїдів буде сприяти зменшенню масогабаритних розмірів тепломасомінного обладнання, в якому буде плануватися їх використання у якості тепло- та холодоносіїв.

5.3.2 Аналіз узагальнених характеристик процесу тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3

З метою виявлення загальних закономірностей процесу тепловіддачі при течії нанофлюїду ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 був проведений аналіз узагальнених характеристик цього процесу (критеріїв подоби) [32-38].

Слід зазначити, що питання можливості застосування кореляцій, які запропоновані для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі для однофазних рідин, к аналізу процесів при течії нанофлюїдів до сих пір не вирішене (см. розділ 1). Аналіз експериментальних даних у вигляді критеріїв подоби ускладнюється тим, що багато дослідників використовують не отримані в експерименті значення теплофізичних властивостей нанофлюїдів, а їх розрахункові значення.

На рисунку 5.7 наведено залежність числа Прандтля від температури та від концентрації наночастинок Al_2O_3 , яка отримана з використанням експериментальних даних з теплофізичних властивостей нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 [10]. Як видно з рис. 5.7, зі збільшенням концентрації наночастинок Al_2O_3 в

ізопропанолі число Прандтля збільшується пропорційно концентрації наночастинок. Тобто збільшення в'язкості при додаванні наночастинок до базової рідини превалює над збільшенням теплопровідності. Цей факт не говорить на пряму про покращення інтенсивності тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів у зв'язку зі зміною властивостей нанофлюїду з ростом концентрації наночастинок. Потрібний подальший аналіз з розгляданням чисел Рейнольдса, Пекле та Нусельта. Але, досягнення однакових чисел Рейнольдса при вимушеній течії нанофлюїду буде супроводжуватися збільшенням втрат тиску, що не може бути не врахованим при аналізі доцільності застосування нанофлюїдів в якості холодоносіїв на практиці.

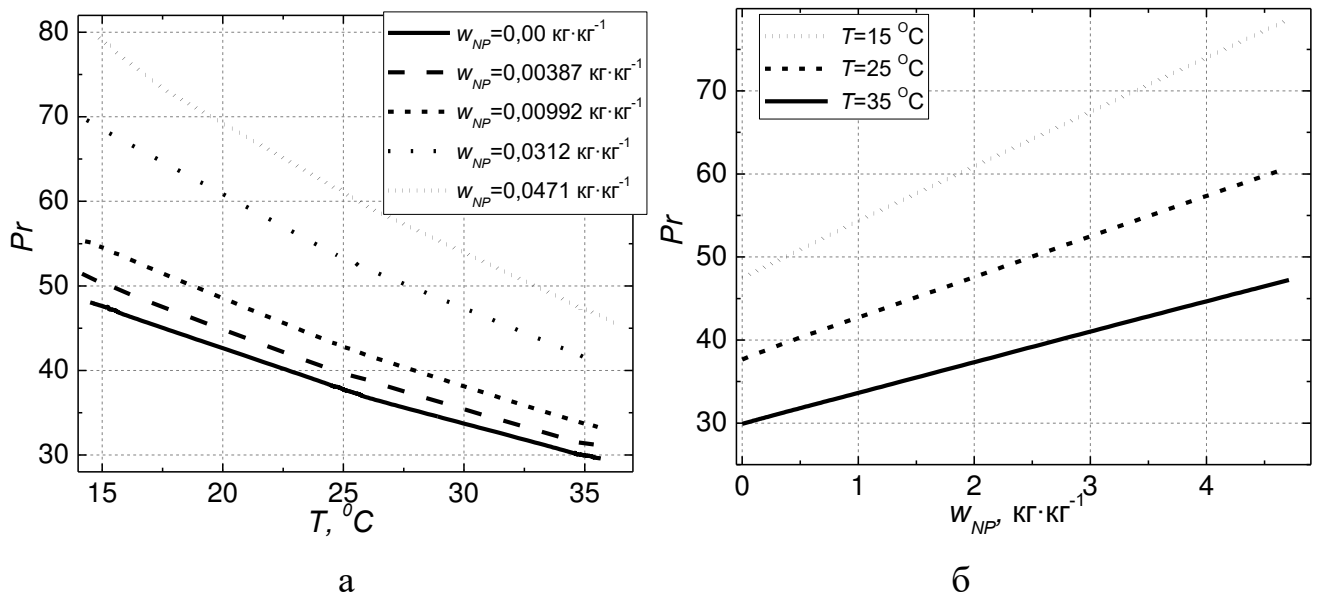


Рисунок 5.7 – Залежність числа Прандтля від температури та концентрації наночастинок для нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3

На рисунку 5.8 наведено залежність числа Пекле від числа Рейнольдса, які отримані з використанням експериментальних даних з витрат рідини, коефіцієнтів тепловіддачі та експериментальних значень теплофізичних властивостей нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3 [8, 10].

Як видно з рис. 5.8, зі збільшенням концентрації наночастинок Al_2O_3 в ізопропанолі число Пекле збільшується пропорційно концентрації наночастинок. При чому видно чітке розшарування залежностей для нанофлюїду однакового складу по трьох температурах.

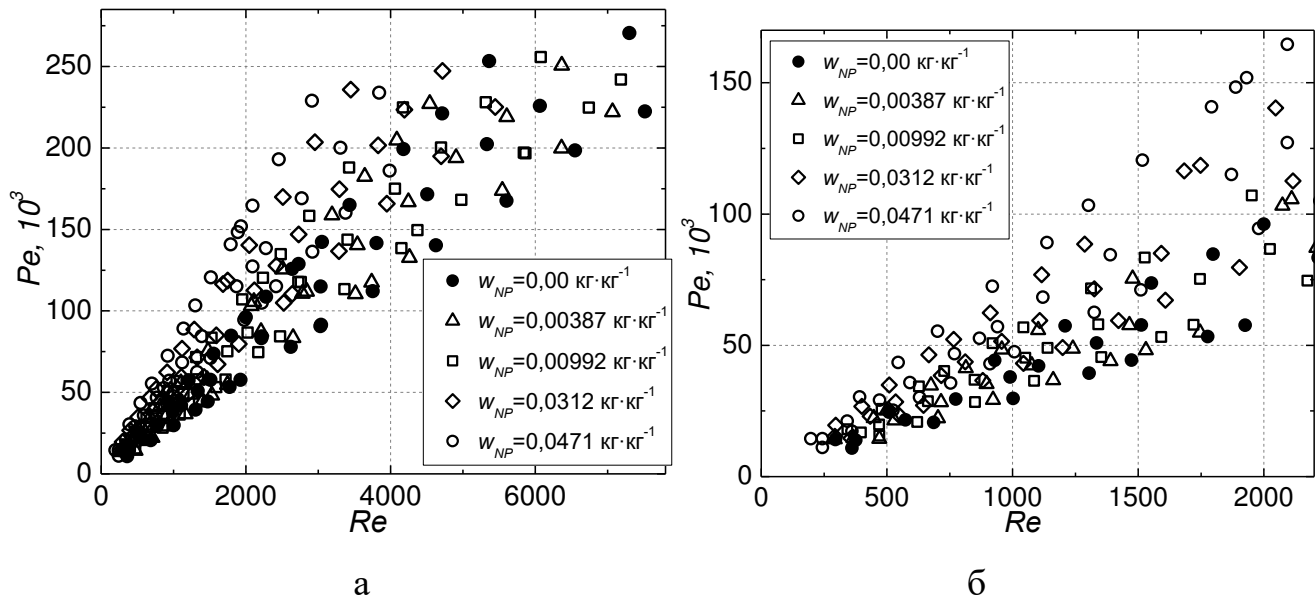


Рисунок 5.8 – Залежність числа Пекле від числа Рейнольдса при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу

На рисунку 5.9 наведено залежність числа Нусельта від числа Рейнольдса, які отримані з використанням експериментальних даних з витрат рідини, коефіцієнтів тепловіддачі та експериментальних значень теплофізичних властивостей нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 [8, 10]. Як видно з рис. 5.9, при малих числах Рейнольдса (ламінарний режим) розкид значень числа Нусельта для всіх об'єктів дослідження лежить у межах невизначеності експериментальних даних. Тобто за отриманими результатами можна зробити висновок, що коефіцієнт тепловіддачі при ламінарній течії розглянутих об'єктів дослідження можна розраховувати за рівняннями, запропонованими для течії однофазних рідин з використанням коректо визначених теплофізичних властивостей нанофлюїду.

Стосовно турбулентного режиму течії нанофлюїдів картина інша. З рис. 5.9 чітко видно розшарування експериментальних даних для базової рідини та нанофлюїдів з різною концентрацією наночастинк. Різниця в числі Нусельта для чистого ізопропанолу та нанофлюїду зі вмістом $0,0315 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$ наночастинок дорівнює приблизно 50 %, що вже значно вище, ніж невизначеність експериментальних даних. Тобто можна зробити висновок, що залежність для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі впри вимушеній течії нанофлюїдів у турбулентному режимі течії по-

требують модифікації з урахуванням фізичних ефектів впливу наночастинок на ступень турбулентності потоку.

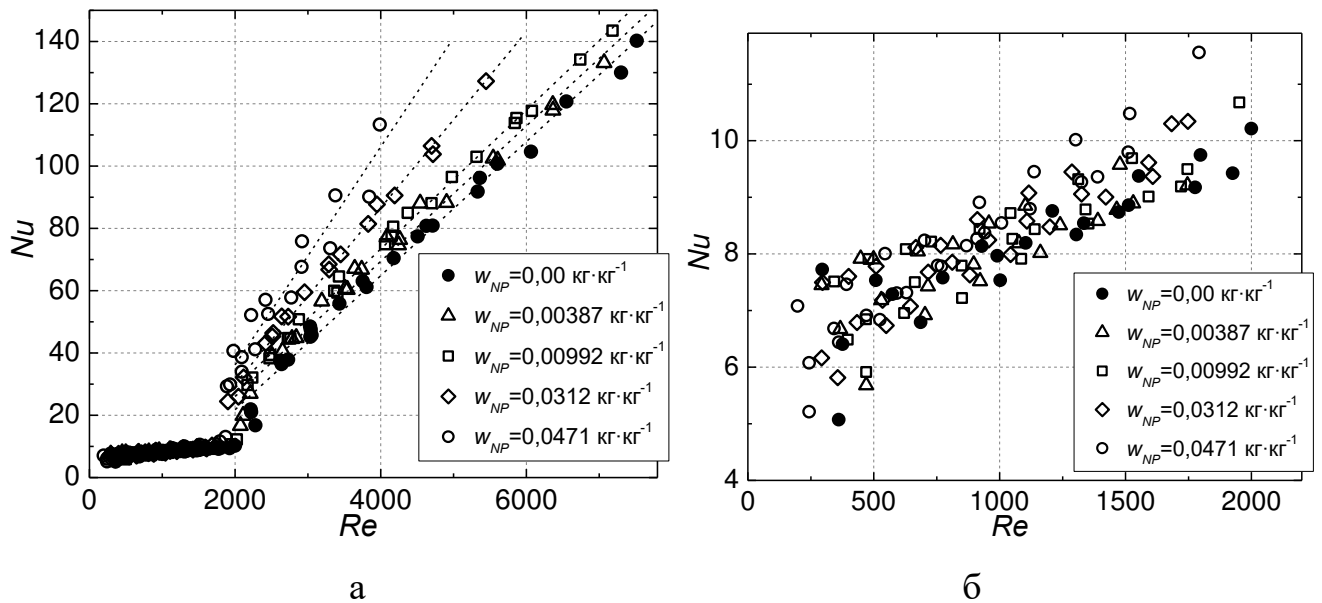


Рисунок 5.9 – Залежність числа Нусельта від числа Рейнольдса при вимушеній течії чистого ізопропанолу та нанофлюїдів ізопропанол/наночастишки Al_2O_3 у каналі круглого поперечного перерізу

5.3.3 Аналіз механізмів впливу наночастинок на гідронімічні та теплообмінні характеристики при течії нанофлюїдів

Встановлення механізмів впливу наночастинок на процеси переносу при течії нанофлюїдів є одною з ключових проблем сучасної галузі науки, яка займається питаннями впровадження нанофлюїдів у промислове обладнання.

Виділяють два основних механізми, які визначають збільшення втрат тиску як при ламінарному, так й при турбулентному режимах течії суспензій [39]:

- домішки наночастинок призводить до збільшення як ефективної в'язкості нанофлюїду (розділ 1 та 4), так й турбулентної в'язкості;
- непружні зіткнення частинок зі стінками тимчасово зменшують середню швидкість частинок; частина енергії базової рідини витрачається на збільшення імпульсу наночастинок, що сприяє збільшенню втрат енергії при течії суспензій у порівнянні з течією базової рідини.

На думку автора роботи, з погляду на малу інерційність наночастинок, вклад другого механізму на збільшення втрат тиску при течії нанофлюїдів можна

не враховувати. Тому отримані в роботі результати про незалежність коефіцієнту втрат тиску по довжині від наявності в рідині наночастинок (рис. 5.3) збігаються з розглянутими механізмами впливу наночастинок на втрати тиску при течії нанофлюїду та визначаються лише збільшенням в'язкості нанофлюїдів.

Виходячи з вищесказаного результати збігання залежності числа Нуссельта від Рейнольдса для ламінарного режиму течії (рис. 5.9) також є очікуваними. Але розшарування залежності Nu від Re в турбулентній області потребує додаткового аналізу.

Встановлення впливу дисперсної фази (частинок або капель) на енергію турбулентності дисперсійного середовища є одною з ключових проблем механіки двофазних потоків [40].

В дослідженні [12] показано, що рівень пульсацій тиску в нанофлюїді (вода/наночастинки Al_2O_3 з концентрацією 1 та 2 % та середнім розміром 25 нм) при ламінарній течії приблизно на 30-40 % вище, ніж при течії базової рідини у трубі. Дестабілізування потоку частинками малого розміру вперше було показано при дослідженні течії газових суспензій [12, 41, 42]. Таким чином, частинки дестабілізують потік рідини при ламінарному режимі течії. Напевно, цим фактом може бути прояснено зафіксоване в експерименті (підрозділ 5.2) припинення існування ламінарного режиму течії нанофлюїдів в каналі при $Re < 2300$.

З другого боку в [12] зафіксований протилежний результат при турбулентному режимі течії нанофлюїдів в трубі. Показано, що наночастинки суттєво знижують пульсації тиску в середній та високочастотній частинах частотного спектру енергії турбулентності. Тобто при малих та середніх масштабах турбулентності, так як хвильове число є величиною зворотною радіусу вихору (енергія турбулентності малих вихорів) [43-45]. Тобто, домішки наночастинок сприяють пригніченню маломасштабних турбулентних флуктуацій у потоці. В той же час в роботі [12] зафіксоване збільшення пульсацій тиску у низькочастотній частині спектру, яке було пропорційним збільшенню концентрації наночастинок. Але це збільшення ступеня турбулентності в роботі не пояснюється. На думку автора, невелика кількість домішок малоінерційних частинок (наночастинок) у потоці не буде сприяти

збільшенню ступеня турбулентності. Але деякий ефект впливу на амплітуду пульсацій тиску, пов'язаний зі взаємодією наночастинок друг з другом при їх великій концентрації у рідині, може пояснити ефекти, що отримані у роботі [12] та у власних дослідженнях (рис. 5.9).

Ефекти впливу на ступень турбулентності залежить більшою мірою від розміру частинок та масштабу турбулентності [40] – рис. 5.10. В [40, 46-48] наведені результати математичного моделювання процесів додаткової дисипації турбулентності малоінерційними частинками (квазірівноважна течія) й додаткової генерації турбулентності в слідах за частинками, що рухаються у потоці (течія з крупними частинками).



Рисунок 5.10 – Основні фізичні механізми модифікації енергії турбулентності в газових потоках з малоінерційними та крупними частинками [40]

Одно з перших оглядових дослідження впливу частинок мікророзміру на турбулентний режим течії однофазного середовища були виконані в роботі [49]. Автори [49] показали, що інтенсивність турбулентних пульсацій зростає при величинах відношенні розміру частинок до масштабу турбулентності Колмогорова (масштабу малих вихорів) більш ніж 0,1, та навпаки зменшується, якщо ця величина менш ніж 0,1. Тобто, чим менше частинка, тим більше ефект зменшення тур-

5.4 Висновки за розділом

1. Зі збільшенням числа Рейнольдса добавка наночастинок Al_2O_3 в ізопропанол призводить до збільшення як коефіцієнту тепловіддачі при вимушеній течії рідини в трубі, так й до збільшення втрат тиску.

2. Висновок про вплив наночастинок на характеристики процесу тепловіддачі при течії нанофлюїдів суттєво залежить від обраних для аналізу критеріїв. Виконаний аналіз залежності коефіцієнта тепловіддачі від добутку масової витрати нанофлюїду на його теплоємність показав, що суттєвого впливу домьшок наночастинок у рідині на інтенсивність тепловіддачі при її ламінарному режимі течії не спостерігалось. Але при турбулентній течії наявність наночастинок призводила до погіршення коефіцієнту тепловіддачі (при рівних значеннях добутку масової витрати нанофлюїду на його теплоємність). Зафіксовані ефекти впливу наночастинок на коефіцієнти тепловіддачі при вимушеному ламінарному та турбулентній течії нанофлюїдів у порівнянні з базовою рідиною можуть бути пояснені впливом наночастинок на ступень турбулентності потоку.

3. Показано, що критичне число Рейнольдса (яке характеризує закінчення існування ламінарного режиму течії) не відповідає значенню, характерному для течії однофазних рідин у каналах ($Re_{кр} \sim 2300$) й є тим меншим, ніж більше концентрація наночастинок у рідині. При концентрації наночастинок Al_2O_3 у ізопропанолі $0,0315 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в експерименті отримано $Re_{кр} \sim 1500$.

4. З аналізу співвідношення кількості переданої нанофлюїдом теплоти до витрати енергії на перекачування нанофлюїду можна зробити висновок, що з точки зору енергозбереження застосування розглянутих нанофлюїдів не призводить до зміни енерговитрат на перекачування рідини на одиницю переданої кількості теплоти у порівняння з течією базовою рідини при турбулентній течії, та призводить до збільшення енерговитрат при ламінарній течії. Використання нанофлюїдів в якості тепло- та холодоносіїв є перспективним у тих випадках, коли енерговитра-

ти на їх перекачування не є досить важливими у порівнянні з інтенсифікацією тепловіддачі, наприклад при охолодженні електронних елементів різних систем, у воєнній техніці. У такому випадку використання нанофлюїдів буде сприяти зменшенню масогабаритних розмірів теплообмінного обладнання.

5. Залежність коефіцієнта втрат напору (гідрравлічного тертя) по довжині від числа Рейнольдса для нанофлюїду ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 співпадає з цією же залежністю для базової рідини, тобто зроблений висновок про можливість застосування рівнянь для розрахунку коефіцієнта втрат напору по довжині, запропонованих для однофазних рідин з використанням коректо вимірних теплофізичних властивостей нанофлюїдів.

6. Показано, що при ламінарному режимі розкид значень числа Нусельта в залежності від Рейнольдса для всіх об'єктів дослідження лежить у межах невизначеності експериментальних даних. Тобто, коефіцієнт тепловіддачі при ламінарній течії розглянутих нанофлюїдів можна розраховувати за рівняннями, запропонованими для течії однофазних рідин з використанням коректо визначених теплофізичних властивостей нанофлюїду. При турбулентному режиму течії нанофлюїдів різниця в числі Нусельта для чистого ізопропанолу та нанофлюїдів зростає приблизно пропорційна концентрації наночастинок Al_2O_3 у ізопропанолі, та для концентрації $0,0315 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ дорівнює приблизно 50 %, що вже значно вище, ніж невизначеність експериментальних даних. Тобто, для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів у турбулентному режимі, рівняння, що запропоновані для оцінки коефіцієнтів тепловіддачі при течії однофазних рідин, потребують модифікації з урахуванням фізичних ефектів впливу наночастинок на ступень турбулентності потоку.

7. Зроблено припущення, що припинення існування ламінарного режиму течії нанофлюїдів в каналі при $Re < 2300$ пов'язане з дестабілізацією наночастинок потоку рідини при ламінарному режимі течії. Показано, що домішки наночастинок (малоінерційні дисперсні домішки) сприяють пригніченню маломасштабних та середньомасштабних турбулентних флуктуацій у потоці. Але вплив наночастинок на крупномасштабні вихори не є очевидним. Впливом наночастинок на

зменшення турбулентних флуктуацій у потоці можуть бути пояснені ефекти збільшення коефіцієнта тепловіддачі, які були отримані при експериментальних дослідження течії нанофлюїду ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 .

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [8, 50-53].

5.5 Список використаних джерел за розділом

1. Ahmed M. S., Hady M. R. A., Abdallah G. Experimental investigation on the performance of chilled-water air conditioning unit using alumina nanofluids // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 5. 589-596.

2. Balaji N., Kumar P. S. M., Velraj R., Kulasekharan N. Experimental investigations on the improvement of an air conditioning system with a nanofluid-based intercooler // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015. Vol. 40(6). P. 1681-1693.

3. Kumaresan V., Velraj R., Das S. K. Convective heat transfer characteristics of secondary refrigerant based CNT nanofluids in a tubular heat exchanger // *International Journal of Refrigeration*. 2012. Vol.35(8). P. 2287-2296.

4. Bhattad J. Sarkar, P. Ghosh Exergetic analysis of plate evaporator using hybrid nanofluids as secondary refrigerant for low-temperature applications // *Int. J. Exergy*. 2017. Vol. 24 (1). P. 1–20.

5. Leong K.Y., Saidur R., Kazi S.N., Mamun A.H.: Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator) // *Appl. Therm. Eng.* 2010. Vol. **30**. 2685–2692.

6. Mare T., Halefadl S., Sow O., Estelle P., Duret S., Bazantay F. Comparison of the thermal performances of two nanofluids at low temperature in a plate heat exchanger// *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2011. Vol. **35**. P. 1535–1543.

7. Peyghambarzadeh S.M., Hashemabadi S.H., Hoseini S.M., Jamnani M.S. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators // *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2011. Vol. **38**. 1283–1290.

8. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Huminic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 130. P. 1032-1044.

9. Stephan P., Kabelac S., Kind M., Martin H., Mewes D., Schaber K. VDI Heat Atlas, Springer, 2010. 1585 p.

10. Zhelezny V., Geller V., Semenyuk Y., Nikulin A., Lukianov N., Lozovsky T., Shymchuk M. Effect of Al_2O_3 nanoparticles additives on the density, saturated vapor pressure, surface tension and viscosity of isopropyl alcohol // Int. J. Thermophys. 2018. Vol. 39 (38).

11. Meyer J.P., McKrell T., Grote K. The influence of multi-walled carbon nanotubes on single-phase heat transfer and pressure drop characteristics in the transitional flow regime of smooth tubes // Int. J. Heat Mass Transf. 2013. Vol. 58 (1-2). P. 597–609.

12. Rudyak V.Y., Minakov A., Guzey D., Zhigarev V., Pryazhnikov M. On laminar-turbulent transition in nanofluid flows // Thermophys. Aeromech. 2016. Vol. 23 (5). P. 773–776.

13. Liu D., Yu L. Single-phase thermal transport of nanofluids in a minichannel // J. Heat Transfer 2011. Vol. 133 (3). 031009.

14. Taylor B.N., Kuyatt C.E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD, 1994.

15. РМГ 43-2001. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» Минск: Изд-во стандартов, 2001. 26 с.

16. ГОСТ Р 54500.3-2011. Руководство по выражению неопределенности измерения М.: Стандартинформ, 2012. 100 с.

17. Minakov A., Lobasov A., Guzei D., Pryazhnikov M., Rudyak V.Y. The experimental and theoretical study of laminar forced convection of nanofluids in the round channel // Appl. Therm. Eng. 2015. Vol. 88. P. 140–148.

18. Minakov A., Guzei D., Pryazhnikov M., Zhigarev V., Rudyak V.Y. Study of turbulent heat transfer of the nanofluids in a cylindrical channel // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 102. P.745–755.
19. Gómez A.O.C., Hoffmann A.R.K., Bandarra Filho E.P. Experimental evaluation of CNT nanofluids in single-phase flow // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 86. P. 277–287.
20. Jumholkul C., Mahian O., Kasaeian A., Dalkilic A.S., Wongwises S. An experimental study to determine the maximum efficiency index in turbulent flow of SiO₂/water nanofluids // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017. Vol. 112. P. 1113–1121.
21. Tertsinidou G. J., Tsolakidou C. M., Pantzali M., Assael M. J., Colla L., Fedele L., Wakeham W. A. New measurements of the apparent thermal conductivity of nanofluids and investigation of their heat transfer capabilities // *Journal of Chemical & Engineering Data.* 2016. Vol. 62, Issue 1. P. 491-507.
22. Wang X. Q., Mujumdar A. S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review // *International journal of thermal sciences.* 2007. Vol.46 (1).P. 1-19.
23. Sajid M. U., Ali H. M. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: a critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2019. Vol. 103. P. 556-592.
24. Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles // *Applied Physics Letters.* 2001. Vol. 78 (6). P. 718–720.
25. Ali HM, Azhar MD, Saleem M, Saeed QS, Saieed A. Heat transfer enhancement of car radiator using aqua based magnesium oxide nanofluids // *Therm Sci.* 2015. Vol. 19. P. 2039–48.
26. Utomo A. T., Haghghi E. B., Zavareh A. I., Ghanbarpourgeravi M., Poth H., Khodabandeh R., Pacek A. W. The effect of nanoparticles on laminar heat transfer in a horizontal tube // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2014. Vol. 69. P. 77-91.

27. Sadeghinezhad E., Togun H., Mehrali M., Nejad P.S., Latibari S.T., Abdulrazzaq T., Kazi S., Metselaar H.S.C. An experimental and numerical investigation of heat transfer enhancement for graphene nanoplatelets nanofluids in turbulent flow conditions // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2015. Vol. 81. P. 41–51.

28. Sundar L.S., Otero-Irurueta G., Singh M.K., Sousa A.C. Heat transfer and friction factor of multi-walled carbon nanotubes–Fe₃O₄ nanocomposite nanofluids flow in a tube with/without longitudinal strip inserts // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 100. P. 691–703.

29. Sundar L.S., Singh M.K., Sousa A.C. Turbulent heat transfer and friction factor of nanodiamond-nickel hybrid nanofluids flow in a tube: an experimental study // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2018. Vol. 117. P. 223–234.

30. Duangthongsuk W., Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010. Vol. 53 (1). P. 334–344.

31. Pak B.C., Cho Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles // *Exp. Heat Transf. Int. J.* 1998. Vol. 11 (2). P. 151–170.

32. Гухман А.А. Введение в теорию подобия 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973. 296 с.

33. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, sixth ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2007. 589 p.

34. Петухов Б. С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах М.: Энергия, 1967. 409 с.

35. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 744 с.

36. Филиппов Л.П. Явления переноса М.: Изд-во МГУ, 1986. 120 с.

37. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 1990. 367 с.

38. Байков В.И., Павлюкевич Н.В., Федотов А.К., Шнип А.И. Теплофизика. Неравновесные процессы тепломассопереноса Учебное пособие. Минск: Вы-

шэйшая школа, 2018. 477 с.

39. Michaelides E. E. S. Nanofluidics. Cham: Springer International Publishing. 2014. 335 p.

40. Вараксин А. Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (Обзор) // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51, № 3. С. 421–455.

41. Saffman P.G. On the stability of laminar flow of a dusty gas // J. Fluid Mech. 1962. Vol. 13, pt. 1. P. 120–128.

42. Rudyak V.Ya., Isakov E.B., Bord E.G. Hydrodynamic stability of the Poiseuille flow of dispersed fluid // J. Aerosol Sci. 1997. Vol. 28, №. 1. P. 53–66.

43. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Часть I. Введение в турбулентность. Новосибирск: НГУ. 2000. 118 с.

44. Курбацкий А. Ф. Лекции по турбулентности. Часть 2. Моделирование турбулентных течений. Новосибирск: НГУ. 2001. 137 с.

45. Мазо А.Б. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости. Учебное пособие. Казань: КГУ. 2007. 106 с.

46. Вараксин А.Ю., Зайчик Л.И. Влияние мелкодисперсной примеси на интенсивность турбулентности несущего потока в трубе // Теплофизика высоких температур. 1998. Т. 36, №6. С. 1004 – 1007.

47. Зайчик Л.И., Вараксин А.Ю. Влияние следа за крупными частицами на интенсивность турбулентности несущего потока // Теплофизика высоких температур. 1999. Т. 37, №4. С. 683-687.

48. Varaksin A.Y. Turbulent Particle Laden Gas Flows. Springer–Verlag. 2007. 210 p.

48. Gore R. A., Crowe C. T. Effect of particle size on modulating turbulent intensity//International Journal of Multiphase Flow. 1989. Vol. 15(2). P. 279-285.

50. Khliyeva O., Ryabikin S., Lukianov N., Zhelezny V. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al₂O₃ nanoparticles // Eastern european journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 1/8 (85). P. 4-12.

51. Zhelezny V., Chen G., Khliyeva O., Ryabikin S., Shestopalov K. Influence of Al_2O_3 nanoparticle additives on the thermophysical properties of aqueous solution of propylene glycol and on the heat transfer coefficient in forced convection flow in a tube // Proc. 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants. 23 - 26 April 2017, Seoul, Republic of Korea.

52. Рябикин С.С., Хлиева О.Я., Геллер В.З., Железный В.П. Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвекции нанохладоносителей в трубе // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 273-276.

53. Хлиева О.Я., Рябикин С.С., Железный В.П., Гордейчук Т.В. Экспериментальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц Al_2O_3 // Proc. International conference “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”, 29 September – 01 October, 2016. Chisinau, Republic of Moldova. P. 391 – 399.

6 ВПЛИВ ДОМШОК НАНОЧАСТИНОК НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ КИПІННІ НАНОХОЛОДОАГЕНТУ У ВІЛЬНОМУ ОБ'ЄМІ

Даний розділ присвячено експериментальному дослідженню коефіцієнтів тепловіддачі при кипіння у вільному об'ємі нанофлюїду на основі холодоагенту R141b, наночастинок TiO_2 та ПАР (поверхнево-активної речовини), а також розчину ПАР у холодоагенті. Виконано експериментальне дослідження впливу наночастинок і ПАР у холодоагенті на внутрішні характеристики процесу кипіння. Багато уваги присвячено розробці методу прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні як чистих рідин, так й нанофлюїдів, який заснований на використанні обмеженої експериментальної інформації з внутрішніх характеристики процесу кипіння.

6.1 Проблематика прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів

Процес тепловіддачі при кипінні рідин є досить складним, комплексним процесом. Далі в даному розділі буде розглядатися лише тепловіддача при кипінні у вільному об'ємі. Цій процес є більш простим з точки зору факторів, що впливають на нього, ніж процес кипіння в потоці рідини. Тому, ймовірно, кипіння у вільному об'ємі краще вивчене [1]. Багато кореляції для оцінки тепловіддачі при кипінні в потоці ґрунтується на залежностях, отриманих стосовно вивчення процесу кипіння у вільному об'ємі.

Моделювання процесів кипіння є досить складним завданням в силу випадковості цього процесу. В даний час для оцінки інтенсивності переносу теплоти в процесі бульбашкового кипіння рідин в вільному об'ємі запропоновано велику кількість, як емпіричних кореляцій так і моделей, заснованих на урахуванні фізичної сутності розглянутого процесу [2 - 7]. Наявні емпіричні кореляції широко використовуються в інженерній практиці. Але через вузьку області застосування кожної кореляції вони не застосовні до аналізу процесів теплообміну при кипінні

нових об'єктів в нових умовах [3].

В даний час спостерігається інтерес до використання нанофлюїдів в теплообмінних процесах. Тому стає актуальною проблема прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі. Як показали чисельні дослідження, оцінити коефіцієнт тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів з використанням традиційних моделей не є можливим. Як вважає ряд дослідників [3, 8, 9], застосування фізично обґрунтованих моделей (*mechanistic models*) може допомогти вирішити дану проблему. Таки моделі засновані на урахуванні внутрішніх характеристик процесу кипіння таких як: середній відривний діаметр парових бульбашок, середня частота відриву бульбашок, середня швидкість росту бульбашок та кількість активних центрів пароутворення.

Внутрішні характеристики процесу кипіння нанофлюїдів залежать як від властивостей киплячої рідини, так і від стану поверхні нагрівача. В даний час вже є ряд кореляцій, заснованих на урахуванні внутрішніх характеристик процесу кипіння [3, 8-15]. Одна з перших кореляцій, в якій був врахований відривний діаметр та частота відриву бульбашки, а також кількість активних центрів пароутворення запропонована Forster & Greif [11]. Згодом з'явилися аналогічні моделі: кореляція Mikic & Rohsenow [12], кореляція Judd and Hwang [13], кореляція Benjamin & Balakrishnan [14], модель розділення теплових потоків RPI (Rensselaer Polytechnic Institute) [10]. Но в той же час існують і більш прості моделі, які засновані на урахуванні лише деяких внутрішніх характеристик процесу кипіння. Наприклад це модель, яка запропонована в [16] (враховується лише величина відривного діаметра бульбашки), модель Толубінського [8] (враховується величина відривного діаметра бульбашки та частота відриву).

Слід зазначити, що експериментальне дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння є досить складним завданням, що вимагає спеціального устаткування та великої вибірки експериментальних даних у зв'язку з імовірнісним характером процесу кипіння. Отримання цієї інформації стосовно процесу кипіння нанофлюїдів ускладнюється збільшенням оптичної густини зразків зі зростанням в них концентрації наночастинок, що ускладнює застосування оптичних ме-

тодів дослідження. Разом з тим, отримання достовірних (статистично повних) експериментальних даних про величини внутрішніх характеристик процесу кипіння для конкретних рідин (нанофлюїдів) є, на думку автора, необхідними для прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні з використанням фізично обґрунтованої моделі.

Робіт, присвячених дослідженню впливу наночастинок на внутрішні характеристики процесу кипіння досить небагато [17-23]. В деяких з них зазначається лише якісний вплив наночастинок на внутрішні характеристики процесу кипіння базової речовини, без проведення кількісної оцінки [23]. Але, використання експериментальної інформації з внутрішніх характеристик процесу кипіння спільно з моделлю розділення теплових потоків RPI дозволило з високою точністю описати [17] і спрогнозувати [16] процес бульбашкового кипіння як чистих рідин, так і нанофлюїдів.

В роботах [2, 3, 8, 9, 12, 24, 25, 27, 28] наводяться кореляції для розрахунку середнього відривного діаметру бульбашок і рівняння зв'язку середнього відривного діаметру бульбашок з середньою частотою відриву. Разом з тим, в роботі [3] зазначено, що останнім часом запропоновано велику кількість кореляцій та моделей для прогнозування внутрішніх характеристик процесу кипіння, але істотного успіху якісного прогнозування цих характеристик досягнуто не було.

6.2 Результати експериментального дослідження тепловіддачі при кипінні нанофлюїду R141b/наночастишки TiO₂

В якості об'єктів дослідження були обрані наступні системи (див. розділ 2):

- холодоагент R141b без домішок наночастинок й ПАР - R141b;
- розчин холодоагенту R141b з ПАР Span80 (0,001 кг·кг⁻¹) – R141b/ПАР (зміні теплофізичних властивостей базової рідини і внутрішніх характеристик процесу кипіння сприятимуть не тільки домішки наночастинок, але й домішки ПАР [28, 29]);
- нанофлюїд, який складається з холодоагенту R141b, ПАР Span80 (0,001

кг·кг⁻¹) й наночастинок TiO₂ (0,001 кг·кг⁻¹) - R141b/ПАВ/TiO₂.

6.2.1 Результати дослідження впливу наночастинок та ПАВ на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні холодоагенту R141

Експериментальне дослідження проводилися на установці, яка описана в розділі 3. Ступень перегріву поверхні нагрівача і коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження вимьюювалися при трьох значеннях температури насичення: T=77,9; 67,1 й 52,9°C, які відповідають наступним значенням абсолютного тиску насичення чистого R141b [30]: 0,20; 0,30 та 0,40 МПа. Густина теплового потоку змінювалася в інтервалі від 5,81 до 56,44 кВт·м⁻².

Результати дослідження залежності коефіцієнту тепловіддачі від густини теплового потоку при різних значеннях тиску насичення наведені на рис. 6.1. Результати дослідження залежності густини теплового потоку від перегріву стінки нагрівача при різних значеннях тиску насичення наведені на рис. 6.2. Крім того, на цих же рисунках відзначені межі розширених невизначеностей відповідних величин для кожної експериментальної точки. Розширена невизначеність для теплового потоку слала (20-700) Вт·м⁻², для ступеня перегріву – (0,15 – 0,65) К (до 1,30 К для декількох точок при максимальних значеннях теплового потоку), для коефіцієнту тепловіддачі (60-730) Вт·м⁻²К⁻¹ (до 1500 Вт·м⁻²К⁻¹ по аналогії з перегрівом). Більш широкі межі невизначеності при більш високих значеннях густини теплових потоків викликані пульсуючим характером процесу кипіння в цій області, що сприяло збільшенню випадкової складової (невизначеності за типом А) у загальну величину невизначеності.

Після апроксимації отриманих експериментальних даних залежністю виду (6.1) були розраховані значення відносних коефіцієнтів тепловіддачі для R141b/ПАВ та R141b/ПАВ/TiO₂ - рис. 6.3.

$$\alpha = A \cdot q^B, \quad (6.1)$$

де q – густина теплового потоку, Вт·м⁻²; A й B – апроксимаційні коефіцієнти, які для аналізованих об'єктів дослідження наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Апроксимаційних коефіцієнти рівняння (6.1)

Об'єкт дослідження	P=0.20 МПа		P=0.30 МПа		P=0.40 МПа	
	A	B	A	B	A	B
R141b	1.1732	0.781756	1.9631	0.748324	4.3676	0.686787
R141b/ПАР	3.6585	0.673049	6.7067	0.627153	10.3692	0.594978
R141b/ПАР/TiO ₂	2.4160	0.718459	4.8583	0.660957	9.5380	0.603588

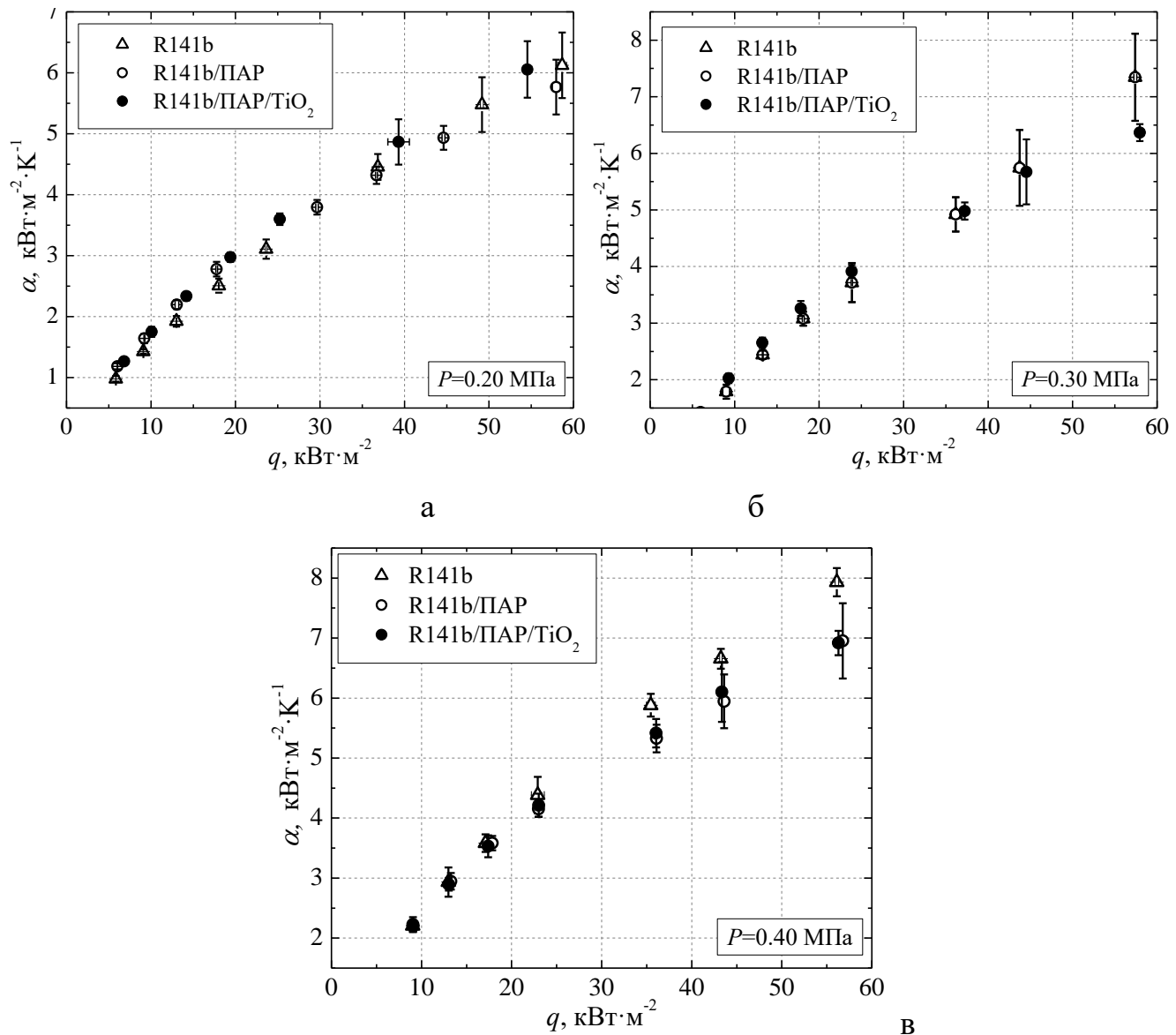


Рисунок 6.1 – Залежність коефіцієнту тепловіддачі при кипіння у вільному об'ємі R141b, R141b/ПАР й R141b/ПАР/TiO₂ від густини теплового: (а) 0,4·МПа, (б) 0,3·МПа, (в) 0,2·МПа.

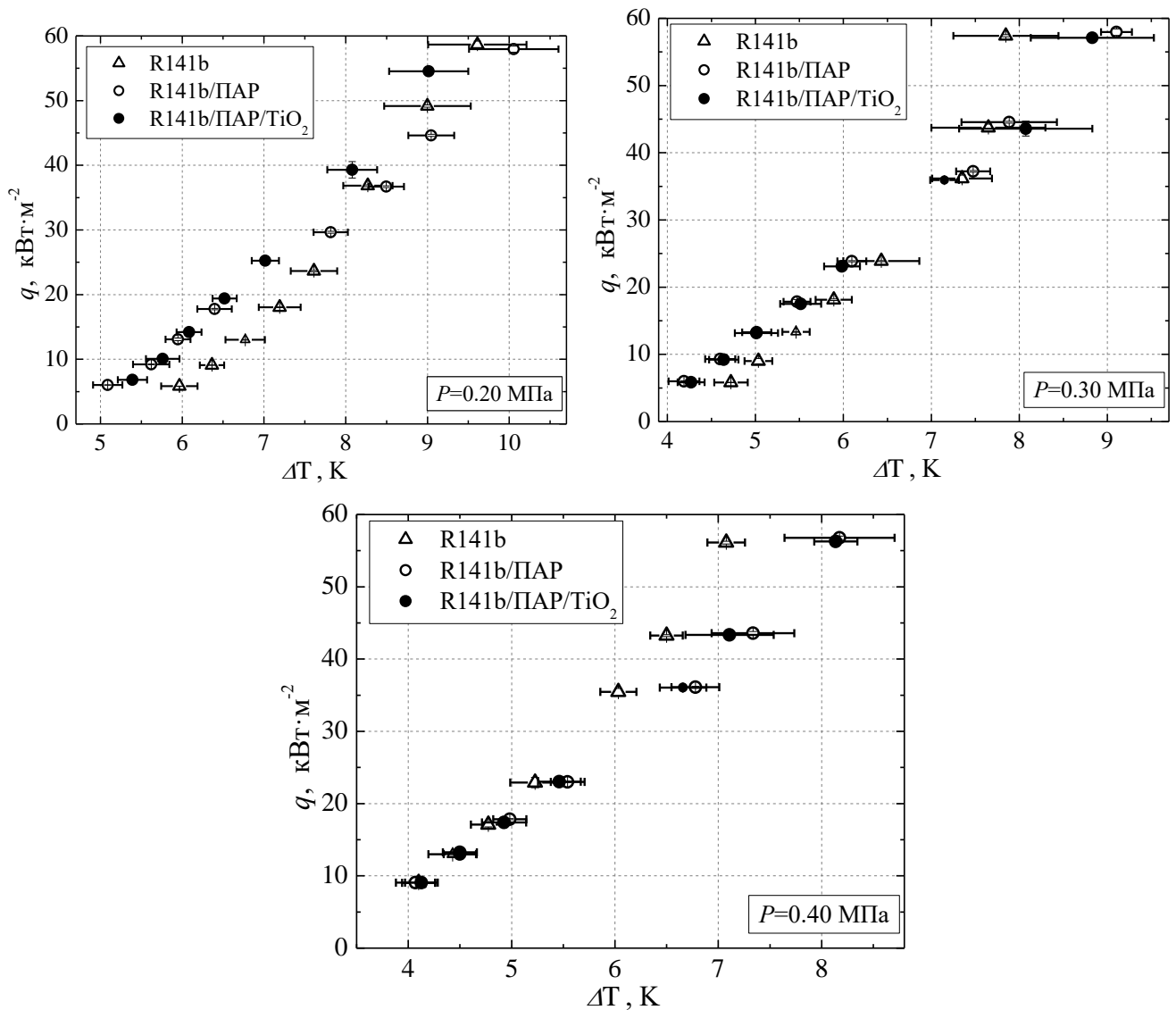


Рисунок 6.2 – Залежність густини теплового потоку при кипіння у вільному об'ємі для R141b, R141b/ПАР и R141b/ПАР/TiO₂ від ступеня перегріву стінки: (а) 0.4·МПа, (б) 0.3·МПа, (в) 0.2·МПа.

Виконаний аналіз отриманих експериментальних даних показує, що добавки як ПАР Span-80, так і наночастинок TiO₂ з ПАР Span-80 у R141b призводять до збільшення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі при низьких значеннях густини теплового потоку. Навпаки, при збільшенні густини теплового потоку спостерігається зменшення коефіцієнту тепловіддачі. Отримані експериментальні дані вказують на залежність збільшення коефіцієнта тепловіддачі при введенні в R141b наночастинок TiO₂ і ПАР від густини теплового потоку і від температури насичення. Зі збільшенням густини теплового потоку внесок наночастинок

TiO₂ і ПАР в зростання коефіцієнту тепловіддачі знижується. Найбільший ефект від добавок наночастинок TiO₂ і ПАР в зростання коефіцієнта тепловіддачі спостерігається при низькому тиску.

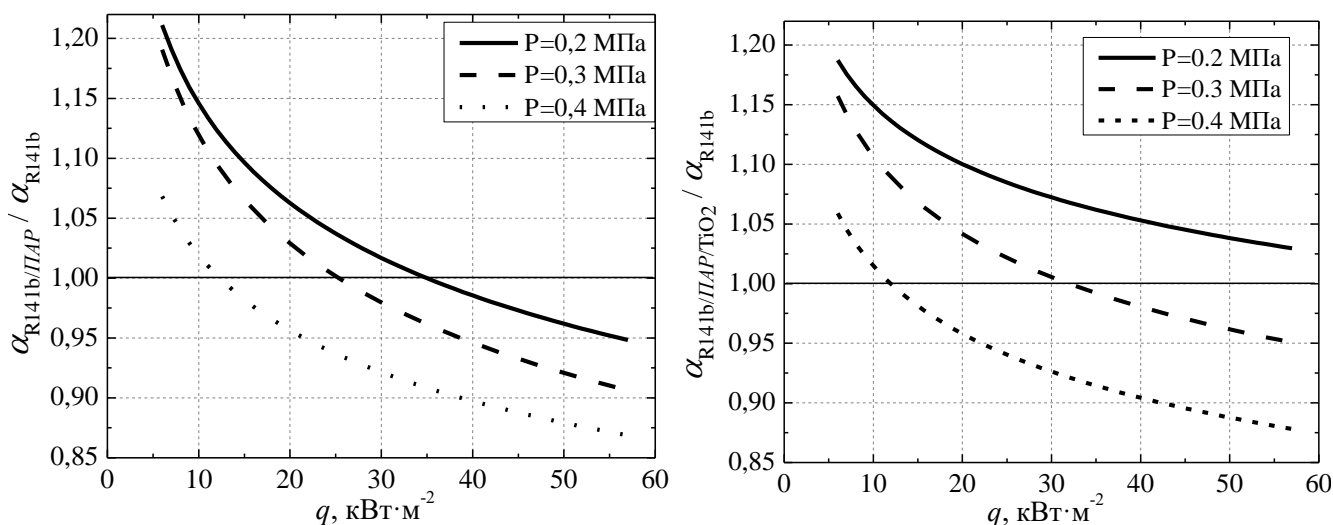


Рисунок 6.3 – Залежність відносного коефіцієнта тепловіддачі (відносно коефіцієнту тепловіддачі при кипіння R141b) від густини теплового потоку для R141b/ПАВ та R141b/ПАВ/TiO₂

Слід зауважити, що саме низькі значення тиску і низькі значення густини теплового потоку (до $20 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) характерні для випарників парокомпресійних холодильних машин і теплових насосів [30-32], тому при реальних параметрах роботи холодильного обладнання використання домішок як ПАР Span-80, так і наночастинок TiO₂ до холодоагенту з метою збільшення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні може бути доцільним.

6.2.2 Результати дослідження впливу наночастинок та ПАР на внутрішні характеристики процесу кипіння холодоагенту R141b

Внутрішні характеристики процесу кипіння (середній відривний діаметр парових бульбашок та середня частота відриву бульбашок) були експериментально досліджені при атмосферному тиску та трьох значеннях густини теплового потоку: 29,6; 42,2 та 57,0 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Використання стробоскопічного ефекту при фіксуванні на матриці фотоапарата зображення бульбашок дозволило в процесі оброб-

ки графічного об'єкта оцінити частоту відриву парових бульбашок. Ці данні були отримані за рахунок обробки фотографічних зображень киплячих рідин за допомогою редактора AutoCAD. Кількість бульбашок для визначення середнього відривного діаметру \bar{d}_b складала 100-160 шт. та для визначення середньої частоти відриву \bar{f}_b складала 70-120 шт. Величину середньої швидкості росту парових бульбашок було визначено по середнім значенням \bar{d}_b та \bar{f}_b для кожного об'єкта дослідження й кожного значення густини теплового потоку.

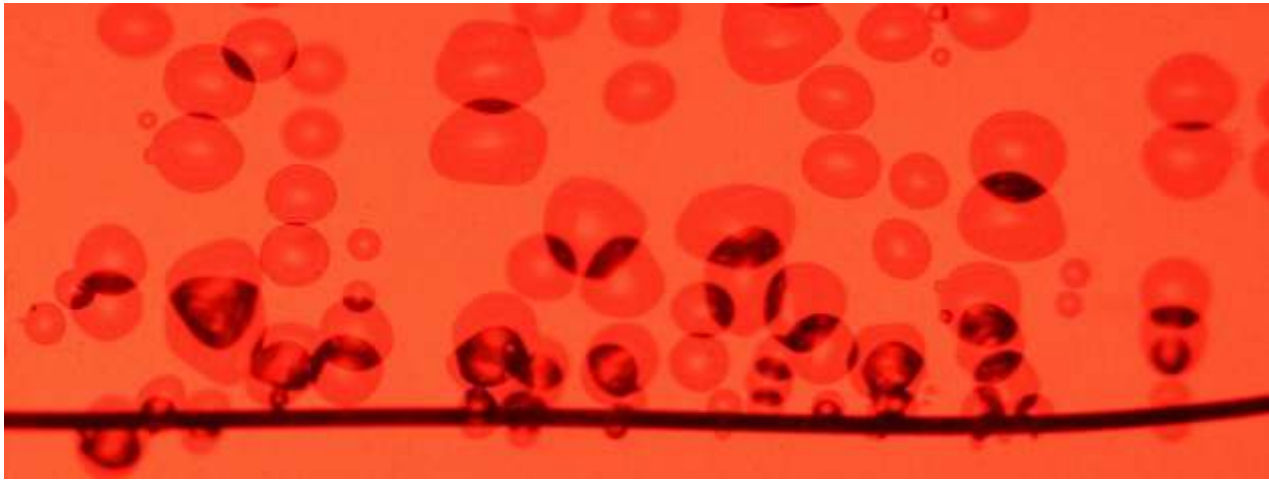
На рис. 6.4 наведено зображення процесу кипіння об'єктів дослідження при атмосферному тиску та густині теплового потоку рівній $57,0 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$, які були отримані з використанням описаної вище методики в експериментальній оптичній комірці, яка розглянута у розділі 3.

Залежність середнього відривного діаметру бульбашки \bar{d}_b та середньої частоти відриву \bar{f}_b від густини теплового потоку при $P=0,1013 \text{ МПа}$ для об'єктів дослідження наведено на рис. 6.5. Також на рис. 6.5.в наведено середню швидкість росту парових бульбашок $\bar{w}_b = \bar{d}_b \cdot \bar{f}_b$.

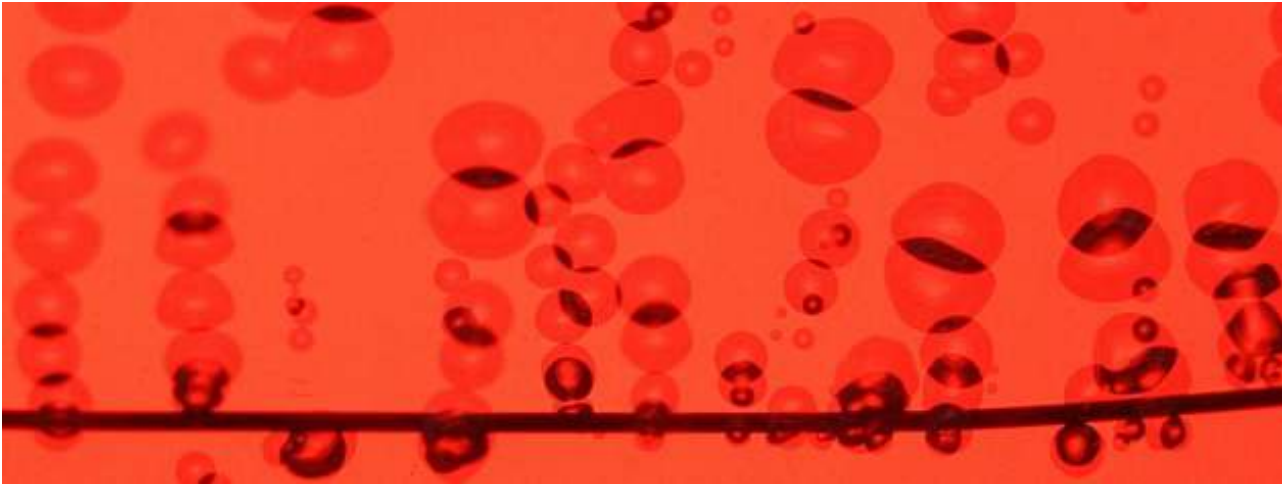
Як впливає з наведених рисунків, середній відривний діаметр бульбашки збільшується зі збільшенням густини теплового потоку. Причому це збільшення значне для чистого холодоагенту і несуттєве для холодоагенту з добавками ПАР і наночастинок. Низьке значення відривного діаметру для R141b при тепловому потоці $29,6 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ можна пояснити наступною причиною. При візуальному спостереженні за процесом кипіння при тепловому потоці $29,6 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ для R141b спостерігалось нерозвинене кипіння, яке характеризувалося нестійкою роботою центрів пароутворення, що генерували дрібні бульбашки з великою частотою. Для R141b/ПАР та R141b/ПАР/TiO₂ при даній густині теплового потоку кількість активних центрів пароутворення було вже значно більше.

Середня частота відриву бульбашок зменшувалася зі збільшенням густини теплового потоку (рис. 6.5). Середнє значення швидкості росту парових бульбашок з достатньою точністю можна прийняти незалежним від густини теплового потоку (рис. 6.5) (якщо при аналізі не враховувати значення для чистого R141b

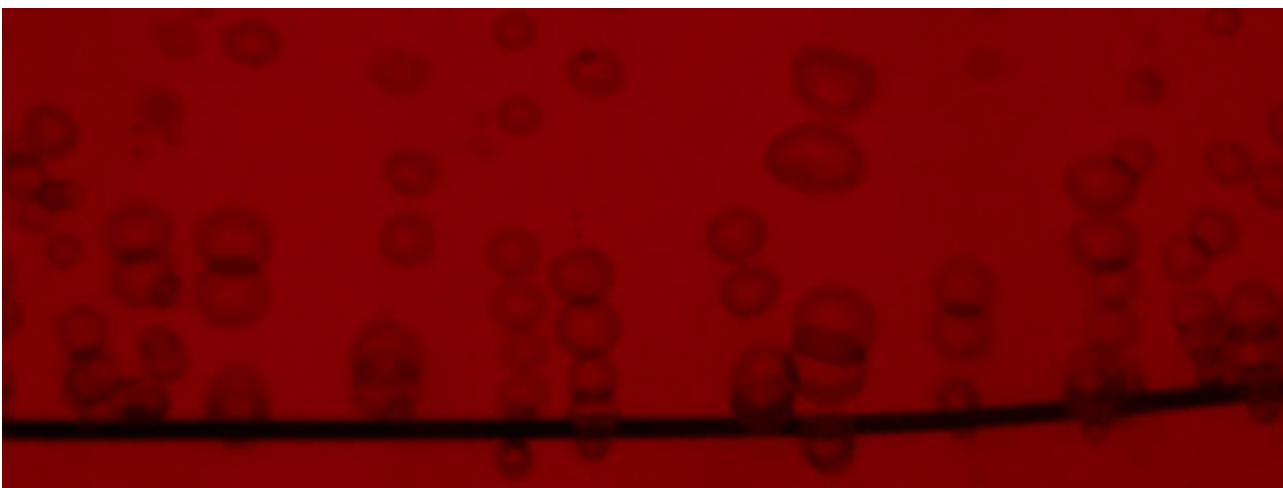
при тепловому потоці $29,6 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ отримане для нерозвиненого режиму кипіння), що збігається з даними [8].



а



б



в

Рисунок 6.4 – Візуалізація процесу кипіння R141b (а), розчину R141b/ПАВ (б) та нанофлюїд R141b/ПАВ/TiO₂ (в) при густині теплового потоку $57,0 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$

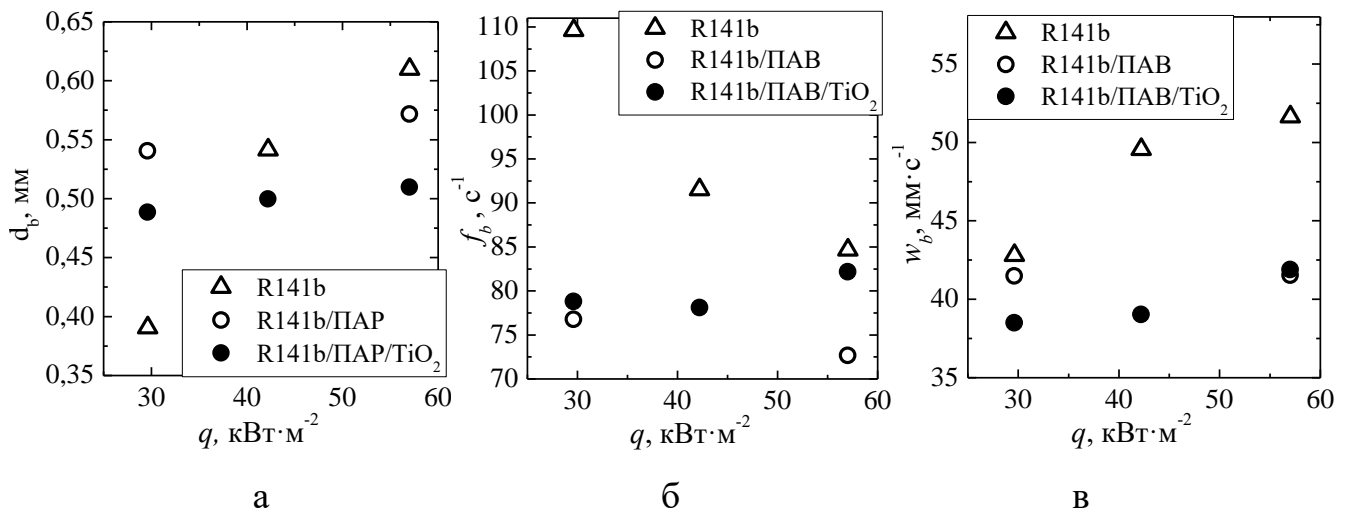


Рисунок 6.5 - Залежність внутрішніх характеристик процесу кипіння від густини теплового потоку для R141b, R141b/ПАА та R141b/ПАА/TiO₂ при $P=0,1013$ МПа: (а) середній відривний діаметр бульбашки, (б) середня частота відриву, (в) середня швидкість росту парових бульбашок

6.3 Прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів у вільному об'ємі

6.3.1 Аналіз можливостей застосування фізично обґрунтованих підходів щодо моделювання коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів

В підрозділі аналізується можливість застосування двох моделей (Толубинського та RPI) до розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження: холодоагенту R141b, розчину R141b з ПАА Span-80 та нанофлюїду R141b/ПАА/наночатсинки TiO₂.

На першому етапі на підставі наявний неповної інформації з внутрішніх характеристик процесу кипіння для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі була розглянута можливість використання залежності В.І. Толубінського [8], в якій не враховується вплив стану поверхні нагрівача (не враховується кількість активних центрів пароутворення)

$$\frac{\alpha_{\text{boil}}}{\lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} = 75 \left(\frac{q}{\Delta h \cdot \rho'' \bar{w}_b} \right)^{0.7} \left(\frac{a}{\nu} \right)^{0.2}, \quad (6.2)$$

де α_{boil} – коефіцієнт тепловіддачі, Вт·м⁻²·К⁻¹; λ – коефіцієнт теплопровідності,

$\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$; σ – поверхневий натяг, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$; ρ' й ρ'' - густина рідини та пару, відповідно, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; q - густина теплового потоку, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$; Δh – теплота випаровування, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$; \bar{w}_b - середня швидкість росту парових бульбашок, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$; ν – кінематична в'язкість, $\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$.

На підставі великого числа експериментальних даних В.І. Толубинський [8] прийшов до висновку, що швидкість росту парових бульбашок \bar{w}_b є перспективною характеристикою з точки зору моделювання процесу кипіння, так як ця величина залежить лише від фізичних властивостей рідини, несуттєво змінюється зі зміною густини теплового потоку і незначно залежить від стану поверхні нагріву. Виходячи з припущення незалежності \bar{w}_b від стану поверхні нагріву інформація про відривний діаметр бульбашки і частоти відриву, яка отримана при кипінні об'єктів дослідження на ніхромовому дроті (рис. 6.5) була використана для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі за кореляцією (6.2) та порівняна у подальшому з експериментальними даними, отриманими при кипінні на сталевому капілярі на установці, наведеної на рис. 3.7.

Для визначення величини \bar{w}_b при тисках, відмінних від атмосферного, була використана безрозмірна емпірична кореляція, яка справедлива при $\pi \leq 0,8$ [8]

$$\bar{w}_b / \bar{w}_{b,0.1} = (\rho''_{0.1} / \rho'')^{2.3+0.51g\pi}, \quad (6.3)$$

де $\bar{w}_{b,0.1}$ та $\rho''_{0.1}$ - середня швидкість росту парових бульбашок та густина пари при тиску $P_{0.1}=0,1013\cdot\text{МПа}$, відповідно; $\pi = P_{0.1}/P_C$ - зведений тиск.

У даному дослідженні при моделюванні коефіцієнта тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження приймалися значення $\bar{w}_{b,0.1} = \bar{d}_{b,0.1} \cdot \bar{f}_{b,0.1}$, які були отримані апроксимацією лінійною залежністю експериментальних даних з $\bar{d}_{b,0.1}$ й $\bar{f}_{b,0.1}$ від густини теплового потоку (рис. 6.5). Рівняння і коефіцієнти апроксимації експериментальних значень $\bar{d}_{b,0.1}$ й $\bar{f}_{b,0.1}$ наведено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Рівняння й коефіцієнти апроксимації
експериментальних значень $\bar{d}_{b,0.1}$ й $\bar{f}_{b,0.1}$

Об'єкт дослідження	$\bar{d}_{b,0.1} = A + B \cdot q$, м		$\bar{f}_{b,0.1} = A + B \cdot q$, с ⁻¹	
	A	B	A	B
R141b	$35,49 \cdot 10^{-10}$	$3,869 \cdot 10^{-4}$	$-8,970 \cdot 10^{-4}$	133,8
R141b/ПАР	$8,085 \cdot 10^{-10}$	$5,227 \cdot 10^{-4}$	$-1,129 \cdot 10^{-4}$	79,44
R141b/ПАР/TiO ₂	$7,686 \cdot 10^{-10}$	$4,664 \cdot 10^{-4}$	$1,282 \cdot 10^{-4}$	74,19

Експериментальні дані з впливу домішок ПАР Span-80 і наночастинок TiO₂ на теплофізичні властивості були раніше отримані автором роботи та наведені в [33]. Показано, що ефекти на густину, в'язкість, теплопровідність і поверхневий натяг базової рідини від добавок ПАР (0,001 кг·кг⁻¹) і наночастинок (0,001 кг·кг⁻¹) до R141b дуже незначні, отже, не можуть суттєво впливати на коефіцієнт тепловіддачі. При розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження теплофізичні властивості пари чистого R141b були отримані з використанням бази даних RefProp [30].

На другому етапі, для оцінки впливу кількості центрів пароутворення на величину коефіцієнта тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження в вільному об'ємі було виконано розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі з використанням фізично обґрунтованої моделі RPI, запропонованої Kurul та Podowsky [10]. Досить висика якість прогнозування з використанням даної моделі була підтверджена в роботах [10, 17].

В рамках моделі RPI розглядаються такі механізми перенесення теплоти: передача теплоти за рахунок випаровування - теплота, що витрачається на утворення бульбашок - q_e ; витрата теплоти на відновлення теплового приграничного шару після відриву бульбашки - q_q ; передача теплоти до рідини за допомогою конвекції за межами області впливу бульбашок - q_{conv} .

Сумарний переданий тепловий потік визначається за формулою

$$q_{tot} = q_e + q_q + q_{conv}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (6.4)$$

Кількість теплоти, що витрачається на утворення бульбашок

$$q_e = \frac{\pi}{6} \rho'' \cdot \Delta h \cdot n_b \left(f_b \cdot d_b^3 \right), \quad (6.5)$$

де ρ'' – густина пари, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; Δh – теплота пароутворення, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$; n_b – кількість активних центрів пароутворення, м^{-2} ; f_b – частота відриву бульбашок, с^{-1} ; d_b – відривний діаметр бульбашки, м.

Виходячи з припущення Nan й Griffith [35] про те, що бульбашка, яка відривається, збурює область теплового приграничного шару діаметром в два рази більшим ніж d_b , витрата теплоти на відновлення теплового приграничного шару після відриву бульбашки може бути розрахована за рівнянням

$$q_q = \frac{2\pi \cdot \lambda (T_w - T_s)}{\sqrt{\pi \cdot a}} n_b \left(f_b \cdot d_b^2 \sqrt{\frac{1}{f_b}} \right), \quad (6.6)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності рідини, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; T_w и T_s – температура стінки й насичення, відповідно, К; a – коефіцієнт температуропровідності рідини, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Теплота, що передається вільною конвекцією від області нагрівача, що не збурена бульбашками, може бути розрахована за рівнянням

$$q_{conv} = (1 - 0,25\pi \cdot n_b \cdot d_b^2 - A_c) \cdot \alpha_{conv} (T_w - T_s), \quad (6.7)$$

де A_{conv} – частка площі циліндричної поверхні нагрівача, на яку впливає спливаючі знизу бульбашки, м^2 .

$$A_{conv} = (\pi/8) d_b \cdot d_h \cdot n_b, \quad (6.8)$$

де d_h – діаметр нагрівача, м.

Коефіцієнт тепловіддачі при природній конвекції [36]

$$\alpha_{\text{conv}} = \frac{\lambda}{d_h} 0.5 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0.25} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_w} \right)^{0.25}, \quad (6.9)$$

де Gr й Pr – числа Грастгофа й Прандтля для рідини, відповідно; Pr_w - число Прандтля для рідини при температурі стінки.

За описаною вище методикою - рівн. (6.4) - (6.9), з використанням отриманих в експерименті даних з середнього відривного діаметра і середньої частоти відрива бульбашок для об'єктів дослідження (табл. 6.2) був виконаний розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі за рівн. (6.10)

$$\alpha_{\text{boil}} = \frac{q_{\text{tot}}}{(T_w - T_s)}. \quad (6.10)$$

При використанні моделі RPI відривний діаметр бульбашок при тиску, відмінному від атмосферного, оцінювався за співвідношенням

$$\bar{d}_b = \bar{d}_{b0.1} \left(\frac{\sigma(\rho'_{0.1} - \rho''_{0.1})}{\sigma_{0.1}(\rho'_{0.1} - \rho''_{0.1})} \right)^{0.5}, \quad (6.11)$$

де \bar{d}_b , ρ' , ρ'' й σ - середній відривний діаметр, густина рідини і пара та поверхневий натяг при певному тиску, для якого визначається величина \bar{d}_b , відповідно; $\bar{d}_{b0.1}$, $\rho'_{0.1}$, $\rho''_{0.1}$, й $\sigma_{0.1}$ - відривний діаметр, густина рідини і пара та поверхневий натяг при тиску $P_{0.1}=0,1013 \cdot \text{МПа}$, відповідно.

Частота відриву при тиску, відмінному від атмосферного, розраховувалася за $\bar{f}_b = \bar{w}_b / \bar{d}_b$, де величина \bar{w}_b визначалася за рівн. (6.3).

Для орієнтовної оцінки кількості центрів пароутворення (у рамках моделі RPI) була використана залежність (6.12) [8, 9]

$$\sqrt{n_b} = 25 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\Delta h \cdot \rho'' \cdot \Delta T}{T_s \cdot \sigma} \right)^{1.5}, \quad (6.12)$$

де n_b - кількість центрів пароутворення, м^{-2} , Δh - теплота пароутворення, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$;

ρ'' - густина пара, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; ΔT - ступень перегріву стінки, $^{\circ}\text{C}$; T_s - температура насичення, K ; σ - поверхневий натяг, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$.

Результати розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі по моделі Толубинського (рівн. (6.2), (6.3)) і моделі RPI (рівн. (6.4) - (6.12)), а так само експериментальні дані з коефіцієнтів тепловіддачі для об'єктів дослідження наведено на рис. 6.6. Відхилення розрахункових та експериментальних (апроксимованих рівнянням (6.1)) значень наведено на рис. 6.7.

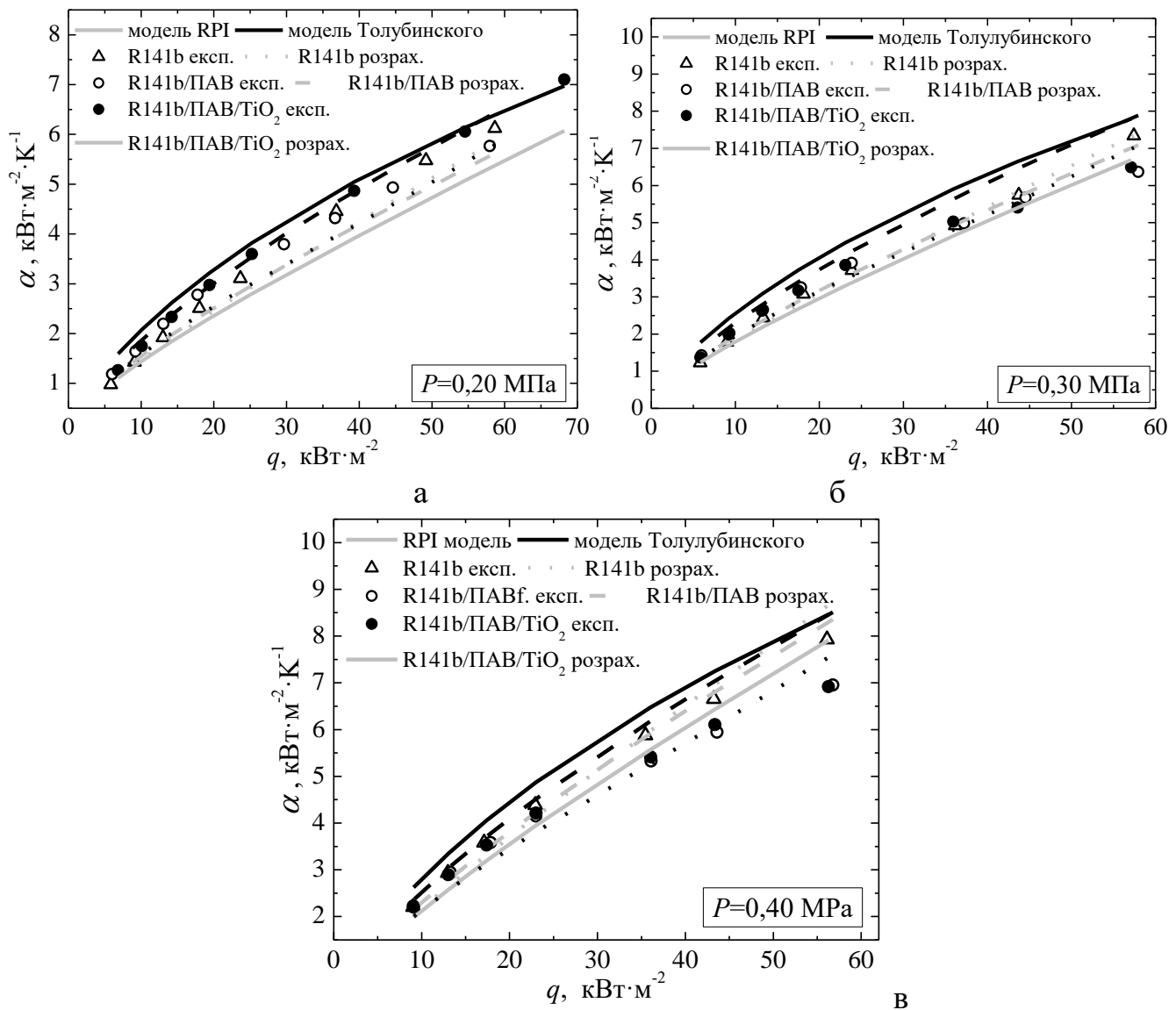


Рисунок 6.6 – Залежність експериментальних та розрахованих за моделями Толубинського (рівн. (6.2)-(6.3)) та RPI (рівн. (6.4)-(6.11) з розрахованим значенням ρ'' (6.12)) коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі R141b, R141b/ПАР та R141b/ПАР/TiO₂: (а) 0,2·МПа, (б) 0,3·МПа, (в) 0,4·МПа

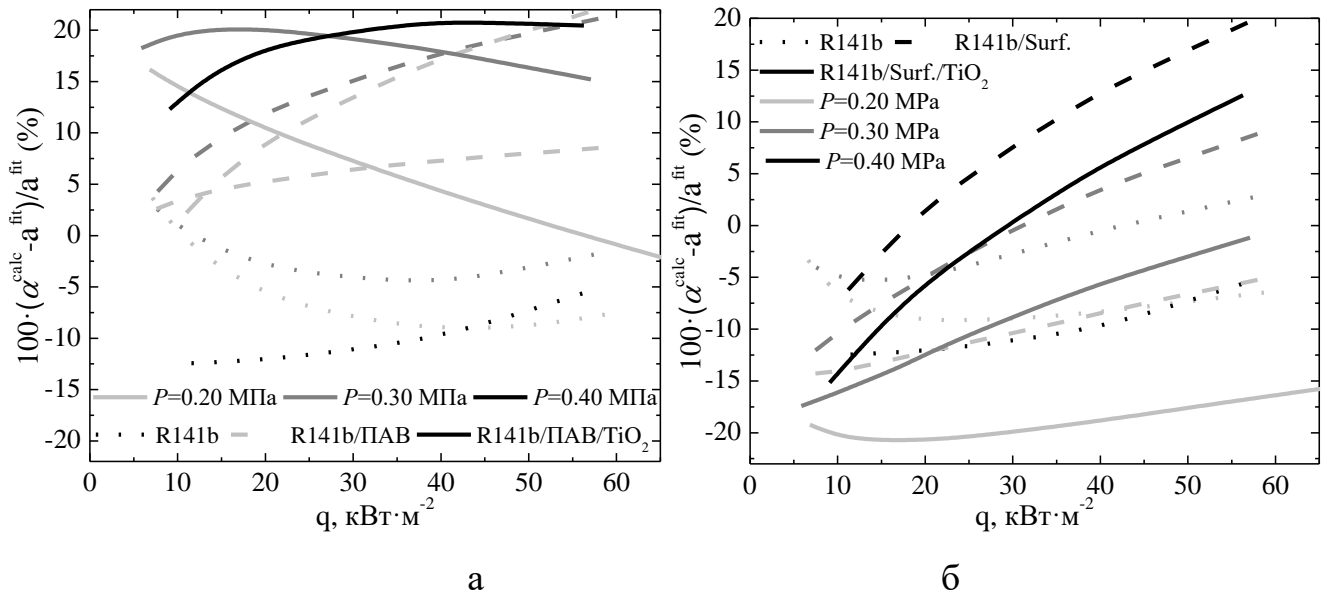


Рисунок 6.7 – Відносні відхилення експериментальних та розрахованих за моделлю Толубинського (рівн. (6.2)-(6.3)) – (а) - та моделлю RPI (рівн. (6.4)-(6.11) з розрахованим значенням n_b (6.12)) - (б) - коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі R141b, R141b/ПАВ та R141b/ПАВ/TiO₂

Як впливає з інформації, яка наведена на рис. 6.6, хорошого узгодження отриманих в експерименті значень з коефіцієнтів тепловіддачі для розглянутих систем з розрахованими за моделлю Толубинського (6.2) величинами не спостерігається. У всіх випадках розрахункові та експериментальні дані з коефіцієнтів тепловіддачі близькі за значеннями при низьких теплових потоках. Однак при збільшенні густини теплового потоку розрахункові величини коефіцієнтів тепловіддачі мають завищені значення для R141b/ПАВ та для R141b/ПАВ/TiO₂. Слід зазначити, що експериментальні дані показують зниження коефіцієнту тепловіддачі при великих теплових потоках для розглянутих систем щодо чистого R141b.

Як впливає з інформації наведеної на рис. 6.6 – 6.7, застосування моделі RPI з розрахунком n_b за емпіричною формулою (6.12) призводить до суперечливих результатів з величин коефіцієнтів тепловіддачі у порівнянні як з експериментальними даними так, й з результатами розрахунку за моделлю Толубинського. Причому, аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі у рамках моделі Толубинського і RPI показує протилежні результати впливу домішок наночасти-

нок у базовій рідині на інтенсивність тепловіддачі її при кипінні: модель RPI прогнозує зниження коефіцієнту тепловіддачі при кипінні нанофлюїду (у порівнянні з кипінням базової рідини), а модель Толубинського - збільшення.

Виконаний аналіз показує, що зміна теплофізичних властивостей R141b при введенні невеликих кількостей ПАР Span-80 і наночастинок TiO_2 не є фактором, який визначає величину коефіцієнту тепловіддачі при кипінні розглянутих систем. Отримані суперечливі результати пояснюється переважним впливом кількості активних центрів пароутворення на поверхні нагрівача на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні [17, 21]. При збільшенні густини теплового потоку число активних центрів пароутворення зростає і їх внесок в величину коефіцієнта тепловіддачі збільшується. Цей факт призводить до все більшої неузгодженості експериментальних й розрахованих за різними моделями даних (рис. 6.6).

Відомо, що кількість центрів пароутворення залежить від різних факторів і може змінюватися з часом на одній і тій же поверхні нагріву через її окислення, адгезію на неї різних сполук та ін. Відомо, що осідання наночастинок (а так само й ПАР - високомолекулярних сполук) може сприяти як зменшенню кількості активних центрів пароутворення, так й їх збільшенню [34, 37-39]. Причому, як відмічається в [38], кількість активних центрів пароутворення суттєво залежить від розмірів наночастинок у нанофлюїді та від початкового розміру нерівності поверхні нагрівача. У декількох дослідженнях було показано [38-40], що збільшення розміру порожнин на поверхні нагріву за рахунок осідання наночастинок в агломерованій формі (коли їх розмір більше, ніж шорсткість поверхні) сприяє активації роботи центрів пароутворення та збільшенню тепловіддачі при кипінні у області низьких значень теплового потоку. Але коли розмір наночастинок, що осідають, менші за шорсткість поверхні, кількість активних центрів пароутворення зменшується. Крім того, додатковим впливом на зменшення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні може бути збільшенням термічного опору на поверхні нагрівача за рахунок осідання на неї наночастинок [37]. При цьому важливо враховувати, що зі збільшенням густини теплового потоку при кипінні в роботу включається все більше центрів пароутворення менших розмірів.

Отже, без урахування зміни числа активних центрів пароутворення не можна спрогнозувати вплив домішок наночастинок і ПАР у базовій рідині на коефіцієнт тепловіддачі при її кипінні. Можливістю як збільшення так і зменшення кількості активних центрів пароутворення в результаті модифікації поверхні нагріву значною мірою можна пояснити наявність у літературі досить суперечливих результатів досліджень процесу тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів.

6.3.2 Методика прогнозування коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів та чистих речовин у вільному об'ємі

На наступному етапі дослідження з використанням отриманих експериментальних даних з коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження (апроксимаційні рівняння (6.1)), а також експериментальних даних про середні значення відривного діаметру бульбашок і частоту відриву (таблиця 6.2) у рамках моделі RPI (рівн. (6.4) - (6.11)) була обчислена залежність кількості центрів пароутворення від густини теплового потоку для об'єктів дослідження при трьох різних значеннях тиску - рис. 6.8.

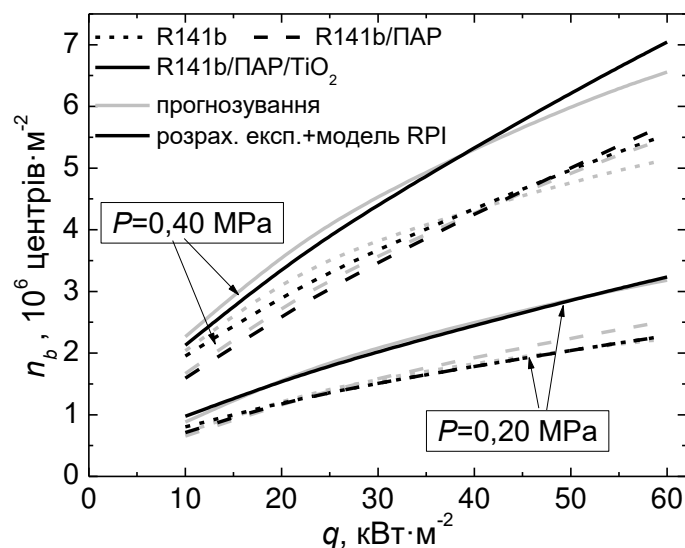


Рисунок 6.8 - Залежності кількості центрів пароутворення від густини теплового потоку, що були розраховані у рамках моделі RPI за рівн. (6.4) - (6.11) з використанням експериментальних даних з коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні і даних про середні значення відривного діаметру і частоти відриву бульбашок а також прогнозовані данні за рівн. (6.13)-(6.14)

На підставі виконаних розрахунків було отримано, що кількість центрів пароутворення при кипінні нанофлюїду помітно більше ніж при кипінні чистого холодоагенту і його розчину з ПАР. У той же час видно (рис. 6.8), що значення кількості центрів пароутворення при кипінні чистого R141b і R141b з добавками ПАР досить близькі. Отримані результати дослідження кількості центрів пароутворення підтверджують сформульований вище висновок про те, що у процесі кипіння нанофлюїду відбувається зміна стану поверхні нагріву, що істотно впливає на інтенсивності тепловіддачі при кипінні.

Проведене дослідження показує, що розраховані значення n_b у всьому інтервалі тисків для всіх об'єктів дослідження добре описуються залежністю виду (6.13) від густини теплового потоку

$$n_b = A \cdot q^B, \quad (6.13)$$

де A й B – апроксимаційні коефіцієнти.

Огляд літературних джерел [8, 9], а також виконаний в роботі аналіз залежності кількості центрів пароутворення від тиску для всіх розглянутих об'єктів дослідження, дозволив отримати наступну залежність

$$n_b = n_{b0.1} \left(\frac{\Delta h \cdot \rho''}{T_s \cdot \sigma} \cdot \frac{T_{s0.1} \cdot \sigma_{0.1}}{\Delta h_{0.1} \cdot \rho''_{0.1}} \right)^C, \quad (6.14)$$

де n_b , Δh , ρ'' , T_s й σ - кількість центрів пароутворення, теплота випаровування, густина пари, температура насичення і поверхневий натяг при певному тиску, для якого визначається величина n_b , відповідно; $n_{b0.1}$, $\Delta h_{0.1}$, $\rho''_{0.1}$, $T_{s0.1}$ и $\sigma_{0.1}$ - кількість центрів пароутворення, теплота випаровування, густина пари, температура насичення і поверхневий натяг при тиску $P_{0.1}=0,1013 \cdot \text{МПа}$, відповідно; C – емпіричний коефіцієнт.

Виконаний аналіз залежності кількості центрів пароутворення від густини теплового потоку та тиску для всіх об'єктів дослідження, дозволив отримати на-

ступні значення коефіцієнтів A , B та C у рівняннях (6.13) та (6.14) – табл. 6.3.

На рис. 6.8 наведені залежності n_b від густини теплового потоку, розраховані за апроксимаційними рівняннями (6.13)-(6.14) з використанням коефіцієнтів, наведених в таблиці 6.3. Як впливає з інформації наведеної на рис. 6.8, апроксимаційні рівняння (6.13)-(6.14) при визначених з експерименту значеннях коефіцієнтів A , B та C дозволяє розраховувати кількість центрів пароутворення при різних значеннях густини теплового потоку на достатньому для цілей прогнозування рівні.

Таблиця 6.3 - Коефіцієнти апроксимації у рівняннях (6.13) – (6.14)

Об'єкт дослідження	A	B	C
R141b	3748	0.5826	1.20
R141b/ПАР	1007	0.7122	1.09
R141b/ПАР/TiO ₂	2076	0.6682	1.05

Визначений при обробці експериментальних даних показник ступеня C рівняння (6.14) для розглянутих об'єктів дослідження був прийнятий різним для різних об'єктів дослідження. Але на аналізі цього коефіцієнту слід зосередитися більш детально, тому що його визначення на основі проведення обмеженого експерименту ускладнено. Залежність кількості центрів пароутворення від тиску можна встановити за рівнянням (6.12) [8, 9]. В [8] наведено узагальнена за різними речовинами інформація про вплив тиску на зміну кількості центрів пароутворення при кипінні. Показано, що узагальнена за різними речовинами залежність $\sqrt{n_b} = f(\Delta h \cdot \rho'' \Delta T / T_s \cdot \sigma)$ в логарифмічних координатах добре відповідає лінійній. Але, якщо розглядати цю залежність для індивідуальних речовин, то можна констатувати декілька різних її нахил в залежності від речовини. Тому, наведений в [8] показник ступеня 1,5 при цієї залежності є досить усередненим значенням, що й було підтверджено власним аналізом ($C \neq \text{const}$ для різних речовин). Величина коефіцієнту C в (6.14) залежить від рідини, що кипить, та напевно, від структури поверхні нагрівача. Але отримання цього коефіцієнту потребує проведення до-

даткового експерименту з визначення кількості активних центрів пароутворення при не менш ніж двох значеннях тиску, що ускладнює конструкцію експериментальної установки з дослідження внутрішніх характеристик процесу кипіння.

Результати розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при кипінні об'єктів дослідження з використанням моделі RPI і даних про кількість центрів пароутворення, отриманих з кореляції (6.14) показані на рис 6.9.

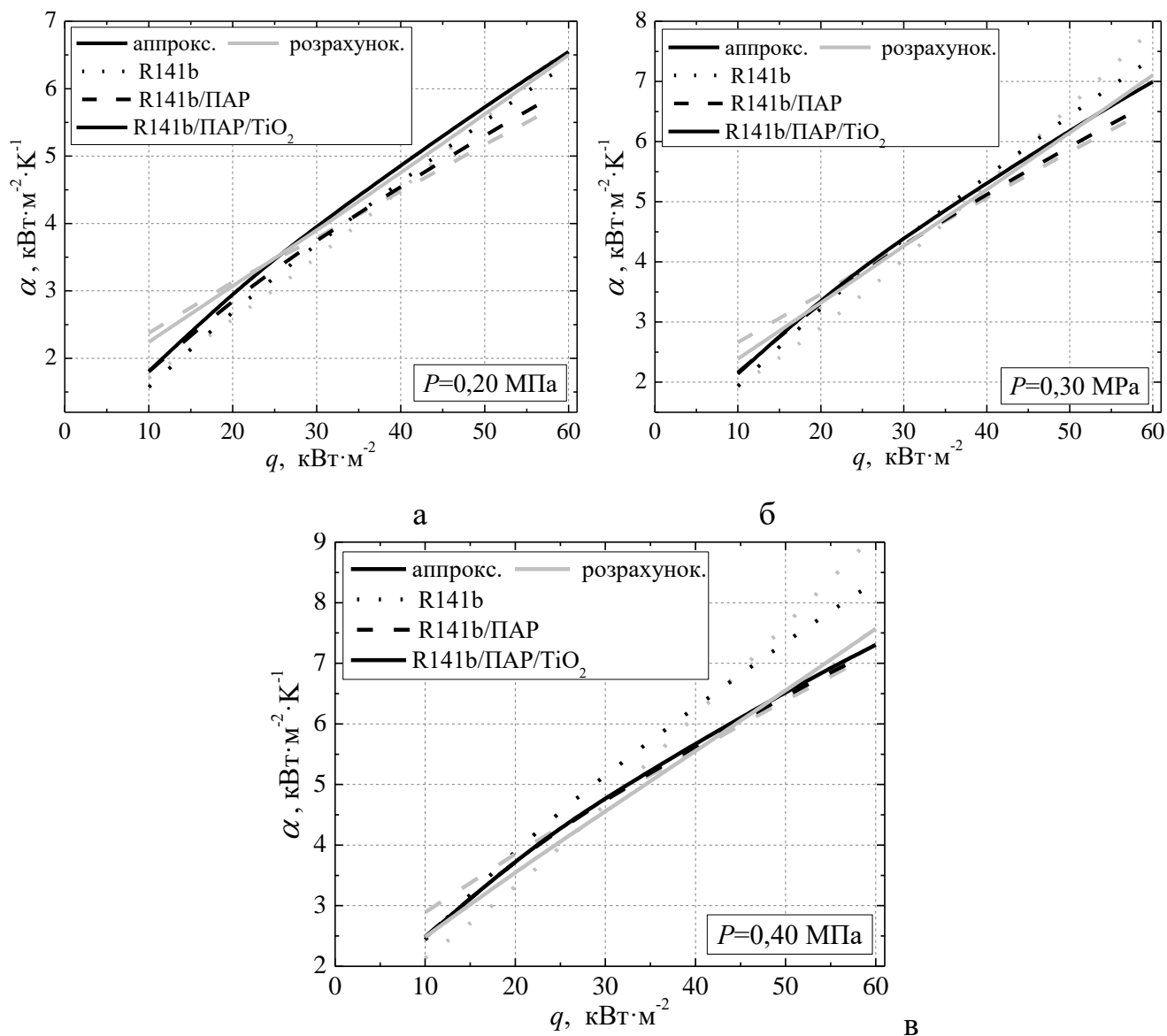


Рисунок 6.9 – Залежність експериментальних даних з коефіцієнтів тепловіддачі (апроксимованих рівнянням (6.1)) та розрахованих з використанням моделі RPI (рівн. (6.4)-(6.11)) з розрахунком величини n_b за рівнянням (6.14) для R141b, R141b/ПАР та R141b/ПАР/TiO₂: (а) 0.2·МПа, (б) 0.3·МПа, (в) 0.4·МПа

На рис. 6.10 (а) наведені відхилення розрахованих за рівняннями (6.4) -

(6.11), (6.13)-(6.14) значень коефіцієнтів тепловіддачі від експериментальних величин (рівн. (6.1)). На рис. 6.10 (б) також наведені відхилення розрахованих за цими ж рівняннями при постійному значенні коефіцієнта $C=1$.

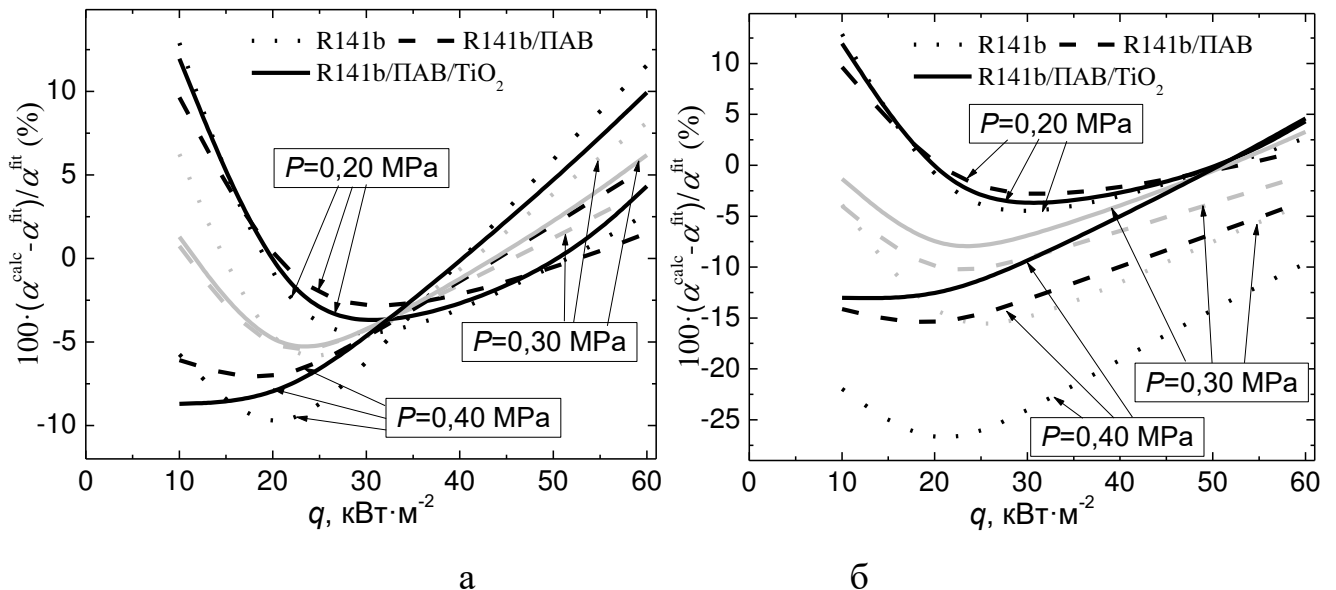


Рисунок 6.10 – Відносні відхилення розрахованих за рівняннями (6.4) - (6.11), (6.13)-(6.14) значень коефіцієнтів тепловіддачі від експериментальних значень (рівн. (6.1)): а – величина коефіцієнта C в рівн. (6.14) приймалася за табл. 6.2; б – $C=1$ для віх об'єктів дослідження

З рис. 6.8 і 6.9 (а) випливає, що запропонована модель розрахунку коефіцієнту тепловіддачі забезпечує якісне узгодження експериментальних і розрахункових даних. Разом з тим хорошого кількісного узгодження при низьких теплових потоках не спостерігається. Це пояснюється кількома причинами. Як відомо, при низьких теплових потоках великий внесок в коефіцієнт тепловіддачі при бульбашковому кипінні вносить конвекційна складова, а центри пароутворення працюють нестабільно. Крім того, в представленому дослідженні інформація про значення загального середнього відривного діаметра бульбашки і частоти відриву не була одержана при низьких значеннях теплових потоків і не можна було візуально простежити чи є розвинений режим кипіння при теплових потоках порядку 5-20 кВт. Ймовірно, відсутність розвиненого режиму кипіння можна пояснити не досить якісний опис величини n_b рівнянням виду $n_b = A \cdot q^B$ при низьких теплових потоках.

Таким чином, в рамках виконаного дослідження показано, що спрогнозувати вплив добавок наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні на підставі урахування тільки середнього відривного діаметру бульбашки і частоти їх відриву навряд чи представляється можливим. Для коректної оцінки коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїду необхідно також мати інформацію про кількість центрів пароутворення. Причому потрібно володіти інформацією зі зміни кількості центрів пароутворення не тільки з густиною теплового потоку, но й з тиском. Таким чином, без проведення додаткового дослідження залежності кількості центрів пароутворення від тиску не можливо виконати прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при кипінні на достатньому для практичного застосування рівні якості – рис. 6.10 (б). Для вузького інтервалу тисків можна орієнтовно приймати коефіцієнт C в рівнянні (6.14) величиною однаковою для всіх рідин. Слід констатувати необхідність подальшого вивчення впливу тиску на зміну кількості центрів пароутворення при кипінні як чистин рідин, так й нанофлюїдів.

На підставі виконаного аналізу запропонована модель прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні як чистих рідин, так і нанофлюїдів, яка оснований на використанні обмеженої експериментальної інформації з внутрішніх характеристик процесу кипіння (відривний діаметр, частота відриву бульбашок і кількості центрів пароутворення), отриманої при одному зручному для проведення експерименту тиску і двох або декількох значеннях теплового потоку для визначення відривного діаметру й частоти відриву бульбашок, та при двох значеннях теплового потоку та двох значеннях тиску для кількості центрів пароутворення – рис. 6.11.

Надалі, запропонована методика вимагає підтвердження з використанням експериментальної інформації з внутрішніх характеристиках процесу кипіння і коефіцієнтах тепловіддачі для різних об'єктів дослідження.

6.4 Висновки за розділом

1. За результатами виконаного експериментального дослідження показано, що домішки як ПАР Span-80 ($0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$), так і наночастинок TiO_2 ($0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$)

з ПАР Span-80 ($0,001 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$) у R141b призводять до збільшення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі при низьких значеннях густини теплового потоку (приблизно до $20 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$), а при збільшенні густини теплового потоку спостерігається зменшення коефіцієнту тепловіддачі. Найбільший ефект від добавок наночастинок TiO_2 і ПАР в зростання коефіцієнта тепловіддачі спостерігається при низькому тиску. Саме низькі значення тиску і низькі значення густини теплового потоку (до $20 \text{ кВт}\cdot\text{м}^{-2}$), характерні для випарників парокомпресійних холодильних машин і теплових насосів, тому при реальних параметрах роботи холодильного обладнання добавки як ПАР Span-80, так і наночастинок TiO_2 до холодоагенту можуть бути доцільними з метою збільшення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні.

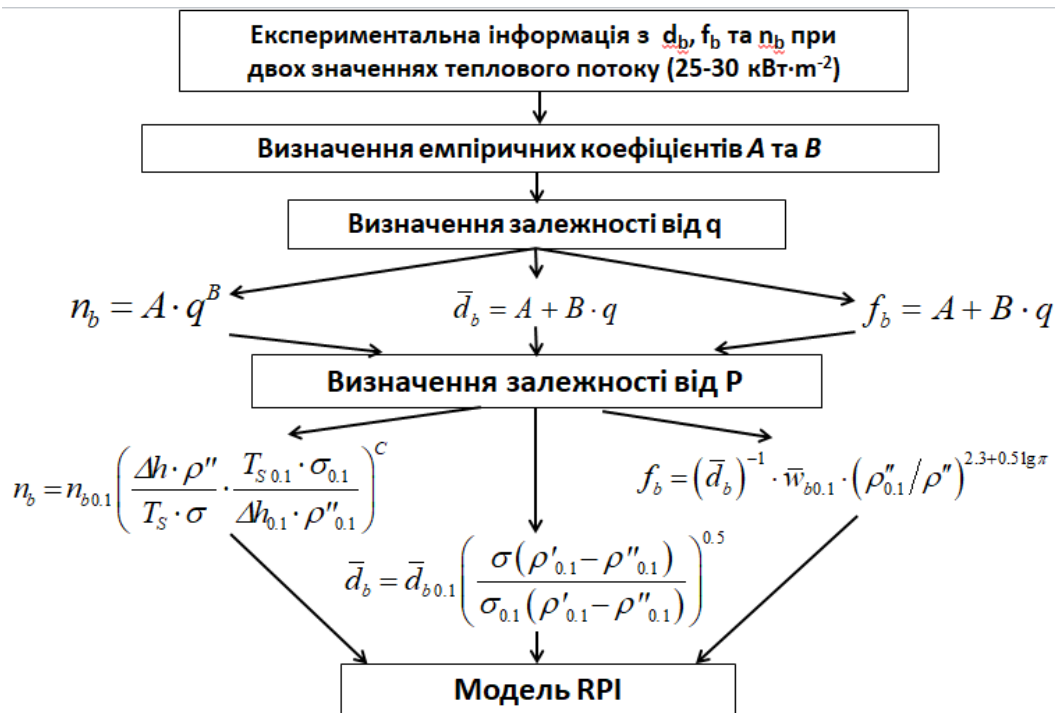


Рисунок 6.11 – Схема застосування моделі прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні рідин, що основана на використанні обмеженої експериментальної інформації з внутрішніх характеристики процесу кипіння

2. Виконаний експериментальний аналіз внутрішніх характеристик процесу кипіння показує, що середній відривний діаметр бульбашки незначно збільшується з ростом густини теплового потоку. Середня частота відриву бульбашок незначно зменшується з ростом густини теплового потоку. Середнє значення швидкості

росту парових бульбашок для розглянутих об'єктів дослідження в розглянутому інтервалі значень густини теплового потоку можна прийняти незалежним від густини теплового потоку.

3. Виконаний аналіз показує, що зміна теплофізичних властивостей R141b при введенні невеликих кількостей ПАР Span-80 і наночастинок TiO_2 не є фактором, який визначає величину коефіцієнта тепловіддачі при кипінні розглянутих об'єктів. Отриманий результат пояснюється великим впливом кількості активних центрів пароутворення на поверхні нагрівача на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні. Зміна коефіцієнта тепловіддачі при кипіння нанофлюїду може бути пояснена модифікацією поверхні нагрівача за рахунок осідання та адгезії на неї наночастинок.

4. Величина коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанофлюїду не піддається прогнозуванню з використанням традиційних полуміричних моделей. Оцінка впливу наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при кипіння нанофлюїду можлива з використанням фізично обґрунтованих моделей (mechanistic models), які засновані на урахуванні внутрішніх характеристик процесу кипіння. Аналіз отриманих у рамках модель Толубинського і модель RPI (в якості вхідної інформації використовувалися експериментальні значення середнього відривного діаметру й частоти відриву бульбашок та додатково для модель RPI розраховувалася кількість активних центрів пароутворення за емпіричною залежністю) значень коефіцієнтів тепловіддачі призводить до протилежних висновків про вплив добавок наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні нанофлюїду у порівнянні з кипінням базової рідини. Отже, без урахування зміни кількості активних центрів пароутворення не можна спрогнозувати вплив добавок наночастинок і ПАР в базову рідину на коефіцієнт тепловіддачі при їх кипінні.

5. З використанням отриманих експериментальних даних з коефіцієнтів тепловіддачі та внутрішніх характеристик процесу кипіння (величини \bar{d}_b та \bar{f}_b) в рамках моделі RPI була обчислена залежність кількості центрів пароутворення від густини теплового потоку та тиску. Було показано, що кількість центрів пароутворення при кипінні нанофлюїду помітно більше ніж при кипінні чистого холодоагенту і йо-

го розчину з ПАР. Отримані результати підтверджують висновок про те, що в процесі кипіння нанофлюїдів відбувається зміна стану поверхні нагріву, що визначає зміну інтенсивності процесу кипіння.

6. Запропоновано методику прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів, яка основана на використанні фізично обґрунтованої моделі RPI та внутрішніх характеристик процесу кипіння. Особливістю запропонованого у рамках моделі RPI підходу є можливість використання обмеженої експериментальної інформації з внутрішніх характеристик процесу кипіння об'єкта дослідження, яка отриманої при одному зручному для проведення експерименту тиску і двох значеннях теплового потоку для визначення відривного діаметру й частоти відриву бульбашок, та при двох значеннях теплового потоку та двох значеннях тиску для кількості центрів пароутворення.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [17, 22, 41 - 50].

6.5 Список використаних джерел за розділом

1. Pinto R. V., Fiorelli F. A. S. Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 108. – С. 720-739.
2. Rohsenow W. M., Cho Y. I. *Handbook of heat transfer* (Vol. 3). 1998. J. P. Hartnett (Ed.). New York: McGraw-Hill.
3. Dhir V. K. Mechanistic prediction of nucleate boiling heat transfer—achievable or a hopeless task? // *J. of Heat Transfer*. 2006. Vol. 128 (1). P. 1–12.
4. Collier J. G., Thome J. R. *Convective boiling and condensation*. Clarendon Press. 1994.
5. Tong L. S. *Boiling heat transfer and two-phase flow*. – Routledge. 2018.
6. Kandlikar S. G. *Handbook of phase change: boiling and condensation*. – Routledge. 2018.
7. Bergman T. L., Incropera F. P., Lavine A. S., DeWitt D. P. *Introduction to heat*

transfer. John Wiley & Sons. 2011.

8. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении Киев: Наукова думка, 1980. - 316 с.

9. Piro I., Rohsenow W., Doerffer S., Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2004a. Vol. 47 (23). P. 5033–5044.

10. Gerardi C., Buongiorno J., Hu L. W., McKrell T. Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video// *Int. J. Heat. Mass Transf.* 2010. Vol. 53 (19-20). P. 4185-4192.

11. Forster D. E., Greif R. Heat Transfer to a Boiling Liquid – Mechanism and Correlation // *ASME J. Heat Transfer*. 1959. Vol. 81. P. 43–53.

12. Mikic B. B., Rohsenow W. M. A new correlation of pool-boiling data including the effect of heating surface characteristics // *Journal of Heat Transfer*. 1969. Vol. 91(2). P. 245-250.

13. Judd R. L., Hwang K. S. A Comprehensive Model for Nucleate Boiling Heat Transfer, Including Microlayer Evaporation // *ASME J. Heat Transfer*. 1976. Vol. 98. P. 623–629.

14. Benjamin R. J., Balakrishnan A. R. Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes // *Int. J. Heat. Mass Transf.* 1996. Vol. 39 (12). P. 2495-2504.

15. Kolev N. I. How accurately can we predict nucleate boiling? // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 1995. Vol. 10. Iss. 3. P. 370-378.

16. Stephan K., Abdelsalam K. Heat transfer correlation for boiling // *Int. J. Heat. Mass Transf.* 1980. Vol. 23. P. 73–87.

17. Nikulin A., Khliyeva O., Lukianov N., Zhelezny V., Semenyuk Y. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/Al₂O₃ nanofluid // *Int. J. Heat. Mass Transf.* 2018. Vol. 118. P. 746-757.

18. Karimzadehkhoei M., Shojaeian M., Şendur K., Mengüç M. P., Koşar A. The effect of nanoparticle type and nanoparticle mass fraction on heat transfer enhancement in pool boiling // *Int. J. Heat. Mass Transf.* 2017. Vol. 109. P. 157-166.

19. Quan X., Wang D., Cheng P. An experimental investigation on wettability effects of nanoparticles in pool boiling of a nanofluid // *Int. J. Heat. Mass Transf.* 2017. Vol. 108. P. 32-40.
20. Sarafraz M. M., Hormozi F. Nucleate pool boiling heat transfer characteristics of dilute Al₂O₃–ethylene glycol nanofluids // *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2014. Vol. 58. P. 96-104.
21. Gerardi C., Buongiorno J., Hu L. W., McKrell T. Infrared thermometry study of nanofluid pool boiling phenomena // *Nanoscale research letters.* 2011. Vol. 6(1). P. 232.
22. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V., Nikulin A. An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process // *Eastern European journal of enterprise technologies.* 2018. Vol. 4/8 (94). P. 59-66.
23. Naphon P., Thongjirakul C. Pool boiling heat transfer characteristics of refrigerant-nanoparticle mixtures // *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 2014. Vol. 52. P. 84-89.
24. Perkins A. S., Westwater J. W. Measurements of bubbles formed in boiling methanol // *AIChE Journal.* 1956. Vol. 2(4). P. 471-476.
25. Zuber N. Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 1963. Vol. 6(1). P. 53-78.
26. Malenkov I. G. Detachment frequency as a function of size for vapor bubbles // *Journal of engineering physics.* 1971. Vol. 20. Issue 6. P. 704-708.
27. Kutateladze S., Gogonin I. Growth rate and detachment diameter of a vapor bubble in free convection boiling of saturated liquids // *High Temp.* 1979. Vol. 17 (4). P. 792–797.
28. Peng H., Ding G., Hu H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2011. Vol. 35. Issue 6. P. 960-970.
29. Cheng L., Mewes D., Luke A. Boiling phenomena with surfactants and

polymeric additives: a state-of-the-art review // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50(13-14). P. 2744-2771.

30. REFPROP: Reference fluid thermodynamic and transport properties, NIST standard reference database 23, Version 8.0 / E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden. - Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology, 2007.

30. Гоголин А.А., Данилова Г.Н, Азарсков, В. М., Медникова Н. М. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин. – М: Легкая и пищевая промышленность. 1982. 224 с.

31. Данилова Г.Н., Богданов С.Н., Иванов О.П. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок Под ред. д. т.н. Даниловой Г.Н. Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.

32. Быков А.В. Теплообменные аппараты, приборы автоматизации и испытания холодильных машин. Справочник Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1984. 248 с.

33. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V. Experimental study of the effect of nanoparticles TiO₂ on the thermophysical properties of the refrigerant R141b// *Eastern European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 6/5 (96). P. 33-41.

34. Ciloglu D., Bolukbasi A. A comprehensive review on pool boiling of nanofluids // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 84. P. 45–63.

35. Han C.Y., Griffith P. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1965. Vol. 8. P. 887–914.

36. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача Изд. 4-е. - М.: "Энергоиздат", 1981. - 415 с.

37. Kiyomura I.S., Manetti L.L., Da Cunha A.P., Ribatski G., Cardoso E.M. An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and ON pool boiling of water // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 106. P. 666-674.

38. Liang G., Mudawar I., Review of pool boiling enhancement with additives and nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018.Vol.124. P.423-

453.

39. Liang G., Mudawa I, Review of pool boiling enhancement by surface modification // *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019. Vol.128. P.892-933.

40. Vafaei S. Nanofluid pool boiling heat transfer phenomenon // *Powder Technol.* 2015. Vol. 277. P. 181–192.

41. Nikulin A., Khliyeva O., Zhelezny V., Semenyuk Yu., Lukianov N., Moreira A.L.N. How does change of the bulk concentration affect the pool boiling of the refrigerant oil solutions and their mixtures with surfactant and nanoparticles? // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019 Vol. 137. P. 868-875.

42. Лук'янова Т. В., Хлієва О. Я., Семенюк Ю. В., Железний В. П., Корнієвич С. Г., Альтман Е. І. Експериментальне дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанохолодоагенту R141b/наночастинки TiO_2 на поверхнях з різним ступеням змочування // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(3). С. 47-54.

43. Хлієва О.Я., Гордейчук Т.В., Никулин А.Г., Лукьянов Н.Н., Железний В.П. Экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц TiO_2 на процесс кипения хладагента R141b в свободном объеме // *Промышленная теплотехника*, №5 (39), 2017. С. 37-40.

44. Лукьянов Н.Н., Мельник А.В., Железний В.П., Хлієва О.Я., Мороз А.С. Влияние примесей компрессорного масла /наночастиц TiO_2 в хладагенте на коэффициент теплоотдачи при кипении в горизонтальной трубе // *Холодильная техника и технология*. 2015. № 5 (51). С. 59-66.

45. Хлієва О.Я., Поберезкін О.А., Крижановський С.С., Оболонський Е.С. Вивчення впливу домішок компрессорного мастила в холодоагенті на інтенсивність тепловіддачі за умов кипіння у великому об'ємі // *Обладнання та технології харчових виробництв: тематичний збірник наукових праць*. – Донецьк: ДонДУЕТ, випуск 21, 2009. С. 34-40.

46. Khliyeva O., Nikulin A., Zhelezny V., Lukianov N., Semenyuk Y., Moreira A.L.N. Prediction of pool boiling heat transfer coefficient for the refrigerant R141b and its solutions with surfactant and nanoparticles using limited set of experimental data // 1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019) 2nd European Symposium on

Nanofluids (ESNf2019) 26-28 June 2019, Castelló, Spain.

47. Khliyeva O.Ya., Gordeychuk T.V., Semenyuk Yu.V., Zhelezny V.P., Lukianov N.N., Nikulin A.G. The effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the heat transfer at the pool boiling on the different heat surfaces // Proc. X Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 10-13 September, 2018. P. 435- 443.

48. Khliyeva O., Nikulin A., Gordeychuk T., Lukianov N., Semenyuk Y. An experimental study of heat transfer coefficient and internal characteristics of nucleate pool boiling of nanofluid R141b/TiO₂ //1st European Symposium on Nanofluids (ESNf2017), 8-10 October 2017, Lisboa, Portugal. P. 162-165.

49. Lukianov M., Melnyk A., Khliyeva O., Zhelezny V., Polyuganich M. An influence of the nanoparticles Al₂O₃ and TiO₂ admixtures on thermophysical properties and flow boiling heat transfer coefficient of the R600a/mineral oil solutions // Proc. of the 8th International Symposium On Turbulence, Heat and Mass Transfer. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 15-18 September, 2015. P. 697 - 700.

50. Семенюк Ю.В., Никулин А.Г., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л. Применение модели RPI для прогнозирования коэффициента теплоотдачи при кипении чистых жидкостей и нанофлюидов // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 281-285.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОМІШОК НАНОЧАСТИНОК У РОБОЧІ ТІЛА КОМПРЕСОРНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН НА ЇХ ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

У даному розділі наводяться експериментальні данні з параметрів енергетичної ефективності роботи парокомпресійної холодильної машини на базі компресора побутового холодильного приладу з використанням в якості холодоагента R600a та різних компресорних мастил з домішками наночастинок оксидів металів та фулеренів. Наводиться аналіз отриманих результатів та факторів, з якими пов'язані зміни показників енергетичної ефективності холодильної машини.

7.1 Аналіз досліджень впливу домішок наночастинок у робочі тіла компресорних холодильних машин на їх показники енергетичної ефективності

Одним з перспективних напрямків підвищення енергетичної ефективності парокомпресійного холодильного обладнання є застосування так званих нанохолодоагентів - робочих тіл, що складаються з розчинів холодоагенту з компресорним маслом, в яке додано певну кількість наночастинок.

З аналізу опублікованих експериментальних робіт [1 – 24] можна зробити висновок, що застосування наночастинок в якості домішок до компресорного масла переважно приводить до підвищення показників енергетичної ефективності парокомпресійного холодильного обладнання.

Найбільші ефекти показані в роботах [7, 10, 15, 16]. Автори роботи [10] проводили порівняння параметрів ефективності холодильної машини (холодоагент R12) з мінеральним маслом з домішками наночастинок TiO_2 та без них. Показано, що при об'ємній концентрації наночастинок 0,01 об. % в компресорному маслі холодильний коефіцієнт збільшувався на 17 %. У роботі [15] автори аналізували застосування наномасла (мінерального компресорного масла с домішками 0,2 мас. % наночастинок TiO_2) у холодильній машині з герметичним компресором при різних температурах кипіння. В проведених експериментах спостерігалось

збільшення усередненого по температурі кипіння значення холодильного коефіцієнта на 16,08 %. В роботі [7] проводилось порівняння енергетичних параметрів холодильної машини на робочих тілах R134a/поліефірне масло, R134a/мінеральне масло та R134a/мінеральне масло/ Al_2O_3 з концентрацією 0,06 мас. % й показано збільшення холодильного коефіцієнта на 33% при заміні поліефірного масла на мінеральне наномасло. Аналогічні результати по збільшенню холодильного коефіцієнта для холодильної машини при заміні поліефірного масла на мінеральне з наночастинками TiO_2 при роботі на трьох холодоагентах (R134a, R436A, R436B) були наведені в [16]. В залежності від холодоагенту, концентрації наночастинок автори показали максимальне збільшення холодильного коефіцієнта майже на 30 %.

Однак слід зауважити, що позитивний ефект в більшості інших досліджень [1-6, 8, 9, 11-14, 17-25] значно менше, а іноді лежить в межах невизначеності виконаних експериментів. Крім того, отримані в [7, 16] результати не є об'єктивними, тому що порівняння проводилося з використанням різних компресорних мастил.

В розглянутих роботах [1 – 25] достатньо абстрактне пояснюються причини отриманих ефектів збільшення холодильного коефіцієнта. Найчастіше згадуються наступні механізми збільшення енергоефективності парокомпресійних холодильних машин (які, наприклад, узагальнено в [26]):

- інтенсифікація тепловіддачі в холодильних установках, перш за все при кипінні у випарниках;
- збільшенню розчинності холодоагентів з компресорними мастилами які містять домішки наночастинок, що сприяє покращенню винесення масла з випарника та, як наслідок, інтенсифікації тепловіддачі;
- компресорне масло з домішками наночастинок має кращі трибологічні характеристики з точки зору зниження втрат енергії на тертя та ступеня зношування у порівнянні з базовим мастилом.

На сьогодні немає жодної роботи, те було б експериментально досліджено хоча б один з заявлених механізмів та ці дослідження були б порівняні з результа-

тами експериментального дослідження енергетичних параметрів роботи парокompресійної холодильної машини.

В даний час є досить великий обсяг експериментальних досліджень, присвячених вивченню теплофізичних властивостей робочих тіл парокompресійних холодильних машин (розчинів холодоагенту з маслом - РХМ) з домішками наночастинок [2, 3, 27]. У цих статтях відзначаються позитивні (з точки зору вимог холодильної техніки) зміни їх теплофізичних властивостей у порівнянні з властивостями базових рідин: збільшення теплопровідності, тиску насичених парів, зменшення поверхневого натягу. Однак присутність наночастинок завжди призводить до збільшення в'язкості базової рідини [2, 3, 27]. Зазначені зміни теплофізичних властивостей РХМ, які пов'язані з наявністю домішок наночастинок в компресорному маслі, визначають зміну показників енергетичної ефективності компресійної холодильної машини, але важко кількісно спрогнозувати які зміни (позитивні або негативні) будуть превалювати. Крім того, добавки наночастинок до компресорних мастил, безсумнівно, ведуть до зміни втрат енергії на тертя в компресорі [3, 13, 14, 28, 29]. Оскільки показники енергетичної ефективності компресорної холодильної машини залежать від великої кількості чинників, виконати прогнозу оцінку зміни холодильного коефіцієнта при наявності наночастинок в робочому тілі холодильної машини, навіть з урахуванням даних про теплофізичні властивості РХМ з домішками наночастинок, неможливо.

Але, наприклад, в [30, 31] виконано дослідження теплофізичних властивостей нанохолодоагентів та на основі отриманих даних отримані кількісні висновки з доцільності застосування нанофлюїдів в якості робочих тіл. Але при триманні цих висновків не враховувалися інші можливі механізми та це висновки не були підтверджені експериментальними дослідження параметрів роботи холодильної машини.

Слід відзначити, що оцінка впливу домішок наночастинок в компресорному маслі різної в'язкості на показники ефективності холодильної машини залишається поза рамками проведених досліджень. Так, на думку автора, результати робіт [7, 16] слід було б доповнити дослідженням роботи холодильної машини з базо-

вим компресорним маслом (до якого додавалися наночастинки).

Слід зазначити, що вибір наночастинок для створення перспективних для застосування в холодильній техніці робочих тіл досить обмежений - це переважно оксиди металів і деякі вуглецеві наноструктури. З огляду наведених вище робіт можна зробити висновок, що в більшості досліджень в якості домішок до робочих тіл використовуються наночастинок оксидів металів. Разом з тим вплив домішок фулеренів C_{60} в робочому тілі парокompресійної холодильної машини на показники її енергетичної ефективності розглядається лише в одній роботі [12]. Автори цієї роботи констатують збільшення холодильного коефіцієнта побутового холодильника на 5,3-5,6 % при використанні компресорного масла з концентрацією в ньому фулеренів C_{60} $0,003 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Є так само роботи, присвячені оцінці ефективності холодильної машини при добавці до робочого тіла наночасток $\text{MoFe}_2\text{O}_4\text{-NiFe}_2\text{O}_4$ /фулерени [13, 14]. Показано збільшення холодильного коефіцієнту при використанні в якості робочого тіла системи R600a/компресорне масло/ $\text{MoFe}_2\text{O}_4\text{-NiFe}_2\text{O}_4$ /фулерени на 5,33 % у порівнянні з традиційним робочим тілом. Слід зазначити, що недоліком технологій приготування компресорного масла у роботах [13, 14] є застосування ПАР. Наявність ПАР в складі наномасла може впливати на теплофізичні властивості робочого тіла, коефіцієнт тертя в деталях компресора і інтенсивність теплообміну при кипінні РХМ у випарник.

З урахуванням викладених вище аспектів застосування нанофлюїдів в холодильному обладнанні, метою представленого розділу була експериментальна оцінка показників енергетичної ефективності парокompресійної холодильної машини при роботі на робочому тілі, яке знайшло найбільше поширення для використання в побутовій холодильній техніці - R600a/мінеральне масло, та порівняння цих показників при використанні у якості робочого тіла розчину R600a / мінеральне масло з домішками наночастинок TiO_2 та Al_2O_3 , а також фулеренів C_{60} .

Вибір наночастинок TiO_2 та Al_2O_3 в якості присадок до компресорного масла був обґрунтований наступними факторами:

- технології промислового виробництва наночастинок TiO_2 та Al_2O_3 добре розроблені, наночастинки відрізняються низькою вартістю;

- наявні в літературі експериментальні дослідження показали доцільність застосування наночастинок для підвищення холодильного коефіцієнта парокомпресійного холодильного обладнання.

Вибір фулеренів в якості присадки до компресорного масла був обґрунтований наступними факторами:

- можливістю створення колоїдно стійкої системи мінеральне масло/фулерени C_{60} без використання ПАР [28, 29, 32];

- зниженням втрат енергії на тертя в деталях компресора при використанні мастил з домішками фулеренів C_{60} [28, 29];

- незначним (на відміну від наночастинок оксидів металів) впливом добавок C_{60} на в'язкість масла при підвищених температур [28, 29, 33-35] (деякі дослідники зафіксували зниження в'язкості при введенні в масло фулеренів).

Як було відзначено, присутність фулеренів у компресорному маслі може призводити до зниження втрат енергії на тертя у компресорі. Але того ж ефекту можна добитися підбором комерційного масла з оптимальною в'язкістю (відповідно до параметрів роботи холодильної машини) та розчинністю у холодоагенті. Так, у роботі [36] показано, що при рівних параметрах роботи холодильної машини з холодоагентом R290 (пропан) використання менш в'язкого поліетерного компресорного мастила забезпечувало більш високе значення холодильного коефіцієнту, ніж використання мінерального компресорного масла з більшою в'язкістю. Крім того, інтересними результатами є дослідження, які наведені у [28]. В цій роботі показано, що для мастила з більш низькою в'язкістю покращення протизношувальних характеристик та зниження коефіцієнту тертя між деталями, яке пов'язане з присутністю у маслі фулеренів, вище, ніж для в'язкого масла. Добре відомо [37], що використання малов'язких мастил призводить до зниження втрат енергії на тертя, але кращі протизношувальні властивості забезпечують більш в'язкі мастила. Тому доцільним є розгляд можливостей покращення протизношувальних властивостей менш в'язких мастил за рахунок додавання до них фулеренів.

Тому додатково у наведеному дослідженні була виконана експериментальна

оцінка холодильного коефіцієнта при роботі парокомпресійної холодильної машини з застосуванням двох компресорних мінеральних мастил, які характеризуються різною величиною в'язкості.

7.2 Результати експериментальних досліджень впливу домішок наночастинок TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} у компресорні масла на показники енергетичної ефективності холодильної машини

В підрозділі наводяться результати експериментальних досліджень впливу домішок наночастинок TiO_2 , Al_2O_3 та фулеренів C_{60} у компресорні масла різної в'язкості на холодопродуктивність, потужність, що споживається компресором, та холодильний коефіцієнт холодильної машини з компресором побутового холодильного приладу.

7.2.1 Об'єкти дослідження та параметри проведення експерименту

Об'єктами дослідження являлись наступні робочі тіла:

- РХМ1 – розчин холодоагенту R600a у компресорному мінеральному маслі № 1 (в'язкість $8,0 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$);
- РХМ2 - розчин холодоагенту R600a у компресорному мінеральному маслі № 2 (в'язкість $19,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$);
- РХМ1+ TiO_2 – РХМ1 з домішками наночастинок TiO_2 $0,0048 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорному маслі №1;
- РХМ1+ TiO_2 – РХМ1 з домішками наночастинок TiO_2 $0,010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорне масло №1;
- РХМ1+ Al_2O_3 – РХМ1 з домішками наночастинок Al_2O_3 $0,0008 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорному маслі №1;
- РХМ1+ Al_2O_3 – РХМ1 з домішками наночастинок Al_2O_3 $0,0052 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорному маслі №1;
- РХМ2+ C_{60} – РХМ2 з домішками фулеренів $0,0050 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорному маслі №2.

Для приготування об'єктів дослідження використовувалися два комерційних мінеральних масла, рекомендованих поставниками для застосування в холодильному обладнанні з холодоагентом R600a: масло №1 з в'язкістю $8,0 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ й масло №2 з в'язкістю $19,5 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (інформацію з фізико-хімічних характеристик мастил наведено у таблиці Б.3 додатку Б); фулерени C_{60} (Sigma Aldrich, CAS №99685-96-8, чистота $0,999 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$); наночастинки TiO_2 (Sigma Aldrich, CAS №1317-70-0, розмір частинок не більш ніж 25 нм); наночастинки Al_2O_3 (Sigma Aldrich, CAS №1344-28-1, розмір частинок не більш ніж 50 нм); холодоагент - ізобутан R600a (CAS № 75-28-5) чистотою $0,998 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$. Питання створення та дослідження колоїдної стабільності об'єктів дослідження наведено у розділі 2.

Для заправки в парокompресійну холодильну машину готувалось масло з певною концентрацією наночастинок або фулеренів. Отримане масло заправлялось в картер компресора. Після вакуумування система заправлялася необхідною кількістю холодоагента R600a.

З метою вивчення доцільності використання робочих тіл на основі компресорних мастил з домішками наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 , а також фулеренів C_{60} , або мастил з різною в'язкістю у холодильному обладнанні проведена серія експериментів по визначенню холодопродуктивності і споживаної потужності холодильною машиною. Схема експериментальної установки та принцип проведення експериментального дослідження наведені у розділі 3.

Параметри проведення експериментальних досліджень наведено в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 - Параметри проведення експериментальних досліджень енергетичних характеристик парокompресійної холодильної машини

Робочі тіла	Витрати робочого тіла, $\text{г}\cdot\text{с}^{-1}$	Температура кипіння, К	Температура конденсації, К	Перегрів в випарнику (відносно температури насичення R600a) ΔT , К
РХМ1	0,23 – 0,43	$255,6 \pm 2,70$	$301,15 \pm 2,65$	3,0
РХМ2	0,202 – 0,404	$255,35 \pm 0,45$	$300,85 \pm 0,15$	3,0

7.2.2 Результати експериментального дослідження параметрів роботи холодильної машини при використанні компресорного масла з домішками фулеренів C_{60}

Після заправки холодоагентом холодильної машини брутто концентрація компонентів в розчині холодоагент/ масло/фулерени складала:

- концентрація масла $w_{Oil} = 0,7053 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$,
- концентрація холодоагенту $w_R = 0,2911 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$,
- концентрація фулеренів $w_{C60} = 0,0036 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Результати експериментальних значень холодопродуктивності і споживаної компресором потужності при різних витратах розглянутих в даному дослідженні робочих тіл наведені на рисунках 7.1 та 7.2.

Аналіз інформації наведеної на рисунку 7.1 показує, що спостережуване зменшення споживання енергії компресором при роботі з робочим тілом з домішками фулеренів склало в середньому 5%. Разом з тим видно суттєву різницю в споживання енергії компресором залежно від в'язкості використовуваного компресорного масла. При збільшенні в'язкості компресорного масла (з $8,0 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ до $19,5$ при 40°C) витрати енергії збільшилися на 9-18 %.

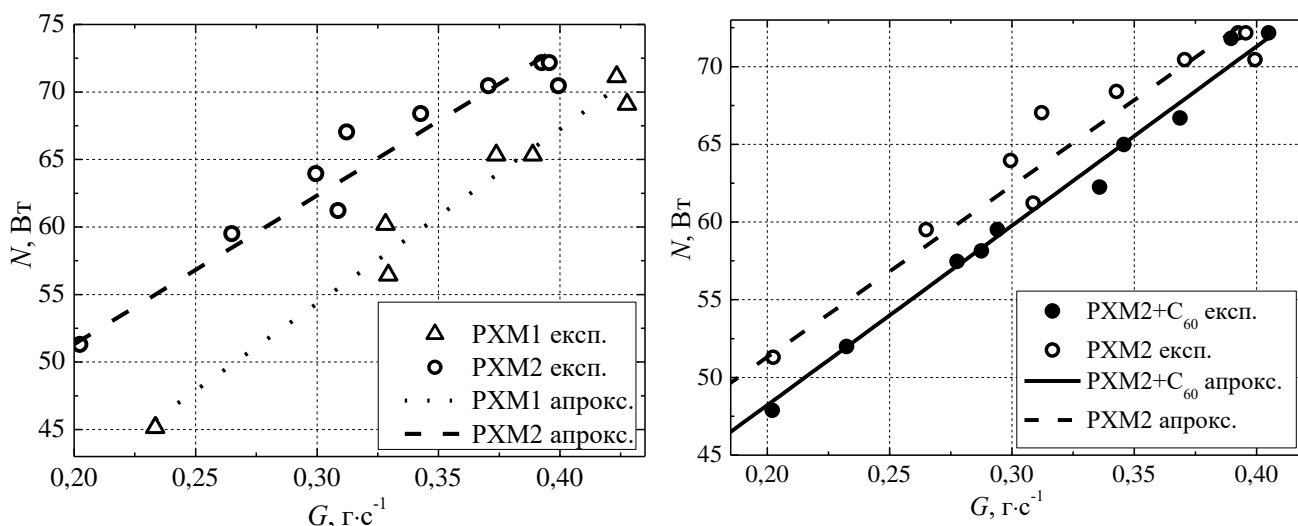


Рисунок 7.1 - Залежність споживаної компресором потужності від витрати робочого тіла в контурі холодильної машини

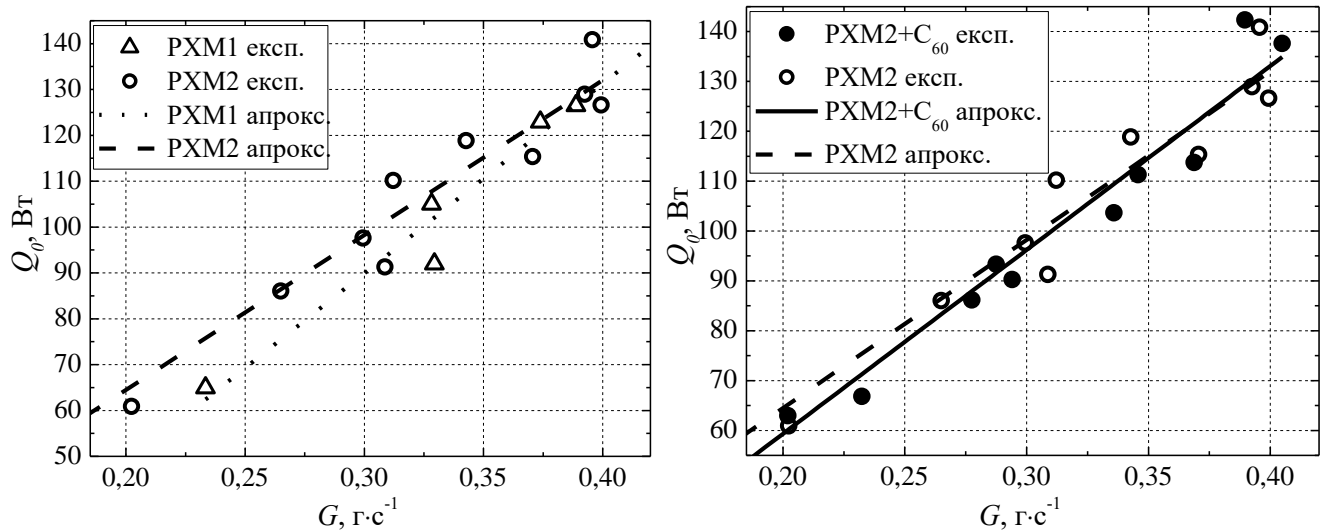


Рисунок 7.2 - Залежність холодопродуктивності від витрати робочого тіла в кон-
турі холодильної компресорної машини

З інформації, наведеної на рисунку 7.2 можна сформулювати два висновки. По-перше, в проведених дослідженнях не зафіксовано істотної зміни холодопродуктивності при додавці фулеренів до РХМ2. По-друге, застосування більш в'язких компресорних мастил при мінімальних витратах робочого тіла (отже, великій величині унесення мастила з компресора [38]) сприяє збільшенню холодопродуктивності парокомпресійної холодильної машини, що напевно пов'язано зі збільшенням коефіцієнта подачі. Зі збільшенням витрати робочого тіла ефект від присутності фулеренів в робочому тілі зменшується.

Відсутність впливу домішок фулеренів на холодопродуктивність холодильної машини може бути пояснена низькою концентрацією фулеренів в робочому тілі і, як наслідок, несуттєвим впливом на зміну теплофізичних властивостей РХМ. Фулерени (як і інші наночастинки) уносяться з компресора з дрібними краплями компресорного масла. Результати відбору проб РХМ перед дросельним пристроєм при різних значеннях масової витрати робочого тіла та параметрах експерименту (таблиця 7.1) були використані для визначення концентрації масла та фулеренів в РХМ [39] - рис. 7.3. Ця інформація була використана для розрахунку масової концентрації компресорного масла та фулеренів в різних частинах холодильної компресорної системи – рис. 7.4.

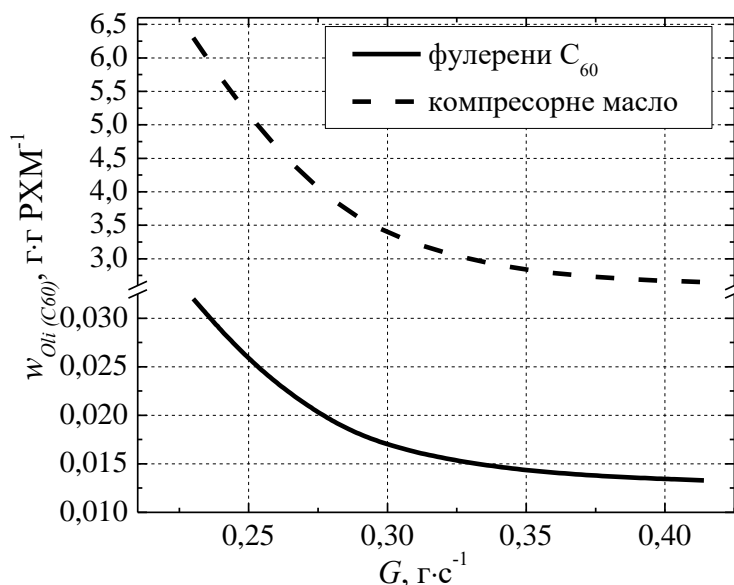


Рисунок 7.3 - Залежність масової концентрації компресорного масла ($v_{40}=19,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$) w_{Oil} та фулеренів w_{C60} від витрати робочого тіла в контурі холодильної компресорної системи

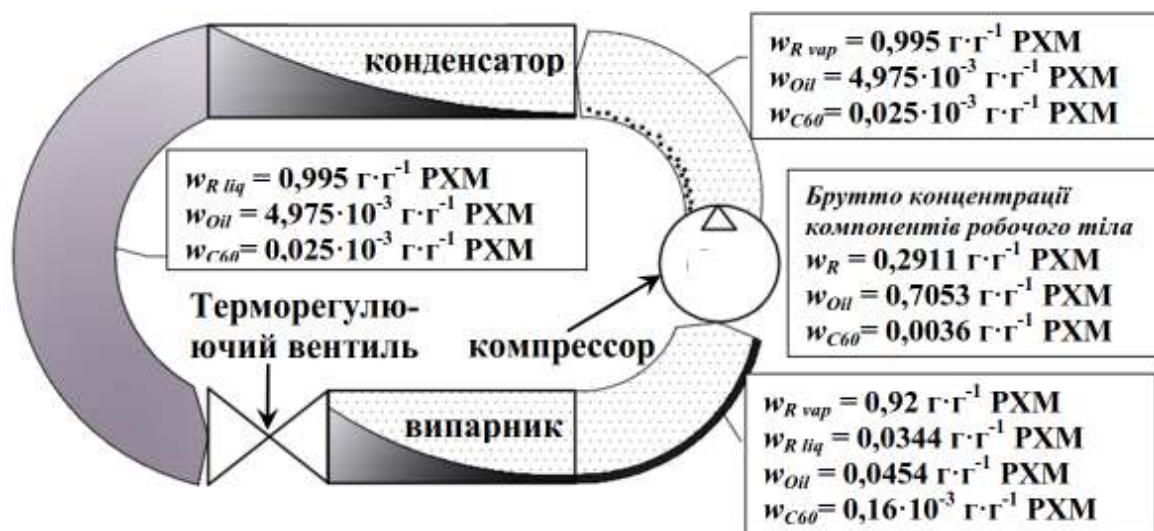


Рисунок 7.4 - Схема циркуляції робочого тіла R600a / компресорне масло ($v_{40}=19,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$) / наночастинки по контуру холодильної компресорної системи при витраті робочого тіла $0,252 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$.

Як видно з інформації на рис. 7.4, фулерени циркулюють по контуру холодильної компресорної системи разом рідкою фазою робочого тіла. З компресора фулерени потрапляють в конденсатор з краплями масла, так як невелика кількість домішок масла завжди циркулює по контуру. Проведені дослідження (рис. 7.3) показують, що концентрації масла і фулеренів в робочому тілі холодильної комп-

ресорної системи на базі компресора СКН-150 фірми Atlant незначні і залежать від масової витрати робочого тіла. Таким чином, виконане дослідження показує, що домішки фулеренів в робочому тілі в випарнику мають низьку концентрацію - $0,025 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{г}^{-1}$ РХМ і тому практично не впливають на значення холодопродуктивності. Навпаки, присутність фулеренів в компресорі в концентрації $0,0036 \text{ г} \cdot \text{г}^{-1}$ РХМ призводить до зменшення втрати енергії на тертя в деталях компресора.

7.2.3 Результати експериментального дослідження параметрів роботи холодильної машини при використанні компресорного масла з домішками наночастинок Al_2O_3 та TiO_2

Для того, щоб сформулювати більш об'єктивні висновки з перспектив застосування добавок наночастинок у робочі тіла РХМ був виконаний аналіз впливу наночастинок оксидів металів (як найбільш досліджених різними авторами присадок до компресорних мастил) на показники енергетичної ефективності холодильної машини. Щоб уникнути впливу різноманітних шумових ефектів вимірювання енергетичних параметрів роботи пароконпресійної холодильної машини при роботі на РХМ з домішками наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 виконувалося на тій же експериментальній установці, що й експериментальні дослідження, наведені у підрозділі 7.2.2. Робота з експериментальної оцінки параметрів енергетичної ефективності компресорної холодильної системи була виконана спільно з аспірантом М.М. Лукьяновим та опублікована у [11, 39, 40].

Результати отриманих у експерименті значень холодопродуктивності і споживаної компресором потужності при різних витратах розглянутих в даному дослідженні робочих тіл наведені на рисунках 7.5 та 7.6.

Аналізуючи наведену на рис. 7.5 та 7.6 інформацію, можна зробити висновок про те, що домішки наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 в робочому тілі позитивно впливають на енергетичну ефективність холодильної компресорної системи. Збільшення холодопродуктивності при використанні робочого тіла з домішками наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 насамперед пов'язано зі збільшенням тиску насичених парів в картері компресора. Цей ефект призводить до збільшення густини насиче-

ної пари холодоагенту, та, як наслідок, до збільшення масової витрати робочого тіла. Крім того, присутність наночастинок у робочому тілі сприяє інтенсифікації процесу кипіння у випарнику (як було показано в розділі 6), що також може сприяти збільшенню холодопродуктивності.

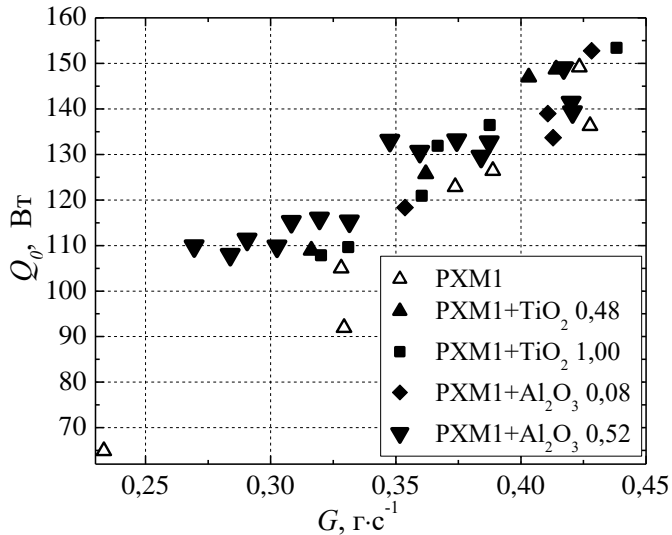


Рисунок 7.5 - Залежність споживаної компресором потужності від витрати робочого тіла в контурі холодильної компресорної системи

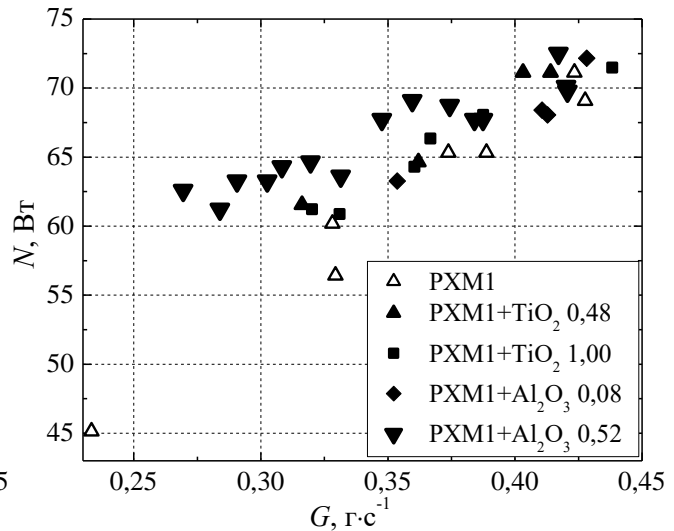


Рисунок 7.6 - Залежність холодопродуктивності від витрати робочого тіла в контурі холодильної компресорної системи

Збільшення витрат енергії, яка споживається компресором, може бути пояснено декількома факторами. По-перше, збільшенням масової витрати робочого тіла. По-друге, збільшенням в'язкості РХМ в картері компресора, що призводить до зростання витрат енергії на подолання сил тертя між деталями компресора.

Крім того, додатково в зміну споживаної потужності та холодопродуктивності можуть вносити свій вклад такий фактор (який не був експериментально вивчений в дисертації), як: вплив добавок наночастинок на розчинність холодоагенту в маслі. Цей фактор визначає зміну виносу мастила з випарника та, як наслідок, зміну інтенсивності тепловіддачі при кипінні РХМ у випарнику.

7.2.4 Аналіз експериментальних значень холодильного коефіцієнту та можливих механізмів впливу домішок наночастинок у компресорному маслі на його величину

Остаточний висновок про доцільність застосування РХМ з домішками наночастинок Al_2O_3 й TiO_2 та фулеренів C_{60} в парокompресійних холодильних машинах можна сформулювати, виконавши аналіз холодильного коефіцієнта, отриманого з використанням експериментальних даних з Q та N при роботі розглянутої холодильної компресорної системи на різних робочих тілах - об'єктах дослідження (див. рис. 7.7).

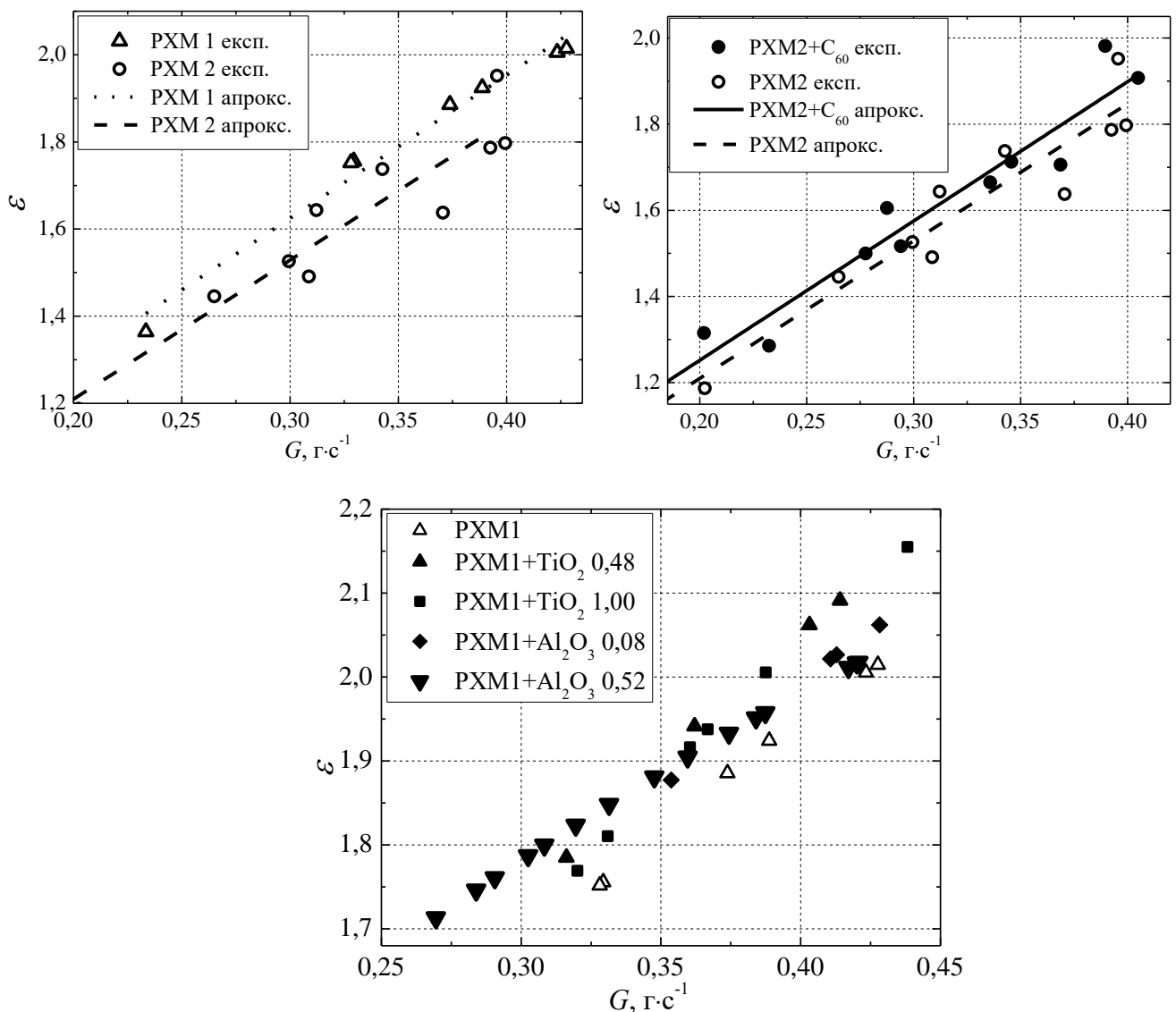


Рисунок 7.8 – Залежність холодильного коефіцієнту від витрати робочого тіла в контурі холодильної компресорної системи

Для зручності аналізу доцільності використання у парокompресійному холодильному обладнанні РХМ з домішками наночастинок Al_2O_3 й TiO_2 та фулеренів C_{60} отримані значення холодильного коефіцієнту ε були апроксимовані в залежності від масової витрати (в інтервалі експериментальних значень масових витрат РХМ) рівнянням виду

$$\varepsilon = a + b \cdot G + c \cdot G^2, \quad (7.1)$$

де G – масова витрата РХМ, $\text{г} \cdot \text{с}^{-1}$; a , b та c – апроксимаційні коефіцієнти.

За отриманим апроксимаційним рівнянням для холодильного коефіцієнту ε для всіх розглянутих об'єктів дослідження були розраховані значення відносного холодильного коефіцієнту: відношення холодильного коефіцієнту холодильної компресорної системи при роботі на РХМ без додавання наночастинок або фулеренів до відповідного холодильного коефіцієнта при роботі системи на РХМ з домішками наночастинок або фулеренів. Отримані значення відносного холодильного коефіцієнту наведено на рис. 7.8.

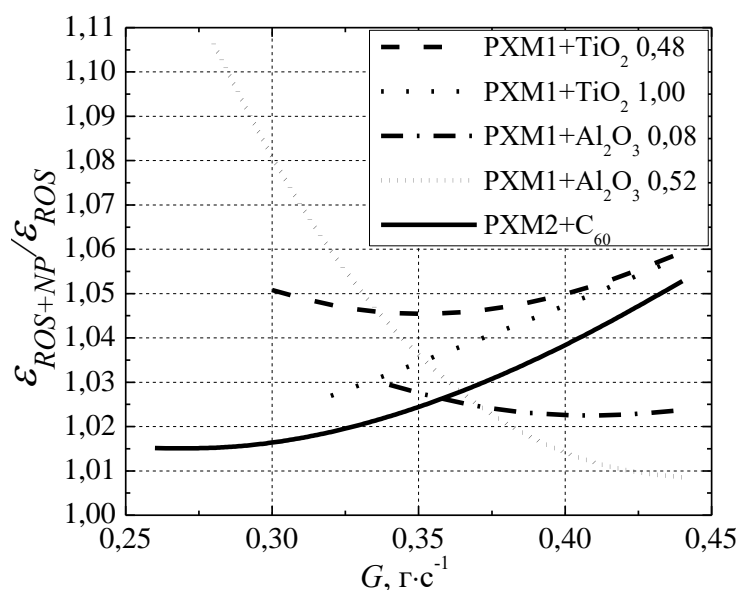


Рисунок 7.8 – Залежність відносного холодильного коефіцієнта для різних об'єктів дослідження від витрати робочого тіла

Як видно з наведених на рис. 7.7 результатів, холодильний коефіцієнт холодильної компресорної системи при добавці в компресорне масло фулеренів в кількості всього $0,005 \text{ г} \cdot \text{г}^{-1}$ збільшується приблизно на 4 % у всьому інтервалі витра-

тах робочого тіла. Застосування менш в'язкого масла в складі РХМ1 сприяє підвищенню холодильного коефіцієнта на 5-7 %, в порівнянні з використанням більш в'язкого масла в складі РХМ2. Отримані результати вказують, що підвищення ефективності холодильної компресорної системи може бути пов'язано зі зниженням втрат енергії на тертя в рухомих деталях компресора та покращенням унесення мастила з випарника в компресор. Так, в дослідженнях [41] показано, що використання фулеренів якості присадки до змащувальних мастил за рахунок їх сферичній формі, сприяє зниженню площі контакту деталей та адгезії при сковзанні. В [42] показано, що домішки фулеренів у змащувальних мастилах призводять до зниження коефіцієнта тертя сковзання (кількісна величина залежить від мастила та прикладеного навантаження). В роботі [43] показано, що на поверхні мідної фольги при терті об неї сталевого ролика, змащеного індустріальним маслом, що містить 5% фулеренів C_{60} , утворюється захисна плівка (товщиною ≤ 100 нм). Плівка, ймовірно, є фулерен-полімерною, що утворена фулеренами C_{60} і ковалентно зв'язаними фрагментами вуглеводневих ланцюгів, що виділяються в процесі механохімічного розкладу мастила. Плівка проявляє підвищену твердість і протизношувальні властивості.

Тому, очевидно, основним механізмом збільшення холодильного коефіцієнта при роботі холодильної машини з використанням компресорного мастила з домішками фулеренів C_{60} є зменшення втрат енергії на тертя у компресорі.

Для оцінки подальших перспектив використання фулеренів в якості домішки до РХМ інтересним є результати дослідження [28], де показано що для масла з більш низькою в'язкістю поліпшення протизношувальних характеристик і зниження коефіцієнта тертя між деталями, яке пов'язане з присутністю в ньому фулеренів, вище, ніж для в'язкого масла. Отже, при вирішенні завдання підвищення енергетичної ефективності пароконпресійних холодильних машин вибір марки компресорного масла є не менш важливим завданням, ніж вибір альтернативного холодоагенту. Отже, оптимальний вибір компресорного масла з низьким значенням в'язкості та використання фулеренів C_{60} в якості присадок до нього має сприяти суттєвому підвищенню енергетичної ефективності холодильного обладнання.

Я було показано вище, на відміну від домішок фулеренів (які незначно впливають на зміну теплофізичних властивостей РХМ), домішки наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 до РХМ призводять до збільшення тиску насиченої пари та, як наслідок, до збільшення масової витрати робочого тіла у контурі холодильної машини. Разом з тим, підвищення холодопродуктивності, пов'язане з добавками в робоче тіло наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 , превалює над зростанням витрат енергії, яка споживається компресором - рис. 7.8 та 7.9. Значення холодильного коефіцієнта при роботі холодильної машини на РХМ з домішками наночастинок оксидів металів завжди більше, ніж при роботі на традиційному робочому тілі R600a/компресорне масло. Тобто позитивні механізми збільшення енергетичної ефективності парокомпресійної холодильної машини (покращення інтенсивності тепловіддачі при кипінні в випарнику) превалюють над негативними (збільшення в'язкості РХМ). Крім того неврахованим остається вплив наночастинок на зміну розчинності холодоагенту в РХМ.

Як видно з рисунка 7.8, найбільший ефект збільшення холодильного коефіцієнту при витратах РХМ, характерних для роботи побутових холодильних приладів (відповідно до компресора, яких застосовувався в експериментальній установці) $0,42 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ спостерігається при добавках наночастинок TiO_2 та фулеренів. Характер зміни відносного холодильного коефіцієнту при викосританні РХМ з наночастинками оксидів металів зі збільшенням витрати РХМ говорить о том, що вплив концентрації наночастинок на збільшення холодильного коефіцієнту не є прямо пропорційним. Можна зробити висновок, що для кожного РХМ з домішками наночастинок при використанні у конкретному обладнанні при певних параметрах його роботи є оптимальне значення концентрації наночастинок, при якому їх позитивний вклад на параметри енергетичної ефективності превалює над негативним.

7.2.5 Аналіз невизначеності експериментальних даних

Аналіз невизначеності виконувався у відповідності до рекомендацій [44]. При цьому враховувалися два типи невизначеності: невизначеності типу А «випа-

дкова складова» та типу В «систематична складова». Кінцеві результати розрахунку за методикою [44] з урахуванням характеристик вимірювального обладнання, наведених у розділі 3, представлено в таблиці. 7.2.

Таблиця 7.2

Результати виконаної оцінки невизначеностей вимірювань параметрів роботи холодильної компресорної системи

Масова витрата робочого тіла, $\text{г}\cdot\text{с}^{-1}$	
Діапазон значень	0,20 – 0,44
Сумарна стандартна невизначеність	0,009-0,013
Розширена невизначеність	0,017-0,025
Холодопродуктивність, Вт	
Діапазон значень	65-153
Сумарна стандартна невизначеність	2,4
Розширена невизначеність	4,6
Потужність, що споживається компресором, Вт	
Діапазон значень	45-75
Сумарна стандартна невизначеність	0,58
Розширена невизначеність	1,13
Холодильний коефіцієнт	
Діапазон значень	1,2-2,2
Сумарна стандартна невизначеність	0,06
Розширена невизначеність	0,11

Таким чином, невизначеність вимірювання холодильного коефіцієнта при витратах робочого тіла, характерних для роботи побутового холодильного приладу не перевищує 5 %.

7.3 Висновки за розділом

1. Додатки наночастинок TiO_2 й Al_2O_3 та фулеренів C_{60} до робочого тіла па-

рокомпресійної холодильної машини R600a/мінеральне компресорне масло призводять до зміни холодопродуктивності та потужності, яка споживається компресором. Домішки наночастинок оксидів металів призводять до збільшення холодопродуктивності, в той час як домішки фулеренів в РХМ практично не змінюють цей параметр. Для всіх видів РХМ з домішками наночастинок TiO_2 та Al_2O_3 потужність компресора холодильної машини збільшувалася у порівнянні з роботою цієї машини на РХМ без домішок наночастинок. Добавки фулеренів C_{60} до РХМ навпаки приводили до зменшення потужності, що споживалася компресором.

2. Добавки наночастинок TiO_2 та Al_2O_3 та фулеренів C_{60} до робочого тіла парокомпресійної холодильної машини R600a/мінеральне компресорне масло приводять до збільшення холодильного коефіцієнту в інтервалі параметрів проведення експериментальних досліджень. Найбільший ефект збільшення холодильного коефіцієнту при витратах РХМ, характерних для роботи побутових холодильних приладів $0,42 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$ спостерігається при домішках наночастинок TiO_2 ($0,0048$ та $0,0010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) та фулеренів C_{60} ($0,0050 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) – до 5-6 %.

3. Механізми впливу домішок наночастинок оксидів металів (TiO_2 та Al_2O_3) та фулеренів C_{60} у мінеральних компресорних мастилах на показники енергетичної ефективності парокомпресійної холодильної машини різні.

4. Холодильний коефіцієнт холодильної машини при добавці в компресорне масло фулеренів C_{60} в кількості $0,005 \text{ г} \cdot \text{г}^{-1}$ збільшується приблизно на 4 % у всьому інтервалі витрат робочого тіла. Отриманий результат може бути пов'язаний зі зниженням втрат енергії на тертя в рухомих деталях компресора та покращенням унесення мастила з випарника. Зміна теплофізичних властивостей РХМ від добавок фулеренів C_{60} незначна, та практично не впливає на отримані ефекти покращення енергетичних показників холодильної машини. Вірогідно, основним механізмом збільшення холодильного коефіцієнта при роботі холодильної машини з використанням компресорного мастила з домішками фулеренів C_{60} є зменшення втрат енергії на тертя у компресорі (зниження коефіцієнта тертя сковзання та утворення фулерен-полімерної захисної плівки з підвищеною твердістю і протизношувальними властивостями).

5. Значення холодильного коефіцієнта при роботі холодильної машини на РХМ з домішками наночастинок оксидів металів завжди більше, ніж при роботі на традиційному робочому тілі R600a/компресорне масло. Домішки наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 до РХМ призводять до збільшення тиску насиченої пари та, як наслідок, до збільшення коефіцієнту подачі компресора та масової витрати робочого тіла у контурі холодильної машини. При цьому збільшення холодопродуктивності превалює над збільшенням споживаної потужності, що напевно пов'язано з незмінністю втрат енергії на тертя у компресорі. З додаткових механізмів збільшення енергетичної ефективності парокомпресійної холодильної машини у зв'язку з наявністю домішок наночастинок у РХМ можна відзначити покращення інтенсивності тепловіддачі при кипінні у випарнику, а з негативних - збільшення в'язкості РХМ. Крім того неврахованим остається вплив наночастинок на зміну розчинності холодоагенту в РХМ. Вірогідно, основним механізмом збільшення холодильного коефіцієнта при роботі холодильної машини з використанням компресорного мастила з домішками наночастинок оксидів металів є збільшення тиску насиченої пари РХМ, яке сприяє збільшенню коефіцієнта подачі компресора.

6. Для кожного РХМ з домішками наночастинок або фулеренів при використанні у конкретному обладнанні при певних параметрах його роботи є оптимальне значення концентрації наночастинок, при якому їх позитивний вклад на параметри енергетичної ефективності превалює над негативним.

7. Отримані у роботі результати показують, що вибір компресорного масла з оптимальною в'язкістю дозволяє покращити показники енергетичної ефективності парокомпресійної холодильної машини. Так, наприклад, застосування в компресорах для побутових холодильних приладів мінерального масла з в'язкістю $8 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ (при 40°C) призводить до збільшення холодильного коефіцієнта на 5-7% у порівнянні з використанням компресорного масла з $19,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ (при 40°C) при рівних параметрах холодильного циклу.

8. На основі виконаного аналізу для підвищення енергетичної ефективності побутових холодильних приладів рекомендоване використання в якості домішки до мінерального компресорного масла фулеренів C_{60} з підбором з наявних на рин-

ку мінеральних компресорних мастил такого, яке при його в'язкості забезпечить найбільше значення холодильного коефіцієнту при збереженні змащувальних властивостей. Рекомендоване для підбраного масла виконати додаткові експериментальні дослідження з визначення оптимальної концентрації домішки C_{60} .

9. В якості перспективної домішки до мінерального компресорного масла можна розглядати наночастики TiO_2 , які є більш дешевими, у порівнянні з фулеренами. Але, з погляду на необхідність застосування ПАР при приготуванні компресорного масла з домішками наночастинок TiO_2 , необхідні подальші експериментальні дослідження протягом більшого періоду часу. Метою цих досліджень є перевірка колоїдної стабільності РХМ з домішками наночастинок TiO_2 та незмінність параметрів енергетичної ефективності парокомпресійної машини з часом.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [11, 40, 45-48].

7.4 Список використаних джерел за розділом

1. Zhelezny V. P. An application of nanotechnologies in refrigeration – perspectives and challenges // Proc. 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, IIR Hangzhou. China, 2014.

2. Celen A., Çebi A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A. S., Wongwises S. A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and Applications // International Journal of Refrigeration. 2014. Vol. 44. P. 125–140.

3. Azmi W. H., Sharif, M. Z., Yusof, T. M., Mamat, R., Redhwan, A. A. M. Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system— A review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 69. P. 415-428.

4. Chen G., Zhelezny V., Shestopalov K., Lukianov N., Polyuganich M. An experimental and theoretical investigation of the compressor oil and nanoparticles admixtures influence on the performance of the compressor systems // Proc. 24th International Congress of Refrigeration. Yokohama, Japan, August 16 - 22, 2015. ID 318.

5. Bi S., Shi L., Zhang L. Application of nanoparticles in domestic refrigerators // *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28, Issue 14-15. P. 1834–1843.
6. Bi S., Guo K., Liu Z., Wu J. Performance of a domestic refrigerator using TiO₂-R600a nano-refrigerant as working fluid // *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52, Issue 1. P. 733–737.
7. Subramani N., Prakash M. J. Experimental studies on a vapour compression system using nanorefrigerant // *International Journal of Engineering, Science and Technology*. 2011. Vol. 3, Issue 9. P. 95–102.
8. Jwo C. S., Jeng L. Y., Teng T. P., Chang H. Effects of nanolubricant on performance of hydrocarbon refrigerant system // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 2009. Vol. 27, Issue 3. P. 1473–1477.
9. Kumar D. S., Elansezhian R. D. Experimental Study on Al₂O₃-R134a Nanorefrigerant in Refrigeration System // *International Journal of Modern Engineering Research*. 2012. Vol. 2, Issue 5. P. 3927–3929.
10. Sabareesh R. K., Gobinath N., Sajith V., Das S., Sobhan C. B. Application of TiO₂ nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems – An experimental investigation // *International Journal Refrigeration*. 2012. Vol. 35, Issue 7. P. 1989–1996.
11. Лукьянов Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40.
12. Xing M., Wang R., Yu J. Application of fullerene C₆₀ nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors // *International Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 40. P. 398-403.
13. Jia T., Wang R., Xu R. Performance of MoFe₂O₄–NiFe₂O₄/Fullerene-added nano-oil applied in the domestic refrigerator compressors // *International Journal of Refrigeration*. 2014. Vol. 45. P. 120-127.
14. Wang R., Zhang, Y., Liao Y. Performance of rolling piston type rotary

compressor using fullerenes (C70) and NiFe₂O₄ nanocomposites as lubricants additives // *Front. Energy*. 2017. P. 1–5.

15. Sajumon K. T., Jubin V. J., Sreejith, S. Aghil, V. M. Sreeraj Kurup P. N., Sarath S. Performance analysis of nanofluid based lubricant // *Proc. of International Conference on Energy and Environment - 2013 (ICEE 2013)*. 2013. P. 832–838.

16. Padmanabhan V. M. V., Palanisamy S. The use of TiO₂ nanoparticles to reduce refrigerator ir-reversibility // *Energy Conversion and Management*. 2012. Vol. 59. P. 122–132.

17. Kasaeian A., Hosseini S. M., Sheikhpour M., Mahian O., Yan W. M., Wongwises S. Applications of eco-friendly refrigerants and nanorefrigerants: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. Vol. 96. P. 91-99.

18. Sheikholeslami M., Rezaeianjouybari B., Darzi M., Shafee A., Li Z., Nguyen T. K. Application of nano-refrigerant for boiling heat transfer enhancement employing an experimental study // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 141. P. 974-980.

19. Anish M., Senthil Kumar G., Beemkumar N., Kanimozhi B., Arunkumar T. Performance study of a domestic refrigerator using CuO/AL₂O₃-R22 nanorefrigerant as a working fluid // *International Journal of Ambient Energy*. 2018. DOI: 10.1080/01430750.2018.1451376.

20. Ande R., Koppala R. S., Hadi M. Experimental Investigation on VCR system using Nano-refrigerant for COP Enhancement // *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 71. P. 967-972.

21. Bhattad A., Sarkar J., Ghosh P. Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: a comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. P. 3656-3669.

22. Soliman A. M., Rahman A. K. A., Ookawara S. Enhancement of vapor compression cycle performance using nanofluids // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 135(2). P. 1507-1520.

23. Gill J., Ohunakin O. S., Adelekan D. S. Experimental Investigation of Vapour Compression Refrigeration Systems using 0.4 g 13nm Al₂O₃-lubricant based LPG

Refrigerant as Working Fluid // Thermal Science and Engineering. 2018. Vol. 1(3).

24. Kumar R., Singh J., Kundal P. Effect of CuO nanolubricant on compressor characteristics and performance of LPG based refrigeration cycle: experimental investigation // Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 54(5). P. 1405-1413.

25. Pico D.F.M., Silva L.R.R., Schneider P.S., Filho E.P.B. Performance evaluation of diamond nanolubricants applied to a refrigeration system // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol. 100. P. 104-112.

26. Sharif M. Z., Azmi W. H., Mamat R., Shaiful A. I. M. Mechanism for improvement in refrigeration system performance by using nanorefrigerants and nanolubricants—A review // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 92. P. 56-63.

27. Zhelezny V., Lukianov N., Khliyeva O., Nikulina A., Melnyk A. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil- Al_2O_3 and R600a-mineral oil- TiO_2 . Thermophysical properties // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 486-502.

28. Ku B.C., Han Y.C., Lee J.E., Lee J.K., Park S.H. Tribological effects of fullerene (C60) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity // Int. J. Precis. Eng. Man. 2010. Vol. 11. P. 607-611.

29. Lee K., Hwang Y., Cheong S., Kwon L., Kim S., Lee J. Performance evaluation of nanolubricants of fullerene in refrigeration mineral oil // Current Applied Physics. 2009. Vol. 9, Issue 2. P. 128-131.

30. Alawi O. A., Salih J. M., Mallah A. R. Thermo-physical properties effectiveness on the coefficient of performance of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R141b}$ nano-refrigerant // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 103. P. 54-61.

31. Ma L., Liu Y., Qing S., Liu Y. Thermal and Exergy Optimization of an Organic Rankine Cycle Using Metal Oxide Nanorefrigerants // Nanoscience and Nanotechnology Letters. 2019. Vol. 11(3). P. 322-329.

32. Zhelezny V., Faik A., Khliyeva O., Motovoy I., Ivchenko D., Grosu Y., Nikulin A. Caloric properties of R600a solutions in compressor oil containing fullerenes C60 // Natural refrigerant solutions for warm climate countries: proc. the 13th IIR

Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. Valencia, Spain. June 18 to 20, 2018.

33. Hwang Y.j., Lee J., Lee C., Jung Y., Cheong S., Lee C., Ku B., Jang S. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids // *Thermochim. Acta*. 2007. Vol. 455. P. 70–74.

34. Rashidi A., Ahmadi H., Mohtasebi S. S., Pourkhalil M. Thermal and rheological properties of oil-based nanofluids from different carbon nanostructures // *Int. Commun Heat Mass Transfer*. 2013. Vol. 48. P. 178–182.

35. Dombek G., Nadolny Z., Przybylek P. The study of thermal properties of mineral oil and synthetic ester modified by nanoparticles TiO₂ and C₆₀ // *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2014 International Conference on*. 2014.

36. Martínez-Galván I., González-Maciá J., Corberán J. M., Royo-Pastor R. Oil type influence on the optimal charge and performance of a propane chiller // *International journal of refrigeration*. 2011. Vol. 34(4). P. 1000-1007.

37. Анисимов И. Г., Бадыштова К. М., Бнатов С. А., под ред. Школьников В. М. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение. М.: ИЦ Техинформ. 1999. 596 с.

38. Zhelezny V. P. Chen G. M., Shestopalov K. O., Melnyk A. V. Experimental and theoretical investigation of heat transfer coefficient for boiling of the isobutene/compressor oil solution flow in the pipe // *Proc. 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, IIR Hangzhou. – China, 2014*.

39. Лукьянов Н.Н. Изучение перспектив применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике (теплофизический эксперимент, моделирование, эколого-энергетический анализ): дис. ... кандидата техн. наук: 05.14.06 –Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. Одесса, 2015. 198 с.

40. Железный В.П., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л., Лукьянов Н.Н., Мороз С.А. Повышение эффективности парокomppressorных холодильных машин за счет использования нанотехнологий // *Промышленная теплотехника (Труды IX международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники»)*, №7 (37), 2015. С. 94-95.

41. Gulzar M., Masjuki H. H., Kalam M. A., Varman M., Zulkifli N. W. M., Muf-ti R. A., Zahid R. Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives // *Journal of Nanoparticle Research*. 2016. Vol. 18(8). 223.

42. Zhai W., Srikanth N., Kong L. B., Zhou K. Carbon nanomaterials in tribology // *Carbon*. 2017. Vol. 119. P. 150-171.

43. Ginzburg, B. M., Shibaev L. A., Kireenko O. F., Shepelevskii A. A., Baidakova M. V., Sitnikova A. A. Antiwear effect of fullerene C₆₀ additives to lubricating oils // *Russian journal of applied chemistry*. 2002. Vol. 75 (8). P. 1330-1335.

44. Taylor B.N., Kuyatt C.E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD, 1994.

45. Мороз С. А., Хлиева О. Я., Лукьянов Н. Н., Железный В. П. Эксперимен- тальное исследование влияния примесей фуллеренов С₆₀ в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрес- сорной системы // *Вестник Международной академии холода*. 2016. № 1. С. 41–46.

46. Лукьянов, Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Иссле- дование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого- энергетической эффективности оборудования // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40.

47. Хлиева О.Я., Мороз С.А., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Оценка перс- пектив применения компрессорных масел с добавками фуллеренов в бытовом хо- лодильном оборудовании // *Сбор. докл. межд. науч.-техн. конф.: Казахстан-Холод 2016*. 1-2 марта 2016 г. Алматы: АТУ, 2016. С. 120-126.

48. Moroz S. A., Khliyeva O. Ya., Zhelezny V. P., Lukianov N. N. Experimental investigation of the influence of fullerenes additives to the working fluid isobutene/compressor oil on refrigeration system performance // *Proc. International conference “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”*, 29 September – 01 October, 2016. Chisinau, Republic of Moldova. P. 132 – 136.

8 ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДАННЯ

У представленому розділі обґрунтовується необхідність розробки і застосування еко-енергетичних методів аналізу енергоємних виробництв. Пропонується оригінальна методика оцінки еколого-енергетичної ефективності продукції або обладнання, яка заснована на розрахунку емісії парникових газів за життєвий цикл об'єкта, що аналізується. Запропонована методика була адаптована до еко-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів. У роботі пропонується новий індикатор, який, поряд з традиційно використовуваним індексом енергетичної ефективності, може застосовуватися для оцінки еко-енергетичної ефективності побутових холодильних приладів. Наводяться результати еко-енергетичного аналізу перспектив використання нанофлюїдів в якості робочих тіл парокомпресійних холодильних машин, а так само результати розрахунку еко-енергетичної ефективності побутових холодильних приладах.

8.1 Еколого-енергетичні проблеми холодильної галузі

Сучасний технологічний прогрес в холодильному обладнанні базується на дотриманні ряду міжнародних законодавчих актів, таких як Монреальський і Кіотський протоколи, а також низки законодавчих актів, орієнтованих на раціональне використання матеріальних і енергетичних ресурсів.

Холодильна промисловість відноситься до галузі, яка вносить значний прямий та непрямий вклад у глобальні кліматичні зміни. По-перше, холодильна промисловість спільно з системами кондиціонування повітря відносяться до галузі з великим споживанням електроенергії. У відповідності до звіту UNEP [1] при виробництві штучного холоду різного температурного рівня в розвинених країнах споживається від 10 до 30 % всієї потрібної країні електроенергії. Крім того, фторвуглеводневі холодоагенти, які використовуються у парокомпресійних холодильних машинах, відносяться до речовин з високим потенціалом глобального потепління. Останні роки все більше уваги приділяється переходу на використання

холодоагентів з низьким потенціалом глобального потепління: вуглеводнів (ізобутан, пропан), аміак, CO₂ - див. Таблиці Б. 1 Додатка Б. Але питання повного відказу від використання фторвуглеводневих холодоагентів не вирішено.

Вчені та інженери докладають багато зусиль для розробки та впровадження заходів, які орієнтовані на раціональне використання енергетичних ресурсів, або на впровадження низькопотенційних та відновлювальних джерел енергії у різних галузях промисловості. Існує кілька перспективних напрямків підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у холодильній промисловості. По перше, це впровадження тепловикористовуючих холодильних машин, що споживають низькопотенційну теплоту різних джерел або використовують відновлювальні джерела енергії, наприклад сонячну радіацію (абсорбційні, пароежекторні). По друге, ще застосування нанофлюїдів в якості робочих тіл парокомпресійних холодильних машин.

Слід зауважити, що часто енергозберігаючі системи на етапі їх створення та утилізації вимагають більш великої кількості енергетичних ресурсів, ніж традиційні. З урахуванням цієї обставини, вони не завжди є більш екологічно чистими, якщо оцінювати ефективність їх використання за життєвий цикл. Тому при модернізації любого обладнання з метою підвищення його енергоефективності необхідно проводити аналіз антропогенного впливу з використанням як енергетичних показників ефективності, так і екологічних індикаторів.

Зазвичай для порівняльного аналізу показників ефективності різних холодильних машин використовують термодинамічний, ексергетичний і економічний методи аналізу, а також деякі інші підходи [2]. Останні три десятиріччя фахівці вказують на необхідність екологічного аналізу стосовно до холодильного обладнання. Так, слід зазначити, що ще на початку 1980-х років нашим співвітчизником Є.А. Таубманом пропонувалися критерії екологічної оцінки холодильного та теплонасосного обладнання, які ґрунтуються на розрахунку економічних збитків від антропогенного впливу обладнання [3-6]. Існує підхід, який об'єднує ексергетичний і екологічний методи аналізу енергоємного обладнання, запропонований, наприклад, в роботах [7, 8].

Антропогенний вплив на навколишнє середовище холодильних машин та установок може бути оцінений з використанням різних підходів і індикаторів. Коротко зупинимося на основних методах, які найбільш часто застосовуються в даний час для екологічного аналізу холодильного обладнання.

Total Equivalent Warming Impact (TEWI) – еквівалентний внесок у глобальне потепління (в кг CO₂-екв.) при експлуатації холодильної техніки. У цьому методі враховується як пряма, так і непряма емісія парникових газів при експлуатації обладнання [9, 10, 11]. Цей метод був одним з перших, запропонованих для розрахунку еквівалентної емісії парникових газів в холодильній промисловості. Спочатку його основною метою був вибір альтернативних холодоагентів. Однак, в класичному підході TEWI аналізу не розглядалася емісія, пов'язана з виробництвом обладнання, що є його основним недоліком.

Life cycle climate performance (LCCP) – оцінка внеску в глобальне потепління за життєвий цикл обладнання [12]. Концепція LCCP аналізу була спочатку заснована на TEWI аналізі з деякими доповненнями. Цей метод в різних варіаціях досить часто використовується для аналізу холодильного обладнання [13-20]. В 2016 г. International institute of refrigeration (IIR) розробив методичні рекомендації для розрахунку величини LCCP для систем опалення, вентиляції, кондиціонування та охолодження (HVAC&R) [12].

Carbon Footprint Assessment (CFA) – методика розрахунку вуглецевого сліду. Вперше ця концепція була запропонована Rees в 1992 [21]. «Вуглецевий слід» складається з двох складових: прямої емісії, яка робить внесок у парниковий ефект за рахунок витоків різних парникових газів, і непрямой емісії, пов'язаної з енергоспоживанням в різних процесах [22]. Стандартом для CFA є ISO/TS 14067:2013 [23], який був розроблений на основі методичних рекомендацій з аналізу LCA - ISO UNI EN 14044:2006 [24].

Life Cycle Assessment (LCA) є методикою розрахунку екологічного впливу обладнання або товару за його життєвий цикл [25 – 27]. Особливість цієї методики, на відміну від трьох вище розглянутих методів, є урахування декількох екологічних впливів одночасно. Але, недоліком є той факт, що вагові коефіцієнти при

підсумовуванні в один критерій таких величин як потенціали ODP, GWP, викиди NO_x , SO_2 та інших екологічно небезпечних речовин не можуть бути однозначно визначені.

Крім розглянутих вище методів, існують роботи, присвячені екологічному аналізу, заснованому на використанні менш поширених підходів [28-34], або роботи, в яких використовуються модифікації зазначених вище методів [14, 35].

Короткий огляд робіт, присвячених екологічним методам аналізу холодильного обладнання (див. табл. 8.1) показав, що останнім часом дослідниками найчастіше використовується методика LCSP. Однак основним недоліком цієї методики є спрощений підхід до розрахунку емісії, пов'язаної з виробництвом матеріалів холодильного обладнання та відсутність урахування енергетичного еквівалента людської праці при виготовленні холодильного обладнання.

Крім того, слід зазначити, що більшість застосовуваних дослідниками методів аналізу еколого-енергетичної ефективності (див. табл. 8.1) засновані на урахуванні емісії парникових газів. Єдиний метод, який враховує декілька факторів впливу на навколишнє середовище – LCA. Але він часто використовується авторами з метою розрахунку тільки емісії парникових газів.

Таблиця 8.1 – Короткий огляд наукових робіт, присвячених екологічному аналізу холодильних машин та установок

Метод	Год, автор, посилання	Об'єкти дослідження
Модернізований TEWI метод - (LCWI)	1997 Parasavva et al. [35]	Холодильна машина R11, R12, R123, R134a
TEWI	1998 Johnson et al. [36]	Автомобільна система кондиціонування повітря R134a, суміш вуглеводнів
LCA	2000 Yanagitani and Kawahara [37]	Повітряний кондиціонер для побутового застосування R410A, R22
LCA	2000 Ciantar and Hadfield [38]	Холодильна машина R12, R134a

TEWI	2000 Лавренченко и др. [39]	Компресорний агрегат
TEWI	2003 Halimic et al. [40]	Парокомпресійна холодильна машина R12, R134a, R401A, R290 $Q_0=(3.0 - 12.5)$ кВт в інтервалі температур $T_{ev}= (-25 - 5)$ °C
TEWI	2004 Davies and Caretta [41]	Інноваційна система великої потужності для торгового застосування CO_2/NH_3
LCCP	2007 Hwang et al. [13]	Холодильна машина R290, R404A, R410A $Q_0=(3,7 - 12,5)$ кВт
LCA	2007 Bovea et al. [42]	Промислова холодильна машина R410A, R744, R404A
LCCP	2010 Papasavva et al. [15]	Автомобільний кондиціонер повітря R134a, R1234yf, R744
TEWI	2012 Aprea et al. [43]	Прототип холодильної машини R744, R134A
CFA	2013 Wu et al. [44]	Холодильна установка для транспортування харчових продуктів R404A, R744, R410A
LCCP	2013 Horie et al. [16]	Побутовий тепловий насос R410A, R32, R1234yf $Q_0=(1.3 - 1.6)$ кВт
LCCP	2014 Zhang et al. [17]	Побутовий тепловий насос R410A, R134a, R1234yf $Q_0=11$ кВт
LCCP	2014 Beshr et al. [18]	Торгова холодильна установка R404A, R407F, N40 $Q_0=308$ кВт
Ексерго-екологічний аналіз	2014 Stanek et al. [34]	Абсорбційна водоохолоджуюча установка
LCCP	2016 Troch et al. [19]	Побутовий тепловий насос R410A $Q_0=11$ кВт
LCCP	2016 Lee et al. [20]	Побутовий тепловий насос R410A, ARM70a, D2Y60, DR5, L41a, R32, R32/R134a, R32/R152a, R290 $Q_0=11$ кВт

CFA	2016 Cascini et al. [45]	Низькотемпературна та середньотемпературна холодильні установки. Номінальна потужність компресорів 0.56 й 1.3 кВт, відповідно R404A, R407F, R410A
Environmental analysis (спрощена оцінка емісії парникових газів)	2016 Mosaffa et al. [33]	Каскадна холодильна машина CO ₂ /NH ₃
Повна еквівалента емісія парникових газів (TEGHGE)	2016 Chen et al. [46]	Порівняння пароежекторного, абсорбційного та парокомпресійного кондиціонера повітря
Власний підхід до LCCP	2017 Choi et al. [14]	Система опалення та кондиціонування (холодильна й газовий котел)
Environmental analysis (спрощена оцінка емісії парникових газів)	2017 Nemati et al. [32]	Двоступеневий ежекторний надкритичний холодильний цикл
Повна еквівалента емісія парникових газів (TEGHGE)	2017 Chen et al. [30]	Порівняння пароежекторного та парокомпресійного кондиціонера повітря

На думку автора така ситуація не випадкова. Більшість екологічних факторів в даний час нормуються величиною гранично допустимої концентрації (ГДК) речовин. А викиди парникових газів вносять істотний внесок в процеси глобальних кліматичних змін незалежно від місця викидів. Оскільки основна антропогенна емісія парникових газів пов'язана з діяльністю енергетичних, металургійних і нафтохімічних підприємств, зниження її об'ємів буде також сприяти і зниженню інших супутніх екологічних впливів.

8.2 Методика еколого-енергетичного аналізу продукції або обладнання

У роботах [29, 30, 46] була запропонована методика розрахунку повної еквівалентної емісії парникових газів TEGHGE. Автори пропонують розглядати весь

технологічний ланцюжок виробництва продукту (наприклад, виробництва холоду). При цьому враховуються викиди парникових газів при створенні та утилізації виробничого обладнання, споруд тощо, викиди при виробництві продукції на цьому обладнанні, еквівалентні викиди праці робітників.

Загальна залежність для розрахунку TEGHGE може бути записана у вигляді суми різних вкладів в еквівалентну емісію парникових газів за життєвий цикл обладнання, яке виробляє певну продукцію

$$\begin{aligned} \text{TEGHGE} = & \sum em_i \cdot m_i^{\text{unit}} + \tau \cdot (k_{\text{rep}} + k_{\text{dep}}) \sum em_i \cdot m_i^{\text{unit}} + \sum em_{\text{UTIL}i} \cdot m_i^{\text{unit}} + em^{\text{h.l}} \cdot T^{\text{h.l eq}} + \\ & \tau \cdot n \cdot \beta \cdot E^{\text{prod}} + \tau \cdot n \sum (em_j \cdot m_j^{\text{prod}}) + \tau \cdot n^{\text{prod}} \sum em_{\text{UTIL}j} \cdot m_j^{\text{prod}} + \tau \cdot n^{\text{prod}} \cdot em^{\text{h.l}} \cdot T^{\text{h.l prod}} + \\ & \sum m_k \cdot \text{GWP}_k \cdot (1 - \gamma_{\text{UTIL}k}) + \tau \cdot n^{\text{prod}} \sum (m_q \cdot \text{GWP}_q), \end{aligned} \quad (8.1)$$

де em_i - питомі викиди парникових газів при створенні одиниці i -го матеріалу, який використовується при виготовленні обладнання, на якому проводиться випуск продукції, $\text{кг CO}_2\text{-екв} \cdot (\text{кг матеріалу})^{-1}$; m_i^{unit} - маса (або інша одиниця виміру) i -го матеріалу, який використовується при виготовленні обладнання, кг ; τ - строк експлуатації обладнання, рік ; k_{rep} и k_{dep} - коефіцієнти відрахувань на амортизацію і ремонт обладнання, рік^{-1} ; $em_{\text{UTIL}i}$ - питомі викиди парникових газів при утилізації одиниці i -го матеріалу, який використовується при виготовленні обладнання, $\text{кг CO}_2\text{-екв} \cdot (\text{кг матеріалу})^{-1}$; $em^{\text{h.l}}$ - еквівалентні викиди парникових газів від одиниці людської праці, $\text{кг CO}_2\text{-екв} \cdot (\text{люд} \cdot \text{год})^{-1}$; $T^{\text{h.l eq}}$ - витрати людської праці на виробництво обладнання, $\text{люд} \cdot \text{год}$; n^{prod} - випуск продукції розглянутою системою за рік, $\text{од. продукції} \cdot \text{рік}^{-1}$; β - викиди парникових газів при виробництві 1 $\text{кВт} \cdot \text{год}$ електроенергії для певної країни, $\text{кг CO}_2\text{-екв} \cdot (\text{кВт} \cdot \text{год})^{-1}$; E^{prod} - енергоспоживання на виробництво одиниці продукції, $\text{кВт} \cdot \text{год}$ (од. продукції) $^{-1}$; em_j - питомі викиди парникових газів на одиницю j -го матеріалу, що використовується при виготовленні продукції, $\text{кг CO}_2\text{-екв} \cdot (\text{кг матеріалу})^{-1}$; m_j^{prod} - маса (або інша одиниця ви-

міру) j -го матеріалу, що використовується при виготовленні продукції, кг; $em_{UTL, j}$ - питомі викиди парникових газів при утилізації одиниці j -го матеріалу, що використовується при виготовленні продукції, кг CO_2 -eq·(кг матеріалу)⁻¹; $T^{h.l. prod}$ - витрати людської праці на виготовлення одиниці продукції, люд.·год (од. продукції)⁻¹; m_k - маса k -го парникового газу, що використовується при виготовленні та експлуатації обладнання, кг; GWP - потенціал глобального потеплення парникового газу, (кг CO_2 -екв)·(кг парникового газу)⁻¹; γ_{UTL} - доля парникового газу, що утилізується після закінчення строку експлуатації обладнання; m_q - маса q -го парникового газу, що використовується при виробництві одиниці продукції, кг (од. продукції)⁻¹.

Для елементів обладнання, у яких непрямий вклад в еквівалентну емісію парникових газів від створення конструкційних матеріалів менше, ніж енергетичні і трудові витрати на їх виготовлення (наприклад, елементи автоматики) розрахунок непрямой емісії, пов'язаної з їх виробництвом з достатньою для порівняльного аналізу точністю можна виконати за формулою (8.2). Такий підхід в рамках порівняльного аналізу є припустимим, так як грошові витрати будуть прямо пропорційні витратам людської праці (які, як буде відзначено нижче, безпосередньо пов'язані з емісією парникових газів) і витратами енергії на виготовлення цих елементів.

$$em \cdot m = \beta \cdot e_{GDP} \cdot c = em_{GDP} \cdot c, \quad (8.2)$$

де e_{GDP} - енергоємність валового внутрішнього продукту (ВВП) для конкретної країни, (кВт·год)·(грош.од.)⁻¹; c - собівартість виробництва елемента обладнання або продукції, грош.од; em_{GDP} - величина емісії CO_2 -eq на одиницю ВВП, CO_2 -екв·(грош.од.)⁻¹.

Розглянемо ряд прийнятих в розрахунках постійних величин, які входять в формули (8.1) й (8.2).

Питомі викиди парникових газів при виробництві матеріалів, які використовуються при виготовленні невисокотехнологічних елементів обладнання або продукції $e_{\text{п}}$ можна прийняти за наявними довідковими даними [12]. Крім того, в [12] наявна інформація про емісію при утилізації деяких матеріалів $e_{\text{УТЛ}i}$. Величина емісії при виробництві матеріалів була отримана на підставі аналізу різних технологічних процесів в США і ЄС. Однак в [12] наведені дані лише для чотирьох матеріалів: сталі, алюмінію, міді й пластику.

Еквівалентна емісія парникових газів від людської праці $e_{\text{п}}^{\text{h.l}}$ може бути визначена як емісія, пов'язана із задоволенням біологічних, матеріальних і культурних потреб людини. Відповідно до дослідження Rugani зі співавторами [47], емісія, пов'язана із забезпеченням основних потреб людини може бути виражена в залежності від кваліфікації працівника: HL-1 (висококваліфікований фахівець), HL-2 (фахівець) і HL-3 (некваліфікований працівник). В [47] було показано, що праця висококваліфікованого працівника завжди призводить до більшої емісії парникових газів, ніж праця некваліфікованого працівника. Для рівня кваліфікації HL-1 $e_{\text{п}}^{\text{h.l}} = 0,52 \text{ CO}_2\text{-екв}\cdot(\text{люд}\cdot\text{год})^{-1}$, для HL-2 $e_{\text{п}}^{\text{h.l}} = 0,46 \text{ CO}_2\text{-екв}\cdot(\text{люд}\cdot\text{год})^{-1}$ й для HL-3 $e_{\text{п}}^{\text{h.l}} = 0,41 \text{ CO}_2\text{-екв}\cdot(\text{люд}\cdot\text{год})^{-1}$. Для подальших розрахунків можна прийняти середнє значення $e_{\text{п}}^{\text{h.l}} = 0,46 \text{ CO}_2\text{-екв}\cdot(\text{люд}\cdot\text{год})^{-1}$ [47]. Слід розуміти, що для розвинених країн величина $e_{\text{п}}^{\text{h.l}}$ буде вище, ніж для країн, що розвиваються.

Коефіцієнт β характеризує еквівалентну емісію парникових газів ($\text{CO}_2\text{-екв}$) при виробництві 1 кВт·год електроенергії. Очевидно, що ця величина буде залежати від структури виробництва електроенергії в конкретній країні (регіоні) та буде змінюватися з часом. Слід зазначити, що емісія парникових газом має місце навіть при виробництві електроенергії без спалювання палива (атомні станції, гідроелектростанції) [48, 49]. При оцінці сьогоденної величини коефіцієнта β можна використовувати інформацію, наведену на офіційному сайті: world-statistics.org. В наступний час величину β для України можна прийняти рівною $0,697 \text{ кгCO}_2\text{-екв}\cdot(\text{кВт}\cdot\text{год})^{-1}$.

Величина GWP для великої кількості речовин, в тому числі для холодоагентів, наведена, наприклад в [50]. У таблиці Б.16 додатку Б наведені значення GWP для деяких холодоагентів.

Величина енергоємності ВВП e_{GDP} (споживання первинної енергії на грошову одиницю для конкретної країни) відповідно до IEA Atlas of Energy для України у 2016 році дорівнювала 0,760 тон нафтового еквівалента на 1 тис US\$ віднесених до 2005 року (<http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/-297203538/2>), тобто $e_{GDP} = 8,839 \text{ кВт}\cdot\text{год}\cdot(\text{US\$})^{-1}$.

Інформація за значенням емісії CO_2 на одиницю ВВП для різних країн для різних років наводиться у IEA Atlas of Energy. Наприклад, в 2016 р. значення величини емісії CO_2 на одиницю ВВП для України склало $1,6 \text{ кг CO}_2\cdot(\text{US\$})^{-1}$ (<http://energyatlas.iea.org/#!/tellmap/1378539487/2>).

8.3 Методика розрахунку величини повної еквівалентної емісії парникових газів стосовно еколого-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів

Стосовно до побутових холодильних приладів формула для розрахунку повної еквівалентної емісії парникових газів в спрощеному вигляді може бути записана у такий вигляд

$$\begin{aligned} \text{TEGHGE}_{HR} = & \sum e m_i \cdot m_i^{\text{unit}} + \sum e m_{\text{UTIL}i} \cdot m_i^{\text{unit}} + e m^{\text{h.l}} \cdot T^{\text{h.l eq}} + \beta \cdot E_{\text{annual}} \cdot \tau \\ & + m_R \cdot \text{GWP}_R \cdot L_{\text{annual}} \cdot \tau + m_R \cdot \text{GWP}_R \cdot (1 - \gamma_{\text{RUTIL}}), \end{aligned} \quad (8.3)$$

де E_{annual} – річне енергоспоживання побутовим холодильним приладом, $\text{кВт}\cdot\text{год}$; m_R – маса заправки холодоагента, кг ; GWP_R – потенціал глобального потеплення холодоагента, $\text{кг CO}_2\text{-екв}\cdot\text{кг}$; L_{annual} – доля витоків холодоагента з холодильного обладнання, год^{-1} ; γ_{RUTIL} – доля холодоагенту, яка утилізується після закінчення строку експлуатації побутового холодильного приладу.

Дані про маси матеріалів і деталей, з яких складається побутовий холодильний прилад, не завжди є в наявності. Наприклад, в [12] наведені дані про середній вміст основних матеріалів в тепловому насосі для опалення житлових приміщень.

Норми річних витоків L_{annual} для різного типу холодильного обладнання, так само як й частка холодоагенту, що утилізується γ_{RUTPL} наведені, наприклад, у [11] та у таблиці Б.17 додатку Б.

На сьогодні основною енергетичною характеристикою побутових холодильних приладів є їх добове енергоспоживання. З використанням цієї величини оцінюється індекс енергетичної ефективності EEI [51], за чисельним значенням якого визначається клас енергетичної ефективності побутових холодильних приладів. Індекс енергетичної ефективності може бути розрахований за формулою

$$EEI = 100 \cdot \frac{E_{\text{annual}}}{SE_{\text{annual}}}, \quad (8.4)$$

де E_{annual} – річне енергоспоживання побутовим холодильним приладом, кВт·год;
 SE_{annual} – стандарте річне енергоспоживання побутовим холодильним приладом, яке визначається за методикою [51], кВт·год.

Останні роки розвиток ринку побутових холодильних приладів направлено на підвищення їх класу енергетичної ефективності. При цьому критерії оцінки еколого-енергетичної ефективності обладнання стосовно побутових холодильних приладів досі залишаються не розробленими.

На думку автора цієї роботи, величина EEI і клас енергетичної ефективності не може бути інтегральним критерієм для оцінки перспективності нового покоління обладнання, так як ці критерії не враховують енергетичні витрати на створення побутових холодильних приладів. Очевидно, що високий клас енергетичної ефективності, як правило, забезпечується високими витратами енергетичних та матеріальних ресурсів на створення побутових холодильних приладів. Викорис-

тання для аналізу побутових холодильних приладів методики LCC (Life Cycle Cost) дозволяє врахувати фактор високої вартості обладнання. Однак, слід підкреслити, що ні величина LCC, ні індекс енергетичної ефективності побутових холодильних приладів не враховують екологічні аспекти експлуатації холодильних приладів. Разом з тим, в матеріалах UNEP [1] підкреслюється, що створення нового енергоємного холодильного обладнання повинно проводитися з урахуванням необхідності зниження викидів парникових газів на всіх етапах життєвого циклу побутових холодильних приладів.

У відповідності до сказаного вище, є доцільним застосування вже відомих принципів оцінки еквівалентної емісії парникових газів при виробництві штучного холоду [29, 30, 46] та формули (8.1)-(8.2) до розробки зручних для практичного використання еко-енергетичних індикаторів для аналізу побутових холодильних приладів.

Показник еко-енергетичної ефективності побутових холодильних приладів може бути розрахований за такою формулою

$$EEEI = \frac{TEGHGE_{HR}}{V_{eq} \cdot \tau}, \quad (8.5)$$

де $TEGHGE_{HR}$ – повна еквівалента емісія парникових газів за життєвий цикл побутового холодильного приладу, кг CO_2 -екв; V_{eq} - еквівалентний об'єм побутового холодильного приладу [51], л; τ – період експлуатації побутового холодильного приладу, год.

Еквівалентний об'єм розраховується за формулою

$$V_{eq} = \left(\sum_{C=1}^{C=n} V_C \frac{25 - T_C}{20} \cdot FF_C \right) \cdot CC \cdot BI, \quad (8.6)$$

де n – кількість камер в побутовому холодильному приладі; V_C - внутрішній об'єм камери, m^3 ; T_C - номінальна температура в камері, $^{\circ}C$; FF_C – коригуючий коефіцієнт, для морозильних камер, які самі не розморожуються - 1,2, в інших випадках –

1,0; *CC* – кліматичний клас, для тропічного виконання – 1,2, для субтропічного – 1,1, в інших випадках – 1,0; *VI* - коригуючий коефіцієнт, для вбудованої техніки шириною до 58 см 1,2, в інших випадках – 1,0.

Запропонований еко-індикатор може бути використаний як для обґрунтованого вибору перспективного робочого тіла (у т.ч. і нанохолодоагентів), так і для оцінки загальної еко-енергетичної ефективності побутових холодильних приладів.

8.4 Результати еколого-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів

У цьому розділі наводяться результати еко-енергетичного аналізу перспектив використання різних нанохолодоагентів в побутових холодильних приладах, а так само результати дослідження їх еко-енергетичної ефективності.

8.4.1 Результати еколого-енергетичного аналізу побутових холодильних приладів при використанні нанофлюїдів у якості робочих тіл

З метою вивчення доцільності використання робочих тіл з добавками наночастинок або фулеренів був виконаний еко-енергетичний аналіз побутових холодильних приладів з використанням даних про енергетичні характеристики роботи парокомпресійної холодильної машини, наведених в розділі 7. Наведені в розділі 7 експериментальні дані дозволяють порівняти між собою параметри роботи побутових холодильних приладів, виходячи з параметрів експериментальних досліджень, отриманих при роботі лабораторної холодильної компресорної системи.

Як показано в розділі 7, холодопродуктивність і споживана компресором потужність холодильної компресорної системи були визначені при температурі кипіння РХМ в випарнику $255,6 \pm 2,70$ °С. и температурі конденсації $301,15 \pm 2,65$ °С для наступних робочих тіл:

- РХМ1 – розчин холодоагенту R600a у компресорному мінеральному маслі № 1 (в'язкість $8,0 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ при 40 °С);

- PXM2 - розчин холодоагенту R600a у компресорному мінеральному маслі № 2 (в'язкість $19,5 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$);
- PXM1+TiO₂ – PXM1 з добавками наночастинок TiO₂ $0,0048 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорне масло №1;
- PXM1+TiO₂ – PXM1 з добавками наночастинок TiO₂ $0,010 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорне масло №1;
- PXM1+Al₂O₃ – PXM1 з добавками наночастинок Al₂O₃ $0,0008 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорне масло №1;
- PXM1+Al₂O₃ – PXM1 з добавками наночастинок Al₂O₃ $0,0052 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорне масло №1;
- PXM2+C₆₀ – PXM2 з добавками фулеренів $0,0050 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в компресорне масло №2.

В якості прототипу був обраний побутовий холодильний прилад, що випускається на підприємстві України та для якого були наявні дані з матеріальних витрат на його виготовлення - НОРД-233-6. Його основні характеристики: об'єм холодильної камери 285 л; об'єм морозильної камери 65 л; габарити 180,5x58x61 см; температура холодильної камери $+4 \text{ }^\circ\text{C}$; температура у морозильній камері мінус $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Слід зазначити, що параметри експерименту по визначенню параметрів роботи холодильної компресорної системи, укомплектованої компресором СКН-150 фірми Atlant, на різних робочих тілах не збігалися з робочими температурами аналізованого побутового холодильного приладу. Але метою дослідження було розгляд теоретичної можливості застосування компресорних мастил з домішками наночастинок для підвищення еколого-енергетичних параметрів побутових холодильних приладів. Для оцінки можливості застосування отриманих експериментальних даних до аналізу еколого-енергетичної ефективності побутового холодильника був виконаний розрахунок теплоприпливів в холодильну і морозильну камеру розглянутого побутового холодильника для літнього і зимового періоду експлуатації: $Q_{\text{Summer}} = 104,4 \text{ Вт}$, $Q_{\text{Winter}} = 72,7 \text{ Вт}$. З використанням експериментальних даних про споживану потужність і холодопродуктивність холодильної компресо-

рної системи були розраховані коефіцієнт робочого часу, добове енергоспоживання, і величина індексу енергетичної ефективності побутового холодильного прилада при роботі на різних нанохладагентах при різних витратах робочого тіла – таблиці Б.19 додатка Б.

Для розглянутого побутового холодильного приладу орієнтовна структура матеріальних витрат наведена в таблиці Б.20 додатка Б (по даним підприємства яке виготовляє побутові холодильники). При цьому усі його елементи були розділені на 5 груп в залежності від матеріалу: сталь, мідь, алюміній, пластик, інше. Масове співвідношення чотирьох основних видів матеріалів, які застосовуються при виготовленні побутових холодильних приладів та при виготовленні теплового насосу для опалення житлових приміщень (ці данні є аналогічними для побутового кондиціонера повітря) наведені у таблиці 8.2. Відповідно до структури грошових витрат на матеріали побутових холодильних приладів, грошові витрати на наведені у таблиці 8.2 матеріали складають близько 70 %. Інші 30 % грошових витрат на матеріали (перш за все це автоматика) у рамках пропонованого підходу слід враховувати за формулою (8.2).

Слід зазначити, що в даний час в холодильниках НОРД використовується холодоагент R600a. Відомо, що кількість холодоагенту R600a, що заправляється в систему в середньому в 2 рази менше, ніж холодоагенту R134a [52], тому для подальших розрахунків маса заправки R600a прийнята рівною 90 г (см. таблицю Б.20 додатку Б).

Результати розрахунку величини EEI при масовій витраті, яка відповідає реальній витраті робочого тіла в побутовому холодильному приладі $0,42 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$, при роботі на різних робочих тілах наведені на рис. 8.1.

Результати розрахунку показують, що при використанні нанохолодоагентів замість традиційного робочого тіла (ізобутан/компресорне масло) індекс енергетичної ефективності EEI зменшується приблизно на 4 % при використанні домішок фулеренів до компресорного масла, і на 3,8 % при використанні наночастинок TiO_2 з концентрацією 0,48 % мас. (Для інших розглянутих робочих тіл з домішками наночастинок оксидів металів вплив домішок наночастинок на EEI ниж-

че). Використання тільки менш в'язкого компресорного масла ($8,0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ в складі РХМ1 замість масла з в'язкістю $19,5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ в складі РХМ2) призводить до зниження ЕЕІ на 6 %. Отриманий результат вказує на зміну енергетичної ефективності побутових холодильних приладів при застосуванні різних робочих тіл, що дозволяє сформулювати висновок про принципову можливість підвищення класу енергетичної ефективності об'єкта дослідження при використанні нанохолодоагентів та при виборі компресорного масла з оптимальною в'язкістю.

Таблиця 8.2 – Структура матеріальних затрат на виготовлення побутового холодильного приладу та теплового насосу

Матеріал	Побутовий холодильний прилад	Тепловий насос (кондиціонер повітря) [12]
Сталь	65,4 %	46 %
Алюміній	0,6 %	12 %
Мідь	29,0 %	19 %
Пластик	5,09 %	23 %

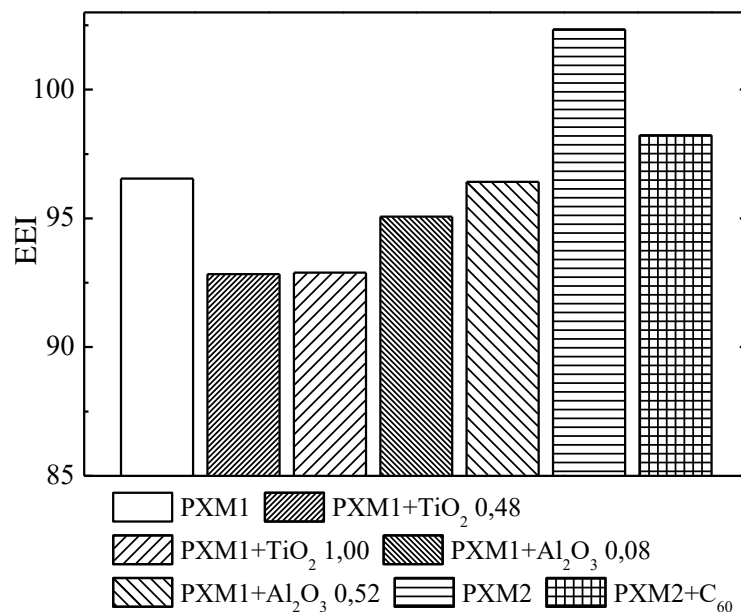


Рисунок 8.1 - Результати розрахунку величини ЕЕІ для побутових холодильних приладів з $V_{\text{eq}} = 439,0 \text{ л}$ при масовій витраті робочого тіла $0,42 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$

Аналіз запропонованого в даній роботі еко-енергетичного індикатора ЕЕЕІ в даному випадку не призведе до якісно іншого висновку, так як збільшення витрат на створення побутових холодильних приладів за рахунок добавок наночастинок до компресорного масла незначне і становить за приблизними оцінками (0,2-0,3) % при використанні наночастинок оксидів металів (TiO_2 і Al_2O_3) з ПАР і до 1,0 % при використанні домішок фулеренів C_{60} . Результати розрахунку величини ЕЕЕІ при різних витратах робочого тіла для різних робочих тіл наведені на рис. 8.2. Термін експлуатації побутових холодильних приладів прийнятий рівним 12 років.

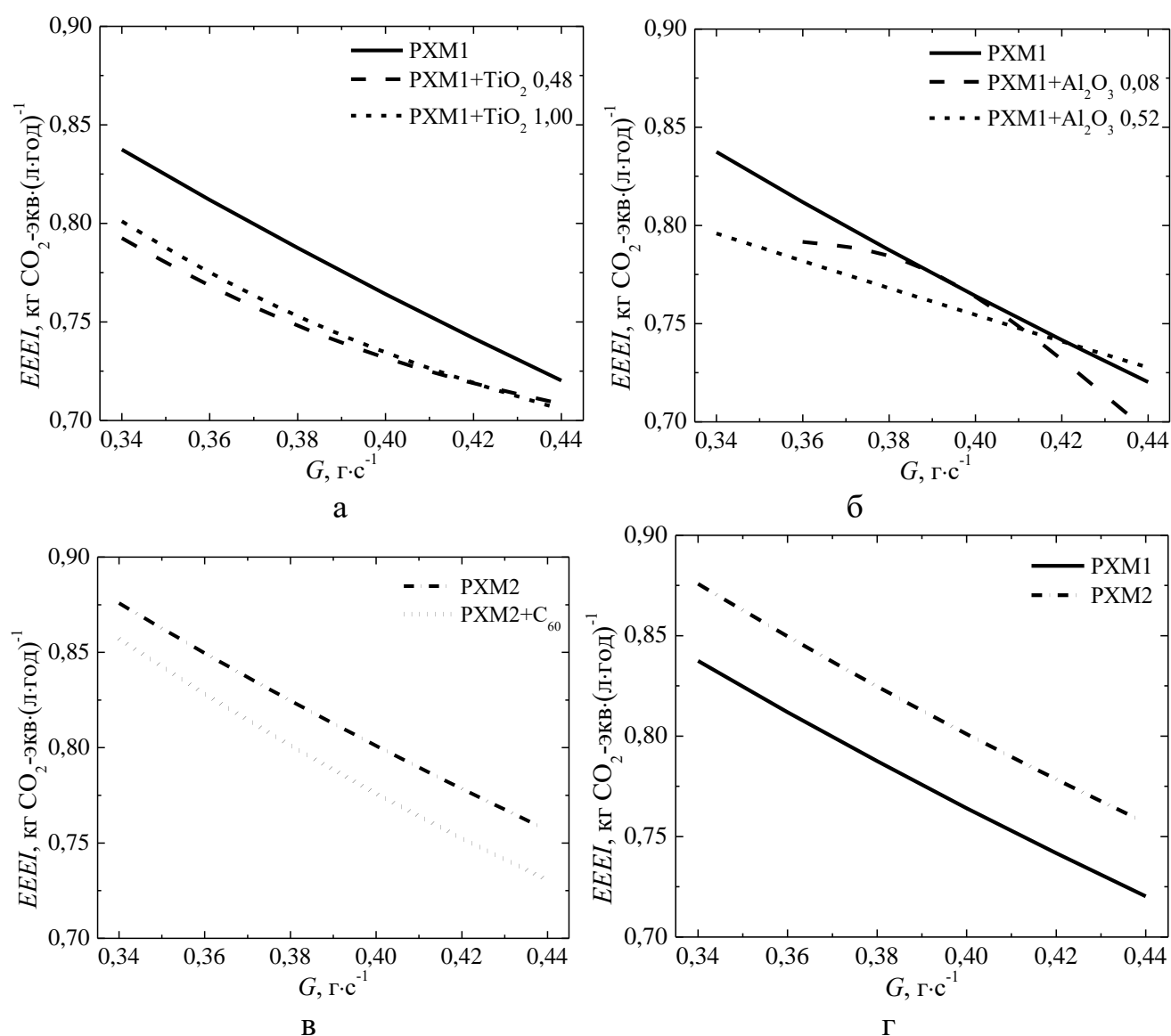


Рисунок 8.2 - Залежність еко-енергетичного індикатора ЕЕЕІ від витрати різних робочих тіл для прототипу побутового холодильного приладу НОРД-233-6 при його експлуатації 12 років

Зниження величини ЕЕЕІ з витратою робочого тіла (рис. 8.2) пояснюється, тим, що при високих витратах компресор працює в більш ефективному режимі, і, як наслідок, збільшується холодильний коефіцієнт холодильної компресорної системи (див. рис. 7.9).

На рисунку 8.3 наведено діаграма прямих та непрямих вкладів в величину TEGHGE для побутових холодильних приладів при його роботі на робочому тілі R600a.

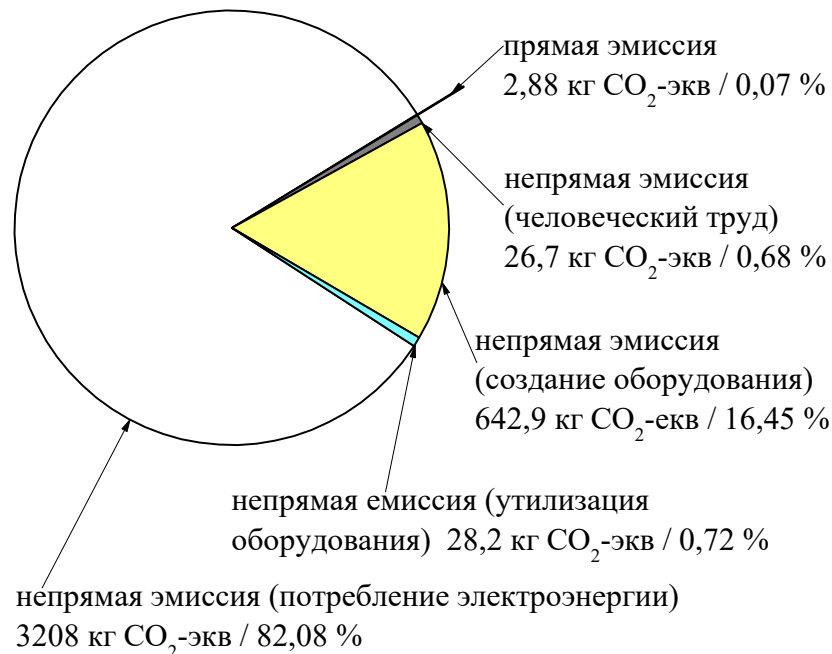


Рисунок 8.3 - Діаграма прямих та непрямих вкладів в величину TEGHGE для прототипу побутового холодильного приладу НОРД-233-6 при його експлуатації 12 років, холодоагент R600a

Виконаний аналіз вкладів в загальну величину TEGHGE показує, що непрямий внесок від енергоспоживання побутових холодильних приладів більше, ніж непрямі емісії парникових газів при його виробництві. Але на думку автора цю величину потрібно враховувати при виконанні аналізу доцільності модернізування холодильних приладів, так як непрямі емісії парникових газів при їх виробництві може бути не скомпенсована зниженням енергоспоживання. Тому на думку автора, зниження енергоспоживання побутовим холодильним приладом без

істотної модернізації обладнання є пріоритетним напрямком удосконалення побутових приладів. Проведене дослідження показує, що застосування нанохолодоагенті забезпечує рішення задачі підвищення еколого-енергетичної ефективності без істотного збільшення витрат на виробництво побутового холодильного приладу.

8.4.2 Результати еколого-енергетичного аналізу різних моделей побутових холодильних приладів

Для перевірки чутливості запропонованого еко-індикатора ЕЕЕІ до зміни непрямих вкладів в величину TEGHGE був виконаний еко-енергетичний аналіз побутових холодильних приладів з приблизно однаковими споживчими характеристиками (побутовий холодильник з холодильною камерою з температурою +4 °С і морозильною камерою температурою -18 °С), з близьким загальним об'ємом і вироблених на одному підприємстві. Основні параметри прийнятого для аналізу холодильного обладнання наведені в таблиці 8.3 [53].

Таблиця 8.3 - Основні параметри холодильного обладнання виробництва Atlant (по даним каталогу підприємства 2018/2019) [53]

Модель	ХМ-4625	ХМ-6323	ХМ-6221
Об'єм загальний, л	378	371	373
Об'єм холодильної камери, л	206	256	252
Об'єм морозильної камери, л	172	115	121
Маса побутового холодильного прилада, кг	76	81	84
Добове енергоспоживання, (кВт·год)·доба ⁻¹	0,88	0,81	0,84

Для розрахунку величини TEGHGE були використані дані про масу побутового холодильного прилада та їх собівартість. Структура матеріальних витрат в рамках порівняльного аналізу була прийнята за даними таблиці 8.2. Крім того, додатково враховувалися грошові витрати на інші елементи побутового холодильного прилада (автоматика) у розмірі 30 % від загальної собівартості. Слід зазначи-

ти, що дане припущення призведе до деяких погрішностей при виконанні еко-енергетичного аналізу побутового холодильного приладу, але в рамках порівняльного аналізу цілком допустимо, оскільки собівартість обладнання пропорційна енергетичним і матеріальним витратам на його виготовлення.

Метою виконаного розрахунку була оцінка принципової можливості запропонованого індикатора *EEEI* для розрахунку еко-енергетичної ефективності побутового холодильного приладу і оцінка його відмінності від традиційно використовуваного індексу енергетичної ефективності *EEL*. Для виконання більш точного еко-енергетичного аналізу необхідно володіти більш повною інформацією про структуру матеріальних і грошових витрат на створення побутового холодильного приладу, яка не завжди доступна дослідникам, але є у підприємств-виробників обладнання.

Для розрахунків термін експлуатації побутового холодильного приладу прийнятий рівним 12 років. Холодоагент у всіх порівнюваних холодильниках - R600a. Маса заправки, рівень витоків прийняті однаковими для порівнюваних об'єктів.

Результати розрахунку індексу енергетичної ефективності *EEL* і еко-енергетичного індикатора *EEEI* для трьох порівнюваних побутових холодильних приладів наведені на рис. 8.4.

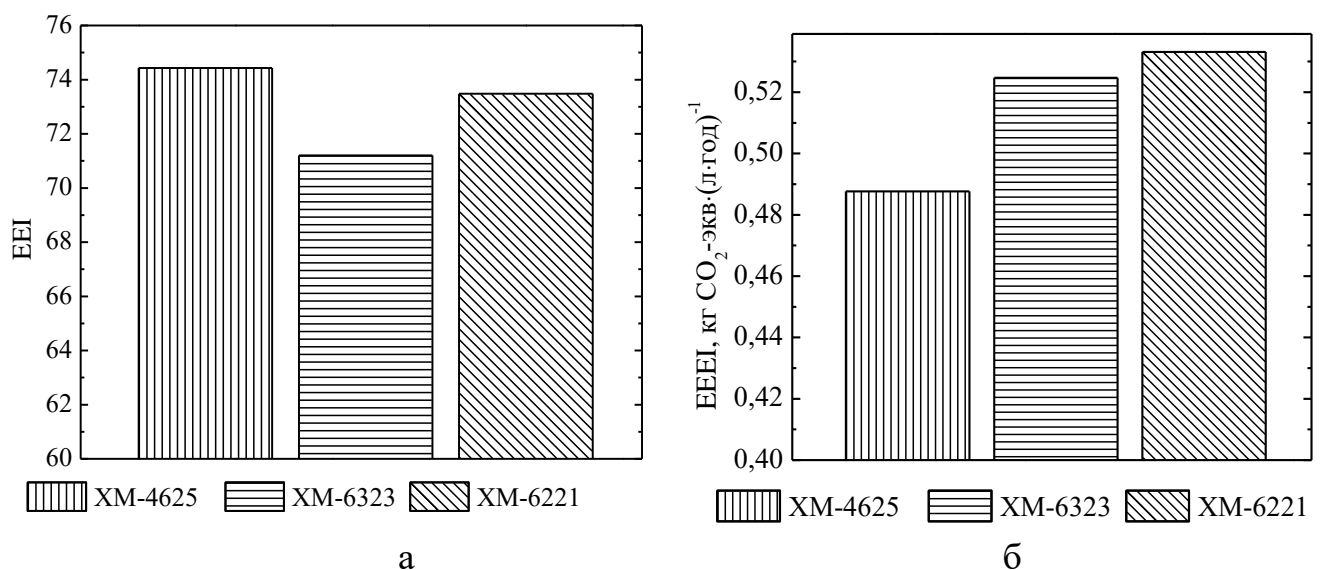


Рисунок 8.4 - Залежність індексу енергетичної ефективності *EEL* (а) і еко-енергетичного індикатора *EEEI* (б) для трьох побутових холодильних приладів

Як видно з проведеного дослідження (рис. 8.4), результати розрахунку індексу енергетичної ефективності ЕЕІ і еко-енергетичного індикатора ЕЕЕІ проводять до якісно протилежних висновків про ефективність побутових холодильних приладів, які були проаналізовані. Так, ХМ-4625 має найбільший зі всіх порівнювальних моделей індекс енергетичної ефективності, тобто з точки зору енергоспоживання він є найгіршим варіантом. Але, з точки зору питомої величини емісії парникових газів за життєвий цикл ЕЕЕІ цей побутовий холодильний прилад має найнижчий показник, що є найкращим варіантом. Найбільш вірогідно, що зниження індексу енергетичної ефективності було отримано за рахунок внесення змін в конструкцію побутового холодильного прилада, що призвело до збільшення непрямого вкладу в емісію парникових газів при його створенні. Це видно на прикладі побутових холодильних приладів ХМ-6323 та ХМ-6221. Але, це збільшення емісії не було скомпенсоване за рахунок зниження енергоспоживання, тому величина ЕЕЕІ для ХМ-6323 та ХМ-6221 достатньо висока, але при цьому індекс енергетичної ефективності низький.

На рисунку 8.5 наведено структуру вкладів в величину $TEGHGE$ для порівнювальних побутових холодильних приладів. Прямий внесок в $TEGHGE$ для порівнювальних об'єктів досить незначний, що пояснюється як використанням «натурального» холодоагенту ізобутану з низьким потенціалом глобального потеплення, так й невеликою масою холодоагенту у побутовому холодильному приладі.

Як видно з рис. 8.5, непрямий внесок від енергоспоживання побутового холодильного приладу більше, ніж непряма емісія парникових газів при його виробництві. Але, навіть при невеликому вкладі в повну емісію парникових газів за життєвий цикл побутового холодильного приладу емісії при його створенні та утилізації, цей внесок необхідно обов'язково враховувати при оцінці доцільності модернізування обладнання.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що запропонований в роботі еко-енергетичний індикатор ЕЕЕІ може бути додатково використаний для оцінки екологічних характеристик побутового холодильного приладу спільно з традиційно застосовуваним індексом енергетичної ефективності. Запропо-

нований еко-індикатор ЕЕЕІ більш коректно відображає ефективність використаних енергетичних ресурсів при виробництві холоду.

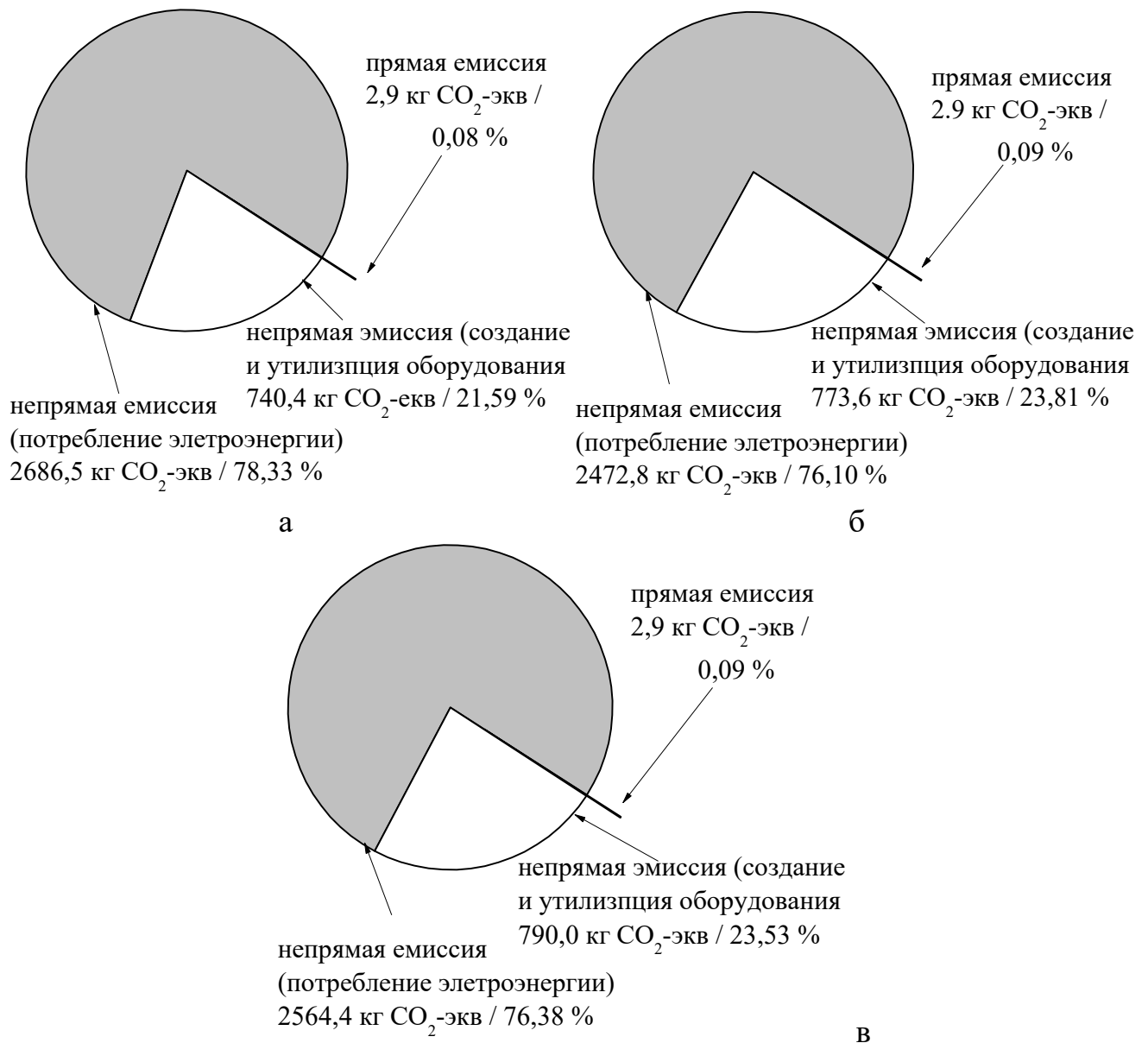


Рисунок - 8.5 Структуру вкладів в величину TEGHGE для порівнювальних побутових холодильних приладів: а - ХМ-4625; б - ХМ-6323; в - ХМ-6221

8.5 Висновки за розділом

1. Розроблено нову методику еколого-енергетичного аналізу енергоємних систем, яка оснований на урахуванні еквівалентної емісії парникових газів за повний життєвий цикл обладнання або продукції. Ця методика відрізняється від вже

існуючих врахуванням еквівалента людської праці та можливістю її адаптації до наявних для аналізу вхідних даних.

2. Виконано адаптацію методики еколого-енергетичного аналізу до аналізу побутового холодильного приладу. Запропоновано новий індикатор еко-енергетичної ефективності $EEEE$ побутових холодильних приладів, який визначає емісію парникових газів на одиницю ефективного об'єму холодильного приладу за певний строк його експлуатації. На відміну від широко застосованого індексу енергетичної ефективності побутового холодильного приладу - EEl , новий індикатор враховує емісію парникових газів на етапі створення та утилізації обладнання. Запропонований індикатор $EEEE$ нарівні з індексом енергетичної ефективності EEl може використовуватися виробниками для аналізу ефективності побутового холодильного обладнання.

3. Виконаний розрахунок індексу EEl та індикатора $EEEE$ для прототипу побутового холодильного приладу при його роботі на робочих тілах з домішками наночастинок TiO_2 та Al_2O_3 та фулеренів C_{60} показав, що застосування цих домішок сприяє зниженню величини EEl приблизно на 4 % при використанні фулеренів, й на 3,8 % при використанні наночастинок TiO_2 з концентрацією $0,0048 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (для інших розглянутих робочих тіл з домішками наночастинок оксидів металів ефект на EEl нижче). Показано, що використання менш в'язкого компресорного масла ($8,0 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ у складі РХМ1) замість масла з більш високою в'язкістю ($19,5 \text{ мм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ у складі РХМ2) приводить до зниження EEl на 6 %. Якісно аналогічні результати було отримано при аналізі величини $EEEE$, що пов'язано з незначним збільшенням величини емісії парникових газів на етапі виробництва компресорного масла з домішками (від 0,2 % для оксидних наночастинок з ПАР до 1,0 % для домішок фулеренів).

4. Виконаний розрахунок індексу EEl та індикатора $EEEE$ для трьох порівнювальних побутових холодильних приладів одного функціонального призначення та близького корисного об'єму показав якісно протилежні результати. Величину $EEEE$ рекомендовано використовувати для аналізу при проектуванні та модернізуванні побутових холодильних приладів сумісно з величиною IEE .

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [28-31, 46, 54-59].

8.6 Список використаних джерел за розділом

1. UNEP 2014. Report of the Refrigeration, air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. 2014 Assessment. http://www.montreal-protocol.org/Assessment_Panels/TEAP/Reports/RTOC/RTOC-Assessment-Report-2014.pdf

2. Железный В.П., Семенюк Ю. В. Рабочие тела парокомпрессорных холодильных машин: свойства, анализ, применение: моногр. Одесса: Феникс. 2012. 420 с

3. Таубман Е.А., Бодюл О.И. К вопросу о влиянии холодильной техники на окружающую среду // Холодильная техника. 1981. №2. С. 42-44.

4. Таубман Е.А., Бодюл О.И. Об экологической оценке конкурирующих вариантов холоильных систем // Холодильная техника и технология. 1981. №32. С. 105-108.

5. Таубман Е.А., Бодюл О.И., Рыбалким Л.М., Корчевский В.П. Об экологической эффективности теплонасосного теплоснабжения // Холодильная техника и технология. 1986. №42. С. 93-99.

6. Таубман Е.А., Бодюл О.И. Критерии оценки влияния холодильных систем на окружающую среду // Холодильная техника и технология. 1980. №31. С. 82-86.

7. Szargut J. Exergy method: technical and ecological applications. WIT press. 2005. 161 p.

8. Dincer I., Rosen M. A. Exergy: energy, environment and sustainable development. Newnes, 2012. 537 p.

9. Fischer S. K. Total equivalent warming impact: a measure of the global warming impact of CFC alternatives in refrigerating equipment // Int. J. Refrigeration. 1993. Vol. 6. P. 423–428.

10. Orfeo S. R. A History of the TEWI Process // Proc. International Conference

on Ozone Protection Technology. 1997, Maryland, USA.

11. Methods of calculating total equivalent warming impact (TEWI). Best practice guidelines, Australian Institute of Refrigeration, Air-conditioning and Heating. AIRACH. 2012.

https://www.airah.org.au/Content_Files/BestPracticeGuides/Best_Practice_Tewi_June2012.pdf

12. IIR. Guideline for Life Cycle Climate Performance. International Institute of Refrigeration. 2016.

http://www.iifir.org/userfiles/file/about_iir/working_parties/WP_LCCP/07/LCCP-WP_Booklet-LCCP-Guideline-V7_2015-08.pdf

13. Hwang Y., Jin D.-H., Radermacher R. Comparison of R-290 and two HFC blends for walk-in refrigeration systems // *Int. J. Refrig.* 2007. Vol. 30. P. 633-641.

14. Choi S., Oh J., Hwang Y., Lee H. Life cycle climate performance evaluation (LCCP) on cooling and heating systems in South Korea // *Applied Thermal Engineering.* 2017. Vol. 120. P. 88-98.

15. Papasavva S., Hill W.R., Andersen S.O., GREEN-MAC-LCCP: a tool for assessing the life cycle climate performance of MAC systems // *Environ. Sci. Technol.* 2010. Vol. 44 (19). P. 7666–7672.

16. Horie H., Kamiaka T., Dang C., Hihara E., Ha K., Study on cycle property and LCCP evaluation of heat pump using HFO-1234yf, HFC-32, and HFC-410A as refrigerant // *International Symposium on Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Technology.* 17–19 February 2010, Tokyo, Japan. 2010.

17. Zhang M., Muehlbauer J., Aute V., Radermacher R. Life Cycle Climate Performance Model for Residential Heat Pump System, Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Technology Institute // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue,* July 16-19. 2012.

18. Beshr M., Aute V., Abdelaziz O., Fricke B., Radermacher R. An Evaluation of the Environmental Impact of Different Commercial Supermarket Refrigeration Systems Using Low Global Warming Potential Refrigerants // *15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue,* July 14-17, 2014.

19. Troch S.V. Harmonization of Life Cycle Climate Performance and its improvements for Heat Pump Applications. Thesis for the degree of Master of Science. University of Maryland. 2016.
20. Lee H., Hwang Y., Radermacher R. LCCP evaluation on various vapor compression cycle options and low GWP refrigerants //International Journal of Refrigeration. 2016. Vol. 70. P. 128-137.
21. Rees W. E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out //Environment and urbanization. 1992. Vol. 4 (2). 121-130.
22. Wiedmann T. Minx J. A Definition of 'Carbon Footprint'. In Pertsova C. C. Ecological Economics Research Trends. Nova Science Publishers, Hauppauge NY, USA. 2008. Chapter 1. P. 1-11.
23. ISO/TS 14067:2013, 2013. Greenhouse Gases - Carbon Footprint of Products - Requirements and Guidelines for Quantification and Communication
24. ISO UNI EN 14044:2006, 2006. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines. International Organization for Standardization.
25. Guinee J. B., Heijungs R., Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Rydberg T. Life cycle assessment: past, present, and future // Environmental science and technology. 2010. Vol. 45. P. 90-96.
26. Curran M. A. Life cycle assessment handbook: a guide for environmentally sustainable products. John Wiley & Sons. 2012.
27. Horne R., Grant T., Verghese K. Life Cycle Assessment: Principles, Practice and Prospects. CSIRO Publishing, Australia. 2009.
28. Zhelezny V., Hlieva O., Artemenko S. Assessment of Total Equivalent of Greenhouse Gases Emission in the Industry // Proceedings of the 3rd Europeans Congress "Economics and Management of Energy in Industry". Lisboa, Portugal, 2004.
29. Железный В. П., Быковец Н. П., Хлиева О. Я., Степанова В. П., Суходольская А. Б. Методика расчета полной эквивалентной эмиссии парниковых газов в промышленности // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2004. № 6. С. 34–43.
30. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and

energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioner // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 127-135.

31. Zhelezny V.P., Zhelezny P. V., Hlieva O.Ya. New Indicators for Refrigeration Management // Proc. International Conference "Refrigerant Management and Destruction Technologies of CFC". Dubrovnik, Croatia. August 29-31, 2001. CD edition, RQO-21.

32. Nemati A., Nami H., Yari M. A comparison of refrigerants in a two-stage ejector-expansion transcritical refrigeration cycle based on exergoeconomic and environmental analysis // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 84. P. 139-150.

33. Mosaffa A.H., Farshi L.G., Ferreira C.I., Rosen M.A. Exergoeconomic and environmental analyses of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems equipped with different types of flash tank intercoolers // Energy Convers. Manag. 2016. Vol. 117. P. 442– 453.

34. Stanek W., Gazda W. Exergo-ecological evaluation of adsorption chiller system // Energy. 2014. Vol. 76. P. 42-48.

35. Papasavva S., Moomaw W. R. Life-Cycle Global Warming Impact of CFCs and CFC-substitutes for Refrigeration // Journal of Industrial Ecology. 1997. Vol. 1 (4). P. 71-91.

36. Johnson E.P., Banks R.E., Sharratt P.N. Automobile air conditioning: a case study of CFC replacements part II // Int. J. Life Cycle Assess. 1998. Vol. 3. P. 75-79.

37. Yanagitani K., Kawahara K. LCA study of air conditioners with an alternative refrigerant // Int. J. Life Cycle Assess. 2000. Vol. 5. P. 287-290.

38. Ciantar C., Hadfield M. An environmental evaluation of mechanical systems using environmentally acceptable refrigerants // Int. J. Life Cycle Assess. 2000. Vol. 5. P. 209-220.

39. Лавренченко Г.К., Волобуев И.В., Железный В.П., Лысенко О.В. TEWI-анализ компрессорных агрегатов при работе на традиционных и альтернативных хладагентах // Холодильная техника. 2000. №2. С. 10 –13.

40. Halimic E., Ross D., Agnew B., Anderson A., Potts I. A comparison of the

operating performance of alternative refrigerants // *Appl. Therm. Eng.* 2003. Vol. 23. P. 1441-1451.

41. Davies T.W., Caretta O. A low carbon, low TEWI refrigeration system design // *Appl. Therm. Eng.* 2004. Vol. 24. P. 1119-1128.

42. Bovea M.D., Cabello R., Querol D. Comparative life cycle assessment of commonly used refrigerants in commercial refrigeration systems // *Int. J. Life Cycle Assess.* 2007. Vol. 12. P. 299-307.

43. Aprea C., Greco A., Maiorino A. An experimental evaluation of the greenhouse effect in the substitution of R134a with CO₂ // *Energy*. 2012. Vol. 45. P. 753-761.

44. Wu X., Hu S., Mo S. Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems // *J. Clean. Prod.* 2013. Vol. 54. P. 115-124.

45. Cascini A., Gamberi M., Mora C., Rosano M., Bortolini M. Comparative Carbon Footprint Assessment of commercial walk-in refrigeration systems under different use configurations // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. P. 3998-4011.

46. Chen G., Zhelezny V., Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V. A comparative ecological and energy efficiency analysis of vapor compression, absorption and ejector air conditioners operating with “natural” refrigerants // *Heat Powered Cycles Conference 2016*, Nottingham University, UK, 28 - 30 June 2016. Paper HPC520.

47. Rugani B., Panasiuk D., Benetto E. An input–output based framework to evaluate human labour in life cycle assessment // *The Int. J. of Life Cycle Assessment*. 2012. Vol 17. P. 795-812.

48. Weisser D. A guide to life-cycle greenhouse gas emissions from electric supply technologies // *Energy*. 2007. Vol. 32. P. 1543–1559.

49. Fthenakis V. M., Kim H. C. Greenhouse-gas emissions from solar electric-and nuclear power: A life-cycle study // *Energy Policy*. 2007. Vol. 35. P. 2549-2557.

50. Calm J. M., Hourahan G. C. Physical, Safety and Environmental Data for Current and Alternative Refrigerants // *Refrigeration for Sustainable Development*. In:

Proc. 23th International Congress of Refrigeration, 2009, Prague, Czech Republic.

51. Commission delegated regulation (EU) No 1060/2010 of 28 September 2010 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of household refrigerating appliances // Official Journal of the European Union

52. ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineering, Inc. Atlanta: ASHRAE. 2017.

53. Каталог продукции 2018/2019 ЗАО «АТЛАНТ», www.atlant.by.

54. Khliyeva O. New indicator for life cycle greenhouse gases emission assessment of household refrigerating appliances // Environmental Problems. 2019. Vol. 4 (1). P. 39-44.

55. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of reasonability application of ejector air conditioner compared to vapor compression equipment // Proc. 24th International Congress of Refrigeration. - Yokohama, Japan, August 16 - 22, 2015.

56. Khliyeva O.Ya., Zhelezny V.P., Kosoy B.V., Stepanova V.P. The End and New the Beginning: Alternative Refrigerants for the New Heat Pump Generation Abstracts 5-th International Conference "Problems of Industrial Heat Engineering", May 22-27, 2007, Kiev, Ukraine. P. 223-224.

57. Лукьянов, Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40.

58. Суходольская А.Б., Железный В.П., Хлиева О.Я. Эколого-энергетический анализ перспектив применения альтернативных хладагентов в тепловых насосах // Холодильная техника и технология. 2005. №2 (94). С. 37-45.

59. Хлиева О.Я., Мороз С.А., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Оценка перспектив применения компрессорных масел с добавками фуллеренов в бытовом холодильном оборудовании // Сбор. докл. межд. науч.-техн. конф.: Казахстан-Холод 2016. 1-2 марта 2016 г. Алматы: АТУ, 2016. С. 120-126.

ВИСНОВКИ

У дисертації на основі комплексних експериментальних і теоретичних досліджень вирішена важлива науково-технічна проблема – обґрунтування доцільності впровадження нового класу робочих тіл та холодоносіїв з домішками наночастинок з метою покращення еколого-енергетичних характеристик парокомпресійних холодильних машин та установок. Результати проведених досліджень дозволили сформулювати основні висновки.

1. Застосування комбінованої (ультразвукової і механічної) двоступеневої процедури створення нанофлюїдів з використанням в якості середовища для диспергування наночастинок компонента з найменшою в'язкістю (або проміжної малов'язкої рідини з високим тиском насичених парів) буде сприяти покращенню якості нанофлюїдів на основі компресорних мастил або органічних холодоносіїв. Якщо для забезпечення колоїдної стійкості нанофлюїдів потрібна поверхнево-активна речовина, процедура створення потребує додавання цієї речовини на першій стадії створення нанофлюїду з попереднім підбором як типу поверхнево-активної речовини, так й її концентрації.

2. Присутність наночастинок призводить до зниження теплоємності базової рідини яке не прогнозується з використанням правила адитивності. Цей висновок отриманий на основі аналізу нової експериментальної інформації з питомої ізобарної теплоємності нанофлюїдів ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 у широкому інтервалі концентрацій та температур. Основною причиною наявності надлишкових значень питомої ізобарної теплоємності є наявність на поверхні наночастинок структурованого шару з молекул базової рідини - поверхневої фази, яка має властивості, що відрізняються від властивостей базової рідини при однакових параметрах стану.

3. Запропонований у роботі метод визначення концентрації поверхневої фази в нанофлюїді є базою для розробки методів прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів. Особливістю метода є можливість використання різноманітної вхідної експериментальної інформації з теплофізичних властивостей нанофлюїдів та базової рідини (густини, питомої ізобарної теплоємності, теплоти правлення),

отриманої при одній концентрації наночастинок у нанофлюїді та декількох температурах (для густини та теплоємності).

4. Розроблені методи прогнозування питомої ізобарної теплоємності та динамічної в'язкості нанофлюїдів, які основані на використанні даних з температурній залежності концентрації поверхневої фази у нанофлюїді, показали достатнє для практичного застосування збігання експериментальних та прогнозних значень для нанофлюїду ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 у широкому інтервалі температур та концентрацій ($T=190 - 330$ К, $w_{NP}= 0-0,0996$ кг·кг⁻¹). Запропоновані методи є ефективним фізично обґрунтованим інструментом прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів, для яких відсутня експериментальна інформація у широкому діапазоні параметрів стану.

5. Домішки $0,0020$ кг·кг⁻¹ фулеренів C_{60} в компресорному маслі сприяють незначному зниженню поверхневого натягу ($T=283 - 303$ К) та в'язкість ($T=253 - 283$ К), збільшенню тиску насиченої пари ($T=283 - 354$ К) розчинів масла в холодоагенті R600a у широкому інтервалі концентрацій R600a. Найбільші ефекти зафіксовано при низьких температурах, при більш високих температурах домішки C_{60} практично не впливають на властивості розчинів R600a/масло. З використанням обмеженої експериментальної інформації з теплофізичних властивостей розчинів R600a/компресорне масло/ C_{60} та принципів розширеного скейлінгу показано достатнє для практичного застосування збігання експериментальних та прогнозних значень з густини, в'язкості, тиску насиченої пари і поверхневого натягу.

6. Домішки наночастинок Al_2O_3 в ізопропанолі призводять до збільшення як коефіцієнту тепловіддачі при його вимушеній течії в каналі, так й до збільшення втрат тиску зі збільшенням числа Рейнольдса приблизно пропорійно концентрації наночастинок як при ламінарному, так й при турбулентному режимах течії.

7. З точки зору енергозбереження застосування нанофлюїду ізопропанол/ наночастинок Al_2O_3 не приводить до зміни енерговитрат на перекачування рідини на одиницю переданої кількості теплоти у порівняння з використанням базової рідини при турбулентному режимі, та призводить до збільшення енерговитрат при ламінарному режимі руху. Використання нанофлюїдів в якості холодоносіїв є пе-

спективним коли енерговитрати на перекачування не є важливими у порівнянні з інтенсифікацією тепловіддачі, наприклад при охолодженні електронних елементів різних систем. При цьому використання нанофлюїдів буде сприяти зменшенню масогабаритних розмірів теплообмінного обладнання.

8. Залежності, які запропоновані для розрахунку коефіцієнту втрат на тертя по довжині (для ламінарного та турбулентного режимів) та коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії однофазних рідин у каналах є придатними для розрахунку цих величин для нанофлюїду ізопропанол/ наночастинки Al_2O_3 з використанням коректо визначених теплофізичних властивостей нанофлюїду. Але для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі при турбулентній течії рівняння, запропоновані для однофазних рідин, потребують модифікації. Показано, що домішки наночастинки (малоінерційні дисперсні домішки) сприяють пригніченню маломасштабних турбулентних флуктуацій у потоці.

9. Домішки наночастинок TiO_2 ($0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) та поверхнево-активної речовини Span-80 ($0,001 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$) у холодоагент R141b призводять до збільшення коефіцієнту тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі (до 20 % у порівнянні з кипінням базової рідини) при низьких теплових потоках (до $20 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$) та низьких тисках. При збільшенні теплового потоку та тиску спостерігається погіршення інтенсивності тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів. Найбільший ефект від домішок наночастинок TiO_2 і поверхнево-активної речовини в зростання коефіцієнту тепловіддачі спостерігається при параметрах, характерних для роботи випарників парокомпресійних холодильних машин.

10. Основним фактором, який визначає вплив наночастинок на інтенсивність кипіння є зміна густини активних центрів пароутворення за рахунок осідання та адгезії наночастинок на поверхні нагріву. Запропоновано метод прогнозування коефіцієнту тепловіддачі при кипінні як чистих рідин, так й нанофлюїдів, який оснований на використанні фізично обґрунтованої моделі RPI та внутрішніх характеристик процесу кипіння, визначених при одному значенні тиску і двох значеннях теплового потоку (для відривного діаметру та частоти відриву бульбашок) та двох значеннях тиску (для кількості активних центрів пароутворення).

11. Використання в якості робочих тіл у парокомпресійних холодильних машинах розчинів холодоагенту R600a у компресорних маслах з наночастинками TiO_2 й Al_2O_3 та фулеренами C_{60} призводить до збільшення холодильного коефіцієнту. Найбільший ефект при витратах робочого тіла, характерних для роботи побутових холодильних приладів ($0,42 \text{ г} \cdot \text{с}^{-1}$) зафіксований при використанні робочих тіл з наночастинками TiO_2 та фулеренами C_{60} – 5-6 %. Для підвищення енергетичної ефективності парокомпресійних холодильних машин з холодоагентом R600a рекомендоване використання в якості домішок до компресорного масла фулеренів C_{60} з підбором з наявних на ринку мастил такого, яке при його в'язкості забезпечить найбільше значення холодильного коефіцієнту при збереженні достатніх змащувальних властивостей.

12. Механізми впливу домішок наночастинок оксидів металів та фулеренів у компресорні масла на показники енергетичної ефективності парокомпресійних холодильних машин різні. При використанні в якості домішок C_{60} превалюючим механізмом, ймовірно, є зниженням втрат енергії на тертя в компресорі. Зміна теплофізичних властивостей розчинів холодоагенту з маслом від добавок C_{60} незначна, та не впливає на отримані ефекти. При використанні в якості домішок наночастинок Al_2O_3 та TiO_2 превалюючим механізмом, ймовірно, є збільшення тиску насиченої пари та, як наслідок, збільшення коефіцієнту подачі компресора та масової витрати робочого тіла у контурі парокомпресійної холодильної машини. При цьому збільшення холодопродуктивності превалює над збільшенням споживаної потужності, що напевно пов'язано з незмінністю втрат енергії на тертя у компресорі. Вклад додаткових механізмів (інтенсифікація тепловіддачі при кипінні, збільшення в'язкості розчину холодоагента в компресорному маслі, зміна розчинності мастила в холодоагенті), ймовірно, незначний.

13. Новий індикатор еко-енергетичної ефективності побутових холодильних приладів *IEEE*, заснований на оцінці емісії парникових газів за життєвий цикл обладнання, є альтернативною характеристикою традиційно використовуваному на практиці індексу енергетичної ефективності *IEE*. Запропонований індикатор *IEEE* відрізняється від індексу енергетичної ефективності *IEE* урахуванням емісії парникових

газів на етапах створення та утилізації обладнання. На основі аналізу величин *IEEE* та *IEE* для трьох побутових холодильних приладів одного функціонального призначення та близького корисного об'єму, показано, що побутовий холодильний прилад, який має найкращий індекс енергетичної ефективності *IEE*, не є найкращим варіантом з еколого-енергетичної точки зору. Величину *IEEE* рекомендовано використовувати для аналізу при проектуванні та модернізуванні побутових холодильних приладів сумісно з величиною *IEE*.

14. Результати, що тримані в дисертаційній роботі, будуть сприяти науково-обґрунтованому впровадженню нанофлюїдів у холодильну та теплоенергетичну галузь у якості холодо- та теплоносіїв, а також робочих тіл, та, як наслідок, підвищенню енергетичної ефективності обладнання цих галузей без його суттєвої модернізації.

Додаток А

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ
ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

Праці в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Монографії

1. Перспективи застосування нанотехнологій у холодильній техніці. Частина 1. Теплофізичні властивості нанофлюїдів: монографія/В.П. Железний, Ю.В. Семенюк, О.Я. Хлієва, М.М. Лук'янов, А.Г. Нікулін, А.С. Нікуліна; Під ред. В.П. Железного. Одеса: Фенікс, 2019. 313 с. (російською) ISBN 978-966-428-414-3.

Статті у наукових журналах

2. Zhelezny V., Khliyeva O., Lukianov M. Motovoy I., Ivchenko D.A., Faik A., Grosu Ya., Nikulin A., Moreira A.L.N. Thermodynamic properties of isobutane/mineral compressor oil and isobutane/mineral compressor oil/fullerenes C60 solutions // International Journal of Refrigeration. 2019. Vol.106. P. 153-162. *Входить до БД Scopus.*

3. Zhelezny V., Khliyeva O., Motovoy I., Lukianov N. An experimental investigation and modelling of the thermal and caloric properties of nanofluids isopropyl alcohol - Al₂O₃ nanoparticles // Thermochimica Acta. 2019. Vol. 678. 178296.

4. Khliyeva O. New indicator for life cycle greenhouse gases emission assessment of household refrigerating appliances // Environmental Problems. 2019. Vol. 4 (1). P. 39-44.

5. Khliyeva O.Ya., Ivchenko D.A., Khanchych K.Yu., Motovoy I.V., Zhelezny V.P. The relationship between the surface tension and the saturated vapor pressure of model nanofluids // Refrigeration engineering and technology. 2019. № 55 (1). P. 40-46.

6. Nikulin A., Khliyeva O., Zhelezny V., Semenyuk Yu., Lukianov N., Moreira A.L.N. How does change of the bulk concentration affect the pool boiling of the refrigerant oil solutions and their mixtures with surfactant and nanoparticles? // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 Vol. 137. P. 868-875.

7. Zhelezny V., Motovoy I., Khliyeva O., Lukianov N. An influence of Al₂O₃ nanoparticles on the caloric properties and parameters of the phase transition of

isopropyl alcohol in solid phase // *Thermochimica Acta*. 2019. Vol. 671. P. 170-180.

8. Nikulin A., Moita A.S., Moreira A.L.N., Murshed S.M.S., Humnic A., Grosu Y., Faik A., Nieto-Maestre J., Khliyeva O. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on laminar, transient and turbulent flow of isopropyl alcohol // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 130. P. 1032-1044.

9. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V. Experimental study of the effect of nanoparticles TiO_2 on the thermophysical properties of the refrigerant R141b// *Eastern European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 6/5 (96). P. 33-41.

10. Івченко Д. О., Мотовий І. В., Хлієва О. Я., Железний В. П. Експериментальне дослідження калоричних властивостей розчинів диметилового ефіру (DME) в триетиленгліколі (TEG) // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(5). С.68-76.

11. Хлієва, О. Я., Лук'янова, Т. В., Семенюк, Ю. В., Железний, В. П., Корнієвич, С. Г., Мельник, О. Ю. Дослідження технології приготування робочих тіл парокомпрессионних холодильних систем з добавками наночастинок TiO_2 // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(4). С.49-56.

12. Мотовой И. В., Железный В. П., Хлиева О. Я. Исследование влияния наночастиц на давление насыщенных паров изопропилового спирта // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(3). С. 55-60.

13. Лук'янова Т. В., Хлієва О. Я., Семенюк Ю. В., Железний В. П., Корнієвич С. Г., Альтман Е. І. Експериментальне дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні нанохолодоагенту R141b/наночастинок TiO_2 на поверхнях з різним ступеням змочування // *Холодильна техніка та технологія*. 2018. № 54(3). С. 47-54.

14. Khliyeva O., Lukianova T., Semenyuk Yu., Zhelezny V., Nikulin A. An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process// *Eastern European journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 4/8 (94). P. 59-66.

15. Nikulin A., Khliyeva O., Lukianov N., Zhelezny V., Semenyuk, Y. Study of

pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/Al₂O₃ nanofluid // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018. Vol. 118. P. 746-757.

16. Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В., Никулин А.Г., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц TiO₂ на процесс кипения хладагента R141b в свободном объеме // Промышленная теплотехника, №5 (39), 2017. С. 37-40.

17. Khliyeva O., Ryabikin S., Lukianov N., Zhelezny V. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al₂O₃ nanoparticles // Eastern european journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 1/8 (85). P. 4-12.

18. Zhelezny V., Lukianov N., Khliyeva O., Nikulina A., Melnyk A. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil-Al₂O₃ and R600a-mineral oil-TiO₂. Thermophysical properties // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 486-502.

19. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of ejector and vapor compression air conditioner // International Journal of Refrigeration. 2017. Vol. 74. P. 127-135.

20. Khliyeva O.Ya. A.S. Nikulina, M.P. Polyuganich, S.S. Ryabikin, V.P. Zhelezny Viscosity of ternary solutions composed of propylene glycol, ethanol and water // Refrigeration engineering and technology. 2016. № 3 (52). P. 29-35.

21. Хлиева О. Я., Полюганич М. П., Рябикин С. С., Никулина А. С., Железный В.П. Исследование плотности бинарных и тройных водных растворов этиленгликоля, пропиленгликоля и этанола // Холодильная техника и технология. 2016. № 2 (52). С. 78-86.

22. Мороз С. А., Хлиева О. Я., Лукьянов Н. Н., Железный В. П. Экспериментальное исследование влияния примесей фуллеренов C₆₀ в компрессорном масле и величины вязкости масла на показатели эффективности холодильной компрессорной системы // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 41–46.

23. Железный В.П., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л., Лукьянов Н.Н., Мороз

С.А. Повышение эффективности парокомпрессорных холодильных машин за счет использования нанотехнологий // Промышленная теплотехника. №7 (37). 2015. С. 94-95.

24. Лукьянов Н.Н., Мельник А.В., Железный В.П., Хлиева О.Я., Мороз А.С. Влияние примесей компрессорного масла /наночастиц TiO_2 в хладагенте на коэффициент теплоотдачи при кипении в горизонтальной трубе // Холодильная техника и технология. 2015. № 5 (51). С. 59-66.

25. Железный В. П., Лукьянов Н.Н., Хлиева О.Я., Никулина А.С. Экспериментальное и расчетное исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на теплофизические свойства растворов хладагента R600a с компрессорным маслом // Холодильная техника и технология. 2015. № 4 (51). С. 82-91.

26. Лукьянов, Н. Н., Хлиева О. Я., Железный В. П., Семенюк Ю. В. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2015. Т. 3, № 5 (75). С. 32-40.

27. Хлієва О.Я., Поберезкін О.А., Крижановський С.С., Оболонський Е.С. Вивчення впливу домішок компресорного мастила в холодоагенті на інтенсивність тепловіддачі за умов кипіння у великому об'ємі // Обладнання та технології харчових виробництв: тематичний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонДУЕТ, випуск 21, 2009. С. 34-40.

28. Суходольская А.Б., Железный В.П., Хлиева О.Я. Эколого-энергетический анализ перспектив применения альтернативных хладагентов в тепловых насосах // Холодильная техника и технология. 2005. №2 (94). С. 37-45.

29. Железный В. П., Быковец Н. П., Хлиева О. Я., Степанова В. П., Суходольская А. Б. Методика расчета эквивалентной эмиссии парниковых газов в промышленности // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2004. № 6. С. 34-43.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

30. Khliyeva O., Nikulin A., Zhelezny V., Lukianov N., Semenyuk Y., Moreira A.L.N. Prediction of pool boiling heat transfer coefficient for the refrigerant R141b and

its solutions with surfactant and nanoparticles using limited set of experimental data // 1st International Conference on Nanofluids (ICNf2019) 2nd European Symposium on Nanofluids (ESNf2019) 26-28 June 2019, Castelló, Spain. *Доповідь співавтора*

31. Железный В.П., Хлиева О.Я., Мотовой И.В. Роль избыточных термодинамических функций при разработке методов прогнозирования теплоемкости нанофлюидов // Матеріали XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», 26-29 вересня 2018 р., Одеса. С. 106-109. *Доповідь співавтора*

32. Лукьянова Т.В., Хлиева О.Я., Семенюк Ю.В. Аналіз можливостей інтенсифікації процесу кипіння холодоагентів за рахунок додавання наочастинок та модифікації теплообмінної поверхні // Матеріали XVII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології», 26-29 вересня 2018 р., Одеса. С. 149-152. *Доповідь співавтора*

33. Khliyeva O.Ya., Gordeychuk T.V., Semenyuk Yu.V., Zhelezny V.P., Lukianov N.N., Nikulin A.G. The effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the heat transfer at the pool boiling on the different heat surfaces // Proc. X Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources”, Minsk, Belarus, 10-13 September, 2018. P. 435- 443. *Доповідь співавтора*

34. Lukianova T., Lukianov N., Motovoy I., Khliyeva O., Zhelezny V. Experimental investigation of the influence of the nanoparticles TiO₂ additives on thermophysical properties of R141b // Proc. 7th Rostocker International Conference: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 27-28 July 2018, Rostock, Germany. P. 86. *Заочна участь.*

35. Zhelezny V., Faik A., Khliyeva O., Motovoy I., Ivchenko D., Grosu Y., Nikulin A. Caloric properties of R600a solutions in compressor oil containing fullerenes C₆₀ // Proc. the 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants: “Natural refrigerant solutions for warm climate countries”. Valencia, Spain. June 18 to 20, 2018. *Доповідь співавтора, входить до БД Scopus.*

36. Zhelezny V.P., Motovoy I.V., Khanchych K.Yu., Khliyeva O.Ya., Ivchenko D.A. Surface tension and saturated vapor pressure of nanofluids of isopropanol / Al₂O₃

nanoparticles and o-xylene/C₆₀ fullerenes // Proc. 8th International Conference “Physics of liquid matter: modern problems”. Kyiv, Ukraine, 18-22 May, 2018. - P. 111. *Власна доповідь.*

37. Хлієва О.Я., Желєзний В.П. Аналіз перспектив застосування нанофлюїдів в холодильному устаткуванні // 78 наукової конференції науково-педагогічного складу академії. – Одеса, 23-27 квітня, 2018 р. *Власна доповідь на пленарному засіданні*

38. Nikulin A., Khliyeva O., Moroz S., Lukianov M., Zhelezny V., Moreira A. L. N. An Effect of Fullerenes C₆₀ Additives on Thermophysical Properties of Refrigerant/Mineral Oil Solutions and Efficiency of Vapor Compression Machine // Proc. Nanotech France 2017, NanoMaterials for Energy & Environment NanoMatEn 2017 – NanoMetrology 2017, Joint International Conferences and Exhibition, 28 - 30 June, 2017 Paris. France. *Доповідь співавтора*

39. Мороз С.О., Хлієва О.Я., Желєзний В.П. Експериментальне дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні робочих тіл R600a/компресорне мастило та R600a/компресорне мастило/фуллерени C₆₀ у трубі // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». Одеса: ОНАХТ. 21-22 вересня 2017. С. 216-218. *Власна доповідь.*

40. Хлієва О.Я., Гордейчук Т.В., Семенюк Ю.В. Експериментальне дослідження впливу добавок наночастинок TiO₂ на внутрішні характеристики процесу кипіння холодоагенту R141b // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки та технології». Одеса: ОНАХТ. 21-22 вересня 2017. С. 213-215. *Власна доповідь.*

41. Khliyeva O., Nikulin A., Gordeychuk T., Lukianov N., Semenyuk Y. An experimental study of heat transfer coefficient and internal characteristics of nucleate pool boiling of nanofluid R141b/TiO₂ //1st European Symposium on Nanofluids (ESNf2017), 8-10 October 2017, Lisboa, Portugal. P. 162-165. *Власна доповідь.*

42. Khliyeva O., Gordeychuk T., Ryabikin S., Zhelezny V. Experimental investigation of the viscosity of propylene glycol based nanofluids with improved thermophys-

ical properties // Proc. 6th Rostocker International Conference: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 17-18 July 2017, Rostock, Germany. P. 64. *Доповідь співавтора*

43. Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В., Никулин А.Г., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Экспериментальное исследование влияния добавок наночастиц TiO_2 на процесс кипения хладагента R141b в свободном объеме // Праці X міжнародної конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». Промышленная теплотехника, №7 (39), 2017. С. 19. *Власна доповідь.*

44. Zhelezny V., Chen G., Khliyeva O., Ryabikin S., Shestopalov K. Influence of Al_2O_3 nanoparticle additives on the thermophysical properties of aqueous solution of propylene glycol and on the heat transfer coefficient in forced convection flow in a tube // Proc. 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants. 23 - 26 April 2017, Seoul, Republic of Korea. *Доповідь співавтора.*

45. Железный В.П., Хлиева О.Я., Гордейчук Т.В. Исследование технологий приготовления нанохладоносителей и нанохладагентов с улучшенными теплофизическими свойствами // Сбор. докл. IV межд. науч.-техн. конф.: Казахстан-Холод 2017. 15-16 марта 2017 г., Алматы: АТУ, 2017. С. 241-250. *Заочна участь.*

45. Khliyeva O.Ya., Nikulina A.S., Polyuganich M.P., Ryabikin S.S., Zhelezny V.P. The prediction of the density and viscosity of the system water / ethanol / propylene glycol with Al_2O_3 nanoparticles based on a limited number of experimental data // Proc. 7th International Conference “Physics of liquid matter: modern problems”. Kyiv, Ukraine, 27-30 May, 2016. - P. 113. *Доповідь співавтора.*

47. Хлиева О.Я., Мороз С.А., Лукьянов Н.Н., Железный В.П. Оценка перспектив применения компрессорных масел с добавками фуллеренов в бытовом холодильном оборудовании // Сбор. докл. межд. науч.-техн. конф.: Казахстан-Холод 2016. 1-2 марта 2016 г. Алматы: АТУ, 2016. С. 120-126. *Заочна участь.*

48. Chen G., Zhelezny V., Shestopalov K., Khliyeva O., Ierin V. A comparative ecological and energy efficiency analysis of vapor compression, absorption and ejector air conditioners operating with “natural” refrigerants // Proc. Heat Powered Cycles Con-

ference 2016, Nottingham University, UK, 28 - 30 June 2016. Paper HPC520. *Доповідь співавтора.*

49. Lozovsky T., Motovoy I., Khliyeva O., Zhelezny V. An Influence of the Nanoparticles Al₂O₃ Additives in Isopropyl Alcohol and Propylene Glycol on Heat Capacity in the Liquid and Solid Phases // Proc. 3 rd International Conference On Thermophysical And Mechanical Properties Of Advanced Materials (THERMAM 2016), 1 – 3 September 2016, Izmir, Turkey. P. 111-124. *Доповідь співавтора.*

50. Moroz S. A., Khliyeva O. Ya., Zhelezny V. P., Lukianov N. N. Experimental investigation of the influence of fullerenes additives to the working fluid isobutene/compressor oil on refrigeration system performance // Proc. International conference “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”, 29 September – 01 October, 2016. Chisinau, Republic of Moldova. P. 132 – 136. *Власна доповідь.*

51. Хлиева О.Я., Рябикин С.С., Железный В.П., Гордейчук Т.В. Экспериментальное исследование конвективного коэффициента теплоотдачи хладоносителя с добавками наночастиц Al₂O₃ // Proc. International conference “Energy of Moldova – 2016: Regional aspects of development”, 29 September – 01 October, 2016. Chisinau, Republic of Moldova. P. 391 – 399. *Власна доповідь.*

52. Рябікін С.С. Хлієва О.Я. Експериментальне дослідження конвекційного коефіцієнта тепловіддачі й втрат напору при вимушеному русі нанохолодоносія на основі пропіленгліколю в трубі // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 41-42. *Власна доповідь.*

53. Хлієва О.Я. Аналіз можливих шляхів підвищення еколого-енергетичної ефективності холодильного обладнання за рахунок впровадження нанотехнологій // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 43-45. *Власна доповідь.*

54. Полюганіч М.П. Хлієва О.Я., Нікуліна А.С. Експериментальне й розрахункове дослідження густини та в'язкості трикомпонентних водних розчинів спиртів // Матеріали XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції

«Актуальні проблеми енергетики та екології». 5-7 жовтня 2016 року, м. Одеса. С. 59-60. *Власна доповідь.*

55. Мороз С.А., Хлиева О.Я., Железный В.П. Исследование влияния фуллеренов C60 на вязкость компрессорного масла ХФ16-12 и на плотность и давление насыщенных паров растворов хладагента R600a/масло ХФ16-12 // Матеріали 12 Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв. 12-14 жовтня 2016. С.202-204. *Доповідь співавтора.*

56. Хлиева О.Я., Рябикин С.С., Полюганич М.П., Гордейчук Т.В., Железный В.П. Экспериментальное исследование теплофизических свойств раствора пропиленгликоль/вода/этанол с добавками наночастиц Al_2O_3 // Матеріали 12 Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». Миколаїв. 12-14 жовтня 2016. С.199-201. *Доповідь співавтора.*

57. Chen G., Zhelezny V., Khliyeva O., Shestopalov K., Ierin V. Ecological and energy efficiency analysis of reasonability application of ejector air conditioner compared to vapor compression equipment // Proc. 24th International Congress of Refrigeration. - Yokohama, Japan, August 16 - 22, 2015. *Доповідь співавтора, входить до БД Scopus.*

58. Lukianov M., Melnyk A., Khliyeva O., Zhelezny V., Polyuganich M. An influence of the nanoparticles Al_2O_3 and TiO_2 admixtures on thermophysical properties and flow boiling heat transfer coefficient of the R600a/mineral oil solutions // Proc. of the 8th International Symposium On Turbulence, Heat and Mass Transfer. Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 15-18 September, 2015. P. 697 - 700. *Доповідь співавтора.*

59. Zhelezny V., Semenyuk Yu., Khliyeva O., Shimchuk N., Polyuganich M. Thermophysical properties of propylene glycol / water / TiO_2 nanoparticles mixtures // Proc. International Conference: "Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials" and 4th Rostocker International Symposium: "Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics". Baku, Azerbaijan, 17-18 September, 2015. P. 114. *Власна доповідь.*

60. Zhelezny V., Lukianov M., Khliyeva O., Nikulina A., Polyuganich M. Thermophysical properties of refrigerant R600a/mineral oil solutions with admixtures of the

Al₂O₃ nanoparticles // Proc.International Conference: “Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials” and 4 th Rostocker International Symposium: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”. Baku, Azerbaijan, 17-18 September, 2015. P. 115. *Власна доповідь.*

61. Хлиева О.Я., Рябикин С. С., Геллер В. З. Экспериментальная установка для исследования процесса теплообмена при течении нанофлюидов в трубе // Представлено на X международной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии». Одесса, 11-12 сентября, 2015. С. 173-175. *Власна доповідь.*

62. Хлиева О.Я., Полюганич М.П., Рябикин С. С. Поиск оптимального состава хладоносителя с добавкой наночастиц CuO. Результаты исследования // Представлено на X международной научно-технической конференции «Современные проблемы холодильной техники и технологии». Одесса, 11-12 сентября, 2015. С. 139-141. *Власна доповідь.*

63. Семенюк Ю.В., Никулин А.Г., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л. Применение модели RPI для прогнозирования коэффициента теплоотдачи при кипении чистых жидкостей и нанофлюидов // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 281-285. *Власна доповідь.*

64. Хлиева О.Я., Железный В.П., Лукьянов Н.Н., Игнатова Т.Ю., Пустовойтенко С.В. Эколого-энергетический анализ перспектив применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 269-272. *Власна доповідь.*

65. Хлиева О.Я., Шимчук Н.А., Рябикин С.С., Полюганич М.П., Железный В.П. Новый класс низкотемпературных нанотеплоносителей с улучшенными теплофизическими свойствами // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI

веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 290-293. *Власна доповідь.*

66. Рябикин С.С., Хлиева О.Я., Геллер В.З., Железный В.П. Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвекции нанохладоносителей в трубе // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 273-276. *Власна доповідь.*

67. Хлиева О.Я., Никулин А.Г., Лозовский Т.Л., Железный В.П. Исследование устойчивости нанофлюидов, перспективных для применения в холодильной технике // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г. СПб.: Университет ИТМО. Том. 1. С. 286-289. *Власна доповідь.*

68. Железный В.П., Хлиева О.Я., Лозовский Т.Л., Лукьянов Н.Н., Мороз С.А. Повышение эффективности парокomppressorных холодильных машин за счет использования нанотехнологий // Труды IX международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники». Промышленная теплотехника. №7 (37), 2015. С. 94-95. *Власна доповідь.*

69. Железный В.П., Хлиева О.Я. Перспективы новых рабочих тел на основе нанофлюидов для повышения энергоэффективности холодильного оборудования // Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв: НУК, 8-10 жовтня 2014 р. С. 307-309. *Доповідь співавтора.*

70. Крыжановский С.С., Косой Б.В., Хлиева О.Я. Экспериментальное исследование теплофизических свойств компрессорных масел ХМИ Азмол с добавлением наночастиц TiO_2 , AlO , Al_2O_3 // Book of Abstracts of Inter. Conference "Sciences, Engineering, and Humanities for the Energy World". May 27-30, 2009, Odessa, Ukraine. P. 85-86. *Доповідь співавтора.*

71. Khliyeva O.Ya., Zhelezny V.P., Kosoy B.V., Stepanova V.P. The End and New the Beginning: Alternative Refrigerants for the New Heat Pump Generation Ab-

stracts 5-th International Conference “Problems of Industrial Heat Engineering”, May 22-27, 2007, Kiev, Ukraine. P. 223-224. *Доповідь співавтора.*

72. Железный В.П., Хлиева О.Я., Степанова В.П. Проблемы существующих методов анализа эколого-энергетической эффективности: от коэффициента полезного действия к новым эколого-энергетическим индикаторам // Труды второй международной конференции по проектам совместного осуществления в Украине "Изменение климата и бизнес", Киев, 23-25 октября 2006. *Доповідь співавтора.*

73. Zhelezny V., Hlieva O., Artemenko S. Assessment of Total Equivalent of Greenhouse Gases Emission in the Industry // CD Proceedings of the 3rd Europeans Congress “Economics and Management of Energy in Industry” ISBN-972-99309-0-2, Lisboa, Portugal. 2004. *Доповідь співавтора.*

Додаток Б**ДОВІДНИКОВІ ДАННІ, ХАРАКТРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІ-
ДЖЕННЯ, ДОДАТКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРІМЕНТАЛЬНИХ ТА РОЗ-
РАХУНКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Таблиця Б.1 Порівняльні енергетичні характеристики різних холодильних циклів на різних холодоагентах*

№	Холодоагент Хімічна назва або склад у %	Тиск ви- парування, МПа	Тиск конден- сації, МПа	Витрата холо- доагенту на 1 кВт холодопро- дуктивності, г·с ⁻¹	Холодиль- ний коефіцієнт
Температура кипіння – 31,7 °С, температура конденсації 30 °С					
R744	Діоксид вуглецю	1,349	7,213	7,57	1,698
R170	Етан	1,012	4,655	6,51	1,681
R1270	Пропілен	0,199	1,305	3,72	2,880
R507A	R125/143a (50/50)	0,199	1,460	9,89	2,573
R404A	R125/143a/134a (44/52/4)	0,190	1,421	9,54	2,595
R502	R22/115 (48,8/51,2)	0,183	1,304	10,22	2,739
R22	Хлордіфторметан	0,152	1,192	6,44	2,967
R717	Аміак	0,100	1,167	0,93	3,007
Температура кипіння – 6,7 °С, температура конденсації 30 °С					
R744	Діоксид вуглецю	2,909	7,213	7,72	3,514
R170	Етан	2,024	4,655	6,13	3,588
R32	Діфторметан	0,653	1,928	3,87	5,924
R410A	R32/125 (50/50)	0,643	1,886	5,85	5,780
R507A	R125/143a (50/50)	0,503	1,460	8,70	5,564
R404A	R125/143a/134a (44/52/4)	0,486	1,421	8,42	5,598
R1270	Пропілен	0,476	1,305	3,40	5,975
R502	R22/115 (48.8/51.2)	0,457	1,304	3,40	5,799
R22	Хлордіфторметан	0,399	1,192	9,13	6,105
R407C	R32/125/134a (23/25/52)	0,396	1,267	6,13	5,930
R290	Пропан	0,385	1,079	6,03	5,987
R717	Аміак	0,332	1,167	5,98	6,254
R1234yf	2,3,3,3- тетрафторпропилен**	0,250	0,783	3,47	5,835
R134a	Тetraфторетан	0,228	0,770	0,90	6,063
R1237z e(E)	транс-2,3,3,3- тетрафторпропилен**	0,168	0,578	8,30	6,030
R600a	Ізобутан**	0,123	0,405	3,60	6,171

Температура кипіння 7,2 °С, температура конденсації 30 °С					
R32	Діфторметан	1,018	1,928	3,83	10,602
R410A	R32/125 (50/50)	1,000	1,886	5,71	10,379
R502	R22/115 (48.8/51.2)	0,703	1,304	8,67	10,474
R407C	R32/125/134a (23/25/52)	0,640	1,267	5,76	10,655
R22	Хлордіфторметан	0,626	1,192	5,85	10,885
R290	Пропан	0,588	1,079	3,29	10,743
R717	Аміак	0,559	1,167	0,89	11,186
R500	R12/152a (73.8/26.2)	0,458	0,880	6,65	10,925
R1234yf	2,3,3,3-тетрафторпропилен**	0,401	0,783	7,75	10,623
R12	Діфтордихлорметан	0,388	0,744	7,88	11,004
R134a	Тetraфторетан	0,377	0,770	6,21	10,903
R1237z e(E)	транс-2,3,3,3-тетрафторпропилен**	0,280	0,578	6,71	10,889
R600a	Ізобутан**	0,201	0,405	3,37	11,084
R600	Бутан**	0,134	0,283	3,06	11,226
123	Діхлортрифторетан	0,045	0,110	6,43	11,397
113	Трихлортрифторетан**	0,021	0,054	7,27	11,409

* за даними ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineering, Inc. Atlanta: ASHRAE. 2017. Данні були отримані з використанням NIST CYCLE_D 4.0. Переохолодження відсутнє, перегрів відсутній (за виключенням відзначених ** холодоагентів), втрати по контуру відсутні. Для сумішевих холодоагентів були використані середні температури у конденсаторі та випарнику. В усіх випадках тиск на вході в компресор відповідає насиченню та стиснення у компресорі вважалось адіабатним (постійна ентропія).

** у випадку, коли пар на виході з компресора був вологим, то приймався невеликий перегрів на вході в компресора.

Таблиця Б.2 - Фізичні та хімічні властивості ПАР, обраних для дослідження агрегативної стійкості нанофлюїдів

Коротке позначення, прийняте у звіті	SDBS	SDS	CTAB	Span 80
Найменування, заявлене виробником	Sodium dodecylbenzene sulfonate	Sodium dodecyl sulfate	Cetyl trimethylammonium bromide	Span 80
CAS №	CAS № 25155-30-0	CAS № 151-21-3	CAS № 57-09-0	CAS № 1338-43-8
Хімічна формула	$C_{18}H_{29}NaO_3S$	$C_{12}H_{25}NaO_4S$	$C_{19}H_{42}NBr$	$C_{24}H_{44}O_6$
Молярна маса, кг/кмоль	348,48	288,38	364,5	428,6
Природа ПАР	Аніонна	Аніонна	Катіонна	Неіоногенна
Форма випуску ПАР	Білий порошок	Білий порошок	Білий порошок	Блідо-жовта в'язка рідина
Виробник	Sigma-Aldrich	Sigma-Aldrich	Sigma-Aldrich	Sigma-Aldrich

Таблиця Б.3 – Фізико-хімічні характеристики мінеральних компресорних мастил (за даними поставників)

Характеристика	Масло №1	Масло №2
В'язкість кінематична, $mm^2 \cdot s^{-1}$	8,0 при 40 °C (за даними поставників)	16,0-19,0 при 50 °C (за даними поставників) 19,5 при 40 °C (власні вимірювання)
Густина при 20 °C, $kg \cdot m^{-3}$	870 (власні вимірювання)	850-880
Температура спалаху у відкритому тиглі (не нижче), К	426,15	447,0
Температура застигання (не вище), К	223,15	223,0
Корозійність металів в маслі	Негативна	Негативна
Зміст механічних домішок	Відсутній	Відсутній
Зміст води	Відсутній	Відсутній
Кислотне число, КОН на 1 г масла	0,02	0,02

Таблиця Б.4 – Співвідношення для апроксимаційних коефіцієнтів $a(w_{NP})$, $b(w_{NP})$ й $c(x_{NP})$ в рівняннях (4.3), (4.4) та (4.7) та $A(T)$, $B(T)$ й $C(T)$ в рівнянні (4.10)

№ рівнян- ня	$a(w_{NP})$	$b(w_{NP})$	$c(x_{NP})$
(4.3)	$1.75617 - 146.962 \cdot w_{NP}$	$-2.227 \cdot 10^{-6} + 2.841 \cdot 10^{-4} \cdot w_{NP}$	$1.300 \cdot 10^{-10} - 1.036 \cdot 10^{-8} \cdot w_{NP}$
(4.4)	$19.367 - 2.027 \cdot w_{NP}$	$-5237.7 + 802.79 \cdot w_{NP}$	-
(4.7)	$1.76641 - 1.37609 \cdot w_{NP}$	$-2.473 \cdot 10^{-6} + 2.899 \cdot 10^{-6} \cdot w_{NP}$	$1.318 \cdot 10^{-10} - 1.179 \cdot 10^{-10} \cdot w_{NP}$
	$a(T)$	$b(T)$	$c(T)$
(4.10)	$-0.006220 + \frac{486.30}{T^2}$	$-47.683 + \frac{1.49 \cdot 10^6}{T^2}$	$77226 + \frac{-2.8 \cdot 10^9}{T^2}$

де w_{NP} – масова частка наночастинок, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$; T – температура, К.

Таблиця Б.5 – Теплоємність нанофлюїдів ізопропанол/наночастинок Al_2O_3

T, (К)	$C_V^{(2)}$, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	C_P , $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	C_{Pm} , $\text{кДж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	$C_V^{(2)}$, $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	C_P , $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	C_{Pm} , $\text{кДж} \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
	Ізопропанол $M=60,095 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$			Нанофлюїд ізопропа- нол/наночастинок Al_2O_3 ($w_{NP}=0,0201 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$; $x_{NP}=0,0119$ $\text{моль} \cdot \text{моль}^{-1}$) $M=60,5946 \text{ г} \cdot \text{моль}^{-1}$		
190	1,8452	1,8490	111,12	1,8150	1,8203	110,28
200	1,8751	1,8785	112,89	1,8445	1,8493	112,03
210	1,9107	1,9138	115,01	1,8797	1,8840	114,14
220	1,9529	1,9556	117,52	1,9212	1,9251	116,63
230	2,0021	2,0045	120,46	1,9697	1,9733	119,55
240	2,0591	2,0613	123,88	2,0260	2,0292	122,93
250	2,1247	2,1268	127,81	2,0906	2,0935	126,83
260	2,1996	2,2016	132,31	2,1644	2,1671	131,29
270	2,2846	2,2866	137,42	2,2481	2,2507	136,35
280	2,3805	2,3827	143,19	2,3426	2,3452	142,08
290	2,4882	2,4907	149,68	2,4487	2,4513	148,51
300	2,6086	2,6115	156,94	2,5673	2,5700	155,70
310	2,7425	2,7460	165,02	2,6992	2,7023	163,71
320	2,8910	2,8952	173,99	2,8455	2,8490	172,60
330	3,0551	3,0602	183,90	3,0071	3,0111	182,42

T, (K)	$C_V^{(2)}$, кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	C_P , кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	C_{Pm} , кДж·кмоль ⁻¹ ·К ⁻¹	$C_V^{(2)}$, кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	C_P , кДж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹	C_{Pm} , кДж·кмоль ⁻¹ ·К ⁻¹
	Нанофлюїд ізопропанол/наночастинки Al ₂ O ₃ (w _{NP} = 0,0511 кг·кг ⁻¹ ; x _{NP} = 0,0307 моль·моль ⁻¹) M=61,3804 г·моль ⁻¹			Нанофлюїд ізопропанол/наночастинки Al ₂ O ₃ (w _{NP} = 0,0996 кг·кг ⁻¹ ; x _{NP} = 0,0608 моль·моль ⁻¹) M=62,6414 г·моль ⁻¹		
190	1,7684	1,7760	108,95	1,6956	1,7074	106,83
200	1,7973	1,8043	110,69	1,7235	1,7345	108,53
210	1,8317	1,8382	112,77	1,7568	1,7671	110,57
220	1,8724	1,8783	115,23	1,7960	1,8055	112,98
230	1,9199	1,9252	118,11	1,8418	1,8505	115,79
240	1,9748	1,9796	121,45	1,8948	1,9027	119,06
250	2,0380	2,0423	125,29	1,9557	1,9628	122,82
260	2,1101	2,1140	129,69	2,0252	2,0315	127,12
270	2,1919	2,1954	134,68	2,1040	2,1095	132,00
280	2,2842	2,2873	140,33	2,1929	2,1975	137,52
290	2,3879	2,3907	146,67	2,2926	2,2965	143,71
300	2,5036	2,5062	153,76	2,4041	2,4072	150,64
310	2,6325	2,6349	161,66	2,5280	2,5304	158,35
320	2,7753	2,7777	170,41	2,6654	2,6670	166,91
330	2,9330	2,9354	180,10	2,8171	2,8180	176,36

Таблиця Б.6 – Кореляції для прогнозування в'язкості нанофлюїдів

№ рівняння	Рівняння	Інтервал застосовності	Посилання
(1)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 + 2,5\varphi_{NP})$	$\varphi_{NP} < 0,02$ об. %	Einstein A. A new determination of molecular dimensions. Ann Phys 1906, 4, 37–62.
(2)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 + 4,5\varphi_{NP})$	$\varphi_{NP} < 0,40$ об. %	Hatschek E. The general theory of viscosity of two phase systems. Trans Faraday Soc 1913, 9, 80–92.
(3)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 - \varphi_{NP})^{-2,5}$	Інтервал застосовності не вказаний, але більш, ніж у рівняння (1)	Brinkman HC. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. J Chem Phys 1952, 20, 571–81.
(4)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 - \varphi_{NP}/\varphi_m)^{-2,5}$	Широкий інтервал концентрацій	Roscoe R. The viscosity of suspensions of rigid spheres. J Appl Phys 1952, 267, 3–6.
(5)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 + \eta \cdot \varphi_{NP})$ $\eta = \frac{0,312 \cdot r}{\ln 2 \cdot r - 1,5} + 2 - \frac{0,5}{\ln 2 \cdot r - 1,5} - \frac{1,872}{r}$ r - коефіцієнт форми для наночастинок	Низька концентрація наночастинок, враховується форма наночастинок	Brenner H, Condiff DW. Transport mechanics in systems of orientable particles. Part IV. Convective transport. J Colloid Int Sci 1974, 47, 199–264.
(6)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} (1 + 2,5\varphi_{NP} + 6,2\varphi_{NP}^2)$	Інтервал застосовності не вказаний, але більш, ніж у рівняння (1)	Batchelor G. The effect of Brownian motion on the bulk stress in the suspension of spherical particles. J Fluid Mech 1977, 83, 97–117.
(7)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} \left(\left((1 + 2,5\varphi_{NP}) + \frac{2,25}{1 + (h/2a)} \times \right) \times \left(\frac{1}{h/a} - \frac{1}{1 + h/a} - \frac{1}{(1 + h/a)^2} \right) \right)$	Сферична форма наночастинок	Graham AL. On the viscosity of suspensions of solid spheres. Appl Sci Res 1981, 37, 275–86.

h та a – відстань між частинками та радіус наночастинок, відповідно

(8)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} \left(1 - \varphi_{NP} / \varphi_m\right)^{-[\eta]\varphi_m}$	Сферична форма наночастинок, широкий інтервал концентрацій	Krieger IM, Dougherty T. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres. Trans Soc Rheol 1959, 3, 137–52.
(9)	$\eta_{NF} = \eta_{BF} \left(1 + 1,5\varphi_{NP}\right)^{\left(\frac{\varphi_{NP}}{1-\varphi_m}\right)}$	-	Nielsen LE. Generalized equation for the elastic moduli of composite materials. J Appl Phys 1970, 41, 4626–7.

де φ_{NP} - об'ємна частка наночастинок, $\text{м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$; η_{NF} й η_{BF} - кінематична в'язкість нанофлюїду та базової рідини, відповідно, $\text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$; φ_m - відносна щільність пакування частинок, при вільному розташуванні сферичних частинок приблизно $\varphi_m = 0,64$.

Таблиця Б.7 - Експериментальні дані по кінематичній в'язкості і густині нанофлюїдів ізопропанол/наночастинки Al_2O_3 *

Густина, кг м^{-3}	$\rho_{NF} = \exp(a - b \cdot T^2)$ $T=263-343 \text{ К}$		
	$w_{NP}, \text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	a	b
	0,0000	6,8266	$-1,8518 \cdot 10^{-6}$
	0,00917	6,8420	$-1,8518 \cdot 10^{-6}$
	0,01811	6,8484	$-1,8518 \cdot 10^{-6}$
	0,04008	6,8660	$-1,8518 \cdot 10^{-6}$
	0,06646	6,8814	$-1,8518 \cdot 10^{-6}$
В'язкість, $\text{мм}^2 \text{с}^{-1}$	$\nu_{NF} = \nu_{BF} \cdot \left(1 + (41,52 - 90,16 \cdot 10^{-3} \cdot T) \cdot w_{NP}\right)$ $T=278-343 \text{ К}, w_{NP} = 0 - 0,11 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$		

де w_{NP} - масова частка наночастинок, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$; T - температура, К ; ν_{BF} - кінематична в'язкість базової рідини (ізопропанол), $\text{мм}^2 \text{с}^{-1}$.

* За даними Zhelezny V., Geller V., Semenyuk Y., Nikulin A., Lukianov N., Lozovsky T., Shymchuk M. Effect of Al_2O_3 nanoparticles additives on the density, saturated vapor pressure, surface tension and viscosity of isopropyl alcohol // Int. J. Thermophys. 2018. Vol. 39 (38).

Таблиця Б.8 - Експериментальні значення густини розчинів

R600a/мінеральне масло

T, K	$w_R, \text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	T, K	$w_R, \text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$
258,32		679,4	258,22		827,5
283,21		655,3	283,11		814,3
308,12	0,6588	630,5	308,33		796,1
333,24		605,1	333,14		782,2
353,22		582,2	353,21	0,1725	767,2
258,15		742,6	258,12		886,6
283,12		724,2	283,18		871,9
308,13	0,4310	703,4	308,33		857,5
333,32		683,3	333,14		842,6
353,23		668,2	353,21	0,00	830,9

Стандартна невизначеність $u(T) = 0,1 \text{ K}$. Розширена невизначеність $U(\rho) = (3,92 - 6,07) \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ (0,95 довірчий інтервал).

Таблиця Б.9 - Експериментальні значення капілярної сталої і поверхневого натягу розчинів R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло / C_{60}

T, K	$w_R, \text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$a^2, \text{мм}^2$	$\sigma, \text{мН} \cdot \text{м}^{-1}$	T, K	$w_R, \text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$a^2, \text{мм}^2$	$\sigma, \text{мН} \cdot \text{м}^{-1}$
R600a/мінеральне масло				R600a/мінеральне масло / фулерени C_{60} ($w_{C_{60}} = 0,0020 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ в маслі)			
282,80	0,7246	4,311	13,22	283,53	0,7155	4,216	12,97
286,45	0,5155	4,442	15,92	285,37	0,4523	4,497	15,61
283,06	0,2052	5,509	21,63	284,86	0,2705	5,111	19,41
285,48	0,00	7,225	30,97	283,15	0,00	7,143	30,68
293,05	0,7217	4,163	12,58	293,30	0,7129	4,123	12,50
293,14	0,5037	4,451	14,90	293,10	0,2671	4,508	15,51
293,50	0,2009	5,588	21,73	293,23	0,4481	5,198	19,58
293,49	0,00	7,178	30,56	293,22	0,00	7,062	30,07
303,15	0,7177	4,104	12,21	303,26	0,7093	4,045	12,08
304,04	0,4992	4,426	14,61	303,31	0,4422	4,502	15,31
302,33	0,1991	5,664	21,84	303,73	0,2625	5,207	19,41
303,02	0,00	7,082	29,90	303,54	0,00	6,995	29,52

Стандартна невизначеність $u(T) = 0,1 \text{ K}$. Розширена невизначеність $U(a^2) = (0,025 - 0,041) \text{ мм}^2$, $U(\sigma) = (0,15 - 0,21) \text{ мН} \cdot \text{м}^{-1}$ (0,95 довірчий інтервал).

Таблиця Б.10 - Експериментальні значення тиску насичених парів розчинів
R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло / C₆₀

R600a/мінеральне масло			R600a/мінеральне масло/фулерени C ₆₀ (w _{C60} =0,0020 кг·кг ⁻¹ в маслі)		
T, К	w _R , кг·кг ⁻¹	P, кПа	T, К	w _R , кг·кг ⁻¹	P, кПа
354,61	0,6530	1217	353,61	0,6385	1199
333,84		802	333,22		789
308,91		459	308,10		457
282,90		202	283,61		212
353,33	0,4181	1015	353,20	0,4072	1008
345,30		887	333,91		719
333,62		709	308,30		423
308,73		418	283,53		201
353,55	0,3194	933	353,48	0,3009	908
333,49		641	333,34		631
308,34		368	308,25		357
283,18		189	283,71		197

Стандартна невизначеність $u(T) = 0,1$, К. Розширена невизначеність $U(P_S) = (9 - 11)$ кПа (0,95 довірчий інтервал).

Таблиця Б.11 - Експериментальні значення динамічної в'язкості розчинів
R600a/мінеральне масло і R600a/мінеральне масло / C₆₀

R600a/мінеральне масло				R600a/мінеральне масло / фулерени C ₆₀ (w _{C60} =0,0020 кг·кг ⁻¹ в маслі)			
T, К	w _R , кг·кг ⁻¹	v, мм ² ·с ⁻¹	η, мПа·с	T, К	w _R , кг·кг ⁻¹	v, мм ² ·с ⁻¹	η, мПа·с
252,95	0,7491	-	0,4328	258,12	0,7435	-	0,3992
254,20		-	0,4368	262,53		-	0,3690
258,14		-	0,4046	272,83		-	0,3292
262,37		-	0,3713	273,89		-	0,3190
263,09		-	0,3747	282,79		-	0,2863
271,39		-	0,3319	252,84		-	1,3365
272,38		-	0,3254	253,47		-	1,1946
282,97		-	0,2900	258,20		0,4812	1,0245
252,70	0,4794	-	1,4390	263,17	-	0,8697	
253,34		-	1,3963	272,21	-	0,6905	

Продовження таблиці Б.11

R600a/мінеральне масло				R600a/мінеральне масло / фулерени C ₆₀ (w _{C60} =0,0020 кг·кг ⁻¹ в маслі)			
T, К	w _R , кг·кг ⁻¹	v, мм ² ·с ⁻¹	η, мПа·с	T, К	w _R , кг·кг ⁻¹	v, мм ² ·с ⁻¹	η, мПа·с
258,11		-	1,2213	258,19		-	2,5278
258,70		-	1,1700	263,36		-	2,1265
263,13	0,4794	-	1,0815	265,09		-	2,0200
272,82		-	0,8655	272,40	0,3514	-	1,5617
282,14		-	0,7407	273,11		-	1,5800
283,26		-	0,7255	283,02		-	1,2507
253,07		-	3,2385	283,74		-	1,2310
258,07		-	2,6970	252,53		909,9	809,8
262,61	0,3498	-	2,3215	255,09		696,8	619,1
271,66		-	1,7915	263,00	0,000	329,5	291,2
283,24		-	1,3180	273,64		140,2	123,0
252,44		988,1	879,4	283,16		74,12	64,63
258,93		497,1	440,5				
272,61	0,000	153,4	134,7				
273,12		148,2	130,1				
283,02		74,99	65,40				

Стандартна невизначеність $u(T) = 0,1$, К. Розширена невизначеність $U(v) = (0,25 - 3,51)$ мм²·с⁻¹, $U(\eta) = (0,02 - 0,88)$ мПа·с (0,95 довірчий інтервал).

Таблиця Б.12 – Кореляції для прогнозування теплофізичних властивостей рідин

Властивість	Рівняння	Кросоверна функція	
Капілярна стала	$a^2 = a_0(w_{SR}) \cdot t^{n \cdot \psi(t)}$	$\psi(t) = 1 - 0.04762 \cdot \frac{t^{1.5}}{\ln t}$ де $t = 1 - T / \overline{T}_C(w_{SR})$	(1)
Різниця орт-обари-чних густин	$\Delta\rho = \rho_0(w_R) \cdot t^{\beta \cdot F(t)}$	$F(t) = 1 - 1.2278 \cdot \frac{t^2}{\ln t} + 1.3282 \cdot \frac{t^3}{\ln t}$ де $t = 1 - T / \overline{T}_C(w_R)$	(2)
Поверхневий натяг	$\sigma = \sigma_0(w_{SR}) \cdot t^{\mu \cdot f(t)}$	$f(t) = 1 - 0.03534 \cdot \frac{t^{1.5}}{\ln t} - 0.31656 \cdot \frac{t^2}{\ln t} + 0.34246 \cdot \frac{t^3}{\ln t}$ де $t = 1 - T / \overline{T}_C(w_R)$	(3)
В'язкість	$\eta^{-1} = a_\eta (V - Or) ^{b_\eta}$	-	(4)
Густина на лінії кипіння	$\ln \rho = \ln(\overline{\rho}_C(w_R)) + B_1(w_R) \cdot \Omega^{\beta \cdot F_1(\Omega)}$	$F_1(\Omega) = 1 - 1.113 \cdot \Omega^{0.4} / \ln \Omega$ де $\Omega = \ln(\overline{T}_C(w_R)/T)$	(5)
Тиск насичених парів	$\ln P = \ln(\overline{P}_C(w_{SR})) - \alpha_R(w_{SR}) \cdot \Omega + b \cdot \Omega^{2.64}$	$\Omega = \ln(\overline{T}_C(w_{SR})/T)$	(6)

де w_R - масова частка холодоагенту в об'ємі рідкої фази; w_{SR} - масова частка холодоагенту в поверхневому шарі рідкої фази; a_0 , σ_0 , ρ_0 – критичні амплітуди, які залежать від властивостей даної термодинамічної системи; n , β , μ – критичні індекси для густини і поверхневого натягу, $\psi(t)$, $F(t)$, $f(t)$, $F_1(\Omega)$ – кросоверні функції для нормальних рідин; $t = 1 - T / \overline{T}_C$ и $\Omega = \ln(\overline{T}_C / T)$ - зведені температури; \overline{T}_C - псевдокритична температура; b , a_η та b_η – коефіцієнти, які залежать від індивідуальних властивостей речовин; $\overline{\rho}_C$ та \overline{P}_C - псевдокритичні густина і тиск, відповідно; B_1 – коефіцієнт (критична амплітуда) рівняння розширеного скейлінгу для густини рідини на лінії насичення; α_R - критерій Ріделя.

Таблиця Б.13 – Значення коефіцієнтів рівнянь (1) – (6) таблиці Б.12

$w_R,$ кг·кг ⁻¹	$\bar{T}_C(w_R),$ К	$\rho_0,$ кг·м ⁻³	$\bar{\rho}_C,$ кг м ⁻³	B_1	a_η	b_η
R600a/мінеральне масло						
0,00	746,4	1088,6	276,2	1,6631	-	-
0,10	616,4	1070,3	271,5	1,7049	-	-
0,20	563,2	1050,4	266,5	1,7121	-	-
0,30	524,4	1028,9	261,0	1,7136	-	-
0,40	493,9	1005,8	255,2	1,7129	-	-
0,50	469,7	981,1	248,9	1,7125	8568,6	2,07234
0,60	450,2	954,7	242,2	1,7148	2204,4	1,67015
0,70	434,8	926,8	235,1	1,7224	548,61	1,28368
0,80	422,9	897,2	227,6	1,7386	160,80	0,93263
0,90	414,2	866,0	219,7	1,7675	52,511	0,63695
1,00	408,3	833,2	211,4	1,8133	23,927	0,41373
R600a/мінеральне масло / фулерени C ₆₀ (w _{C60} =0,002 кг·кг ⁻¹ в маслі)						
0,00	746,4	1090,6	276,7	1,6631	-	-
0,10	617,0	1072,2	272,0	1,7044	-	-
0,20	563,9	1052,2	266,9	1,7113	-	-
0,30	525,2	1030,6	261,4	1,7126	-	-
0,40	494,8	1007,4	255,6	1,7117	-	-
0,50	470,4	982,6	249,3	1,7112	9428,1	2,08277
0,60	450,8	956,2	242,6	1,7134	2389,0	1,68028
0,70	435,2	928,1	235,4	1,7211	572,78	1,28524
0,80	423,2	898,5	227,9	1,7377	162,97	0,92737
0,90	414,3	867,2	220,0	1,7670	51,684	0,62988
1,00	408,2	834,3	211,7	1,8137	23,510	0,40495

Таблиця Б.14 – Значення коефіцієнтів рівнянь (1) – (6) таблиці Б.12

$w_{SR},$ кг·кг ⁻¹	R600a/мінеральне масло			R600a/мінеральне масло / фулерени C ₆₀ (w _{C60} =0,002 кг·кг ⁻¹ в маслі)		
	$\sigma_0,$ мН·м ⁻¹	α_R	$\bar{P}_C(w_{SR}),$ Па·10 ⁻⁵	$\sigma_0,$ мН·м ⁻¹	α_R	$\bar{P}_C(w_{SR}),$ Па·10 ⁻⁵
0,00	55,700	-	-	54,898	-	-
0,10	59,490	-	-	58,468	-	-
0,20	60,008	-	-	59,099	-	-
0,30	60,402	-	-	59,374	-	-
0,40	60,677	-	-	59,401	-	-
0,50	60,714	2,8813	31,89	59,167	2,8121	31,46
0,60	60,368	3,7438	35,15	58,620	3,6841	34,88
0,70	59,480	4,5374	36,29	57,698	4,4877	36,16

Продовження таблиці Б.14

0,80	57,883	5,2622	36,03	56,323	5,2230	36,00
0,90	55,398	5,9181	35,30	54,414	5,8897	35,26
1,00	51,835	6,5052	35,12	51,878	6,4881	34,94

Таблиця Б.15 – Експериментальні значення

$t_{in},$ °C	$t_{mean\ flow},$ °C*	$t_{mean\ wall},$ °C*	G, кг·с ⁻¹	$v,$ м·с ⁻¹	Re	$\alpha,$ Вт·м ⁻² ·°C ⁻¹	Nu
$w_{NP}=0.00\text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$							
14.83	16.76	19.28	0.00215	0.278	296	310	7.73
14.63	16.31	20.24	0.00376	0.485	509	303	7.54
15.21	16.93	23.62	0.00673	0.870	929	327	8.14
15.20	17.13	26.14	0.00871	1.126	1210	351	8.76
15.18	17.10	27.86	0.01118	1.446	1553	376	9.38
15.55	17.43	29.04	0.01282	1.659	1798	391	9.75
14.60	16.53	29.53	0.01467	1.897	2000	410	10.2
14.83	16.87	26.35	0.01654	2.139	2280	671	16.7
15.30	17.37	22.38	0.01949	2.523	2729	1519	37.9
15.87	17.90	22.42	0.02144	2.777	3052	1831	45.7
14.50	16.54	20.87	0.02517	3.253	3433	2241	55.8
14.93	16.89	20.85	0.03031	3.921	4179	2825	70.4
15.63	17.61	21.47	0.03341	4.327	4713	3243	80.9
15.34	17.31	21.00	0.03837	4.970	5363	3857	96.2
14.89	16.97	22.08	0.01910	2.469	2641	1462	36.4
25.85	27.93	31.23	0.00202	0.265	377	254	6.41
25.07	27.00	31.14	0.00315	0.412	574	289	7.29
24.68	26.49	31.57	0.00430	0.562	774	301	7.58
24.51	26.28	32.40	0.00553	0.723	991	316	7.97
24.52	26.39	33.32	0.00614	0.804	1104	325	8.19
24.60	26.46	34.43	0.00742	0.970	1334	339	8.54
24.53	26.39	35.15	0.00842	1.101	1512	352	8.86
24.83	26.64	31.90	0.01229	1.609	2222	833	21.0
24.90	26.72	30.10	0.01675	2.191	3033	1793	45.2
25.63	27.47	30.58	0.02064	2.703	3805	2425	61.1
24.65	26.53	29.55	0.02500	3.271	4506	3074	77.4
24.84	26.66	29.56	0.02949	3.859	5332	3644	91.8
25.54	27.44	30.43	0.03291	4.312	6063	4149	104.6
25.75	27.66	30.57	0.03942	5.167	7302	5156	130.0
25.21	27.05	32.14	0.01214	1.588	2216	867	21.9
35.02	37.00	40.31	0.00160	0.211	362	199	5.07
34.65	36.73	41.67	0.00305	0.403	686	267	6.79
35.37	37.32	43.36	0.00440	0.583	1002	296	7.54
34.61	36.61	43.98	0.00581	0.768	1304	328	8.34
34.56	36.68	45.09	0.00655	0.866	1473	343	8.74
34.77	36.86	46.32	0.00787	1.041	1776	361	9.18

Продовження таблиці Б.15

34.97	36.94	46.39	0.00852	1.127	1926	370	9.43
35.38	37.30	40.43	0.01152	1.524	2621	1473	37.5
34.78	36.72	39.63	0.01350	1.786	3039	1865	47.4
35.19	37.08	39.71	0.01656	2.191	3753	2476	63.0
34.53	36.42	38.97	0.02069	2.736	4628	3176	80.8
35.16	36.99	39.37	0.02477	3.278	5602	3957	100.7
34.60	36.43	38.77	0.02928	3.872	6550	4746	120.7
35.66	37.49	39.78	0.03290	4.358	7516	5508	140.2
35.27	37.08	39.34	0.03718	4.922	8425	6244	158.9
35.08	36.96	39.26	0.04018	5.320	9084	6862	174.7
35.09	36.99	39.77	0.01340	1.772	3031	1905	48.5
$w_{NP}=0.00387 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$							
16.24	18.24	21.11	0.00226	0.294	293	300	7.45
15.34	17.25	21.28	0.00359	0.466	448	319	7.92
14.80	16.79	21.55	0.00407	0.528	499	318	7.91
14.16	15.96	21.85	0.00568	0.736	676	324	8.05
14.68	16.53	23.57	0.00670	0.869	814	329	8.17
14.77	16.69	24.87	0.00782	1.016	957	344	8.54
14.62	16.63	26.14	0.00903	1.172	1102	357	8.85
14.62	16.31	26.37	0.01226	1.591	1478	386	9.58
15.28	17.16	24.67	0.01695	2.204	2110	801	19.9
15.22	17.12	21.69	0.02017	2.622	2507	1577	39.2
15.51	17.38	21.32	0.02542	3.307	3190	2278	56.6
15.16	17.10	21.06	0.02933	3.814	3642	2702	67.1
15.17	17.12	21.01	0.03289	4.276	4087	3108	77.2
15.16	17.17	21.07	0.03647	4.745	4541	3544	88.0
15.54	17.42	26.16	0.01651	2.147	2074	670	16.7
24.67	26.69	29.95	0.00218	0.287	367	266	6.68
24.05	26.05	30.45	0.00321	0.422	530	287	7.19
24.95	27.00	32.76	0.00422	0.556	716	296	7.43
25.32	27.27	33.79	0.00525	0.692	897	311	7.82
25.32	27.28	34.77	0.00631	0.831	1077	326	8.19
25.29	27.32	35.91	0.00726	0.955	1240	339	8.51
25.31	27.23	36.55	0.00859	1.131	1465	350	8.78
25.33	27.17	31.55	0.01298	1.709	2210	1073	26.9
25.56	27.24	30.33	0.01666	2.194	2841	1786	44.9
25.04	26.94	30.19	0.02093	2.755	3541	2405	60.4
25.48	27.33	30.38	0.02482	3.271	4245	2972	74.6
25.10	27.07	30.27	0.02889	3.805	4905	3517	88.3
25.57	27.56	30.72	0.03258	4.294	5605	4056	101.9
25.29	27.25	30.34	0.03731	4.917	6366	4695	117.9
25.10	26.81	29.94	0.01650	2.173	2783	1776	44.6
36.09	38.03	41.91	0.00214	0.284	470	224	5.68
34.64	36.56	41.38	0.00330	0.439	703	273	6.92

Продовження таблиці Б.15

34.56	36.51	42.39	0.00433	0.576	922	297	7.52
34.62	36.62	43.75	0.00544	0.724	1162	316	8.02
34.49	36.61	45.07	0.00651	0.866	1390	339	8.59
34.66	36.86	46.14	0.00713	0.948	1531	351	8.90
34.77	36.94	46.99	0.00812	1.080	1746	363	9.21
34.93	36.82	39.85	0.01236	1.645	2651	1604	40.7
35.16	36.92	39.40	0.01635	2.175	3513	2392	60.7
35.48	37.35	39.89	0.01966	2.616	4262	3011	76.4
35.24	37.04	39.42	0.02575	3.428	5546	4042	102.5
35.11	36.97	39.40	0.02958	3.938	6363	4720	119.7
35.00	36.94	39.47	0.03288	4.376	7067	5251	133.2
35.56	37.44	39.83	0.03800	5.062	8256	6261	158.9
35.14	36.93	39.38	0.01740	2.314	3738	2637	66.9
$w_{NP}=0.00992 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$							
16.52	18.44	21.70	0.00274	0.354	343	304	7.51
15.55	17.48	21.96	0.00395	0.510	480	320	7.91
14.65	16.69	22.86	0.00530	0.685	627	327	8.09
14.29	16.30	23.31	0.00623	0.805	728	333	8.22
14.55	16.40	24.36	0.00786	1.015	921	342	8.44
14.89	16.89	26.18	0.00875	1.131	1043	353	8.72
14.98	16.84	27.03	0.01104	1.427	1313	377	9.32
14.90	16.78	28.26	0.01286	1.663	1527	392	9.69
14.85	16.63	29.37	0.01653	2.137	1952	432	10.7
15.25	17.07	21.50	0.02071	2.679	2482	1589	39.3
14.62	16.49	20.63	0.02447	3.164	2876	2057	50.8
14.82	16.66	20.46	0.02901	3.752	3429	2613	64.5
15.51	17.39	21.12	0.03443	4.459	4173	3257	80.5
15.69	17.47	22.20	0.01841	2.384	2237	1298	32.1
25.63	27.45	30.83	0.00245	0.321	397	260	6.49
25.51	27.50	31.62	0.00289	0.379	470	274	6.85
24.52	26.45	31.69	0.00419	0.549	663	301	7.50
24.52	26.39	32.68	0.00538	0.704	849	312	7.79
24.66	26.63	34.31	0.00661	0.866	1051	331	8.27
24.64	26.70	35.25	0.00715	0.937	1139	338	8.44
24.54	26.49	35.68	0.00847	1.108	1341	352	8.79
24.76	26.63	37.19	0.01098	1.438	1746	381	9.50
25.00	26.91	36.60	0.01264	1.657	2025	489	12.2
25.16	27.06	30.64	0.01717	2.251	2761	1785	44.6
25.63	27.51	30.76	0.02094	2.747	3405	2375	59.3
24.84	26.66	29.69	0.02553	3.346	4063	3001	74.9
25.23	27.06	30.03	0.02922	3.831	4697	3528	88.1
24.93	26.84	29.85	0.03327	4.361	5317	4123	102.9
25.63	27.58	30.63	0.03730	4.895	6076	4711	117.7
24.68	26.56	30.08	0.01718	2.251	2727	1794	44.8

Продовження таблиці Б.15

35.72	37.63	41.50	0.00230	0.305	470	234	5.91
35.22	37.23	41.85	0.00307	0.406	621	276	6.95
35.55	37.48	43.31	0.00418	0.554	851	286	7.22
35.23	37.17	44.01	0.00537	0.711	1086	314	7.92
35.08	37.09	45.34	0.00671	0.888	1354	338	8.53
35.23	37.34	46.93	0.00785	1.040	1592	357	9.01
35.11	37.12	46.82	0.00852	1.128	1720	364	9.19
34.18	36.18	40.00	0.01097	1.451	2174	1179	29.7
34.58	36.47	39.67	0.01242	1.643	2474	1519	38.3
35.08	36.96	39.68	0.01671	2.213	3363	2378	60.0
35.47	37.39	40.04	0.02044	2.708	4150	3076	77.6
34.92	36.87	39.48	0.02479	3.283	4980	3825	96.4
35.31	37.18	39.63	0.02901	3.844	5865	4573	115.4
34.91	36.94	39.63	0.02905	3.847	5844	4513	113.8
35.48	37.45	39.99	0.03316	4.395	6741	5319	134.2
35.00	37.00	39.59	0.03567	4.726	7184	5688	143.4
34.50	36.33	38.78	0.02201	2.913	4373	3371	85.0
$w_{NP}=0.0312 \text{ кг}\cdot\text{кг}^{-1}$							
16.71	18.62	21.87	0.00283	0.360	296	309	7.50
16.05	18.10	22.78	0.00387	0.493	400	313	7.60
15.02	17.06	23.00	0.00508	0.645	510	321	7.78
14.36	16.40	23.98	0.00677	0.859	667	335	8.11
15.16	17.22	25.79	0.00760	0.966	766	336	8.15
15.01	17.12	27.02	0.00907	1.152	911	355	8.61
14.85	16.83	27.69	0.01119	1.421	1115	375	9.08
14.83	16.88	29.34	0.01289	1.637	1287	390	9.45
14.81	16.67	30.33	0.01696	2.154	1683	425	10.3
15.16	17.02	23.51	0.02042	2.596	2047	1072	26.0
15.68	17.56	22.12	0.02466	3.138	2509	1868	45.3
14.84	16.82	21.21	0.02963	3.768	2953	2454	59.5
15.16	17.14	21.35	0.03428	4.362	3448	2957	71.7
15.67	17.47	30.89	0.01722	2.191	1748	426	10.3
25.79	27.77	31.19	0.00224	0.289	293	251	6.16
25.32	27.18	31.54	0.00336	0.433	434	277	6.79
25.00	27.00	32.46	0.00416	0.535	535	293	7.18
24.68	26.67	33.54	0.00561	0.722	717	314	7.68
24.53	26.55	34.26	0.00637	0.820	812	321	7.85
24.54	26.57	35.32	0.00751	0.966	957	337	8.25
24.68	26.71	36.38	0.00867	1.116	1108	350	8.58
24.54	26.52	37.24	0.01041	1.339	1325	370	9.06
24.95	26.89	38.69	0.01240	1.598	1592	393	9.62
25.17	27.05	31.60	0.01643	2.116	2116	1314	32.2
24.68	26.62	30.41	0.02140	2.756	2730	2109	51.6
25.16	27.13	30.70	0.02550	3.286	3291	2727	66.8

Продовження таблиці Б.15

25.48	27.44	30.80	0.02945	3.797	3827	3323	81.4
24.94	26.96	30.39	0.03260	4.200	4191	3698	90.6
25.62	27.63	30.96	0.03616	4.664	4717	4235	103.8
25.50	27.40	31.29	0.01866	2.406	2423	1761	43.1
35.60	37.75	41.92	0.00224	0.292	357	235	5.81
34.32	36.19	41.12	0.00355	0.461	549	273	6.74
34.36	36.49	42.72	0.00415	0.539	646	286	7.08
35.13	37.04	44.10	0.00561	0.730	882	308	7.63
35.23	37.17	45.25	0.00662	0.862	1044	323	7.99
35.39	37.54	47.21	0.00755	0.984	1199	343	8.48
34.62	36.73	47.45	0.00909	1.183	1422	364	9.01
34.62	36.74	48.42	0.01028	1.338	1608	379	9.37
34.62	36.67	41.78	0.01218	1.584	1903	990	24.5
34.92	36.90	40.35	0.01608	2.094	2523	1877	46.4
35.08	36.93	39.78	0.02093	2.725	3285	2768	68.5
34.59	36.54	39.36	0.02534	3.297	3949	3548	87.7
35.08	37.03	39.77	0.02988	3.891	4698	4306	106.5
35.23	37.20	39.87	0.03453	4.498	5446	5144	127.2
34.77	36.69	39.82	0.01690	2.199	2640	2092	51.7
$w_{NP}=0.0471 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$							
17.65	20.03	23.08	0.00205	0.258	198	295	7.08
15.62	17.74	23.28	0.00450	0.564	392	312	7.46
14.59	16.65	24.12	0.00669	0.839	545	335	8.01
15.11	17.01	25.44	0.00840	1.054	701	345	8.24
15.20	17.09	27.15	0.01097	1.376	920	373	8.91
15.34	17.27	29.19	0.01340	1.682	1137	395	9.45
14.87	16.79	29.93	0.01583	1.986	1302	419	10.0
14.83	16.74	31.32	0.01851	2.321	1517	439	10.5
15.22	17.18	32.82	0.02124	2.666	1792	484	11.6
15.15	17.16	23.89	0.02293	2.878	1932	1248	29.8
15.16	17.14	22.68	0.02487	3.123	2093	1616	38.6
15.17	17.17	21.98	0.02914	3.659	2456	2196	52.5
15.17	17.16	21.58	0.03458	4.341	2913	2828	67.6
15.23	17.19	23.70	0.02237	2.808	1888	1224	29.3
26.05	28.06	31.38	0.00217	0.276	243	251	6.08
24.60	26.58	30.79	0.00310	0.394	342	277	6.68
24.52	26.44	31.87	0.00427	0.542	471	286	6.91
25.42	27.31	33.66	0.00531	0.675	592	302	7.31
25.24	27.08	34.61	0.00692	0.880	769	322	7.78
25.20	27.21	36.09	0.00780	0.992	869	337	8.15
24.95	27.14	37.34	0.00845	1.074	940	347	8.37
24.96	27.01	37.82	0.01009	1.283	1121	364	8.80
25.16	27.09	38.97	0.01250	1.589	1389	388	9.36
24.84	26.65	37.48	0.01692	2.151	1871	539	13.0

Продовження таблиці Б.15

25.16	27.03	31.33	0.02048	2.605	2275	1703	41.1
25.00	26.96	30.87	0.02497	3.176	2772	2392	57.8
25.32	27.28	30.91	0.02969	3.777	3308	3047	73.6
24.99	27.03	30.64	0.03458	4.398	3842	3733	90.2
24.96	27.10	32.56	0.01883	2.393	2093	1406	34.0
36.31	38.51	42.71	0.00202	0.260	243	213	5.21
34.51	36.56	41.27	0.00303	0.389	361	264	6.44
34.32	36.21	42.15	0.00441	0.565	525	281	6.84
34.47	36.49	43.58	0.00529	0.678	631	300	7.31
34.77	36.90	45.29	0.00631	0.810	754	320	7.80
34.92	37.01	46.40	0.00762	0.978	911	339	8.27
34.82	37.01	47.53	0.00843	1.082	1007	350	8.55
35.08	37.03	48.40	0.01108	1.424	1325	380	9.27
35.13	37.14	49.80	0.01263	1.623	1511	402	9.80
34.62	36.54	40.38	0.01659	2.131	1979	1667	40.6
34.77	36.68	39.99	0.02027	2.603	2420	2341	57.1
35.50	37.45	40.52	0.02437	3.134	2920	3109	75.9
34.90	36.83	39.77	0.02828	3.635	3379	3716	90.6
35.54	37.49	40.31	0.03329	4.281	3988	4643	113.3
35.12	36.98	40.22	0.01860	2.389	2223	2138	52.1

* $t_{сер}$ – середня по довжині робочої ділянки температура рідини

Таблиця Б.16 – Потенціал глобального потеплення GWP для деяких холодоагентів*

Холодоагент	GWP, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$
CO ₂	1
HFC-32	677
HFO-1234yf	<1
HFC-134a	1300
HC-290	3
HFC-404A	3943
HFC-410A	1924

* за даними: IIR, Guideline for Life Cycle Climate Performance, International Institute of Refrigeration, 2016.

Таблиця Б.17 – Річні витрати холодоагенту L_{annual} для різного типу холодильного обладнання (% в рік від маси заправки холодоагенту в систему)*

	Ніжнє значення	Характерне для даного типу обладнання	Високе значення
Холодильне застосування			
Централізовані системи (наприклад, у супермаркетах), конденсаторні агрегати	5 %	12,5 – 15 %	23 %
Чілери	5 %	7 %	16 %
Автономні холодильні системи	-	2 %	-
Автодорожні транспортні	15 %	20 %	23 %
Морські	20 %	30 %	40 %
Кондиціонування повітря			
Чілери	5 %	7 %	9 %
Руфтопи (системи кондиціонування на покрівлі будинку)	4 %	5 %	9 %
Спліт системи	3 %	4 %	9 %
Віконні, портативні	-	2%	-

* за даними: Methods of calculating total equivalent warming impact (TEWI). Best practice guidelines, Australian Institute of Refrigeration, Air-conditioning and Heating. AIRACH. 2012.

Таблиця Б.18 – Емісія парникових газів при виробництві та повторній переробці деяких матеріалів *

Матеріал	Емісія ПГ при виробництві матеріалу**, (кг CO ₂ -екв)·кг ⁻¹	Емісія ПГ при повторній переробці матеріалу, (кг CO ₂ -екв)·кг ⁻¹
Сталь	1,43	0,54
Алюміній	4,50	0,63
Мідь	2,78	2,46
Пластик	2,61	0,12

* за даними: IIR, Guideline for Life Cycle Climate Performance, International Institute of Refrigeration, 2016.

** вважається, що матеріал отриманий частково з первинної та частково зі вторинної сировини

Таблиця Б.19 – Залежність експериментально визначених потужності та холодопродуктивності холодильної компресорної системи, а також розрахованих значень коефіцієнту робочого часу та добового споживання електроенергії від витрати робочого тіла (теплоприпливи в холодильну та морозильну камеру ПХП $Q_{\text{Summer}} = 104,4$ Вт, $Q_{\text{Winter}} = 72,7$ Вт) при застосуванні різних робочих тіл

$G,$ $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$	PXM1	PXM1+	PXM1+	PXM1+	PXM1+	PXM2	PXM2+
		TiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		C ₆₀
		$w_{\text{NP}} =$	$w_{\text{NP}} =$	$w_{\text{NP}} =$	$w_{\text{NP}} =$		$w_{\text{NP}} =$
		0,0048	0,010	0,0008	0,0052		0,0050
		$\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$	$\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$		$\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$
Потужність холодильної компресорної системи, Вт							
0,34	60,04	63,03	62,83	64,07	66,02	67,26	64,20
0,36	62,55	64,82	65,01	63,16	67,24	68,99	66,66
0,38	64,96	67,05	67,00	63,85	68,42	70,63	69,17
0,40	67,27	69,70	68,77	66,15	69,58	72,16	71,73
0,42	69,49	72,79	70,35	70,05	70,72	73,60	74,33
0,44	71,61	76,31	71,72	75,56	71,83	74,94	76,99
Холодопродуктивність, Вт							
0,34	104,9	117,7	115,8	122,5	122,6	111,5	109,1
0,36	113,4	125,7	124,8	118,1	127,6	118,6	118,1
0,38	122,2	134,3	133,2	120,1	132,6	125,7	127,5
0,40	131,2	143,4	140,9	128,7	137,8	133,0	137,4
0,42	140,5	153,1	147,9	143,9	143,2	140,4	147,7
0,44	150,1	163,3	154,2	165,5	148,7	147,9	158,6
Коефіцієнт робочого часу							
0,34	0,844	0,753	0,765	0,723	0,722	0,794	0,811
0,36	0,781	0,704	0,709	0,750	0,694	0,747	0,750
0,38	0,725	0,659	0,665	0,737	0,668	0,704	0,695
0,40	0,675	0,617	0,629	0,688	0,642	0,666	0,645
0,42	0,630	0,578	0,599	0,615	0,618	0,631	0,599
0,44	0,590	0,542	0,574	0,535	0,595	0,599	0,558
Добове енергоспоживання, Вт·год							
0,34	1216	1138	1153	1112	1144	1282	1250
0,36	1172	1096	1107	1137	1120	1237	1200
0,38	1130	1061	1069	1129	1096	1194	1153
0,40	1090	1033	1038	1092	1073	1153	1110
0,42	1051	1010	1011	1035	1049	1114	1069
0,44	1014	993	988	970	1027	1077	1031

Таблиця Б.20 – Орієнтовна структура матеріальних затрат на виробництво

БХП НОРД-233-6

Комплектація	Маса, кг
Компресор	9,540
Полістирол літтевий та екструзивний	12,700
Компоненти для пінополіуретану	6,59
Заготовки випарника	2,320
Метал	34,000
Алюміній (листи и труба)	1,00
Трубка медяна	0,39
Хладон (R134a)	0,180
Холодоагент масло	0,340
Спінюючий агент	0,530
Комплектуючі (реле, терморегулятор, патрон, вимикач, ИМС, полка-скло), інше	-

Додаток В**ДОКУМЕНТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ
РОБОТИ**

Акт

про впровадження у виробництво результатів дисертаційної роботи **Хлісвой Ольги Яківни** «Наукове обґрунтування використання нанофлюїдів для підвищення ефективності холодильних машин» зі спеціальності 05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування

Даним актом засвічується, що результати дисертаційної роботи О.Я. Хлісвой на тему «Наукове обґрунтування використання нанофлюїдів для підвищення ефективності холодильних машин» впроваджено у робочий процес Виробничо-комерційного кооперативу «Холод» Особливий інтерес визвали отримані у дисертації результати можливостей підвищення холодильного коефіцієнту парокомпресійної холодильної машини за рахунок використання у якості присадок до компресорних мастил наночастинок.

Отримані Хлісвою О.Я. результати є досить перспективними з точки зору покращення енергетичних показників роботи холодильного обладнання, яке вже введено в експлуатацію.

Керівник підприємства



В.С. Акулинцев

ТОВ «Чип Маркет»

Україна, 65059, м. Одеса,
 Вул. проспект Адміральський, 33а
 Код ЄДРПОУ: 41497292
 ПІН № 414972915510
 р/рах. № 26000054347999
 в ЮГ ГРУ ПАТ КБ ПРИВАТБАНК м. Одеса
 МФО: 328704
 р/рах. № 26004668827200
 в ПАТ «УкрСиббанк»
 МФО: 351005
 Тел/факс. (048) 734-43-60

ChipMarket

Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Хлісвой Ольги Яківни
**«Наукове обґрунтування використання нанофлюїдів для підвищення
 ефективності холодильних машин»** зі спеціальності 05.05.14 - Холодильна,
 вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування

На ТОВ «Чип Маркет» не останню роль при реалізації проектів займає розробка та впровадження інноваційних наукоємних продуктів у галузі виробництва електричного обладнання. Підприємство зацікавлено у підвищенні конкурентоспроможності власної продукції за рахунок підвищення її енергетичної ефективності. Тому передані нам результати дисертаційної роботи О.Я. Хлісвой є досить інтересними з позиції їх можливого впровадження у виробництво.

Особливий інтерес визивають результати, пов'язані з можливістю використання охолоджувальних рідин з добавками наночастинок, тому що їх використання при охолодженні елементів мікроелектронної апаратури буде сприяти інтенсифікації відводу теплоти від охолоджувальних об'єктів. При успішному застосування такої охолоджувальної рідини у електронному обладнанні можна добитися зменшення масогабаритних розмірів усієї системи.

Додатковий інтерес має запропонована у дисертації методика еколого-енергетичного аналізу, яка може використовуватися на етапі проектування з метою вибору найбільш ефективного рішення.

Розглядаємо отримані у дисертації О.Я. Хлісвой результати як можливі для широкого впровадження у промисловість, у тому числі на ТОВ «Чип Маркет».

Директор ТОВ «Чип Маркет»

 О. Л. Пуленко





ПрАТ "УКпостач"
62301, Харківська обл., Дергачівський р-н,
м. Дергачі, вул. Залізнична, буд. 31-с
т/факс: (057) 7869019, (050) 6379488
E:mail secretar@uksnab.beer-co.com

ЧАО «УКснаб»
62301, Україна, Харьковская обл.,
Дергачевский р-н, г. Дергачи,
ул. Железнодорожная, 31-С
т/факс: (057) 7869019, (050) 6379488
E:mail secretar@uksnab.beer-co.com

Вих. № 020/08-547
від 10.09. 2019р.

Міністерство освіти і науки України

ДОВІДКА

про отримання результатів дисертаційної роботи Хлісвой Ольги Яківни
«НАУКОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ НАНОФЛЮЇДІВ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН» зі
спеціальності 05.05.14 - Холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціонування

ПрАТ «УКпостач», що входить до холдингу «UBC Group», є одним з найпотужніших підприємств України, яке працює у сфері холодильної техніки. Серед основних бізнес-напрямів UBC Group – розробка та виробництво холодильної техніки та надання послуг з модернізації промислового холодильного обладнання. Керівництво UBC Group зацікавлено у реалізації інноваційних проєктів, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності й конкурентоспроможності вироблюваної продукції.

Беручи до уваги вищевикладене, вважаємо, що наведена в дисертаційній роботі інформація становить інтерес для нашого підприємства з точки зору можливостей подальшого підвищення конкурентоспроможності холодильного обладнання, що випускається, а отримані у дисертації результати розглядаються як такі, які можуть у подальшому використовуватися при реалізації різноманітних проєктів ПрАТ «УКпостач».

Виконавчий директор
ПрАТ «УКпостач»

А.Б. Мельничук