

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РЯБІКІН СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 536.248.2: 532.529.5

ДИСЕРТАЦІЯ

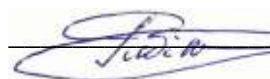
**ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСІВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ
В АПАРАТАХ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ
ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ НАНОТЕПЛОНОСІЇВ
(експеримент, моделювання)**

05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

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

 Рябікін С.С.

Науковий керівник

Геллер Володимир Зіновійович,
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 - 2018

АНОТАЦІЯ

Рябікін С.С. Підвищення інтенсивності процесів теплообміну в апаратах холодильного обладнання шляхом використання нанотеплоносіїв (теплофізичний експеримент, моделювання). – Рукопис. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2018 р.

Дисертація присвячена експериментальному і теоретичному вивченню впливу добавок наночастинок на теплофізичні властивості багатокomпонентних холодоносіїв, складу: пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість (РРВ)/наночастинки Al_2O_3 . Значну увагу в дисертації приділено вивченню інтенсивності процесів теплообміну при вимушеній конвекції при ламінарному режимі течії холодоносіїв і нанохолодоносіїв у горизонтальній трубі.

У дисертації наведено огляд опублікованих робіт, які присвячені вивченню впливу наночастинок на густину, в'язкість, питому теплоємність і теплопровідність базових речовин, які перспективні для застосування в якості компонентів змішаних нанохолодоносіїв. Значну увагу приділено аналізу впливу наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній конвекції при ламінарній течії нанофлюїдів у трубі, а також розгляду різних моделей розрахунку коефіцієнта тепловіддачі (КТВ) при ламінарній течії нанофлюїдів у трубах і каналах.

В роботі запропонована методика приготування агрегативно стійкого нанофлюїда на основі водного розчину пропіленгліколю, речовини, що регулює в'язкість і наночастинок Al_2O_3 (0,53 мас.% і 1,03 мас.%), яка дозволила розробити нанохолодоносії без добавок поверхнево-активних речовин. Для оцінки розміру наночастинок з метою дослідження агрегативної стійкості приготованих нанохолодоносіїв використано метод спектротурбодиметрії. Вимірювання оптичної густини зразків проводилися на спектрофотометрі Shimadzu UV-120-02.

Одним з недоліків введення в склад базових рідин наночастинок є збільшення в'язкості отриманих нанофлюїдів. Тому на першому етапі розробки технології приготування нанохолодоносія було виконане експериментальне дослідження впливу декількох концентрацій речовин, що знижують в'язкість, на густину й в'язкість трикомпонентного холодоносія: вода/пропіленгліколь/речовина, що знижує в'язкість.

На підставі отриманої експериментальної інформації про властивості багатокомпонентних холодоносіїв розроблені нові моделі прогнозування густини і в'язкості на лінії кипіння водних розчинів пропіленгліколя та РРВ. На відміну від існуючих моделей розрахунку, запропоновані методи прогнозування в'язкості і густини багатокомпонентних холодоносіїв не вимагають для свого використання значного обсягу експериментальної інформації, що забезпечує можливість розробки холодоносіїв оптимального складу.

При аналізі ефектів впливу концентрації наночастинок Al_2O_3 на КТВ при вимушеній конвекції в трубі необхідно мати інформацію про теплофізичні властивості об'єктів дослідження. В роботі наведені експериментальні дані про вплив добавок наночастинок Al_2O_3 на густину, теплоємність, в'язкість багатокомпонентних холодоносіїв. Показано, що добавки наночастинок Al_2O_3 в багатокомпонентних холодоносіях сприяють збільшенню в'язкості і незначному зменшенню теплоємності. Негативний ефект збільшення в'язкості може бути усунутий застосуванням спеціальних речовин, що регулюють в'язкість холодоносіїв. Кількісний ефект впливу наночастинок на властивості об'єктів дослідження залежить як від їх концентрації, так і від температури.

Дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції при ламінарній течії багатокомпонентних холодоносіїв і нанохолодоносіїв виконано на експериментальній установці оригінальної конструкції. В запропонованій конструкції експериментальної установки передбачено переміщення вимірювальної ділянки (блоку вимірювання абсолютної температури і перепадів температур між холодоносієм і поверхнею трубки) вздовж труби теплообмінного апарату. Така конструкція робочої ділянки установки дозволяє істотно зменшити вплив

випадкових похибок вимірювання температур і перепадів температур при вимірюванні локальних коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції холодоносіїв (нанохолодносіїв) в трубі.

В результаті проведеного дослідження вперше отримані експериментальні дані про коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів вода/пропіленгліколь/речовина, що регулює в'язкість, з добавками 0,53 мас.% і 1,03 мас.% наночастинок Al_2O_3 в інтервалі чисел Рейнольдса 280-1372. Показано збільшення як локального, так і середнього по довжині труби коефіцієнта тепловіддачі в розглянутому інтервалі чисел Рейнольдса для двох досліджених нанофлюїдів. Не визначено пропорційного впливу концентрації наночастинок на величину коефіцієнту тепловіддачі. Показано, що найбільший вплив наночастинок на інтенсивність тепловіддачі спостерігається при концентрації наночастинок в нанофлюїді 0,53 мас.%.

Певне практичне значення мають наведені в дисертації дані про зміну втрат тиску при наявності добавок наночастинок Al_2O_3 в багатокомпонентному холодоносії. Експериментальні дослідження вказують на збільшення втрат тиску при перебігу нанохолодоносія з 1,03 мас.% наночастинок Al_2O_3 порівняно з цією величиною для базової рідини.

Результати, наведені в дисертації, показують, що інтенсифікація теплообміну та збільшення втрат напору при ламінарній течії нанохолодоносія в трубі не може бути пояснена тільки впливом наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентного теплоносія. Необхідно також враховувати локальну турбулізацію при ламінарній течії теплоносія, в якому присутні наночастинок.

Ключові слова: наночастинок, нанофлюїд, багатокомпонентний холодоносії, теплофізичні властивості, коефіцієнт тепловіддачі, коефіцієнт тертя.

Публікації за темою дисертації

1. Ивченко Д. А., Рябикин С. С., Шимчук Н.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода. *Вестник Казанского технологического университета*. Казань. 2014. Т. 17. № 19 С.64-66. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка до публікації.*

2. Рябикин С.С. О.Я. Хлиева, В.З. Геллер, В.П. Железный. Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвекции нанохладоносителей в трубе. Материалы конференции VII международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (17–20 ноября 2015 г. Санкт-Петербург). Ч. I, С. 273-276. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка до публікації.*

3. Хлиева О.Я., Шимчук Н.А., Рябикин С.С., Полюганич М.П., Железный В.П. Новый класс низкотемпературных нанотеплоносителей с улучшенными теплофизическими свойствами. Материалы конференции VII международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (17–20 ноября 2015 г. Санкт-Петербург). Ч. I, С. 490-493. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел за темою статті підготовка до публікації.*

4. Хлиева О. Я., Полюганич М. П., Рябикин С. С., Никулина А. С., Железный В. П. Исследования плотности бинарных и тройных водных растворов этиленгликоля, пропиленгликоля и этанола. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. №52 (2). С. 78-86. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел, виконання експериментальних досліджень.*

5. Khliyeva O., Nikulina A., Polyuganich M., Ryabikin S., Zhelezny V. Viscosity of ternary solutions composed of propylene glycol, ethanol and water. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. №52 (3). С. 30-35. UDC 621.564.3 *Особистий внесок: аналіз літературних джерел за темою статті, виконання експериментальних досліджень.*

6. Khliyeva O., Ryabikin S., Zhelezny V., Gordeychuk T. Experimental investigation of the convective heat transfer coefficient of coolants with Al_2O_3 nanoparticle additives. International conference «Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development» (Chisinau, Republic of Moldova 2016.) P. 391–399. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних.*

7. 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. №1/8(85).P. 4-12. *Личный вклад: Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних.*

8. 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). DOI: 10.18462. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, аналіз літературних джерел за тематикою статті.*

Публікації апробаційного характеру

1. Ивченко Д. А., Рябикин С. С., Шимчук Н.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода. *Вестник Казанского технологического университета*. Казань. 2014. Т. 17. № 19 С.64-66.

2. Железный В. П., Лукьянов Н. Н., Рябикин С. С., Никулин А. Г., Полюганич М. П., Ивченко Д. А. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения и давления насыщенных паров растворов хладагент/наномасло. *Вестник Казанского технологического университета*. Казань. 2014. Т.17, №20. С. 106-108

3. Рябикин С.С. Хлиева О.Я., В.З. Геллер, В.П. Железный. Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвекции нанохладоносителей в трубе. Материалы конференции VII международной научно-технической конференции «*Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке*». Санкт-Петербург. 2015 г. Ч. I.; С. 273-276.

4. Хлиева О.Я., Шимчук Н.А., Рябикин С.С., Полюганич М.П., Железный В.П. Новый класс низкотемпературных нанотеплоносителей с улучшенными теплофизическими свойствами. Материалы конференции VII международной научно-технической конференции «*Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке*». Санкт-Петербург. 2015 г. Ч. I.; С. 490-493.

5. Хлиева О. Я., Полюганич М. П., Рябикин С. С. Поиск оптимального состава хладоносителя с добавкой наночастиц CuO. результаты исследования. Збірник праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції. «*Сучасні проблеми холодильної техніки і технології*» Одеса. 2015 р. С.139-142.

6. Хлиева О.Я., Рябикин С.С., Геллер В.З., Экспериментальная установка для исследования процесса теплообмена при течении нанофлюидов в трубе Збірник праць X Всеукраїнської науково-технічної конференції. «*Сучасні проблеми холодильної техніки і технології*», Одеса. 2015 р. С.173-175.

7. Рябікін С.С., Хлієва О.Я. Експериментальне дослідження конвекційного коефіцієнта тепловіддачі й втрат напору при вимушеному русі нанохолодоносія на основі пропіленгліколю в трубі. Збірник праць XVI Всеукраїнської науково-технічної конференції. «*Актуальні проблеми енергетики та екології*», Одеса. 2016 р. С.41-42.

8. 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 Al₂O₃ nanoparticles based on a limited number of experimental data. 7th International Conference «*Physics of liquid matter: Modern problems*». Kyiv. 2016. P. 113.

9. Khliyeva O, S.Ryabikin, V. Zhelezny, T. Gordeychuk. Experimental investigation of the convective heat transfer coefficient of coolants with Al₂O₃ nanoparticle additives.

International conference «*Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development*». Chisinau. Republic of Moldova. 2016. P. 391–399.

10. 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». Seoul. Republic of Korea. 2017.

11. Khliyeva O., Gordeychuk T., Ryabikin S., Zhelezny V. Experimental investigation of the viscosity of propylene glycol based nanofluids with improved thermophysical properties. 6th Rostocker International Conference. «Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics». Rostock. Germany. 2017.

ABSTRACT

Ryabikin S.S. **Increase in the intensity of heat transfer processes in refrigeration equipment by using nanocoolants (thermophysical experiment, modeling).** – Manuscript. Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.14.06 – Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. – Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2018.

The thesis is devoted to the experimental and theoretical study of the influence of nanoparticle additives on the thermophysical properties of the multicomponent coolants based on propylene glycol/water/viscosity regulating agents (VRA)/ Al_2O_3 nanoparticles. In the thesis, special attention is paid to the study of the intensity of heat transfer processes under forced convection in the laminar flow of coolants and nanocoolants in a horizontal pipe.

The overview of the articles devoted to the studies of the influence of nanoparticle additives on density, viscosity, specific heat and thermal conductivity of the base fluids, which are perspective for use as components of the mixed nanocoolants is provided. Considerable attention is paid to the analysis of the influence of nanoparticles on the heat

transfer coefficient (HTC) under forced convection in the laminar flow of nanofluids in the pipe and to the review of different calculation models of the heat transfer coefficient at the laminar flow of nanofluids in pipes and channels.

The method of preparation of an aggregate-stable nanofluid on the basis of an aqueous solution of propylene glycol, a viscosity regulating agent and Al_2O_3 nanoparticles (0.53 wt.% and 1.03 wt.%), which allows developing of the nanocoolants without any surfactant additives, is proposed. To estimate the size of the nanoparticles in study of aggregate stability of the prepared nanocoolants, the method of spectroturbidimetry was applied. Optical density measurements of the samples were performed on a Shimadzu UV-120-02 spectrophotometer.

One of the disadvantages of addition of the nanoparticles in the base fluids is an increase in viscosity of the obtained nanofluids. Therefore, at the first stage of the development of the technology of a nanocoolant preparation, an experimental study of the influence of several concentrations of a viscosity reducing agent on the density and the viscosity of a three-component coolant water/propylene glycol/VRA was performed.

Based on the experimental data on the properties of the multicomponent coolants, the new predicting models for density and viscosity on the boiling line of aqueous solutions of propylene glycol and VRA were developed. In comparison to the existing calculation models, the proposed methods for predicting the viscosity and density of the multicomponent coolants do not require a significant amount of experimental data, which allows the possibility of developing the coolants of the optimal composition.

In analysis of the influence of Al_2O_3 nanoparticles concentration on the HTC under forced convection in the pipe, it is necessary to know the thermophysical properties of the research objects. The thesis presents the experimental data on the influence of Al_2O_3 nanoparticle additives on density, heat capacity, viscosity of the multicomponent coolants. It was shown that additives of Al_2O_3 nanoparticles in the multicomponent coolants lead to an increase in viscosity and a slight decrease in the heat capacity. The negative effect of the increasing viscosity can be eliminated by the use of the special viscosity regulating agents for coolants. The quantitative effect of the influence of the nanoparticles on the properties of the research objects depends on both their concentration and temperature.

The study of local heat transfer coefficients under forced convection in a laminar flow of the multicomponent coolants and nanocoolants was performed on the original experimental facility. In the proposed construction of the experimental facility, the movement of the measuring cell (the unit for measuring the absolute temperature and temperature difference between the coolant and the surface of the pipe) along the pipe of the heat-exchange apparatus is realized. Such design of the working space of the facility allows significant reducing of the effect of random errors of the temperature and temperature difference measurements in measurements of the local heat transfer coefficients under forced convection of coolants (nanocoolants) in the pipe.

In this study, the experimental data on the heat transfer coefficient in the forced flow of a nanofluid water/propylene glycol/VRA with the additives of 0.53 wt.% and 1.03 wt.% of Al_2O_3 nanoparticles in the range of Reynolds numbers of 280-1372 were obtained for the first time. An increase in the local and the mean by length of the pipe the heat transfer coefficient in the considered range of Reynolds numbers for two studied nanofluids is shown. The proportional influence of the concentration of the nanoparticles on the value of the heat transfer coefficient is not observed. It is shown that the greatest influence of the nanoparticles on the intensity of heat transfer is observed at the nanoparticle concentration in the nanofluid of 0.53 wt.%.

The data on changes in pressure losses in the presence of Al_2O_3 nanoparticle additives in the multicomponent coolants given in the thesis have a certain practical significance. The experimental studies indicate an increase in pressure losses in a nanocoolant flow with 1.03 wt.% of Al_2O_3 nanoparticles compared to the pressure losses for a base fluid.

The results presented in the thesis have shown that the intensification of the heat exchange in the laminar flow of the nanocoolant in the pipe can not be explained only by the influence of nanoparticles on the thermophysical properties of the base coolant. It is also necessary to consider a local turbulization in the laminar flow of the coolant, which contains nanoparticles.

Key words: nanoparticles, nanofluid, multicomponent coolant, thermophysical properties, heat transfer coefficient, friction coefficient.

Publications on the topic of the thesis

1. Ivchenko, D. A., Ryabikin, S. S., Semchuk N.. Experimental study of thermophysical properties of nanocoolant on the basis of solutions of propylene glycol/water. Bulletin of Kazan technological University. Kazan. 2014. Vol. 17. №. 19. p.64-66. (Rus.).

2. Ryabikin, S. Khliyeva O, Geller V., Zhelezny V. Installation for study of local heat transfer coefficients under forced convection nanocoolant in the pipe. Proceedings of the VII international scientific and technical conference "low-Temperature and food technologies in the XXI century" 2015 St. Petersburg. Part I:, P. 273-276. (Rus.).

3 . Khliyeva O., Semchuk N. Ryabikin S., Polygenic M., Zhelezny V. New class of low-temperature nanocoolant with improved thermal properties. Proceedings of the VII international scientific and technical conference "low-Temperature and food technologies in the XXI century." Saint-Petersburg. 2015 . Part I:, P. 490-493. (Rus.).

4 Khliyeva O., Polygenic M., Ryabikin, S., Nikulin A., Zhelezny V., studies on the density of binary and ternary aqueous solutions of ethylene glycol, propylene glycol and ethanol. Refrigeration techno the technology. 2016. №. 52 (2). C. 78-86. (Rus.).

5. Khliyeva O., Nikulina A., Polyuganich M., Ryabikin S., Zhelezny V. Viscosity of ternary solutions composed of propylene glycol, ethanol and water. Refrigeration technics and technology. 2016. № 52 (3). P. 30-35. (Eng.).

6. Khliyeva O., Ryabikin S., Zhelezny V., Gordeychuk T. Experimental investigation of the convective heat transfer coefficient of coolants with Al_2O_3 nanoparticle additives. International conference «Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development». Chisinau. Republic of Moldova 2016. P. 391-399. (Eng.).

7. 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. №1/8(85).P. 4-12. (Eng.).

8. 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. Seoul. Republic of Korea. 2017. (Eng.).

Publications of approbation nature

1. Ivchenko, D. A., Ryabikin, S. S., Semchuk N. A. Experimental study of thermophysical properties of nanocoolant on the basis of solutions of propylene glycol/water. Bulletin of Kazan technological University. Kazan. 2014. Vol. 17. №. 19. P. 64-66.

2. Zhelezny V. P., Lukyanov N. N., Ryabikin, S. S., Nikulin A. G., Polygenic M. P., Ivchenko, D. A. Experimental study of surface tension and saturated vapor pressure of solutions refrigerant/nanooil. Bulletin of Kazan technological University. Kazan. 2014. Vol. 17. №. 20. P. 106-108.

3. Ryabikin, S. Khliyeva O, Geller V., Zhelezny V. Installation for study of local heat transfer coefficients under forced convection nanocoolant in the pipe. Proceedings of the VII international scientific and technical conference "low-Temperature and food technologies in the XXI century" 2015. Saint Petersburg. Part I:, P. 273-276.

4. Khliyeva O., Semchuk N. Ryabikin S., Polygenic M., Zhelezny V. New class of low-temperature nanocoolant with improved thermal properties. Proceedings of the VII international scientific and technical conference "low-Temperature and food technologies in the XXI century." Saint-Petersburg. 2015 . Part I:, P. 490-493.

5. Khliyeva O. Y., Polygenic M. P., Ryabikin S. S. Search for the optimal composition of a coolant with the addition of CuO nanoparticles. research result. Proceedings of the X international scientific-technical conference. "Modern problems of refrigeration engineering and technology". Odessa. 2015. P. 139-142.

6. Khliyeva O. Y., Ryabikin S. S., Geller, V. S., Experimental setup to study the process of heat transfer in the flow of nanofluid in pipe proceedings of the X international

scientific-technical conference. Proceedings of the X international scientific-technical conference. "Modern problems of refrigeration engineering and technology". Odessa. P. 173-175.

7. Ryabikin, S. S., Khliyeva O. Y. Experimental study of convection heat transfer coefficient and pressure loss in case of involuntary movement of nanocoolant on the basis of propylene glycol in the pipe. Proceedings of XVI international scientific-technical conference. "Actual problems of energy and ecology, Odessa. 2016. P. 41-42.

8. Khliyeva O.Y., 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. 7th International Conference «*Physics of liquid matter: Modern problems*». Kyiv. 2016. P. 113.

9. Khliyeva O, Ryabikin S., Zhelezny V., Gordeychuk T. Experimental investigation of the convective heat transfer coefficient of coolants with Al_2O_3 nanoparticle additives. International conference «*Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development*». Chisinau. Republic of Moldova. 2016. P. 391–399.

10. 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*». Seoul. Republic of Korea. 2017.

11. Khliyeva O., Gordeychuk T., Ryabikin S., Zhelezny V. Experimental investigation of the viscosity of propylene glicole based nanofluids with improved thermophysical properties. 6th Rostocker International Conference. «*Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics*». Rostock. Germany. 2017.

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП	17
<p>РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ НАНОЧАСТИНОК НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ ВИМУШЕНІЙ ТЕЧІЇ НАНОФЛЮЇДІВ</p>	
.....	24
1.1. Нанофлюїди – перспективи застосування в якості тепло- і холодоносіїв.....	25
1.2 Огляд експериментальних досліджень впливу добавок наночастинок на теплофізичні властивості нанофлюїдів.....	28
1.2.1 Густина нанофлюїдів	28
1.2.2 Питома теплоємність нанофлюїдів	30
1.2.3 В'язкість нанофлюїдів	31
1.2.4 Теплопровідність нанофлюїдів	34
1.3 Огляд експериментальних досліджень процесу тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів	36
1.4 Огляд існуючих моделей для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів	41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50
<p>РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ</p>	
.....	55
2.1 Об'єкти для експериментальних досліджень	50
2.2 Методика дослідження стійкості нанофлюїдів і визначення розміру наночастинок у базовій рідині	57
2.3 Експериментальна установка для дослідження густини	54
2.4 Експериментальна установка для дослідження в'язкості	64
2.5 Експериментальна установка для дослідження теплопровідності холодоносіїв у широкому інтервалі параметрів стану	66

2.6 Експериментальна установка для дослідження калоричних властивостей нанофлюїдів	71
2.7 Експериментальна установка для вимірювання локального коефіцієнта теплопередачі при вимушеній конфекції нанотеплоносіїв у трубі.....	76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ХОЛОДОНОСІЇВ ТА НАНОХОЛОДОНОСІЇВ	80
3.1 Результати експериментального дослідження густини і в'язкості трикомпонентних теплоносіїв	81
3.2 Технологія приготування та результати дослідження стійкості нанофлюїда пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість/ Al_2O_3	85
3.3 Результати експериментального дослідження густини холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгліколя	88
3.4 Результати експериментального дослідження в'язкості холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгліколя	90
3.5 Результати експериментального і розрахункового дослідження теплоємності холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгліколя	95
3.6 Результати експериментального і розрахункового дослідження теплопровідності холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгліколя	98
3.7 Моделювання густини та в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв.....	100
3.8 Методика прогнозування густини та в'язкості трикомпонентних розчинів вода/PPV/пропіленгліколь	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	119
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ ТА ВТРАТИ НАПОРУ ПРИ ВИМУШЕНІЙ ЛАМІНАРНІЙ ТЕЧІЇ НАНОХОЛОДОНОСІЇВ	124
4.1 Методика проведення експериментальних досліджень коефіцієнта тепловіддачі	124

4.2 Результати тарувального експерименту	127
4.3. Результати дослідження коефіцієнтів тепловіддачі і втрат тиску при ламінарній течії нанохолодоносіїв у трубі	130
4.4 Моделювання коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів у трубках	136
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	146
ВИСНОВКИ.....	148
ДОДАТОК	150
Додаток А1.....	151

ВСТУП

Одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності та конкурентоспроможності енергетичного і холодильного устаткування є використання нанофлюїдів замість традиційних теплоносіїв. Вимоги, що пред'являються до холодоносіїв, досить суперечливі. Тому все більше застосування на практиці знаходять багатоконпонентні холодоносії. Визначення складу багатоконпонентних нанохолодоносіїв, концентрації і матеріалу наночастинок є складним багатofакторним завданням, рішення якого вимагає великого обсягу емпіричної інформації по теплофізичних властивостях об'єктів дослідження і даних, вплив кожного з компонентів на коефіцієнти тепловіддачі (КТВ) у теплообмінних апаратах.

Завдання підвищення інтенсивності тепловіддачі у теплообмінному обладнанні теплоенергетичних та холодильних систем, зниження масогабаритних характеристик теплообмінного обладнання шляхом науково обґрунтованого впровадження нових теплоносіїв на базі нанофлюїдів; встановлення впливу типу наночастинок і їх розмірів і концентрації на теплофізичні властивості нанотеплоносіїв; встановлення закономірностей процесів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів в однофазному стані з вивченням механізмів, що впливають на інтенсивність тепловіддачі при ламінарному і турбулентному режимах руху нанотеплоносіїв є не в повній мірі вирішеними.

Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених дослідженню технологій створення агрегативно стійких нанофлюїдів, це питання досі не вивчено в достатній мірі. Робіт, присвячених вивченню теплофізичних властивостей нанофлюїдів, також чимало. Однак, по-перше, ці дані досить суперечливі у різних авторів, по-друге, в цих роботах зазвичай вимірювалися окремі теплофізичні властивості (як правило, в'язкість і теплопровідність), а даних про вплив добавок наночастинок на калоричні і інші властивості недостатньо. В даний час опубліковано досить багато робіт, присвячених експериментальному дослідженню процесів теплообміну за участю

нанофлюїдів. Але, по-перше, дані, наведені в цих роботах, вельми суперечливі, по-друге, не розроблено універсальної моделі для оцінки коефіцієнта тепловіддачі, зокрема, при вимушеній конвекції в однофазних потоках нанофлюїдів. Розрахункові моделі визначення теплофізичних властивостей нанофлюїдів в основному носять емпіричний характер і можуть бути використані тільки для досліджених авторами нанофлюїдів і умов проведення експерименту. Залишаються нез'ясованими механізми підвищення інтенсивності тепловіддачі в однофазних потоках нанофлюїдів. Таким чином, можна констатувати відсутність робіт комплексного характеру, що включають всі об'єктивно необхідні етапи: розробка технології приготування нанотеплоносіїв, вимірювання та моделювання їх теплофізичних властивостей; дослідження процесів теплообміну у нанофлюїдах; контроль стабільності нанофлюїдів на всіх стадіях експерименту; еколого-енергетичний аналіз перспектив впровадження нанотеплоносіїв.

З урахуванням викладеного, проблема розробки нового покоління нанохолодоносіїв залишається невирішеною і тому є **актуальною**.

Серед вчених, що плідно працюють в рамках зазначеного наукового напрямку і на публікації яких автор спирався при вирішенні розглянутих у дисертації задач, слід назвати імена таких вчених: Федель Л. (Fedele L.), Боббо С. (Bobbo S.), Рудяк В. (Rudyak V.), Бігделі М.Б.(Bigdeli M. B.), Кака С. (Какаç, S.), Келен А.А. (Celen, A. A), Хеддад З.(Haddad, Z.), Бьянко В.(Bianco, V.),Чой С. (Choi C.), Мазур В.О., Желєзний В.П.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України, від 01.07.1994, № 74/94-ВР "Про енергозбереження", дисертаційна робота є також складовою частиною досліджень, проведених в рамках виконання держбюджетних науково-дослідних робіт МК 16/03 «Дослідження стабільності і теплофізичних властивостей нанофлюїдів, перспективних для використання в холодильному і енергетичному обладнанні», № держреєстрації: 0116U004683; МК № 16/02 «Експериментальне дослідження та моделювання процесів кипіння нанохолодоагентів», № держреєстрації: 00116U004682 і науково-дослідницької

кафедральної теми «Комплексні дослідження теплофізичних властивостей речовин, перспективних для використання в промисловості».

Мета і завдання досліджень. Метою даного дослідження є: експериментальне дослідження й моделювання властивостей багатокомпонентних теплоносіїв; експериментальне і теоретичне вивчення впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентних холодоносіїв; вивчення впливу домішок наночастинок у багатокомпонентних холодоносіях на коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній конвекції в горизонтальній трубі.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- створено експериментальний стенд для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції в горизонтальній трубі;
- розроблено моделі прогнозування густини та в'язкості холодоносіїв на основі розчинів пропіленгліколь/вода;
- вивчено вплив наночастинок Al_2O_3 на теплофізичні властивості багатокомпонентних холодоносіїв (пропіленгліколь/вода/речовина що регулює в'язкість)
- виконані експериментальні дослідження впливу домішок наночастинок Al_2O_3 у багатокомпонентних холодоносіях на локальні та середні по довжині коефіцієнти тепловіддачі при вимушеній конвекції в трубі;
- виконано аналіз факторів, що впливають на інтенсифікацію теплообміну при вимушеній конвекції в трубі в багатокомпонентних холодоносіях пропіленгліколь/вода/наночастинок Al_2O_3 ;

Об'єкти дослідження – багатокомпонентні нанохолодоносії пропіленгліколь/вода/речовина що знижує в'язкість/наночастинок Al_2O_3 .

Предмет дослідження - закономірності впливу домішок наночастинок Al_2O_3 , речовини, що знижує в'язкість на теплофізичні властивості розчинів пропіленгліколь/вода, а також на інтенсивність теплообміну при вимушеній конвекції холодоносія при його течії в горизонтальній трубі.

Методи дослідження. Рішення сформульованих завдань досягнуто в рамках таких методів дослідження:

- експериментальних досліджень густини та динамічної в'язкості трикомпонентних розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість; густини, динамічної в'язкості і теплоємності розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість з домішками наночастинок Al_2O_3 ; локальних та середніх по довжині коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанохолодоносіїв у трубі;

- теоретичних досліджень, пов'язаних з розвитком існуючих методів прогнозування теплофізичних властивостей багатокомпонентних холодоносіїв і нанохолодоносіїв у широких діапазонах параметрів стану і вдосконаленням методик оцінки коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції холодоносіїв і нанохолодоносіїв в трубі.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в тому, що:

- запропоновані нові моделі прогнозування густини і в'язкості багатокомпонентних теплоносіїв на основі розчинів пропіленгліколь/вода /речовина, що регулює в'язкість;

- вперше отримані експериментальні дані про вплив домішок наночастинок Al_2O_3 на в'язкість, густина і теплоємність у багатокомпонентних холодоносіях, створених на основі розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість;

- показано, що у нанохолодоносіях негативний ефект збільшення в'язкості за рахунок домішок наночастинок може бути успішно усунутий спеціальними речовинами що знижують в'язкість;

- вперше отримані експериментальні дані про вплив домішок наночастинок Al_2O_3 в багатокомпонентних холодоносіях, створених на основі розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість на значення коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції в трубі;

- результати проведеного дослідження вказують на те, що інтенсифікація теплообміну при вимушеній конвекції в трубах не може бути пояснена тільки

впливом наночастинок на теплофізичні властивості багатокomпонентного теплоносія.

В рамках дисертаційної роботи можна сформулювати загальний висновок: невеликі добавки наночастинок Al_2O_3 , а також використання речовин, що знижують в'язкість розчинів пропіленгліколь/вода, забезпечують можливість розробки нового покоління багатокomпонентних нанохолодоносіїв, застосування яких сприяють підвищенню показників енергетичної ефективності холодильного обладнання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій визначаються: коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням нового експериментального стенду і сучасних приладів для вимірювання фізичних величин; проведенням тарувальних експериментів і детальним аналізом помилок отриманих експериментальних даних; використанням сучасних математичних методів і програмних засобів обробки даних, а також висновками, отриманими іншими авторами.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що: отримані експериментальні дані про теплофізичні властивості нанотеплоносіїв дозволяють виконати оцінку впливу наночастинок на в'язкість, густину і теплоємність на основі розчинів пропіленгліколь/вода і формують базу довідкових даних для розвитку методів розрахунку властивостей нанофлюїдів; отримані дані про вплив наночастинок на КТВ в трубі дозволяють виділити ключові фактори, що впливають на доцільність впровадження нанотехнологій в холодильну промисловість. Результати дисертаційної роботи, підвищення інтенсивності процесів теплообміну в апаратах холодильного обладнання шляхом використання нанотеплоносіїв використовуються при проектуванні обладнання на ПрАТ «УКпостач» («UBC Group»), м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Результати наведені в дисертації мають важливе значення для холодильної техніки, перспектив наукового та практичного використання результатів. Особисто здобувачем створена і апробована експериментальна установка для дослідження КТВ при вимушеній конвекції при течії теплоносія в трубі, виконано весь обсяг експериментальних досліджень

теплофізичних властивостей багатокомпонентних холодоносіїв, нанофлюїдів і локальних КТВ при використанні холодоносіїв з домішками наночастинок, і проведена обробка експериментальних даних. На підставі отриманих експериментальних даних автором запропонований розвиток методів прогнозування густини і в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних досліджень доповідалися автором на 12 конференціях, в тому числі 7-ми міжнародних науково-технічних конференціях: XIV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ, г. Казань, октябрь 2014 г.; X международной научно-технической конференции «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», г. Одеса, 2015 и 2017 г.; XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики і екології», г. Одеса, октябрь 2016 г.; V Міжнародна науково-технічна конференція «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Росія, Санкт-Петербург, листопад 2015 р.; 7th International Conference «Physics of liquid matter: Modern problems», Київ, травень 2016 р.; International conference «Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development» Chisinau, Republic of Moldova 2016; научно-технической конференции с международным участием «энерго- и экологически эффективные рабочие вещества в теплотехнологиях генерации холода и теплоты», Санкт-Петербург, 2016 года и 2017; 12 Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2016; 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, 2017, Seoul, Republic of Korea; 6th Rostocker International Conference: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 2017, Rostock, Germany.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 8 статтях, опублікованих у фахових періодичних журналах, з яких одна входить в міжнародні наукометричні бази даних, а 4 опубліковані в збірниках наукових праць міжнародних конференцій, і 11 роботах, опублікованих у формі тез в збірниках тез доповідей конференцій.

Структура та обсяги дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури, додатка. Обсяг роботи 135 сторінок

тексту, включаючи 43 рисунки, 14 таблиць і 102 найменування джерел. Обсяг додатків – 30 сторінок.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД РОБІТ, ПРИСВЯЧЕНИХ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ
НАНОЧАСТИНОК НА ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА
ІНТЕНСИВНІСТЬ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ ВИМУШЕНІЙ ТЕЧІЇ
НАНОФЛЮІДІВ

Інтерес до інтенсифікації процесів теплообміну присутній на всіх етапах розвитку і вдосконалення енергетичного обладнання. Потреба в економії енергії та зниженні розмірів теплообмінного обладнання, а також витрат на їх створення, стимулювала пошук різних методів збільшення коефіцієнтів тепловіддачі. У зв'язку з удосконаленням техніки і впровадженням енергозберігаючих технологій, теплові навантаження у теплообмінному обладнанні в електроніці і мікроелектроніці, теплоенергетиці, холодильній промисловості постійно збільшуються. Отже, при впровадженні сучасних технологій пред'являються нові вимоги до підвищення енергетичної ефективності як до теплообмінного обладнання, так і до використовуваних теплоносіїв. Нові покоління тепло-і холодоносіїв повинні забезпечувати передачу дедалі більшої кількості теплоти при мінімальних витратах енергії на їх циркуляцію в теплообмінному обладнанні. Традиційні теплоносії, такі як вода, масла, водні розчини етиленгліколю та пропіленгліколю в силу своїх теплофізичних властивостей не завжди забезпечують необхідну ефективність процесу тепловіддачі у теплообмінному обладнанні.

Існує ряд технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесів теплообміну в обладнанні. Головні механізми інтенсифікації теплообміну при турбулентній і ламінарній однофазних течіях теплоносіїв орієнтовані на збільшення поверхонь теплообміну, руйнування примежового шару і перебудову профілю температур [1].

Існує три основних принципи інтенсифікації тепловіддачі при однофазній течії теплоносіїв [1]:

1. Збільшення інтенсивності тепловіддачі при збереженні коефіцієнта тепловіддачі за рахунок збільшення площі теплообмінної поверхні (використання ребрення);
2. Збільшення коефіцієнта тепловіддачі без істотного збільшення площі теплообміну (застосування шорсткуватих поверхонь);
3. Збільшення як коефіцієнта тепловіддачі, так і площі теплообмінної поверхні (використанні розвинених поверхонь з турболізуючими елементами).

Основною складністю зазначених методів інтенсифікації теплообміну є той факт, що часто ці технічні рішення пов'язані з додатковими матеріальними витратами на створення і модифікацію обладнання. Крім того, реалізація заходів, орієнтованих на інтенсифікацію теплообміну, практично завжди призводить до збільшення гідравлічних втрат у теплообмінному обладнанні [1].

Альтернативою зазначеним вище методам інтенсифікації теплообміну є використання в якості теплоносіїв нанофлюїдів [2 - 6].

1.1 Нанофлюїди - перспективи застосування в якості тепло- і холодоносіїв

Одним з досить недорогих і таких, що не потребують конструктивних змін обладнання, способів інтенсифікації тепловіддачі є введення до складу традиційного теплоносія твердих частинок речовини, що має високу теплопровідність. Практика показала складність використання таких теплоносіїв-суспензій з частинками мікронного розміру з причини їх седиментаційної нестійкості у базовій рідині. Разом з тим, наявність в базовій рідині-теплоносії нанорозмірних частинок (1-100 нм) має забезпечувати їх добру седиментаційну стабільність.

У 1995 році Чои (SUS Choi) [7] вперше ввів термін «нанофлюїд» (nanofluid), який можна застосувати до ультрадисперсних систем, що складаються з базової рідини і наночастинок з розміром порядку 1-100 нм. З цього моменту почалися активні дослідження перспектив застосування нанофлюїдів в енергетичному обладнанні.

У наявних на сьогоднішній день оглядових роботах [2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10] щодо застосування нанофлюїдів як теплоносіїв відзначаються перспективи їх використання у холодильному обладнанні, в альтернативних сонячних системах для виробництва теплової енергії, як рідин для охолодження двигунів внутрішнього згоряння, у теплових трубах і в будь-якому теплообмінному обладнанні різноманітних конструкцій (в тому числі в мікроканалі) в різноманітних енергетичних системах.

У порівнянні з традиційними тепло- і холодоносіями, нанофлюїди характеризуються поліпшеними теплофізичними властивостями (насамперед, теплопровідністю) і забезпечують більш високі значення коефіцієнтів тепловіддачі як при вимушеній конвекції, так і при кипінні [2-6]. У таблиці 1.1 наведені значення теплопровідності наночастинок, перспективних для приготування нанофлюїдів, а також основних базових рідин. Незважаючи на те, що для приготування нанофлюїдів розглядаються перспективи застосування різних наночастинок (див. табл. 1.1), у наукових публікаціях дослідження властивостей і характеристик процесу теплообміну проводиться переважно для нанофлюїдів з домішками оксидів металів. При не дуже високому коефіцієнті теплопровідності, наночастинок оксидів металів не схильні до окислення (на відміну від металевих частинок), технологія їх промислового виробництва добре відпрацьована, вони відрізняються низькою вартістю, нанофлюїд на їх основі не має високої електропровідності (як при використанні нанотрубок).

Таблиця 1.1 – Теплопровідність деяких рідин і наночастинок – основних компонентів нанотеплоносіїв [6]

Матеріали (Компоненти)	Теплопровідність (Вт/м·К)
Моторне масло	0,15
Гас	0,15
Етиленгліколь	0,253
Вода	0,613
Діоксид титану (TiO ₂)	8,4
Оксид міді (CuO)	32,9

Продовження таблиці 1.1

Оксид алюмінію (Al_2O_3)	40
Платина	70
Натрій (Na)	72,3
Залізо (Fe)	80
Кадмій (Cd)	92
Графіт	120
Кремній (Si)	148
Алюміній (Al)	237
Нітрид алюмінію (AlN)	285
Золото (Au)	317
Карбід титану (TiC)	330
Карбід кремнію (SiC)	350
Мідь (Cu)	401
Срібло (Ag)	429
Вуглецеві нанотрубки	3000
Алмаз	3300

Вибір перспективних для застосування в якості тепло- і холодоносіїв нанофлюїдів повинен бути заснований як на їх теплофізичних властивостях, так і на ступені їх стійкості (незмінності дисперсного складу з часом). Слід зазначити, що маловивчене питання стійкості технічно важливих нанофлюїдів є одним із стримуючих чинників при впровадженні нанотехнологій у практику. У багатьох роботах [2-6] відзначається, що технологія приготування нанофлюїдів є дуже важливим завданням, яке сильно впливає як на стійкість отриманих дисперсних систем, так і на теплофізичні властивості базової рідини.

У зв'язку з викладеним, можна констатувати необхідність комплексного дослідження перспектив застосування нанофлюїдів в якості тепло- і холодоносія. Завдання цього дослідження повинні включати: обґрунтування технології приготування нанофлюїда, експериментальне дослідження його теплофізичних властивостей, аналіз впливу добавок наночастинок на характерні параметри роботи обладнання, в якому планується використовувати розглянутий нанофлюїд. Причому, на всіх етапах виконання експериментальних досліджень повинна проводитися оцінка стійкості використовуваного нанофлюїда. Тільки після проведення такого

комплексного дослідження можна робити висновок про перспективи застосування розглянутого нанотеплоносія в обладнанні.

1.2 Огляд експериментальних досліджень впливу добавок наночастинок на теплофізичні властивості нанофлюїдів

Детальний аналіз проведених досліджень теплофізичних властивостей нанофлюїдів наведено в роботах [4, 5, 7, 10, 11, 12, 13]. Як випливає з опублікованих оглядів [4, 5, 7, 10, 11, 12, 13], автори особливу увагу приділяють дослідженню впливу наночастинок на в'язкість і теплопровідність базових рідин. Однак до цього часу залишається недостатньо вивченим питання про вплив наночастинок на величину густини і теплоємності нанофлюїдів, перспективних для застосування в якості компонентів сумішевих холодоносіїв.

1.2.1 Густина нанофлюїдів

Запропоновані в літературі рівняння для розрахунку густини нанофлюїдів, як правило, засновані на принципах адитивності. Наприклад, в роботі [4] пропонується наступна проста, але недостатньо підтверджена експериментальними даними, формула для розрахунку густини нанофлюїдів:

$$\rho_{nf} = \varphi_{np} \cdot \rho_{np} + (1 - \varphi_{np}) \cdot \rho_{br}, \quad (1.1)$$

де φ_{np} – об'ємна частка наночастинок у базовій рідині, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ρ_{np} – густина матеріалу наночастинок, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_{br} – густини базової рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$.

У літературі є лише кілька робіт, присвячених експериментальному дослідженню впливу наночастинок на густину базових рідин. В роботі [11] представлені експериментальні дані по густині нанофлюїда пропанол/ Al_2O_3 при кімнатній температурі і діапазоні концентрацій наночастинок від 0 до 5 мас.%. Представлені дані вказують на те, що добавки наночастинок при концентрації 5%

сприяють збільшенню густини пропанолу на 7,7%. В роботі [12] автори перевірили придатність правила адитивності (1.1) розрахунку густини нанофлюїдів поліефірне масло/R143a/наночастинки Al_2O_3 в діапазоні температур від 15 до 45 °C і концентрації від 5,6 до 40 мас.%. Оскільки ця модель не забезпечувала адекватного опису отриманих даних, автори використовували в рівнянні (1.1) додаткові поправочні коефіцієнти. Автори роботи [13] навели результати дослідження густини різних нанофлюїдів на основі наночастинок Al_2O_3 , Sb_2O_5 , SnO_2 , ZnO з концентрацією від 1 до 10 об.% в розчинах етиленгліколь/вода (60:40) при температурах від 0 до 50 °C. Проведене дослідження показало, що для системи етиленгліколь/вода/наночастинки ZnO відхилення розрахованих за правилом адитивності даних від експериментальних досягають 7,5%. Чандрасекар (Chandrasekar) і ін. [11] порівняли експериментальні дані з густини нанофлюїда пропанол/ Al_2O_3 з розрахованими за правилом адитивності і так само показали деяку невідповідність отриманих величин – рис.1.1.

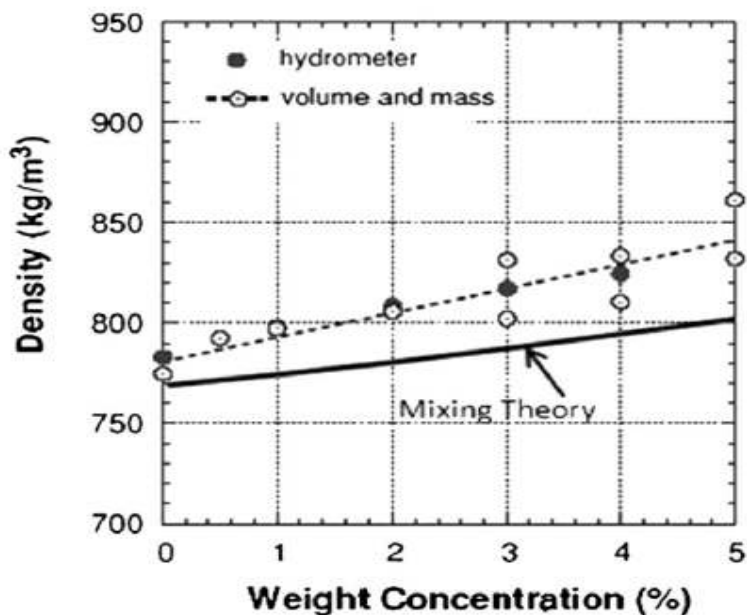


Рис.1.1 – Порівняння експериментальних значень густини нанофлюїда пропанол/ Al_2O_3 з розрахованими за правилом адитивності [14]: density (kg/m^3) – густина ($\text{кг}/\text{м}^3$); mixing theory – правило адитивності; weight concentration (%) – масова концентрація, %

Виконані дослідження густини системи ізопропанол/ Al_2O_3 [15] так само вказують на те, що рівняння (1.1) не забезпечує достатню точність прогнозування густини важливих для практичного застосування нанофлюїдів.

З виконаного огляду можна зробити висновок, що тільки експериментальні дані про величину густини при різних параметрах несуть можливості використання для подальшого прогнозування процесів теплообміну із застосуванням нанофлюїдів.

1.2.2 Питома теплоємність нанофлюїдів

У багатьох роботах відзначається [4, 16, 17], що величина теплоємності нанофлюїдів так само підпорядковується правилу адитивності. В [4, 16, 17] пропонують такі залежності для розрахунку теплоємності:

$$C_{p\text{ nf}} = \varphi \cdot C_{p\text{ np}} + (1 - \varphi)C_{p\text{ bf}}, \quad (1.2)$$

$$(\rho C_p)_{\text{nf}} = \varphi(\rho C_p)_{\text{np}} + (1 - \varphi)(\rho C_p)_{\text{bf}}, \quad (1.3)$$

де $C_{p\text{ bf}}$ – теплоємність базової рідини, $C_{p\text{ np}}$ – теплоємність наночастинок.

Разом з тим, ряд авторів відзначають відхилення експериментальних даних про теплоємність за правилом адитивності.

Намбуру (Namburu et al.) та ін. [18] провели експеримент з вимірювання питомої теплоємності нанофлюїдів на основі розчину етиленгліколь/вода (60/40% мас.) і наночастинок діоксиду кремнію. Розміри використаних наночастинок SiO_2 становили 20, 50 і 100 нм. Об'ємна концентрація наночастинок у базовій рідині змінювалася від 0 до 10%. Проведений експеримент показав, що питома теплоємність нанофлюїдів зменшується зі збільшенням концентрації наночастинок діоксиду кремнію. При концентрації 10% питома теплоємність нанофлюїдів менше приблизно на 12% у порівнянні з основною рідиною.

Важха і Дас (Vajjha and Das) [19] виміряли питому теплоємність нанофлюїда з аналогічною базовою рідиною (етиленгліколь/вода 60/40 мас%) з домішками

наночастинок Al_2O_3 (44 нм) і ZnO (77 нм), а так само нанофлюїда, деіонізована вода/наночастинки SiO_2 (20 нм). Вимірювання виконані в діапазоні температур від 42 до 82 °С і діапазоні об'ємної концентрації від 0 до 10%. Отримані результати вказують, що питома теплоємність всіх типів нанофлюїдів зменшується при збільшенні концентрації наночастинок. Навпаки, питома теплоємність збільшувалася при збільшенні температури. Отримані результати, як вказують автори, не узгоджуються з результатами розрахунку по наявних моделях для розрахунку теплоємності.

1.2.3 В'язкість нанофлюїдів

В'язкість нанофлюїдів є одним з важливих теплофізичних параметрів для їх практичного застосування в якості теплоносіїв, тому що вона безпосередньо впливає на падіння тиску і витрати енергії при примусовій циркуляції у теплообмінних апаратах робочих тіл і теплоносіїв. Як правило, в'язкість базової рідини збільшується з додаванням наночастинок. Крім того, в'язкість також залежить від об'ємної концентрації частинок, розміру частинок в рідині і температури.

Кака і Праманьяроенкій (Какаç and Pramanjaroenkij) узагальнили емпіричні кореляції для розрахунку в'язкості нанофлюїдів в своєму огляді [4]. Автори виконали аналіз експериментальних досліджень в'язкості нанофлюїдів на базі різних базових рідин і наночастинок (див. табл.1.2). Наведені у цій таблиці дані вказують на суттєві відмінності між в'язкістю базової рідини і в'язкістю нанофлюїдів, які потенційно можуть розглядатися як компоненти нанохолодоносіїв. Потрібно відзначити, що в таблиці 1.2 деякі дані про відносну в'язкість наведені без вказівки інтервалу температур, в якому проведені дослідження. Ця обставина знижує достоїнство цього цікавого огляду.

Таблиця 1.2 – Огляд експериментальних досліджень відносної в'язкості нанофлюїдів [4]

Базова рідина	Наночастинки	Об'ємна концентрація, % об.	Відносна в'язкість
Вода	Al ₂ O ₃	0,01–0,30	1,029
	Al ₂ O ₃	0,00–5,00	2,36
	Al ₂ O ₃ (36nm)	0,00–13,00	4,5
	Al ₂ O ₃ (47nm)	0,00–13,00	5,5
	Al ₂ O ₃	0,00–6,00	1,6–1,8
	Al ₂ O ₃ (<50 nm)	0,13–2,90	1,3
	Al ₂ O ₃ (<20 nm)	0,13–2,90	1,8
	TiO ₂	0,20–2,00	1,15
	Fe ₃ O ₄	0,00–2,83	2
	Fe	0,00–4,00	11,25
	Ag	0,30/0,06/0,09	1,06–1,43
	CuO	1,00–6,12	4
	CuO	0,16–1,70	1,14/1,81
	SiC	0,01–0,30	1,029
Етилен-гліколь	Al ₂ O ₃	1,00–10,00	1,37
	Титанатові нанотрубки	0,10–1,80	1,7
	Al ₂ O ₃	0,00–6,00	1,22
	CuO	0,00–6,00	1,24
	ZnO	0,20–5,00	1,15
	Алмази	1,00	1,01

Експериментальні дослідження в'язкості нанофлюїдів наведені у великій кількості опублікованих робіт [4, 12, 18, 20, 21, 22, 23]. Еліас (Elias) і ін. [20] представили нові дані з в'язкості нанофлюїдів на основі води, етиленгліколю і наночастинок Al₂O₃, (об'ємна концентрація від 0,0 до 1,0%). Автори показали, що в'язкість нанофлюїда збільшувалася зі збільшенням об'ємної концентрації наночастинок і зі зменшенням температури. У проведених дослідженнях передбачалося, що базова рідина є ньютонівською. Це припущення є досить суперечливим для нанофлюїдів, особливо при відносно високій концентрації наночастинок і низькій температурі.

Хечей (Hachey) та ін. [21] експериментально досліджували в'язкість двох нанофлюїдів: вода/наночастинки $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ і етиленгліколь/ $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$. Розмір наночастинок у порошку був 10 нм, концентрація наночастинок становила 1,0, 2,5 і 5,0 об.%. Авторами показано, що для деяких зразків величина в'язкості була значно вищою за очікувану і оціненою за наявними в літературі кореляціями.

Манікейндан (Manikandan) і ін. в роботі [22] наводять результати дослідження в'язкості розчинів пропіленгліколь/оксид кремнію. Автори прийшли до висновку, що при концентрації наночастинок 0,2% в'язкість нанофлюїдів зменшується в інтервалі температур від 29 до 1400 °C. Автори цієї роботи припустили, що в добре диспергованих нанофлюїдах взаємодія між наночастинками і пропіленгліколем на поверхні наночастинок призводить до порушення водневих зв'язків між молекулами пропіленгліколя, що призводить до зниження в'язкості у порівнянні з чистим пропіленгліколем.

Сінг (Singh) та ін. [23] використовували наночастинки міді для приготування нанофлюїдів з використанням промислових теплоносіїв (термінол 59 і термінол 66 – на основі алкілзаміщених ароматичних вуглеводнів) для сонячних колекторів. Вони вимірювали динамічну в'язкість нанофлюїдів і прийшли до висновку, що якщо домогтися гарної дисперсії наночастинок, зразки для досліджень можуть розглядатися як ньютонівські рідини. Динамічна в'язкість досліджуваних зразків нанофлюїдів збільшувалася незначно у порівнянні з базовою рідиною при температурі 125 °C і вище.

В даний час пропонується велика кількість моделей для розрахунку в'язкості нанофлюїдів. Огляд цих моделей представлений, наприклад, в роботі [4]. Майже всі запропоновані кореляції засновані на введенні в рівняння Енштейна [4] (див. рівняння (1.4)) додаткових членів, які є функцією об'ємної концентрації наночастинок:

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\varphi)\mu_{bf}, \quad (1.4)$$

де μ_{nf} – об'ємна концентрація нанofлюїда, μ_{bf} – об'ємна концентрація базової рідини.

Разом з тим, багато дослідників пропонують різні емпіричні рівняння для розрахунку в'язкості, відзначаючи при цьому, що вони можуть бути застосовані тільки для певної системи. Таким чином, можна констатувати, що при дослідженні процесів теплообміну нанofлюїдів необхідно володіти достовірною інформацією про температурні залежності в'язкості об'єктів дослідження, отримати яку можна тільки на підставі проведення експерименту.

1.2.4 Теплопровідність нанofлюїдів

Детальні огляди досліджень, які присвячені вивченню теплопровідності нанofлюїдів, були представлені Кака і Прамуаньяроенкій (Kakaç and Pramuanjaroenkij) [4], Ломасколо (Lomascolo M.) [5], Чандрасекар (Chandrasekar) та ін. [14]. У цих оглядах виконаний аналіз численних теоретичних моделей прогнозування теплопровідності нанofлюїдів, а також наведені експериментальні дослідження різних авторів. Результати деяких експериментальних досліджень, які присвячені вивченню теплопровідності нанofлюїдів, перспективних для розробки багатокomпонентних холодоносіїв, наведені в таблиці 1.3 [4].

Таблиця 1.3 – Експериментальні дані про теплопровідність нанofлюїдів, перспективних для застосування в якості теплоносіїв [4]

Базова рідина	Нано–частинки	Об'ємна концентрація, %	Внесок у збільшення теплопровідності, %
Вода	Al ₂ O ₃	0,01–0,30	1,44
	Al ₂ O ₃	0,33–3,00	9,7
	Al ₂ O ₃	0,40	13
	TiO ₂	0,20–2,00	7
	TiO ₂	0,20–2,00	37
	Fe	0,00–4,00	14,9/25
	Ag	0,30/0,06/0,09	30

Продовження таблиці 1.3

Вода	CuO	1,00	5
	CuO	0,30	300
	SiO ₂	1,00–4,00	23
	SiO ₂	1,00	3
Етиленгліколі	AlN	1,00–10,00	38,71
	Cu	0,30/0,50	46
	Al ₂ Cu	2,50	120
	CuO	1,00	9
	Ag	1000–10,000 ppm	18
	алмази	0,10–1,00	17,23

Багато дослідників, що займаються експериментальним дослідженням теплопровідності нанофлюїдів, показують, що на величину теплопровідності нанофлюїда впливають як матеріал і концентрація наночастинок, так і їх розмір [4].

Салех (Saleh at. all.) та ін. в роботі [24] навели результати дослідження теплопровідності нанофлюїдів TiO₂/вода, які можуть використовуватися в якості робочих рідин у теплових трубах. Автори виявили, що відносна теплопровідність з ростом температури нелінійно зростає з додаванням наночастинок, а існуючі теоретичні моделі не пояснюють спостережуване збільшення теплопровідності нанофлюїдів TiO₂/вода.

Манікейнандан (Manikandan at. all.) та ін. в роботі [22] показали лінійне збільшення теплопровідності зі зростанням концентрації наночастинок у базовій рідині (на 46,2% при 10 °C і об'ємній концентрації наночастинок 2%). Автори вказують на роль абсорбції шарів рідини на наночастинках на підвищення теплопровідності нанофлюїдів на основі пропіленгліколей.

Сінг (Singh) в роботі [23] представили дані з теплопровідності нанофлюїдів на основі двох промислових теплоносіїв і наночастинок міді. Автори виявили, що у розглянутих нанофлюїдів теплопровідність зростає зі збільшенням концентрації наночастинок міді.

Ли (Lee) в роботі [25] наводять результати дослідження теплопровідності з урахуванням структурних змін нанофлюїдів в часі. При проведенні досліджень автори використовували п'ять різних нанофлюїдів: Al₂O₃/вода, SiO₂/вода, Ag/вода,

Al_2O_3 /етиленгліколь і ZnO /етиленгліколь. Автори підтвердили, що збільшення об'ємної концентрації та зменшення розміру наночастинок призводять до збільшення теплопровідності нанофлюїдів.

У розглянутих вище роботах автори детально аналізують вплив добавок наночастинок на теплофізичні властивості різних рідин. Незважаючи на велику кількість опублікованих робіт, присвячених вивченню теплофізичних властивостей нанофлюїдів, слід зазначити кілька аспектів. По–перше, основна увага зазвичай приділяється розгляду лише теплопровідності і в'язкості, в той час як практично відсутній аналіз впливу наночастинок на густину, теплоємність і поверхневий натяг базових рідин. По–друге, досить мало робіт, в яких наводяться експериментальні дані, присвячені вивченню теплофізичних властивостей нанофлюїдів на основі багатокомпонентних розчинів. По–третє, наведені в літературі кореляції для розрахунку теплофізичних властивостей нанофлюїдів не мають властивості універсальності. Тобто, зазначені вище особливості сильно ускладнюють проведення експериментального дослідження впливу добавок наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів і вимагають наявності експериментальної інформації по кожній конкретній системі базова рідина/наночастинок.

1.3 Огляд експериментальних досліджень процесу тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів

Експериментальне дослідження процесу конвективної тепловіддачі при русі нанофлюїдів у трубах і каналах було проведено низкою дослідників [4, 5, 6, 26-36]. Результати деяких експериментальних досліджень, які присвячені вивченню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів у трубах і каналах, наведені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів в трубах і каналах

Об'єкт дослідження	Об'ємна концентрація, %	Інтервал чисел Re	Збільшення тепловіддачі, %	Дослідники
CuO/вода	0,3–2,00	10000 – 20000	6 – 39	Xuan Y., Li Q [26]
Al ₂ O ₃ /вода	1,6	500 – 2100	47	Wen D, Ding Y [27]
Al ₂ O ₃ /вода,	6	992.40 – 2927	17–27	Rea U. [39]
Zr/вода	1,32	1182 – 1934	2–3	Rea U. [39]
Al ₂ O ₃ /вода	1,34–4,33	104 – 105	45–75	Pak BC [30]
TiO ₂ /вода	0,99–4,35	104 – 105	12	Pak BC. [30]
CuO/вода	0,031–0,236	5180 – 32900	25	Fotukian SM. [31]
TiO ₂ /вода	0,2–2,0	3000 – 18000	14–26	Duangthongsuk W [33]
вода/титанові нанотрубки	2,5	1100 – 2300	13,5	Chen H [34]
Al ₂ O ₃ /вода	0,3	550 – 700	8,0	Hwang KS [35]
вода/багатошарові вуглецеві нанотрубки	0,25	1400 – 4550	33 – 40	Amrollahi A. [36]

В роботі [26] наведені результати експериментальних досліджень коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїду (вода/наночастинки міді) при турбулентному режимі течії. Автори цієї роботи констатують, що спостерігається збільшення коефіцієнта тепловіддачі в усьому розглянутому в роботі інтервалі чисел

Рейнольдса. Причому підвищення коефіцієнта тепловіддачі було пропорційно концентрації наночастинок у базовій рідині.

В роботі [27] автори привели результати експериментального дослідження коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїда, що складається з води і 1,6 об.%. наночастинок Al_2O_3 . Отримані експериментальні дані вказують на збільшення коефіцієнта тепловіддачі на 47% у порівнянні з використанням базової рідини.

Дослідження теплообміну при ламінарній течії нанофлюїдів, що складаються з води і наночастинок Al_2O_3 з декількома концентраціями, представлено так само в роботі [28]. За результатами проведеного дослідження автори відзначають збільшення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїда, пропорційне концентрації наночастинок.

Автори роботи [29] так само провели дослідження коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанохолодоносія на основі води і наночастинок Al_2O_3 у мікроканалі. Отримані ними результати вказують на істотне збільшення коефіцієнта тепловіддачі.

В роботі [30] автори досліджували коефіцієнт тепловіддачі в інтервалі чисел Рейнольдса, характерного для турбулентного режиму руху для двох видів нанофлюїда на основі води і наночастинок Al_2O_3 і TiO_2 . У цій роботі не було проведено експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі для базової рідини. Виконаний аналіз розрахункових значень коефіцієнта тепловіддачі показав його збільшення при використанні нанофлюїдів.

Автори роботи [31] досліджували коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному режимі течії нанофлюїда, що складається з води/наночастинок CuO з концентраціями від 0,031 до 0,236 об.%. Автори зареєстрували збільшення коефіцієнта тепловіддачі в середньому на 25% у порівнянні з базовою рідиною.

У статті [32] ці ж дослідники експериментально визначили коефіцієнт тепловіддачі при турбулентному режимі течії нанофлюїда, що складається з води і наночастинок $\gamma-Al_2O_3$. Отримані результати дослідження вказують на збільшення коефіцієнта тепловіддачі у порівнянні з процесом теплообміну при використанні

базової рідини (води). У цій роботі в якості об'єкта дослідження розглядалися нанофлюїди з різною об'ємною концентрацією наночастинок, яка завжди не перевищувала 0,2%. У проведених дослідженнях [31, 32] значної зміни коефіцієнта тепловіддачі в залежності від зміни концентрації наночастинок не було зареєстровано. Разом з тим, позитивний ефект від добавок наночастинок спостерігався навіть при малих концентраціях наночастинок в базовій рідині.

Наведені в роботі [33] результати експериментального дослідження процесу тепловіддачі при турбулентному режимі течії нанофлюїда, що складається з води і наночастинок TiO_2 з концентрацією від 0,2 до 2,0 об.%, вказують на збільшення коефіцієнта тепловіддачі приблизно на 26% при концентрації наночастинок до 1,5 об.% і зменшення коефіцієнта тепловіддачі приблизно на 14% при концентрації 2,0 об.%.

Акбарінія і Бехзадмерх (Akbarinia and Behzadmehr) [37] з використанням чисельних методів передбачили збільшення КТВ для нанофлюїдів з домішками наночастинок Al_2O_3 у горизонтальній трубі при розвиненому ламінарному режимі течії теплоносія.

(Чен) (Chen) [34] в результаті експериментального дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеному ламінарній течії нанофлюїда вода/титанові нанотрубки (2,5 мас.%) показали збільшення КТВ на 13,5% у порівнянні з чистою водою.

Хванг (Hwang) в роботі [35] відзначають збільшення КТВ на 8,0% для нанофлюїда вода/наночастинки Al_2O_3 (0,3 мас.%) при сформованому ламінарній течії.

В роботі [36] Амролахай (Amrollahi) досліджував процес тепловіддачі при вимушеному ламінарному і турбулентному режимі течії на початковій термічній ділянці теплообмінника для нанофлюїда вода/багатошарові вуглецеві нанотрубки (0,25 мас.%). Автором було показано збільшення КТВ (в порівнянні з чистою водою) на 33-40%.

Хьюмінік Г, Хьюмінік А (Huminic G, Huminic A) [38] з використанням чисельних методів показали інтенсифікацію тепловіддачі на 14% (в порівнянні з

базовою рідиною) для нанофлюїда з домішками наночастинок CuO (2,0 об.%) при ламінарному режимі течії у теплообміннику типу труба в трубі.

Робота [39] була присвячена експериментальному дослідженню коефіцієнта тепловіддачі і втрат напору при ламінарній течії нанофлюїдів на початковій термічній ділянці труби при граничних умовах другого роду (сталості теплового потоку). Дослідження проводилися для двох типів нанофлюїдів на основі води і наночастинок алюмінію і цирконію. Показано, що коефіцієнт тепловіддачі на початковій термічній ділянці труби і на сталій тепловій ділянці приймає значення на 17% і 27% більше ніж для чистої води, для нанофлюїда з вмістом 6 об.% наночастинок алюмінію, для нанофлюїда із вмістом 1,32 об.% цирконію ці ж величини незначно вище ніж для чистої води – на 2% і 3%, відповідно. У цій же роботі автори відзначають збільшення втрат напору при використанні нанофлюїдів у порівнянні з чистою водою. Крім того, автори прийшли до висновку, що виміряні значення як КТВ, так і коефіцієнта опору тертя знаходяться у хорошій відповідності з розрахованими за традиційними емпіричними залежностями для ламінарної течії рідин, за умови використання теплофізичних властивостей нанофлюїдів. В результаті проведеного дослідження автори роботи [39] не зафіксували аномального збільшення КТВ при проведенні експериментальних досліджень для двох зразків нанофлюїдів.

Підбивши підсумок виконаного короткого огляду, присвяченого експериментальним дослідженням інтенсивності тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів, можна зробити висновок про те, що присутність наночастинок у базовій рідині сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі. Отриманий ефект впливу наночастинок на інтенсивність теплообміну різний у різних авторів. Іноді цей ефект можна порівняти з похибкою експерименту з визначення конвективного коефіцієнта тепловіддачі. Крім того, слід зауважити, що в літературі є публікації, в яких відзначається зменшення коефіцієнта тепловіддачі при додаванні в базову рідину наночастинок [33].

1.4 Огляд існуючих моделей для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів

В даний час дослідниками, які займаються вивченням процесів конвективного теплообміну при вимушеній течії нанофлюїдів, запропоновані напівемпіричні кореляції, які переважно базуються на описі експериментальних даних для конкретних нанофлюїдів [4, 6]. Кореляцій, прийнятних для опису процесу теплообміну при вимушеній течії усього розмаїття перспективних в якості теплоносіїв нанофлюїдів (як при ламінарному, так і при турбулентному режимах), в даний час немає. Цей факт можна пояснити як великою різницею властивостей нанофлюїдів, так і не вивченим в повній мірі механізмом інтенсифікації тепловіддачі при добавці наночастинок в базову рідину.

В даний час запропонована досить велика кількість кореляцій для опису процесу конвективної тепловіддачі при вимушеній ламінарній і турбулентній течії рідин в трубах і каналах. Розглянемо основні емпіричні залежності для оцінки коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії рідин у трубах і каналах.

У разі в'язкісного (ламінарного) режиму інтенсивність тепловіддачі залежить від відносної довжини труби, тому що процес тепловіддачі стає сталим тільки у трубах значної довжини.

Для ламінарного руху у початковій термічній ділянці труби в [40, 41] рекомендується використовувати рівняння виду:

$$\overline{Nu} = c \left(Pe \frac{d}{l} \right) \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^m, \quad (1.5)$$

де μ_f – коефіцієнт динамічної в'язкості при температурі на вході у канал; μ_w – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини при температурі стінки, d – еквівалентний діаметр каналу; l – довжина ділянки каналу, на якому розраховується середнє значення числа Нуссельта.

Слід зазначити, що визначальним критерієм подібності в даному процесі є число Нуссельта, а визначальним – число Пекле (яке можна представити як добуток числа Рейнольдса на число Прандтля).

$$Pe = \frac{\omega \cdot l}{a}, \quad (1.6)$$

$$Re = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (1.7)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (1.8)$$

де ω – швидкість потоку рідини відносно поверхні теплообміну, l – лінійний розмір поверхні теплообміну, a – коефіцієнт температуропровідності, d – гідравлічний діаметр, ν – кінематична в'язкість.

В роботі [41] для розрахунку середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі для комбінованої початкової ділянки (коли формування гідродинамічного і теплового примежового шару відбувається одночасно) при $T_c = \text{const}$, ($0,60 \leq Pr \leq 5$ і $0,004 \leq (\mu_f / \mu_w) \leq 9,75$) рекомендується використовувати залежність:

$$\overline{Nu} = 1.86 \left(\frac{Re_d Pr}{l/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,14}. \quad (1.9)$$

В роботі [41, 42] автори для розрахунку середнього по довжині КТВ для початкової термічної ділянки (коли гідродинамічний прикордонний шар вже сформований) при $T_c = \text{const}$ рекомендують використовувати залежність:

$$\overline{Nu} = 3.66 + \frac{0.0668 \cdot (d/l) \cdot Re_d Pr}{1 + 0.04 \cdot [(d/l) \cdot Re_d Pr]^{2/3}}. \quad (1.10)$$

Дана залежність може бути застосована для комбінованої початкової ділянки і рекомендована до використання, коли не застосовується рівняння (1.8) (при $Pr \geq 5$) [41]. В роботі [42] автори не відзначають ніяких обмежень за значенням числа Прандтля при використанні залежності (1.10) для розрахунку середнього по довжині КТВ для початкової термічної ділянки. Властивості рідини в рівняннях (1.9) і (1.10) приймаються при середній температурі потоку (середній температурі між входом і виходом теплоносія).

В роботі [40, 42] автори для розрахунку середнього по довжині КТВ для початкової термічної ділянки при $T_c = \text{const}$ (а так само при температурі стінки, що слабо змінюється по довжині), рекомендують використовувати залежність:

$$\overline{Nu} = 1.55 \left(\frac{Re_d Pr}{1/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14}. \quad (1.11)$$

Рівняння може бути застосовано при $\frac{1}{Re_d Pr} \cdot \frac{1}{d} \leq 0,05$.

Для комбінованої початкової ділянки в роботі [40] пропонується в рівняння (1.11) вводити поправку:

$$\varepsilon_1 = 0.10 \left(\frac{1}{Re} \cdot \frac{1}{d} \right)^{-1/7} \left/ \left(1 + 2.5 \frac{1}{Re} \cdot \frac{1}{d} \right) \right. . \quad (1.12)$$

В роботі [42] для розрахунку локального по довжині КТВ для початкової термічної ділянки при $T_c = \text{const}$ (а так само при температурі стінки, що слабо змінюється по довжині), автори рекомендують використовувати залежність:

$$Nu_x = 1.03 \left(\frac{Re_d Pr}{x/d} \right)^{1/3}. \quad (1.13)$$

Рівняння може бути застосовано при $\frac{1}{Re_d Pr} \cdot \frac{X}{d} \leq 0,01$.

Властивості рідини в рівняннях (1.11) і (1.13) приймаються при температурі, середній між температурою потоку і стінки каналу.

Визначальним розміром, що вводиться у числа Nu і Re у всіх розглянутих рівняннях (1.5)-(1.13) є внутрішній діаметр труби або еквівалентний діаметр каналу.

Для розрахунку локального значення коефіцієнта тепловіддачі на початковій термічній ділянці труби при умові сталого теплового потоку часто використовують рівняння Шаха [6]:

$$\begin{aligned} Nu_x &= 1.953 \left(\frac{Re_d Pr}{X/d} \right)^{1/3} \quad \text{при} \quad \left(\frac{Re_d Pr}{X/d} \right) \geq 33.3; \\ Nu_x &= 4.364 + 0.0722 \left(\frac{Re_d Pr}{X/d} \right) \quad \text{при} \quad \left(\frac{Re_d Pr}{X/d} \right) < 33.3. \end{aligned} \quad (1.14)$$

В роботі [4] була зроблена спроба визначення середнього числа Нуссельта для початкової термічної ділянки труби при ламінарній течії нанофлюїдів з використанням добре відомої кореляції (1.9).

На рис 1.2 представлені експериментальні дані для середнього коефіцієнта тепловіддачі на початковій термічній ділянці труби при вимушеній течії нанофлюїда вода/наночастинки Al_2O_3 , наведені в роботі [28]. Як впливає з наведеного з рисунка, кореляція (1.9) (пунктирні лінії) дозволяє отримати сильно занижені значення для коефіцієнта тепловіддачі у порівнянні з експериментальними даними. Цей результат може бути пояснений тим, що при розрахунку значень Nu по кореляції (1.9) використовувалися тільки дані про теплофізичні властивості нанофлюїдів. Результати порівняння розрахованих локальних значень КТВ для початкової термічної ділянки труби по кореляції Шаха (1.14) і отриманих експериментальних даних для нанофлюїда Cu /вода з роботи [43] наведені на рис.1.2. Як впливає з інформації, наведеної на рис.1.2, кореляція (1.14) (пунктирні лінії) дозволяє отримати сильно занижені значення КТВ в порівнянні з експериментальними даними.

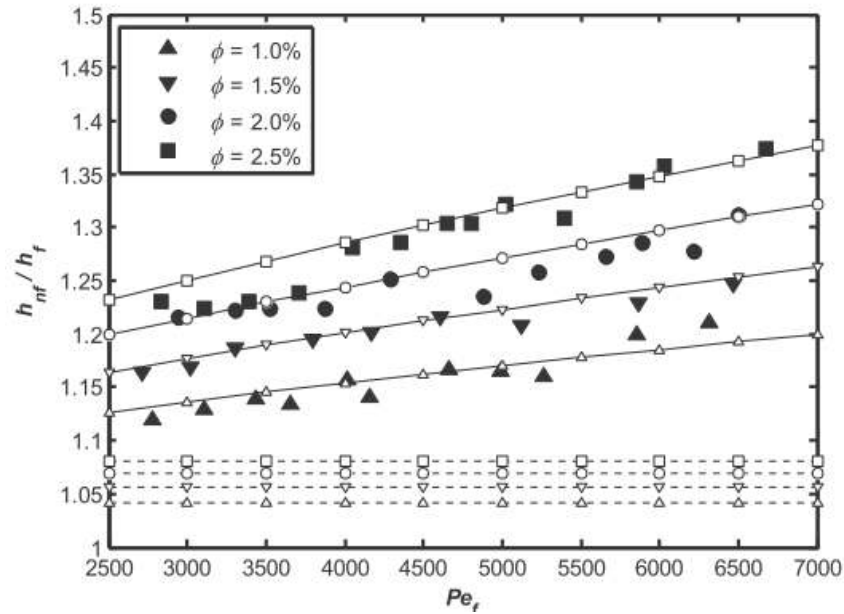


Рис.1.2 – Порівняння розрахованих з використанням кореляції (1.9) значень КТВ (пунктирні лінії) з експериментальними даними (чорні маркери) для нанофлюїда вода/наночастинки Al_2O_3 , що наведені в [28]: h_{nf}/h_f – відношення значень КТВ для нанофлюїда до значень КТВ для базової рідини

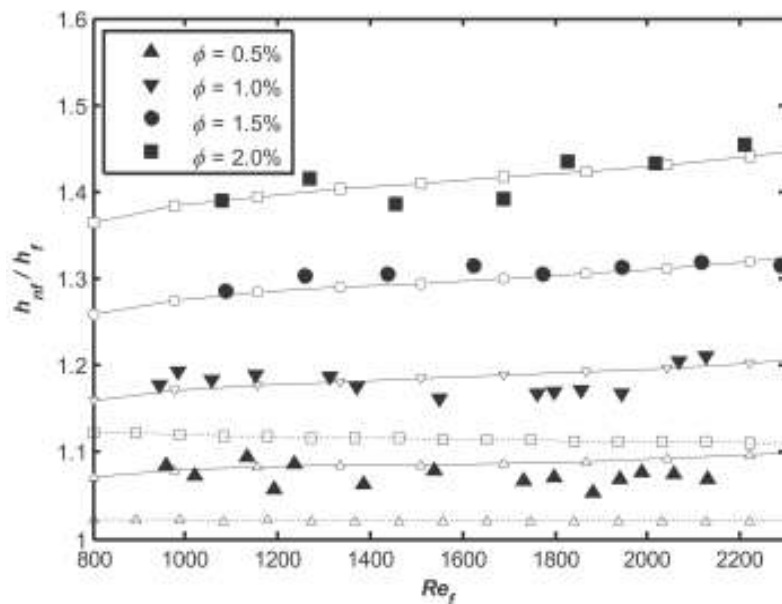


Рис.1.3 – Порівняння розрахованих з використанням кореляції (1.5) локальних значень КТВ (пунктирні лінії) з експериментальними даними (чорні маркери) для нанофлюїда вода/наночастинки Cu , які наведені в роботі [43]: h_{nf}/h_{bf} – відношення локального значення КТВ для нанофлюїда до локального значення КТВ для базової рідини (в певному перерізі початкової термічної ділянки)

Таким чином, можна констатувати, що класичні кореляції для опису процесу тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів не забезпечують достатню точність розрахунку КТВ і вимагають своєї подальшої модифікації.

Разом з тим, слід зазначити, що є незначна кількість робіт [39, 44], в яких показана добра відповідність розрахованих за емпіричними рівняннями (без їх модифікації, з введенням додаткових комплексів, які враховують концентрацію і характеристики наночастинок) і експериментальних значень КТВ.

Наприклад, в роботі [39] авторами для розрахунку локального КТВ для ламінарної течії двох нанофлюїдів (на основі води і наночастинок Al_2O_3 і ZrO_2) з різною концентрацією наночастинок на початковій термічній ділянці експериментальної установки було запропоновано рівняння:

$$Nu_{nf} = 1.619(x^+)^{1/3} \text{ при } x^+ < 0.01, \quad (1.15)$$

$$\text{де } x^+ = \frac{2(X/d)}{Re \times Pr}$$

Автори роботи [39] рекомендують використовувати дане рівняння при наступних параметрах:

$$431 < Re < 2000, 0 < \varphi < 6.0 \text{ об.}\% \text{ Для } Al_2O_3,$$

$$140 < Re < 362, 0 < \varphi < 3.0 \text{ об.}\% \text{ Для } ZrO_2.$$

Результати розрахунку за цією залежністю з використанням теплофізичних властивостей нанофлюїдів добре узгоджуються з даними, отриманими в експерименті. Залежність (1.15) була отримана при обробці експериментальних даних для двох нанофлюїдів при декількох значеннях концентрації наночастинок і не включає в себе ніяких додаткових комплексів. Ця обставина не відрізняє запропоновану кореляцію від класичних емпіричних рівнянь для розрахунку локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі при ламінарній течії рідин на початковій термічній ділянці труби при граничних умовах другого роду.

Автори роботи [44] для опису середнього коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів використовували рівняння виду (1.16), обмежившись лише з підбором нових значень коефіцієнтів рівняння:

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = a\text{Re}^b\text{Pr}^{1/3} \left(\frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu_{\text{nf}}} \right)^{1/3}. \quad (1.16)$$

Автори визначають область застосування цього рівняння параметрами: $5 < \text{Re} < 120$, $0 < \phi < 2.5$ об. %.

Для нанofлюїдів на основі наночастинок графіту і промислового масла, що застосовуються в автоматичних коробках передач, були підібрані коефіцієнти a і b . В роботі [44] показано, що ці коефіцієнти залежать від складу нанofлюїда і його температури.

Розглянемо деякі кореляції для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанofлюїдів при ламінарній течії в трубах і каналах, а так само область їх застосування.

Залежність, яка наведена в роботі [4], була отримана для ламінарної течії нанofлюїдів на основі води і наночастинок Cu з об'ємною концентрацією наночастинок до $\phi = 2,0\%$ в інтервалі чисел Re від 800 до 4000.

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.4328(1 + 11.258 \cdot \phi^{0.754} \text{Pe}_d^{0.218}) \text{Re}^{0.333} \text{Pr}^{0.4}. \quad (1.17)$$

У роботах [4, 45] автори наводять залежність (1.17), яка була отримана для ламінарної течії гібридного нанofлюїда на основі води і $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cu}$ наночастинок. Залежність справедлива при концентрації наночастинок до $\phi = 0,1$ об. %.

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.031(\text{Re}_d \text{Pr})^{0.68} (1 + \phi)^{95.73}. \quad (1.17)$$

Для цього ж нанofлюїда при $\text{Re} < 2300$ в [4] наведена залежність для розрахунку коефіцієнта опору тертя:

$$f_{nf} = 26.4 \text{Re}_d^{-0.8737} (1 + \phi)^{156.23}. \quad (1.18)$$

Ануп (Аноор) зі співавторами в роботі [46] досліджували вплив розміру наночастинок на конвективний теплообмін нанофлюїдів з наночастинками Al_2O_3 і водою в якості базової рідини при розвиненому ламінарному режимі течії. При обробці експериментальних даних авторами [46] була отримана залежність (1.19), яка може бути застосована при $500 < \text{Re} < 2000$, для об'ємної концентрації наночастинок $0 < \phi \leq 4,0\%$:

$$\text{Nu}_{nf} = 4.36 + \left[a + x^{-b} (1 - \phi^c) \exp(-dx_+) \right] \left[1 + e \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{-f} \right], \quad (1.19)$$

де $x_+ = \frac{x}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot d}$; $a = 6.219 \cdot 10^{-3}$, $b = 1.1522$, $c = 0.1533$, $d = 2.5228$, $e = 0.57825$, $f = 0.2183$; $d_{ref} = 100$ нм; d_p – діаметр наночастинок.

Дане рівняння було отримано за результатами експериментального дослідження нанофлюїда з діаметром наночастинок 45 та 150 нм.

Ли і Хуан (Li and Xuan) в роботі [47] запропонували залежність (1.20), яка була отримана для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній ламінарній ($800 < \text{Re} < 4000$) течії нанофлюїдів і наночастинок Cu при їх об'ємній концентрації $0 < \phi < 2, 0\%$:

$$\text{Nu}_{nf} = 0.4328 \left(1 + 11.258 \cdot \phi^{0.754} \text{Pe}_d^{0.218} \right) \text{Re}_d^{0.333} \text{Pr}^{0.4}. \quad (1.20)$$

У цій роботі [47] автори відзначають інтенсифікацію процесу тепловіддачі на 60% (у порівнянні з базовою рідиною) для нанофлюїдів з концентрацією наночастинок 2,0 об.%.

Слід зазначити, що розглянуті кореляції не носять універсальний характер, тому що вони отримані при обробці експериментальних даних конкретних об'єктів дослідження. Отримати універсальну залежність для розрахунку числа Нуссельта тільки з використанням даних про теплофізичні властивості нанофлюїдів без урахування механізмів інтенсифікації тепловіддачі при конвекції нанофлюїдів неможливо. Механізми підвищення інтенсивності теплообміну в нанофлюїдах не є на сьогоднішній день в повній мірі вивченими. Тому робота, присвячена експериментальному дослідженню впливу добавок наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії тепло- і холодоносіїв є актуальною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1]. Попов И. А., Махьянов Х. М., Гуреев В. М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Казань: Центр инновационных технологий. 2009. 222 с.
- [2]. Rajaa M., Vijayana R., Dineshkumar P., Venkatesan M. Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 64. P. 163-173.
- [3]. Masoud Bozorg Bigdeli, Matteo Fasano, Annalisa Cardellini, Eliodoro Chiavazzo, Pietro Asinari. A review on the heat and mass transfer phenomena in nanofluid coolants with special focus on automotive applications. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 60. P. 1615-1633.
- [4]. Kakaç S., Pramuanjaroenkij A. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids -A state-of-the-art review. *International journal of thermal sciences*. 2016. Vol. 100. P. 75-97.
- [5]. Mauro Lomascolo, Gianpiero Colangelo, Marco Milanese, Arturo de Risi. Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2015. Vol. 43. P. 1182-1198.
- [6]. Sundar L. S., Singh M. K. Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 20. P. 23-35.
- [7]. Choi S.U.S., Eastman J.A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles .*ASME-Publications-Fed*. 1995. Vol. 231. P. 99-106.
- [8]. Omid Mahian, Ali Kianifar, Soteris A. Kalogirou, Ioan Pop, Somchai Wongwises. A review of the applications of nanofluids in solar energy .*International journal of heat and mass transfer*. 2013. Vol. 57. № 2. P. 582-594.
- [9]. Sureshkumar R., Mohideen S. T., Nethaji N. Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 20. P. 397-410.

[10]. Ali Celena, Alican Çebia, Melih Aktasa, Omid Mahianb, Ahmet Selim Dalkilica, SomchaiWongwises. A review of nanorefrigerants: flow characteristics and applications .International journal of refrigeration. 2014. Vol. 44. P. 125-140.

[11]. Sommers A. D., Yerkes K. L. Experimental Investigation into the Convective Heat Transfer and System-Level Effects of Al₂O₃-Propanol Nanofluid. Journal of nanoparticle research. 2010. Vol. 12. № 3. P. 1003-1014.

[12]. Kedzierski M. A. Viscosity and density of aluminum oxide nanolubricant. International journal of refrigeration. 2009. Vol. 36 № 4. P. 1333-1340.

[13]. Vajjha R. S., Das D. K., Mahagaonkar B. M. Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory. Petroleum science and technology. 2009. Vol. 27. № 6. P. 612-624

[14]. Chandrasekar M., Suresh S., Senthilkumar T. Mechanisms proposed through experimental investigations on thermophysical properties and forced convective heat transfer characteristics of various nanofluids a review. Renewable and sustainable energy reviews. 2012. Vol. 16. № 6. P. 3917-3938.

[15]. Vitaly Zhelezny, Taras Lozovsky, Vladimir Gotsulskiy, Nikolai Lukianov, Igor Motovoy. Research into the influence of Al₂O₃ nanoparticle admixtures on the magnitude of isopropanol molar volume. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2017. Vol. 2. № 86. P. 33-39

[16]. Pak B. C., ChoY.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluidswith submicron metallic oxide particles. Heat transfer. 1998. Vol.11. P. 151-170.

[17]. Xuan Y., Roetzel W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. Int. Journal heat mass transfer. 2000. Vol. 43 P. 3701-3707.

[18]. Namburu P. K., Kulkarni D. P., Dandekar A., Das D. K. Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxidenanofluids . Micro nano lett. 2007. Vol. 2. № 3. P. 67-71.

[19]. Vajjha R. S., D. K. Das. Specific heat measurement of three nanofluids and development of new correlations. Heat transfer. 2009. Vol. 131. № 7.

[20]. Elias M. M., Mahbubul I. M., Saidur R., Sohel M. R., Shahrul I. M., Khaleduzzaman S. S., Sadeghipour S. Experimental investigation on the thermo-physical

properties of Al_2O_3 nanoparticles suspended in car radiator coolant, *Int. Commun. Heat mass transfer*. 2014. Vol.54. P. 48-53.

[21]. Hachey M. A., Nguyen C. T., Galanis N., Popa C.V. Experimental investigation of Al_2O_3 nanofluids thermal properties and rheology – effects of transient and steady-state heat exposure. *Journal. Therm. Sci.* 2014. Vol. 76. P. 155-167.

[22]. Manikandan S., Shylaja A., Rajan K.S. Thermo-physical properties of engineered dispersions of nano-sand in propylene glycol, *colloids surf. A physicochem. eng. aspects*. 2014. Vol.449. P. 8-18.

[23]. Singh D., Timofeeva E.V., Moravek M.R., Cingarapu S., Yu W., Fischer T., Mathur S. Use of metallic nanoparticles to improve the thermophysical properties of organic heat transfer fluids used in concentrated solar power. *Solar energy*. 2014. Vol.105. P. 468-478.

[24]. Saleh R., Putra N., Wibowo R.E., Septiadi W.N., Prakoso S.P. Titanium dioxide nanofluids for heat transfer applications. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2014 Vol. 52. P. 19-29.

[25]. Lee J., Han K., Koo J. A novel method to evaluate dispersion stability of nanofluids. *Journal of heat transfer*. 2014. Vol.70. P. 421-429.

[26]. Xuan Y., Li Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. *Journal of heat transfer*. 2003. Vol. 125. № 1. P. 151-155.

[27]. Wen D., Ding Y. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluid at the entrance region under laminar flow conditions. *International journal of heat and mass transfer*. 2004. Vol.47. P. 5181-5188.

[28]. Heris S. Z., Esfahany M. N., Etemad S. G. Experimental investigation of convective heat transfer of Al_2O_3 /water nanofluid in circular tube. *International journal of heat and fluid flow*. 2007. Vol. 28. № 2. P 203-210.

[29]. Ho C. J., Wei L. C., Li Z. W. An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al_2O_3 /water nanofluid. *Applied thermal engineering*. 2010. Vol. 30. № 2. P 96-103.

[30]. Pak B.C., Cho YI. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental heat transfer*. 1998. Vol. 11. P. 151-170.

[31]. Fotukian S.M., Esfahany M.N. Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube. *International communications in heat and mass transfer*. 2010. Vol.37. P. 214-219.

[32]. Fotukian S.M., Esfahany M.N. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute g- Al_2O_3 /water nanofluid inside a circular tube. *International journal of heat and fluid flow*. 2010. Vol. 31. P. 606-612.

[33]. Duangthongsuk W., Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO_2 –water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International journal of heat and mass transfer*. 2010. Vol. 53. P. 334-344.

[34]. Chen H., Yang W., He Y., Ding Y., Zhang L., Tan C., Lapkin A.A., Bavykin D.V. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of titanate nanotubes (nanofluids). *Powder technology*. 2008. Vol.18. P. 63-72.

[35]. Hwang K.S., Jang S.P., Choi SUS. Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids in fully developed laminar flow regime. *International journal of heat and mass transfer*. 2009. Vol.52. P. 193-199.

[36]. Amrollahi A., Rashidi A.M., Lotfi R., Meibodi M.E., Kashefi K. Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region. *International communications in heat and mass transfer*. 2010. Vol. 37. P. 717-723.

[37]. Akbarinia A., Behzadmehr A. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in horizontal curved tubes. *Applied thermal engineering*. 2007. Vol. 27. P. 1327-1337.

[38]. Huminic G., Huminic A. Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids. *International journal of heat and mass transfer*. 2011. Vol. 54. P. 4280-4287.

[39]. Rea U. Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids. *International journal of heat and mass transfer*. 2009. Vol. 52. № 7. P. 2042-2048.

[40]. Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплоотдача. Москва, Энергия. 1981. 416 с.

[41]. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.. John Wiley. *Fundamentals of heat and mass transfer*, sixth ed. Hoboken, New Jersey. 2007. P. 589

[42]. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. Москва, Энергия, 1967. 409 с.

[43]. Li Q., Xuan Y. Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid: *Technological Sciences*. 2002. Vol. 45. № 4. P. 408-416.

[44]. Yang Y., Zhang Z.G., Grulke E.A., Anderson W.B., Wu G. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International journal of heat and mass transfer*. 2005. Vol. 48. P. 1107-1116.

[45]. Suresh S., Venkataraj K.P., Selvakumar P., Chandrasekar M. Effect of Al₂O₃ – Cu/water hybrid nanofluid in heat transfer. *Experimental thermal and fluids science*. 2012. Vol. 38. P.54-60.

[46]. Anoop K. B., Sundararajan T., Das S. K. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region. *International journal of heat and mass transfer*. 2009. Vol. 52. № 9. P. 2189-2195.

[47]. Li Q., Xuan Y. Convective heat transfer and flow characteristics of Cu-water nanofluid. *Technology Science*. 2002. Vol. 45. P. 408-416.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОБЛАДНАННЯ І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Відповідно до виконаних оглядів наведених в літературі даних можна прийти до висновку про перспективність використання наночастинок в якості добавок до теплоносія для збільшення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній конвекції у теплообмінних апаратах. З наведеного вище огляду випливає, що в літературі недостатньо публікацій, присвячених дослідженню інтенсивності тепловіддачі при використанні в якості базової речовини для приготування нанофлюїдів пропіленгліколя.

Слід зауважити, що ця речовина є основним компонентом холодоносіїв, що знайшли широке застосування в холодильному обладнанні і системах кондиціонування повітря. Основними перевагами холодоносіїв на основі пропіленгліколю є добра антикорозійна стійкість і низька токсичність. Разом з тим, холодоносії на основі водних розчинів пропіленгліколей мають і недоліки, наприклад, високу в'язкість при температурах, характерних для області застосування в холодильній техніці.

В даному розділі наводиться опис об'єктів дослідження, експериментальних установок і методик проведення експериментів, виконаних автором для вирішення завдань з дослідження стійкості, теплофізичних властивостей і процесів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів.

2.1. Об'єкти для експериментальних досліджень

Об'єктами дослідження були обрані речовини, перспективні для застосування в якості холодоносіїв в холодильних системах з непрямим охолодженням. При всьому різноманітті проміжних тепло- і холодоносіїв, асортимент речовин, які застосовуються в низькотемпературних холодильних установках, вельми

обмежений. В основному застосовуються водні розчини деяких солей і розчини одно- і багатоатомних спиртів (гліколей). До відносно безпечних для людини і навколишнього середовища холодоносіїв на основі одно- і багатоатомних спиртів можна віднести тільки водні розчини пропіленгліколю і етилового спирту.

Водні розчини одноатомних і багатоатомних спиртів мають досить низькі температури початку кристалоутворення, мають порівняно невисоку корозійну активність, а також теплофізичні властивості, які відповідають вимогам, що пред'являються до холодоносіїв. Однак поліспирти мають високу в'язкість при низьких температурах, що призводить до значних витрат енергії на циркуляцію холодоносіїв, створених на їх основі в теплообмінних апаратах. Незважаючи на це, в силу своєї низької токсичності, розчини пропіленгліколю з водою знайшли широке застосування в якості холодоносіїв у холодильному обладнанні, перш за все, в харчовій промисловості.

Оскільки в'язкість багатоатомних спиртів, а також їх бінарних розчинів з водою, істотно збільшується при зменшенні температури, перспективним напрямком підвищення ефективності холодильного обладнання є використання багатокомпонентних сумішей, до складу яких, крім гліколей, входять одноатомні спирти і наночастинки.

Накопичений досвід виконаних досліджень показує [1-4], що включення до складу холодоносіїв на основі пропіленгліколю наночастинок металів і їх оксидів є перспективним напрямком підвищення ефективності холодильного обладнання. Додатки наночастинок в холодоносії сприяють збільшенню теплопровідності базового холодоносія, збільшенню коефіцієнтів тепловіддачі в теплообмінних апаратах [1-4]. Збільшення коефіцієнта тепловіддачі при використанні нанохолодоносіїв сприятиме зменшенню матеріаломісткості теплообмінних апаратів. Разом з тим, присутність наночастинок у багатокомпонентних холодоносіях зазвичай призводить до збільшення їх в'язкості [2-4], що сприятиме збільшенню енергетичних витрат на обслуговування систем непрямого охолодження.

З урахуванням викладеного, в якості об'єктів дослідження розглядалися

наступні розчини, перспективні для застосування в якості тепло- і холодоносіїв в енергетичному обладнанні та холодильній техніці:

- холодоносієм складу пропіленгліколь/вода (54,00/46,00 мас.%) – ХН (ПГ/В);
- холодоносієм складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість холодоносія (48,60/46,52/4,88% мас.) – ХН (ПГ/В/РРВ);
- нанохолодоносієм складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість холодоносія/наночастинки Al_2O_3 (48,24/46,38/4,85/0,53 мас.%)
- наноХН 0,53%;
- нанохолодоносієм складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість теплоносія/наночастинки Al_2O_3 (48,00/46,15/4,82/1,03 мас.%) – наноХН 1,03%.

При приготуванні нанофлюїда використовувалися наночастинки Al_2O_3 α -модифікації виробництва Wenzhou Jingcheng Chemical Co з розміром наночастинок у порошку 10 ± 5 нм, чистотою 99,98%, питомою поверхнею (методом БЕТ) $8,7 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для приготування розчинів використовувався пропіленгліколь–1,2 (постачальник Spectrolab, виробництво Румунія) з масовою часткою основної речовини 99,79%, бідистильована вода, речовина, що регулює в'язкість, з масовим вмістом води 5,80% (вміст води враховувався при розрахунку концентрації розчинів).

Масова частка компонентів визначалася зважуванням на електронних вагах з невизначеністю ($\pm 0,0005$ г).

2.2 Методика дослідження стійкості нанофлюїдів і визначення розміру наночастинок в базовій рідині

Приготування сталого нанофлюїда є ключовим питанням при дослідженні перспектив їх застосування в холодильному обладнанні. При розгляді стійкості нанофлюїдів виділяють два аспекти: седиментаційну і агрегативну стійкість наночастинок.

Приготування стабільного нанофлюїда можливо тільки з використанням нанорозмірних частинок. Відомості про середній розмір наночастинок в нанофлюїді є дуже важливою інформацією при дослідженні їх теплофізичних властивостей. По-перше, зі зміни середнього розміру наночастинок з часом можна судити про стабільність нанофлюїда. По-друге, як було показано в роботах [5, 6], такі важливі для теплоносіїв властивості як в'язкість і теплопровідність залежать від розміру наночастинок в рідині.

Слід зазначити, що «істинний» розмір наночастинок можна визначити лише методом електронної мікроскопії, який неприйнятний для дослідження наночастинок у рідинах. В даний час для оцінки розміру наночастинок в рідині найбільшими перепонами поширення на практиці отримав метод динамічного розсіювання світла (фотонів кореляційної спектроскопії). Але певні перспективи є у більш простого з позиції апаратного оформлення методу, заснованого на явищі статичного розсіювання світла на неоднорідностях у рідині – методу спектротурбодиметрії [7-9].

Необхідною умовою використання методу спектротурбодиметрії для оцінки розміру наночастинок є відсутність поглинання світла наночастинами, а також відсутність вторинного світлорозсіювання (що дотримується при малих концентраціях дисперсної фази). Для багатьох розглянутих в даному дослідженні нанохолодоносіїв на основі води, пропілегліколя і наночастинок Al_2O_3 необхідні умови дотримуються.

Для визначення розмірів частинок сферичної форми, якщо їх розмір (діаметр) становить від $1/10$ до $1/3$ довжини світлової хвилі і показники заломлення частинок і середовища не сильно розрізняються, можна скористатися емпіричним рівнянням Геллера:

$$D = k \cdot \lambda^n, \quad (2.1)$$

де k – константа, яка не залежить від довжини хвилі; D – оптична густина зразка.

Практична реалізація методу спектротурбодиметрії при дослідженні розміру наночастинок в нанофлюїдах полягала у вимірюванні спектральної залежності коефіцієнта пропускання падаючого світла T зразками нанофлюїдів щодо базової рідини. Вимірювання проводились на спектрофотометрі Shimadzu UV-120-02 у плоскопаралельних оптичних ділянках при декількох значеннях довжин хвиль λ видимої частини спектру (інтервал довжин хвиль вибирався в залежності від каламутності зразка таким чином, щоб постаратися виключити багаторазове розсіювання світла на наночастинках).

Перерахунок величини коефіцієнта пропускання – T (вираженої в %) в оптичну густину – D (міру ослаблення світла прозорими об'єктами) проводився за формулою:

$$D = \lg \cdot (100/T). \quad (2.2)$$

Побудова залежності $\lg D = f(\lg \lambda)$ дозволяла визначити показник степеня у рівнянні Геллера (2.1) – n як тангенс кута нахилу прямолінійної ділянки $\lg D = f(\lg \lambda)$. За чисельним значенням величини n по методиках [7, 9] оцінювався середній радіус наночастинок в нанофлюїдах.

Для приготування нанохолодоносіїв використовувався двоступеневий метод, відповідно до якого наночастинок у вигляді порошку змішувалися з частиною базової рідини і піддавалися диспергуванню (протягом 12 годин). Процес диспергування здійснювався в бісерному млині, заповненому кульками з ZrO_2 діаметром 2 мм. Додатково нанофлюїд піддавався ультразвуковій обробці. Отриманий нанофлюїд з великою концентрацією наночастинок розбавляється до необхідного складу перед заправкою в експериментальну установку. Нанохолодоносії були приготовлені без використання поверхнево-активних речовин, тому що їх добавки можуть вплинути на теплофізичні властивості об'єкта дослідження.

Слід зазначити, що при використанні двоступеневого методу приготування нанохолодоносіїв досягти розміру наночастинок в рідині, що відповідає розміру наночастинок в порошку, не вдається. Частина наночастинок може знаходитися в рідині у вигляді тимчасово існуючих агрегатів, які, при правильно здійсненій технології диспергування, повинні залишатися нанорозмірними.

На рис. 2.1 наведено дані про зміну середнього розміру наночастинок, який визначався методом турбодиметрії в процесі приготування нанохолодоносія.

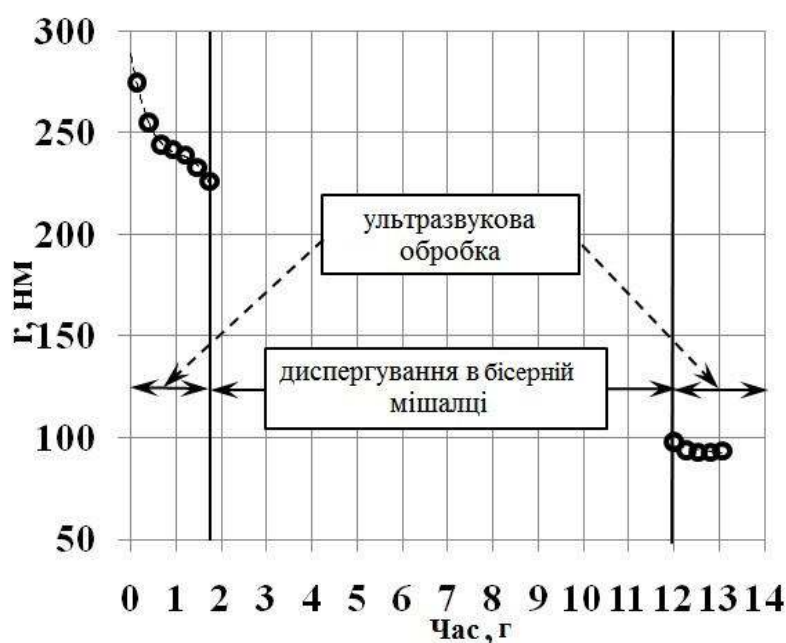


Рис.2.1 – Зміна розміру наночастинок у процесі приготування нанофлюїда пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість холодоносія/наночастинок Al_2O_3 (48,28/46,22/4,98/0,52мас. %)

В роботі [10] вказується, що хороший ефект при підготовці нанофлюїдів може дати попереднє механічне диспергування перед наступною ультразвуковою обробкою. При такому підході при механічному дробленні в агрегатах наночастинок утворюються в мережі тріщини, через які, при подальшій ультразвуковій обробці, в результаті кавітаційних явищ в рідині, агрегати руйнуються. Є роботи, де

дослідники пропонують використовувати саме поєднання УЗ і механічного диспергування [5,11].

Результати проведеного дослідження розмірів наночастинок у базовій рідині (див. рис.2.1) підтверджують доцільність застосування методики, яка складається з комбінації ультразвукового і механічного впливу (з попереднім ультразвуковим диспергуванням). Комбінований підхід до диспергування нанофлюїдів буде сприяти зниженню енерговитрат на приготування нанофлюїда, тому що ультразвукова обробка характеризується великою витратою енергії в порівнянні з механічною.

Надзвичайно важливим завданням при підготовці нанохолодоносіїв є дослідження стійкості нанофлюїдів з часом. Причому важливим є не тільки контроль стійкості при зберіганні нанохолодоносіїв в статичних умовах, але і в процесі їх використання за прямим призначенням в холодильному і енергетичному обладнанні.

Для оцінки тенденції до агломерації і седиментації наночастинок з часом були проведені наступні дослідження. Для двох однакових зразків нанохолодоносія, що складається з пропіленгліколю, води, речовини, що регулює в'язкість, і наночастинок Al_2O_3 з масовою концентрацією компонентів (48,24/46,38/4,85/0,53 мас.%), були визначені середні радіуси наночастинок с використанням методу турбодиметрії.

2.3 Експериментальна установка для дослідження густини

В результаті проведеного експериментального дослідження була виміряна густина зразків теплоносіїв. Виміри проводилися в температурному діапазоні від 253 до 313 К. Визначення густини теплоносіїв виконано пікнометричним методом на експериментальній установці, схема якої показана на рис.2.4.

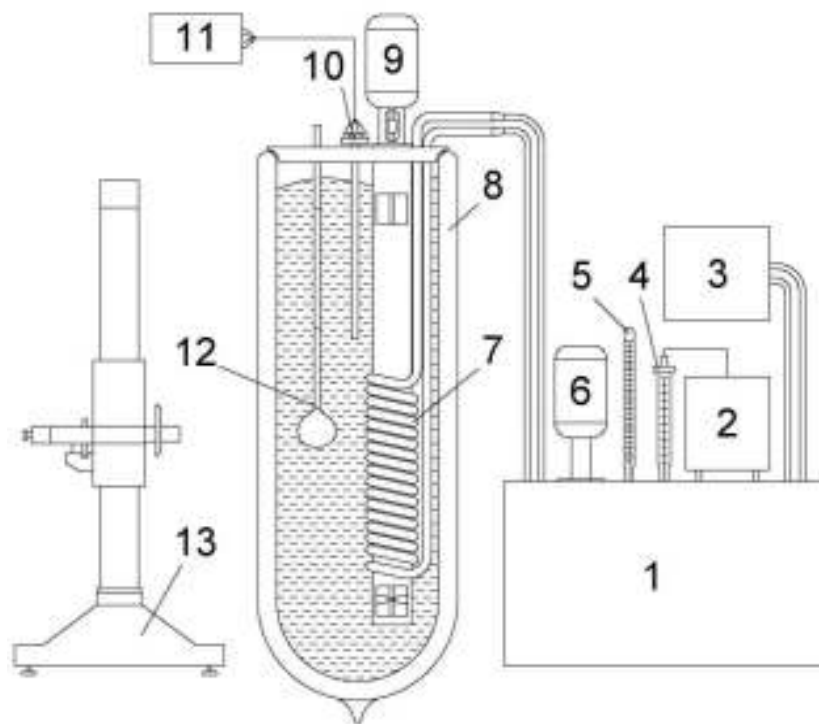


Рис.2.4 – Експериментальна установка з дослідження густини:

1 – рідинний термостат U10, 2 – система регулювання температури, 3 – холодильна машина, 4 – контактний термометр, 5 – ртутний термометр, 6 – насос-мішалка, 7 – теплообмінник, 8 – скляна посудина Дьюара з термостатуючою рідиною, 9 – мішалка, 10 – платиновий термометр опору WKA TR10-A, 11 – цифровий мультиметр Picotest M3510A, 12 – пікнометр, 13 – катетометри

Перший етап дослідження густини полягав у визначенні внутрішнього об'єму пікнометра. З цією метою спочатку здійснювалося зважування порожнього (ретельно промитого і висушеного) пікнометра в повітрі.

Перед другим зважуванням пікнометр заповнювався еталонною рідиною (дистильованою водою) так, щоб її рівень був на нижній межі циліндричної частини горловини пікнометра. Заповнений пікнометр зважувався на електронних вагах AND GR-300 і закріплювався вертикально. В процесі тарування (визначення об'єму пікнометра) катетометри КМ-8 вимірювалися на відстані до нижнього краю меніска h_m води від дна пікнометра h_0 .

Після цього в пікнометр вводилися невеликі порції води для того, щоб підвищити рівень води в ньому на (2 ... 3) мм. Після кожного підйому рівня рідини в

горловині проподилося зважування заповненого водою пікнометра. Зазначена процедура повторювалася кілька разів, поки рівень води не досягне верхньої межі циліндричної частини горловини.

В результаті виконаних процедур була отримана залежність між об'ємом пікнометра і висотою рівня рідини в горловині. Отримана градуйована залежність дозволяє зробити визначення густини рідини в широкому інтервалі температур при одноразовому завантаженні пікнометра зразком без його виймання з термостата. Залежність об'єму рідини, що знаходиться в пікнометрі, від різниці висот ΔH між меніском зразка в горловині та дном пікнометра має вигляд:

$$V = a \cdot \Delta H - b. \quad (2.3)$$

де $a = 0,036384$ і $b = 22,892068$ отримані при калібруванні коефіцієнти.

На другому етапі експерименту пікнометр заповнювався досліджуваною рідиною до рівня, з якого починалося калібрування об'єму пікнометра, і проводилось його зважування.

При досягненні стану термодинамічної рівноваги зразка в пікнометрі (нижче рівня меніска рідини в горловині пікнометра протягом 15 хвилин при сталій температурі термостата) катетометрами вимірювалися висоти h_m і h_0 .

Пікнометр керується за допомогою терморегулятора в скляній посудині Дьюара місткістю 10 літрів. Як термостатуюча рідина, використовувався уайт-спірит, ПМС-5 (полідиметилсілоксан). У посудині Дьюара встановлені змішувачі для перемішування термостатуючої рідини, елементи системи автоматичного регулювання температури і мідний теплообмінник, через який, при роботі на низьких температурах, прокачувався теплоносій з холодильної машини.

Проведені дослідження показали, що коливання температури в термостаті не перевищували $\pm 0,05$ К. Температура експерименту вимірювалася термометром опору Pt-100 (WIKА, TR40). Розширена невизначеність вимірювання температури

не перевищувала 0,2 К. Всі вимірювання проводилися багато разів з метою зменшення впливу випадкової похибки вимірювань.

Густина рідини при кожній температурі обчислювалася за формулою:

$$\rho = (m_{n+ж} - m_n) / V, \quad (2.4)$$

де $m_{n+ж}$ – маса пікнометра, заповненого досліджуваною рідиною, m_n – маса порожнього пікнометра, V – об'єм пікнометра, розрахований за рівнянням (2.3).

2.4 Експериментальна установка для дослідження в'язкості

Експериментальне визначення кінематичної в'язкості холодоносіїв виконано на експериментальній установці, схема якої наведена на рисунку 2.5. Основним елементом установки є скляний капілярний віскозиметр з висячим рівнем типу ВПЖ–2 або ВПЖ–4. В такому віскозиметрі перепад тиску створюється стовпом самої досліджуваної рідини, причому рідина у віскозиметрі має вільний рівень, з'єднаний з атмосферою. Кількість рідини, що заправляється, може бути довільною. Ці віскозиметри випускаються промисловістю і розрізняються за розмірами (діаметрами капіляра) в залежності від рівня вимірюваної в'язкості. Всі вимірювання проводилися багато разів з метою зменшення впливу випадкової похибки вимірювань. Час закінчення мірного об'єму досліджуваної рідини (між ризками, що фіксують мірний об'єм) вимірювався секундоміром з похибкою в 0,1 сек. В експериментах були використані віскозиметри з діаметрами капілярів $d=1,31$ мм; $d=1,12$ мм; $d=0,82$ мм. Вимірювання в'язкості холодоносіїв проводилися в температурному діапазоні від 253 до 313 К.

Константи віскозиметрів були прийняті за їх паспортними даними. Крім того, константи приладів перевірені в контрольних дослідженнях за стандартними довідковими даними (толуолу та ізопропілового спирту). Зіставлення цих даних показало, що розбіжність у константах віскозиметра не перевищує + 0,3%.

Віскозиметри 14 термостатували в скляній посудині Дьюара 8 ємністю 10 літрів. Як термостатуючу рідину використовувалися уайт-спірит. У посудині Дьюара встановлений змішувач 9 для перемішування термостатуючої рідини, елементи системи автоматичного регулювання температури 2 і мідний теплообмінник 7, через який, при роботі на низьких температурах, прокачувався насосом 6 теплоносієм з холодильної машини 3.

Проведені дослідження показали, що коливання температури в термостаті не перевищували $\pm 0,05$ К. Температура експерименту вимірювалася термометром опору Pt-100 (WІКА, TR40). Розширена невизначеність вимірювання температури не перевищувала 0,2 К.

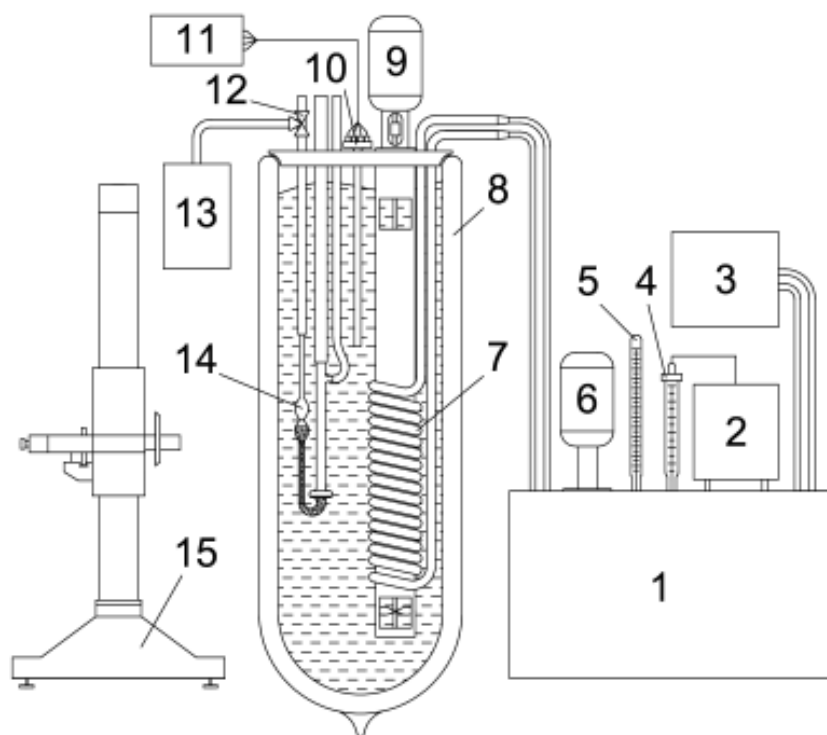


Рис.2.5 – Схема експериментальної установки для вимірювання в'язкості холодоносіїв: 1 – рідинний термостат U10, 2 – система регулювання температури, 3 – холодильна машина, 4 – контактний термометр, 5 –ртутний термометр, 6 – насос-мішалка, 7 – теплообмінник, 8 – скляна посудина Дьюара з термостатуючою рідиною, 9 – мішалка, 10 – платиновий термометр опору WІКА TR10-A, 11 – цифровий мультиметр Picotest M3510A, 12 – триходовий вентиль, 13 – шприц, 14 – капілярний віскозиметр ВПЖ-4, 15 – катетометр

2.5 Експериментальна установка для дослідження теплопровідності холодоносіїв у широкому інтервалі параметрів стану

Для вимірювання теплопровідності нанофлюїдів у широкому інтервалі температур була розроблена установка, схема якої наведена на рис.2.6.

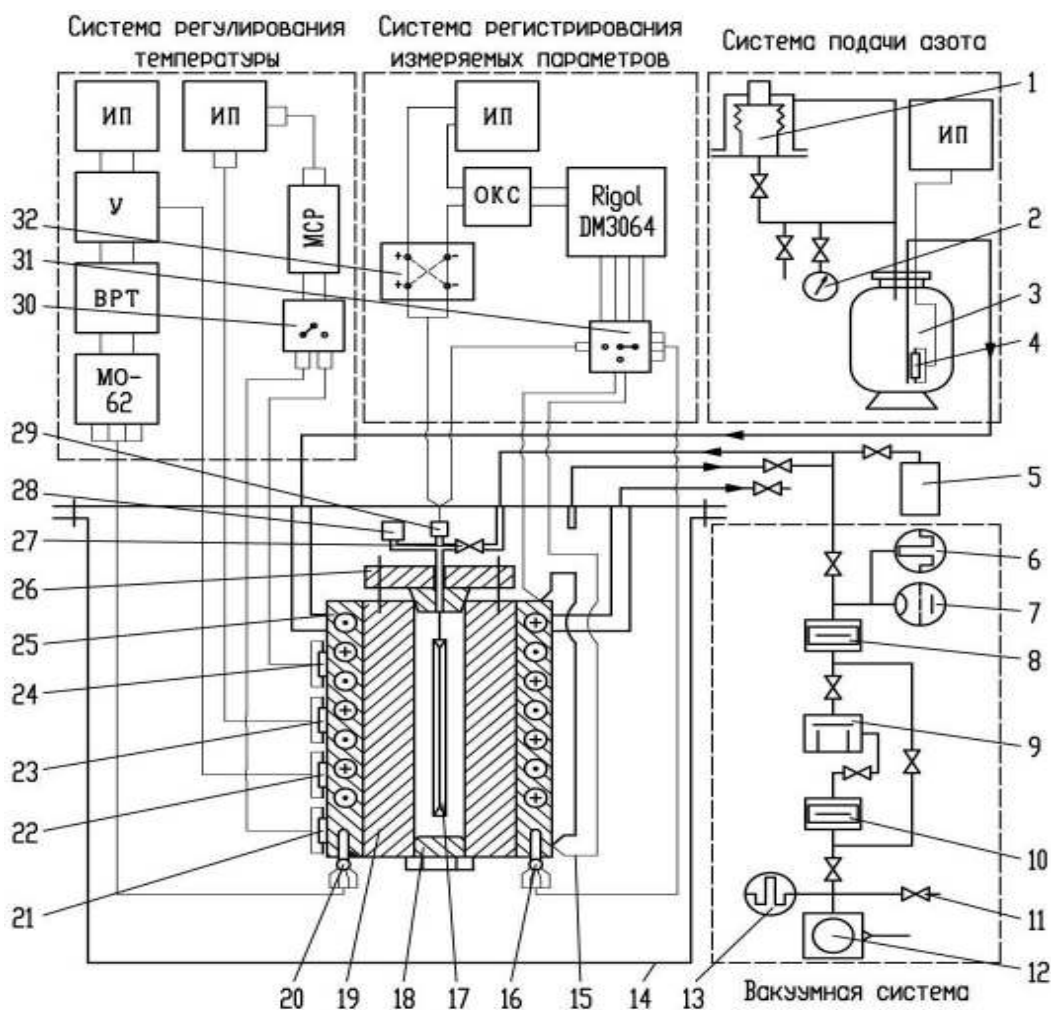


Рис.2.6 – Принципова схема установки для вимірювання теплопровідності холодоносіїв у широкому інтервалі параметрів стану: 1 – сільфонний регулятор тиску; 2 – манометр; 3 – посудина Дьюара; 4 – нагрівач; 5 – заправний балончик; 6, 13 – термопарні вакууметри; 7 – іонізаційний вакууметр; 8, 10 – вакуумні пастки; 9 – дифузний вакуумний насос; 11 – натікач; 12 – форвакуумний насос; 14 – вакуумна камера; 15 – диференціальна термопара; 16 – платиновий термометр опору 100П; 17 – вимірювальна ділянка; 18 – запірна пробка; 19 – мідний блок; 20 – датчик системи регулювання температури; 21, 24 – торцеві нагрівачі; 22 – регулюючий нагрівач; 23

– фоновий нагрівач; 25 – теплообмінник; 26 – фланець; 27 – заправний вентиль; 28 – перетворювач тиску; 29 – електровводи; 30 – двопозиційний двоканальний перемикач; 31 – трипозиційний двоканальний перемикач; 32 – перемикач напряму струму; П – джерела живлення; У – підсилювач потужності; ДРТ – блок регулювання температури; МО-62 – міст опору; МСР – магазин опорів; ОКС – зразкова котушка опору; Rigol DM3064 – прецизійний мультиметр

Вимірювальна ділянка 17, конструкція якої наведена на рис. 2.7, поміщена у мідний блок 19, який виконує роль потужного термостата. На зовнішній поверхні мідного блоку встановлені кілька нагрівачів: фоновий нагрівач 23 (для компенсації надлишкового теплового знімання при проходженні парів азоту через теплообмінник 25); регулюючий нагрівач 22, підключений до системи регулювання температури мідного блоку 19, датчиком якої є термометр опору 20; два торцеві нагрівачі 21 і 24 для усунення можливих градієнтів температури по висоті мідного блоку. Контроль за градієнтом температур по висоті мідного блоку здійснюється диференціальною термопарою 15. Середня температура масивного термостата вимірюється термометром опору 16 по компенсаційній схемі із застосуванням зразкової котушки опору ОКС, класу точності 0,01. Коливання температури в термостаті не перевищували 0,1 К.

Оскільки установка призначена для вимірювання теплопровідності при низьких температурах, охолодження мідного блоку (масивного термостата) 19 проводиться за допомогою прокачування холодоносія (від холодильної установки), або парів рідкого азоту по біфілярному спіральному каналу латунного теплообмінника 25. Система подачі рідкого азоту складається з посудини Дьюара з рідким азотом 3 і регулятора тиску 1 в посудині Дьюара, а також манометра 2 і нагрівача 4. Для зниження теплоприпливів з навколишнього середовища масивний термостат поміщений в вакуумну камеру 14, повітря з якої відкачується вакуумною системою, до складу якої входять форвакуумний 12 і дифузний 9 насоси, вакуумні пастки 8 і 10, а також термопарні 6 і 13 та іонізаційний 6 вакууметри.

При необхідності контролю тиску у вимірювальній ділянці встановлений перетворювач тиску 28 WKA A-10 з діапазоном вимірюваних тисків 0-25 бар. Для даного перетворювача межі розширеної невизначеності не перевищували 0,0625 бар. Всі струмові і потенціометричні дроти, підключені до вимірювальної комірки, ущільнюються за допомогою електровводу 29.

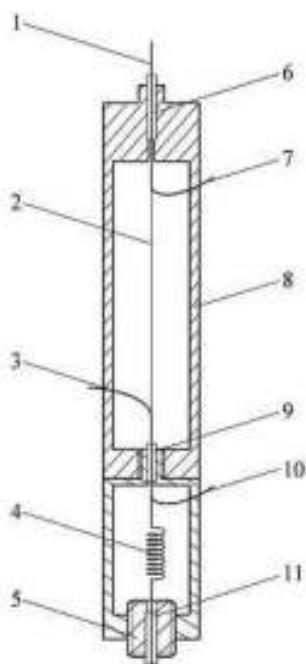


Рис.2.7 – Конструкція вимірювальної комірки: 1,10 – струмові дроти, 2 – платинова нитка, 3, 7 – потенційні дроти, 4 – пружина, 5 – вузол натягнення, 6, 9, 11 – скляні капіляри, 8 – каркас

Після досягнення необхідного температурного рівня в масивному термостаті за допомогою джерела живлення ІІІ протягом 8 секунд подається напруга на платинову нитку вимірювальної комірки. Мультиметром Rigol DM3064 по черзі реєструється падіння напруги на зразковій котушці опору, ОКС послідовно включеної в ланцюг платинової нитки і на самій нитці з часовим інтервалом 0,02 с. Для усунення шумових ефектів, пов'язаних з електромагнітними випромінюваннями в ланцюзі вимірювальної ділянки, передбачений перемикач напрямку струму 32. При обробці отриманих експериментальних даних до розгляду беруться середні значення параметрів, виміряних при прямому і зворотному напрямках струму, що проходить через платинову нитку.

Рішення диференціального рівняння теплопровідності для циліндричної геометрії при обліку відповідних умов однозначності стосовно коефіцієнту теплопровідності одержуємо у вигляді:

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{R}{r}}{2\pi l (T_1 - T_2)}, \quad (2.5)$$

де Q – тепловий потік, R – внутрішній радіус капіляра, r – радіус нитки, l – довжина нитки, $T_1 - T_2$ – перепад температур.

Експеримент проводився на цьому вимірювальному пристрої в нестационарному режимі з урахуванням ряду обмежень, пов'язаних з невиконанням граничних умов при вирішенні рівняння Фур'є для лінійного джерела теплоти (діаметр нитки-нагрівача склав 0,1 мм, товщина шару середовища – 0,55 мм).

Методика вимірювання теплопровідності нестационарним методом нагрітої нитки заснована на рішенні рівняння Фур'є для лінійного джерела тепла, що представляє собою нескінченно довгу і тонку нитку, що розсіює тепло в нескінченне середовище:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \Delta T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Delta T}{\partial r} \right), \quad (2.6)$$

де $\Delta T = T - T_0$, T – кінцева температура, T_0 – початкова температура, r – відстань у радіальному напрямку, τ – час, q – тепловий потік, D – коефіцієнт термодифузії.

Граничні умови можуть бути записані у вигляді:

$$\text{При } \tau = 0 \text{ і } r = 0 \quad \lim_{r \rightarrow 0} \left\{ r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right\} = -\frac{q}{2\pi\lambda}, \quad (2.7)$$

$$\text{при } \tau \geq 0 \text{ і } r = \infty \quad \lim_{r \rightarrow \infty} \{ \Delta T(r, \tau) \} = 0. \quad (2.8)$$

З урахуванням цих умов, зміна температури в радіальному напрямку від джерела тепла може бути представлена у вигляді рівняння:

$$\Delta T(r, \tau) = T(r, \tau) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \text{Ei} \left(\frac{r^2}{4D\tau} \right). \quad (2.9)$$

Інтегрування рівняння (2.10) приводить до формули:

$$\Delta T = T(r, \tau) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ -\gamma + \ln \left(\frac{4D\tau}{r^2} \right) + \left[\frac{\left(\frac{r^2}{4D\tau} \right)}{1 \cdot 1!} - \frac{\left(\frac{r^2}{4D\tau} \right)^2}{2 \cdot 2!} + \dots + \dots \right] \right\}, \quad (2.10)$$

а для будь-якого фіксованої в радіальному напрямку відстані зміна температури може бути представлено у вигляді:

$$\Delta T_2 - \Delta T_1 = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right). \quad (2.11)$$

Звідки випливає, що графік зміни температури як функція логарифма часу являє собою пряму лінію, а нахил цього графіка пропорційний коефіцієнту теплопровідності. З рівняння (2.11) випливає, що теплопровідність може бути розрахована за формулою

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \frac{d \ln(\tau)}{d \Delta T}. \quad (2.12)$$

Таким чином, для розрахунку теплопровідності з даних, отриманих в експерименті, необхідно вимірювати тепловий потік і зміни температури по часу в тій області, де спостерігається лінійна залежність температури від логарифма часу.

2.6 Експериментальна установка для дослідження калоричних властивостей нанофлюїдів

Схема низькотемпературної адіабатичної калориметричної установки представлена на рис.2.8. Кріостат зануреного типу являє собою вакуумну камеру 2, яка знаходиться в посудині Дьюара з рідким азотом 1. Усередині вакуумної камери змонтовані елементи калориметричної системи і контейнер 4 із зразком досліджуваної речовини 3. Радіаційний теплообмін мінімізується за рахунок електролітичного сріблення внутрішньої поверхні адіабатичної оболонки 6, а також покриття полірованою алюмінієвою фольгою зовнішньої поверхні контейнера 4.

Оскільки зразки для досліджень калоричних властивостей являють собою речовини в рідкій фазі, був використаний герметичний контейнер об'ємом 72 мл, всередині якого розташований калориметричний нагрівач Н4 і термометр опору 5. Контейнер для зразка виготовлений з нержавіючої сталі. У верхній частині контейнера розташований мікрорентиль 8, через який здійснюється заправлення досліджуваного зразка або теплообмінного газу (при визначенні теплового значення калориметра).

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 дифузного 18 насосів, вакуумних пасток 17 і 19, іонізаційного 16 і термпарного 20 перетворювачів тиску, а також натікачем 21. Для швидкого виведення калориметричної системи на заданий оператором температурний рівень передбачена можливість заповнення вакуумної камери газоподібним гелієм з балона 15.

Передача теплоти по електричних проводах була максимально знижена за рахунок використання проводів малого діаметра (0,05-0,08 мм) і використання

терморегулюючого кільця 9. На це кільце намотана ділянка проводів, що йдуть від електровводу 12 до адіабатичного екрану 6. Температура терморегулюючого кільця 9 за допомогою додатково розміщеного на ньому регулюючого нагрівача Н2, підтримується рівною температурою контейнера 4. Зовнішній термостатуючий екран 7 необхідний для забезпечення сталості умов теплообміну з адіабатичним екраном 6 в широкому діапазоні температур.

Таким чином, всі елементи калориметричної системи укладені в оболонку з приблизно однаковою температурою. Занурена в посудину Дьюара з рідким азотом 1 вакуумна камера 2 оснащена потужним мідним екраном 10, який має добрий тепловий контакт з кришкою вакуумної камери 2. Така конструкція вакуумної камери запобігає теплообміну випромінюванням між калориметричною системою із зовнішнім середовищем через вакуумопровод 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 диференціальних термопар $-\Delta T_1$, ΔT_2 і ΔT_3 (рис.2.8), що мають високу чутливість ($dE/dT=20-40$ мкВ/К). У даній конструкції калориметра необхідно регулювати різницю температур між наступними елементами: контейнер зі зразком – адіабатичний екран (диференціальна термопара ΔT_1 , $\Delta T = 0$); контейнер зі зразком – гаряче кільце (диференціальна термопара ΔT_2 , $\Delta T = 0$); гаряче кільце – зовнішній екран (диференціальна термопара ΔT_3 , $\Delta T \geq 0$). Блок–схема каналів регулювання параметрів наведена на рис.2.8. Сигнал від кожної з диференціальних термопар надходить на вхід електронного пропорційно–інтегрально-диференціального регулятора температури ВРТ-2. Регулятор управляє напругою на нагрівачі відповідного елемента калориметричної системи через підсилювач потужності (У). Сигнал кожної з термопар вимірюється прецизійним мультиметром Rigol DM3064 з інтервалом 6 секунд і передається на комп'ютер для подальшої обробки, відображення на екрані і збереження отриманих результатів експерименту. Для вимірювання температури контейнера використовується платиновий термометр опору типу ТСП виробництва фірми ТЕРА (5 на рис.2.8)

Оскільки вимірювання температури калориметра термометром опору (ТС) проводилося компенсаційним методом, в процесі дослідження вимірювалися падіння напруги на термометрі і котушці опору – U_t і U_{OKCt} , відповідно. Вимірювання падінь напруги і часу здійснюються за допомогою цифрового мультиметра (див. Rigol на рис.(2.8)).

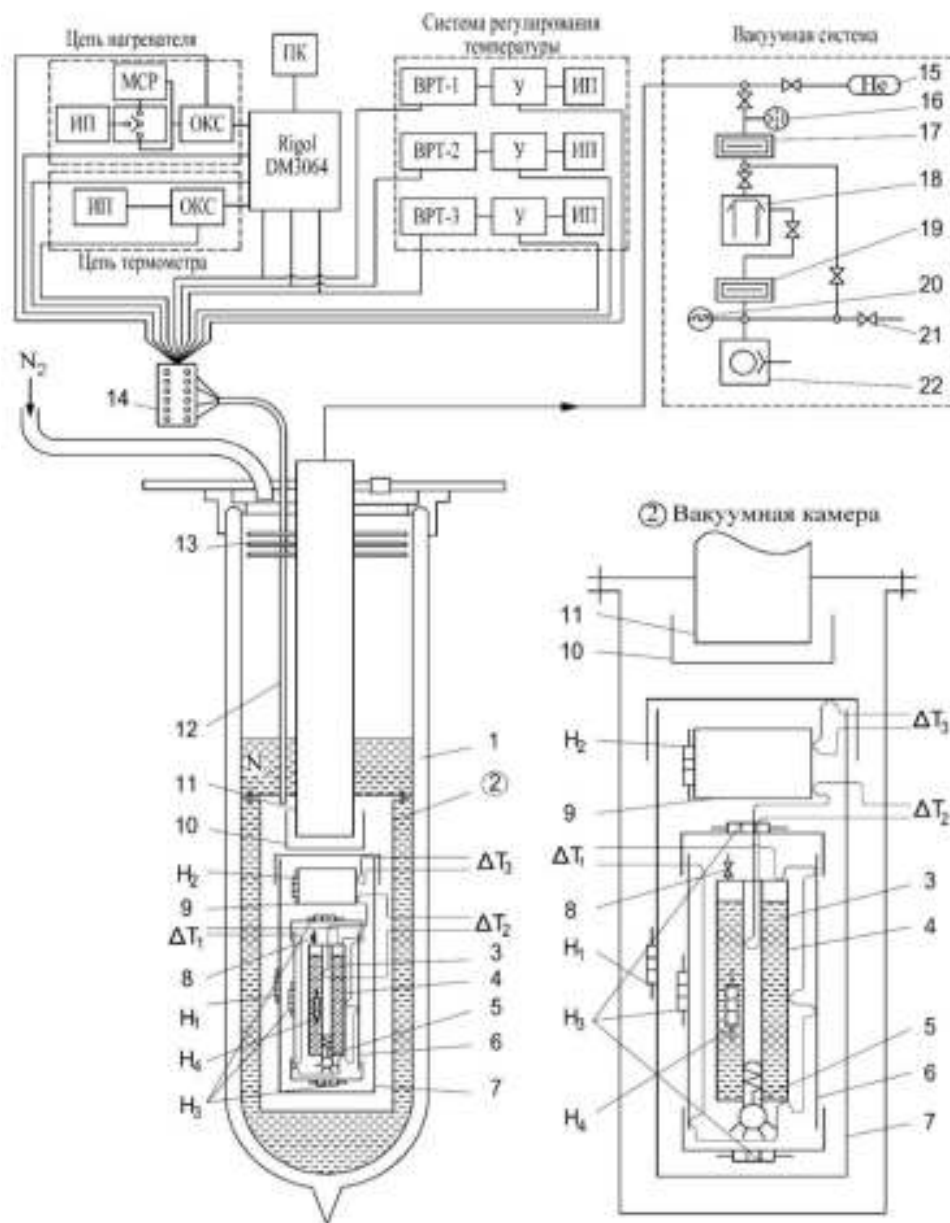


Рис.2.8 – Принципова схема низькотемпературної адіабатичної калориметричної установки: 1 – посудина Дьюара з рідким азотом; 2 – вакуумна камера; 3 – досліджуваний зразок; 4 – контейнер; 5 – платиновий термометр опору (ТС); 6 – внутрішній адіабатичний екран; 7 – зовнішній термостатуючий екран; 8 – заправний мікрорегулююче кільце; 9 – терморегулююче кільце; 10, 13 – екрани; 11 –

вакуумопроводи; 12 – електроввод; 14 – вакуумний електророзєм; 15 – балон з гелієм; 17, 19 – вакуумні пастки; 18 – дифузний насос; 16, 20 – іонізаційний і термопарний перетворювачі тиску; 21 – натікач; 22 – форвакуумний насос; $H1$, $H2$, $H3$ і $H4$ – нагрівачі термостатуючого екрану, кільця адіабатичного екрану і контейнера зі зразком, відповідно; $\Delta T1$, $\Delta T2$, $\Delta T3$ – диференціальні термопари; RigolDM3064 – прецизійний цифровий мультиметр; U – підсилювач потужності; ОКС – зразкова котушка опору; ДРТ – блоки регулювання температури

Розташування нагрівача $H4$ в об'ємі досліджуваної рідини всередині контейнера забезпечує однорідність розподілу температур по внутрішньому об'єму зразка в контейнері.

Першим етапом проведення калориметричного дослідження є заправка контейнера досліджуваною речовиною, яка виконується на окремому стенді. Перед заправкою контейнер вакуумують. Потім контейнер зважується на електронних вагах AND GR-300 з межами відхилень від оцінки виміряних значень маси, що не перевищує $5 \cdot 10^{-7}$ кг. Після чого контейнер заповнюється досліджуваним зразком, повторно зважується і встановлюється в вакуумну камеру (адіабатну систему). Для швидкого виведення калориметричної установки на заданий рівень температур вакуумна камера заповнювалася газоподібним гелієм з балона 15. При досягненні заданої температури гелій відкачують з вакуумної камери за допомогою вакуумної системи.

При реалізації методу монотонного нагрівання швидкості нагрівання досліджуваних зразків у калориметрі не перевищували $dT/dt < 10^{-3}$ град/сек. При цьому потужність, що безперервно подається на калориметричний нагрівач, була не більше 0,5 Вт.

У методі монотонного нагрівання теплоємність досліджуваних зразків розраховувалася зі співвідношення:

$$c_s = \frac{P_{sh} - P_{hl}}{m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}} - \frac{A(T)}{m}, \quad (2.13)$$

де P_{sh} – середня потужність, що підводиться до калориметру, Вт; P_{hl} – потужність теплових втрат при середній температурі експерименту T_{av} , Вт; T – зміна температури калориметра за час Δt ; m – маса досліджуваного зразка, кг; $A(T)$ – теплове значення калориметра при середній температурі експерименту T_{av} , Дж. Результати проведених досліджень теплових втрат при визначенні калоричних властивостей зразків для твердої та рідкої фаз були апроксимовані рівняннями:

$$q_{nom}^{mf} = a + b \cdot T^3, \quad (2.14)$$

$$q_{nom}^{лф} = a + b / T^3, \quad (2.15)$$

де q_{nom}^{mf} і $q_{nom}^{лф}$ – потужності втрат, виміряні для твердої та рідкої фаз зразків, відповідно, Вт; a і b – коефіцієнти: $a = 3,428 \cdot 10^{-3}$, $b = -3,075 \cdot 10^{-10}$ – для твердої фази; $a = 2,2747 \cdot 10^{-3}$, $b = -39,0627$ – для рідкої фази; T – абсолютна температура, К.

Отримані в рамках цього експерименту дані дозволяють розрахувати теплове значення калориметра при різних температурах за формулою:

$$A = \frac{Q_{nim} - Q_{nid}}{\Delta T} - (C_p \cdot m)_{etal}, \quad (2.16)$$

де Q_{nid} – кількість підведеного тепла, Вт; Q_{nim} – теплові втрати, Вт; ΔT – різниця температур в процесі підведення тепла до калориметра, К; C_p – теплоємність еталонної речовини, заправленої в калориметр, Дж/(кг К); m – маса еталонної речовини, кг.

При реалізації режиму безперервного нагрівання попередньо встановлюється нульова різниця температур між контейнером із зразком і адіабатичною оболонкою.

У цьому випадку енергія, що виділяється калориметричним нагрівачем, і теплоти фазових переходів визначають характер зміни температури досліджуваного зразка. Температура досліджуваного зразка при нагріванні не змінюватиметься до тих пір, поки не завершиться процес поглинання енергії при фазовому переході. Це призводить до того, що при температурі фазового переходу на термограмі буде спостерігатися практично горизонтальна ділянка.

2.7 Експериментальна установка для вимірювання локального коефіцієнта теплопередачі при вимушеній конвекції нанотеплоносіїв у трубі

Принципова схема експериментальної установки для дослідження коефіцієнта тепловіддачі і втрат напору при вимушеній течії нанофлюїдів в трубі наведена на рис.2.9.

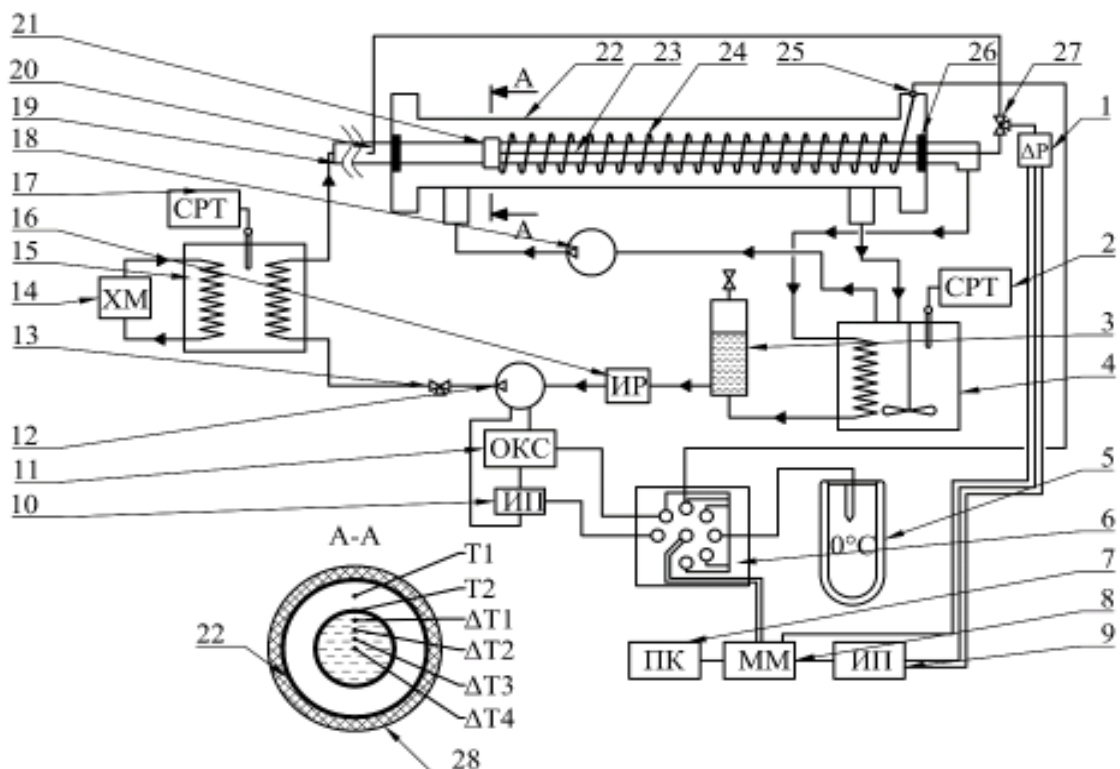


Рис.2.9 - Принципова схема експериментальної установки для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії теплоносіїв: 1 перетворювач тиску $Vika$; 2, 18 - системи регулювання температури термостатів; 3 - накопичувальний

резервуар; 4, 15 - термостати; 5- сосуд Дьюара для холодного спаю абсолютних термопар; 6 - багатопозиційний перемикач; 7 - комп'ютер; 8 - мультиметр Picotest M3510A; 9 - джерело живлення для перетворювача тиску Vika; 10 - джерело живлення для циркуляційного насоса; 11 - зразкова котушка опору P321; 12 - циркуляційний насос вихрового типу для теплоносія - (насоси 15WBX-12); 13 - регулюючий вентиль; 14 - холодильна машина; 16 - шестерний витратомір Oval Gear EM008; 18 - циркуляційний насос для рідини, що термостатується; 19 - робоча ділянка установки (рухома мідна труба); 21 - блок вимірювання температури рідини, що термостатується, $T1$, термопари поверхні внутрішньої труби (стінки) $T2$, термопари стінки і холодоносія на різній відстані від осі труби $\Delta T1$, $\Delta T2$, $\Delta T3$, $\Delta T4$); 20 і 23 - трубки Піто; 22 - зовнішня труба теплообмінного апарату; 24 – вивід термопар на електричний з'єднувач; 25- електричний з'єднувач; 26 - сальники; 27 - перемикач вимірювання повного напору холодоносія; 28- ізоляція

Схема руху теплоносіїв в розглянутій експериментальній установці була прийнята прямою. Внутрішня труба має діаметр $0,01 \times 0,001$ м, довжина робочої ділянки труби становить 0,9 м. Зовнішній контур теплообмінника підключений до системи термостатування, тому температура води на вході у зовнішній контур в процесі експерименту підтримувалася практично сталою при заданих режимах. В експерименті витрата води в зовнішньому контурі зберігалася незмінною 0,060 кг/с. Витрата холодоносія у внутрішньому контурі варіювалася за допомогою регулюючого вентиля в діапазоні від $20,8 \cdot 10^{-6}$ до $92,5 \cdot 10^{-6}$ м³/с. Максимальна розбіжність у тепловому балансі по теплоносію не перевищувала 5%.

Вимірювання температур, необхідних для оцінки локальних коефіцієнтів тепловіддачі, проводилися на відстані $X = 0,10; 0,25; 0,40; 0,55; 0,70$ і $0,85$ м від входу холодоносія в робочу ділянку. Вимірювання температур холодоносія в перерізі труби проводилося за допомогою чотирьох диференціальних термопар, розташованих в одному перерізі на різній відстані від осі труби. Додатково визначалася температура стінки мідної труби у перерізі. Витрата холодоносія визначалася за допомогою витратоміра Oval Gear EM008. Вимірювальна ділянка

експериментальної установки для дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі характеризувалася гідродинамічно стабілізованим режимом течії рідини. Для цієї мети входу холодоносія у вимірювальний ділянку передувала практично ізотермічна ділянка труби довжиною близько 1 м.

Втрати тиску при вимушеній течії холодоносіїв у трубі визначалися на вимірювальній ізотермічній ділянці експериментальної установки, розташованій перед входом у робочу ділянку дослідження КТВ.

Виконаний аналіз розширеної невизначеності вимірюваних в експерименті величин показує, що абсолютна невизначеність вимірювання температури становить 0,15 К, діаметра – 0,05 мм, відстані від входу у вимірювальну ділянку до заданого перерізу труби – 5 мм, витрати теплоносія – 1,0%. Виходячи із зазначених величин, розширена невизначеність визначення коефіцієнта тепловіддачі з урахуванням випадкової складової не перевищує 15%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [[1] Ahuja A. S. Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. Experiments and results. Journal of applied physics. 1975. Vol. 46. № 8. P. 3408-3416.
- [2] Choi S. U., Eastman J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ASME-Publications-Fed. 1995. Vol. 231. P. 99-106.
- [4] Liu M. S., Lin M. C. C., Huang I. T., Wang C. C. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. International communications in heat and mass transfer. 2005. Vol. 32. № 9. P. 1202-1210.
- [5]. 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.
- [6]. Prasher R., Song D., Wang J., Phelan P. Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications. Applied physics letters. 2006. Vol. 89. № 13. P. 133- 108.
- [7]. Кленин В.И., Щеголев С.Ю., Лаврушин В.И. Характеристические функции светорассеяния дисперсных систем. изд-во. Саратовского университета. 1977. 177с.
- [8]. Kourti T. Turbidimetry in particle size analysis. In encyclopedia of analytical chemistry - instrumentation and applications. 2000. P. 5549-5579.
- [9]. Фролов Ю. Г., Гродский А.С. Лабораторные работы и задачи в коллоидной химии. Москва, Химия, 1986. 216с.
- [10]. Агранат Б. А. Дубровин М. Н., Хавский Н.Н. Основы физики и техники ультразвука. Москва, Высшая школа. 1987. 352 с.
- [11]. He Y. Y., Jin, 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. № 11. P. 2272-2281.
- [12]. 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. P. 1359-1366.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ХОЛОДОНОСІЇВ ТА НАНОХОЛОДОНОСІЇВ

Вибір об'єктів дослідження – водних розчинів пропіленгліколю з домішками наночастинок – пояснюється перспективністю їх застосування в якості холодоносіїв і теплоносіїв. У зв'язку з тим, що в дисертаційній роботі будуть досліджуватися процеси теплообміну з нанофлюїдами на основі багатоконпонентних розчинів, то їх теплофізичні властивості досить точно визначені. Огляд представлених у літературі робіт [1, 2, 3] показав, що в даний час відсутня інформація про властивості розчинів нанохолодоносіїв на основі пропіленгліколю при низьких температурах. В літературі також відсутні дані про властивості водних розчинів пропіленгліколю з домішками речовини, що регулює в'язкість.

Тому результати експериментального дослідження теплофізичних властивостей як базового розчину (вода/пропіленгліколь/речовини, що регулює в'язкість), так і нанохолодоносіїв на його основі представляють практичний інтерес. Крім того, без наявності такої інформації неможливо займатися моделюванням процесів теплообміну при вимушеній конвекції розглянутих холодоносіїв і нанохолодоносіїв.

Як неодноразово зазначалося багатьма авторами [4-8], дослідження стабільності застосовуваних нанофлюїдів є важливим фактором, який визначає як значення їх теплофізичних властивостей, так і інтенсивність процесів теплообміну при циркуляції теплоносіїв у теплообмінному обладнанні. Слід зауважити, що дослідженням стійкості нанофлюїдів, перспективних для застосування в якості теплоносіїв, багато авторів не приділяли належної уваги. Таким чином, завдання вивчення стійкості нанофлюїдів (колоїдних систем на основі технічних рідин) залишається невирішеним в повному обсязі і вимагає глибокого вивчення. У даному розділі представлені технологія приготування нанофлюїдів, яка застосовувалася автором, а також результати експериментального дослідження їх стійкості і теплофізичних властивостей.

3.1 Результати експериментального дослідження густини і в'язкості трикомпонентних теплоносіїв

Для приготування об'єктів дослідження використовувався безводний пропіленгліколь (1,2-пропандіол) з масовою часткою 99,79%, речовина, що регулює в'язкість – (РРВ) з вмістом води 5,80 мас.% (Вміст води враховувався при обчисленні концентрації отриманого трикомпонентного розчину) і бідистильована вода. Масова кількість кожного компонента визначалася на аналітичних вагах (невизначеність вимірювання маси $\pm 0,0005$ г).

Обрану стратегію експериментального дослідження густини низькотемпературних теплоносіїв на основі розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь демонструє рис.3.1. Концентрація компонентів розчинів для дослідження густини холодоносіїв вибиралася з урахуванням вимог практичної доцільності їх застосування в холодильному обладнанні (температура плавлення і відносно невисокі значення в'язкості при низьких температурах).

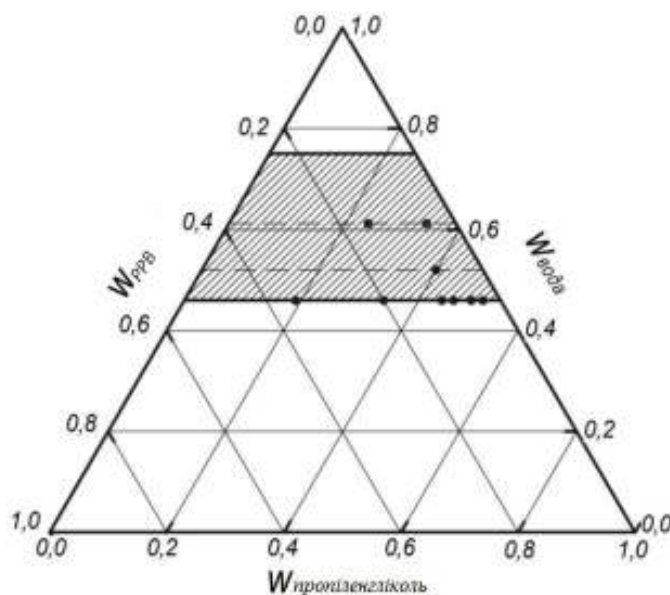


Рис.3.1 – Потрійна діаграма розчину вода/РРВ/пропіленгліколь (заштрихована область відповідає складу розчинів, перспективних як холодоносії): ● – концентрації, при яких була виміряна густина

Обрану стратегію експериментального дослідження в'язкості низькотемпературних теплоносіїв на основі розчинів вода/РРВ /пропіленгліколь

демонструє рис. 3.2. Концентрація компонентів розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь для дослідження в'язкості холодоносіїв вибиралася з урахуванням вимог практичної доцільності їх застосування в холодильному обладнанні (температура плавлення і відносно невисокі значення в'язкості при низьких температурах).

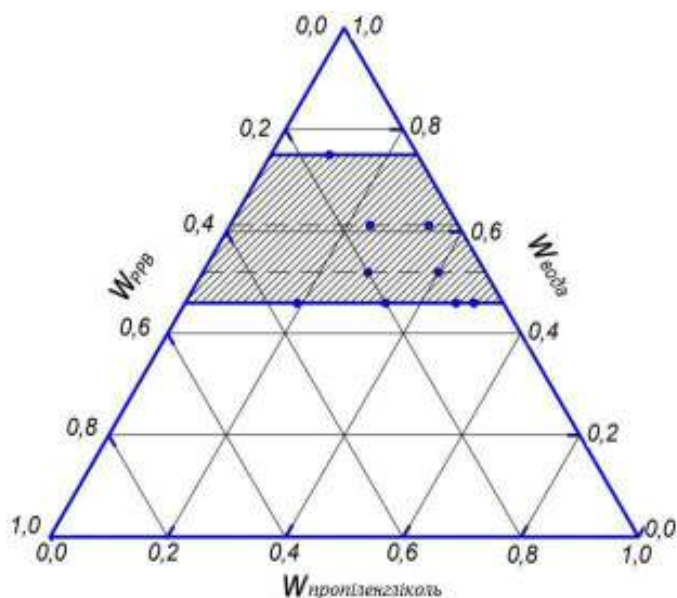


Рис.3.2 – Потрійна діаграма розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь (заштрихована область відповідає складу розчинів, перспективних для застосування в якості холодоносіїв): ● – концентрації, при яких була виміряна в'язкість

Для вирішення поставлених у роботі завдань була проведена серія експериментів по визначенню густини і в'язкості трикомпонентного розчину вода/РРВ/пропіленгліколь різного складу. Експериментальні дані про густину трикомпонентних холодоносіїв (вода/РРВ/пропіленгліколь) були отримані пікнометричним методом в інтервалі температур 248-303 К, при декількох концентраціях компонентів, значення яких наведені в таблиці 3.1. Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність отриманих експериментальних даних не перевищує 0,2%. Експериментальні значення густини розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь при різних температурах наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Експериментальні значення густини рідини ρ , кг/м³ трикомпонентного розчинів вода (x_1)/РРВ(x_2)/пропіленгліколь ($1 - x_1 - x_2$) при різних значеннях температур і 248-303 К

x_1/w_1	x_2/w_2	Експериментальні дані							
0,7763/	0,0202/	T, K	243,1	253,2	263,2	273,1	283,2	293,1	303,2
0,4600	0,0306	$\rho, \text{кг/м}^3$	1060,1	1054,4	1048,6	1042,7	1036,3	1030,3	1023,5
0,7725/	0,0330/	T, K	–	–	263,2	273,2	283,2	293,2	–
0,4602	0,0502	$\rho, \text{кг/м}^3$	–	–	1040,3	1034,4	1028,7	1022,2	–
0,7658 /	0,0524/	T, K	–	250,2	260,1	273,2	283,2	293,1	–
0,4592	0,0804	$\rho, \text{кг/м}^3$	–	1043,6	1037,7	1029,9	1023,6	1017,0	–
0,7626 /	0,0651/	T, K	243,1	253,2	263,1	273,2	283,2	293,2	303,2
0,4603	0,1004	$\rho, \text{кг/м}^3$	1036,6	1030,2	1024,5	1018,3	1011,6	1005,3	998,2
0,7435/	0,1261/	T, K	–	250,1	260,1	273,1	283,1	293,2	–
0,4599	0,1994	$\rho, \text{кг/м}^3$	–	1013,6	1007,1	998,3	991,7	983,8	–
0,7165/	0,2130/	T, K	–	248,1	258,1	273,1	283,2	293,2	–
0,4595	0,3494	$\rho, \text{кг/м}^3$	–	958,4	951,3	940,5	933,2	925,8	–
0,8008/	0,0604/	T, K	245,1	253,1	266,2	273,2	283,2	292,2	–
0,5195	0,1002	$\rho, \text{кг/м}^3$	1035,1	1030,1	1023,6	1019,7	1013,8	1008,4	–
0,8591/	0,0274/	T, K	–	253,1	263,2	273,1	283,2	293,2	303,2
0,6100	0,0498	$\rho, \text{кг/м}^3$	–	1037,0	1032,9	1027,8	1023,0	1017,9	1011,6
0,8408/	0,0809/	T, K	–	248,4	258,2	273,2	283,2	293,2	–
0,6101	0,1501	$\rho, \text{кг/м}^3$	–	1014,4	1010,2	1003,0	997,8	992,0	–

У таблиці x_1 і x_2 молярні частки води і етанолу в трикомпонентному розчині, відповідно; w_1 і w_2 – масові частки води і РРВ в трикомпонентному розчині, відповідно.

Визначення кінематичної в'язкості холодоносіїв виконано на експериментальній установці, основним елементом якої є скляний капілярний віскозиметр з висячим рівнем типу ВПЖ-2 і ВПЖ-4. Невизначеність вимірювання температури не перевищувала 0,2 К, а розширена невизначеність визначення

в'язкості складала 0,2%. У процесі проведеного дослідження отримана нова інформація про кінематичну в'язкість трикомпонентного розчину вода/РРВ/пропіленгліколь при різних концентраціях компонентів в інтервалі температур 248-303 К.

Експериментальні значення кінематичної в'язкості розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь при різних температурах і концентраціях компонентів наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Експериментальні значення кінематичної в'язкості рідини ν трикомпонентного розчинів вода (x_1)/РРВ(x_2)/пропіленгліколь ($1-x_1-x_2$) при різних значеннях температур

x_1/w_1	x_2/w_2	Експериментальні дані							
		T, K							
0,00/0,00	0,00/0,00	T, K	245,2	253,1	263,1	278,2	293,2		
		$\nu \cdot 10^6, m^2/c$	4289	1644	586,2	168,5	59,65		
0,7722/0,4 598	0,0329 /0,0501	T, K	245,6	253,1	263,2	273,1	283,2	293,2	
		$\nu 10^6, m^2/c$	160,4	78,53		17,49	10,04	6,295	
0,7658/0,4 592	0,0524/0, 0804	T, K	248,0	258,2	267,8	273,0	281,4	291,7	
		$\nu 10^6, m^2/c$	113,5	47,02	21,55	15,59	9,764	5,977	
0,7434/0,4 599	0,1263 /0,1998	T, K		253,1	263,2	273,3	283,2		
		$\nu 10^6, m^2/c$		41,18	19,55	13,19	7,945		
0,7160/0,4 590	0,2135 /0,3500	T, K		248,8	258,2	273,2	283,2	293,2	303,2
		$\nu 10^6, m^2/c$		38,36	20,89	8,627	5,537	3,921	2,772
0,8008/0,5 195	0,0604 /0,1002	T, K	245,1	253,1	266,2	273,2	283,2	292,2	
		$\nu 10^6, m^2/c$	115,30	55,35	19,34	12,41	7,315	4,874	
0,7821/0,5 194	0,1179 /0,2002	T, K	245,9	253,2	266,1	273,1	283,2	293,1	303,1
		$\nu 10^6, m^2/c$	82,82	44,16	17,31	11,37	6,791	4,329	2,981
0,8591/0,6 100	0,0274 /0,0498	T, K		253,1	263,2	273,1	283,2	293,2	303,2
		$\nu 10^6, m^2/c$		41,05	19,14	10,15	6,064	3,879	2,688

продовження таблиці 3.2

0,8408/0,6	0,0809	T, K	248,4	258,2	263,1	273,2	283,2	293,2	303,2
101	/0,1501	$\nu 106, m^2/c$	57,82		17,86	9,569	5,686	3,673	2,549
0,9006/0,7	0,0707	T, K			263,1	273,2	283,2	293,2	303,2
488	/0,1502	$\nu 106, m^2/c$			11,08	6,156	3,774	2,529	1,801

У таблиці x_1 і x_2 молярні частки води і РРВ у трикомпонентному розчині, відповідно; w_1 і w_2 – масові частки води і етанолу в трикомпонентному розчині, відповідно.

3.2 Технологія приготування та результати дослідження стійкості нанофлюїда пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість/ Al_2O_3

Для приготування холодоносіїв з наночастинками Al_2O_3 в даному дослідженні використовувалася наступна методика. На першому етапі певна маса сухих наночастинок у суміші з РРВ, кількість якої визначалася відповідно до необхідного складу нанохолодоносія, піддавалася перемішуванню за допомогою вібростішувача в товстостінній кварцовій колбі, заповненій кульками з ZrO_2 діаметром 2 мм. При такому перемішуванні кульки впливають на частки суміші ударно-зсувними зусиллями, що викликає ефективне механічне пошкодження агломератів наночастинок, яке неминуче утворюється при їх зберіганні. Для більш ефективного руйнування агломератів періодично (кожні 3-4 години) нанофлюїд, що знаходиться в колбі, піддавався ультразвуковому впливу протягом 30 хвилин з використанням ультразвукової ванни Codison CD 4800 (частота 42 кГц, потужність 0,07 кВт). Тривалість процесу дроблення наночастинок становила 24 години. Далі, певна кількість отриманого нанофлюїда, відповідна заданій технологічними умовами концентрації нанохолодоносія, розбавлялася до необхідного складу перед заправкою в експериментальну установку. Концентрація отриманого нанофлюїда визначалася виходячи з відомих мас всіх компонентів.

У процесі циркуляції холодоносія з домішками наночастинок по контуру системи може відбуватися їх осідання і відкладення на стінках теплообмінного обладнання. При цьому питання агрегативної і седиментаційної стійкості термодинамічної системи холодоносій/наночастинок в контурі циркуляції залишаються недостатньо вивченими, що стримує технологічний прогрес у холодильному машинобудуванні. Тому однією з цілей виконаного дослідження було дослідження стійкості нанофлюїда в процесі його використання в якості холодоносія в експериментальній установці.

Для оцінки тенденції до агломерації і седиментації наночастинок з часом були проведені наступні дослідження. Для двох однакових зразків нанохолодоносія були визначені середні радіуси наночастинок з використанням методу турбодиметрії, описаного в розділі 2.

Вимірювання залежності оптичної густини зразків нанохолодоносія (наноХН) з концентрацією наночастинок Al_2O_3 0,53 мас.% від довжини хвилі світла, що проходить (в інтервалі $\lambda=700-990$ нм) здійснювалося на спектрофотометрі Shimadzu UV-120-02 у герметичних оптичних ділянках з довжиною оптичного шляху 4,05 мм. Фотографії оптичних ділянок зі зразками досліджуваних холодоносіїв через 12 днів після початку проведення дослідження наведені на рис.3.3. Оптична густина першого зразка наноХН вимірювалася протягом 30 діб (щодня без попереднього збовтування) для оцінки зміни середнього розміру наночастинок в рідині в результаті їх часткової седиментації при зберіганні зразка в статичних умовах. Другий зразок наноХН перед кожним виміром збовтують безпосередньо в оптичній ділянці. Таким чином, імітувалися умови постійного механічного перемішування робочого тіла з наночастинками при його циркуляції в системі. Зміна з часом середнього розміру наночастинок Al_2O_3 у нанохолодоносії з концентрацією 0,53 мас.% показана на рис.3.3. За умови статичного зберіганні зразка середній розмір наночастинок зменшувався від 240 до 145 нм протягом 12 діб і в подальшому розмір наночастинок у зразку залишався майже незмінним. Цей факт пояснюється частковою седиментацією найбільш великих частинок, які не беруть участі в броунівському русі.



Рис.3.3 Фотографія холодоносія (ХН) без добавок наночастинок (зліва), холодоносія з домішками наночастинок Al_2O_3 з концентрацією 0,53мас. % (наноХН) зберігаються в статичних умовах протягом 12 діб (посередині) і нанохолодоносія з домішками наночастинок Al_2O_3 з концентрацією 0,53 мас.% (наноХН) піддавався механічному перемішуванню перед проведенням досліджень (праворуч) в оптичних осередках з довжиною оптичного шляху 4,05 мм

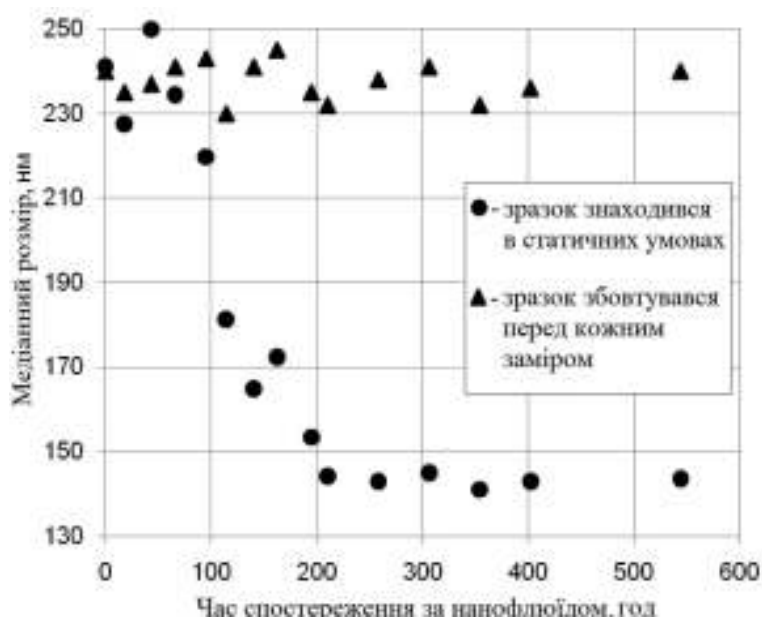


Рис.3.4 – Зміна середнього розміру наночастинок в нанофлюїді (метод спектротурбидиметрії) з часом починаючи, з моменту приготування нанохолодоносія із вмістом наночастинок Al_2O_3 0,53 мас.%

Для зразка, який піддається збовтуванню, розмір наночастинок зберігався приблизно сталим – 240 нм. Аналогічні дослідження для зразків наноХН зі вмістом наночастинок 1,03 мас.% провести не вдалося, тому що при такій концентрації

наночастинок спостерігалось високе значення оптичної густини. Але при подальшому розведенні цього нанофлюїда, результати визначення розміру наночастинок відповідали отриманим для зразка наноХН 0,53 мас.%. Отримані дані про розмір наночастинок вказують на відсутність їх агрегації у досліджуваному зразку.

Цей результат є важливим, оскільки показує, що отримані зразки нанофлюїдів можна використовувати у пристроях з вимушеною циркуляцією води/холодоносія. Розмір наночастинок у нанохолодоносії, оцінений після одного місяця зберігання в статичних умовах і подальшого механічного перемішування зразка, відповідав розміру, зареєстрованому відразу після приготування нанофлюїда.

Слід зазначити, що аналогічні результати були отримані в роботі [9], де розмір наночастинок TiO_2 у воді вимірювався методом динамічного розсіювання світла (фотонів кореляційної спектроскопії) кожен день протягом місяця після попередньої ультразвукової обробки зразка. Але в реальних умовах важливіше знати, як буде змінюватися розмір агрегатів при механічному перемішуванні, а не при ультразвуковій обробці.

3.3 Результати експериментального дослідження густини холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгіколя

При вивченні перспектив застосування нанотехнологій в холодильній техніці важливо дослідити вплив наночастинок на теплофізичні властивості базових холодоносіїв. Дані про густину необхідні для моделювання процесів теплообміну. Для отримання цих даних автором було досліджено густину базового холодоносія. Отримані експериментальні дані по густину для ХН (ПГ/В/РРВ) були апроксимовані рівнянням (3.1) з наступними коефіцієнтами: $A = -0,6245$, $B = 1217,6$ для ХН (ПГ/В/РРВ):

$$\rho = A \cdot T + B, \quad (3.1)$$

де T – температура, К.

Густина ρ_{nf} для наноХН 0,53 мас.% та наноХН 1,03 мас.% була розрахована за правилом адитивності (3.2):

$$\rho_{nf} = \rho_{np} \cdot \varphi + \rho_{bf} \cdot (1 - \varphi), \quad (3.2)$$

де ρ_{np} – густина наночастинок, кг/м^3 ; φ – об'ємна частка наночастинок в нанофлюїді; ρ_b – густина базового ХН (ПГ/В/РРВ), кг/м^3 .

Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність вимірювання густини холодоносіїв не перевищувала 0,2%. Отримані експериментальні дані про густину холодоносія і нанохолодоносія наведені в таблиці і представлені на рис.3.3.

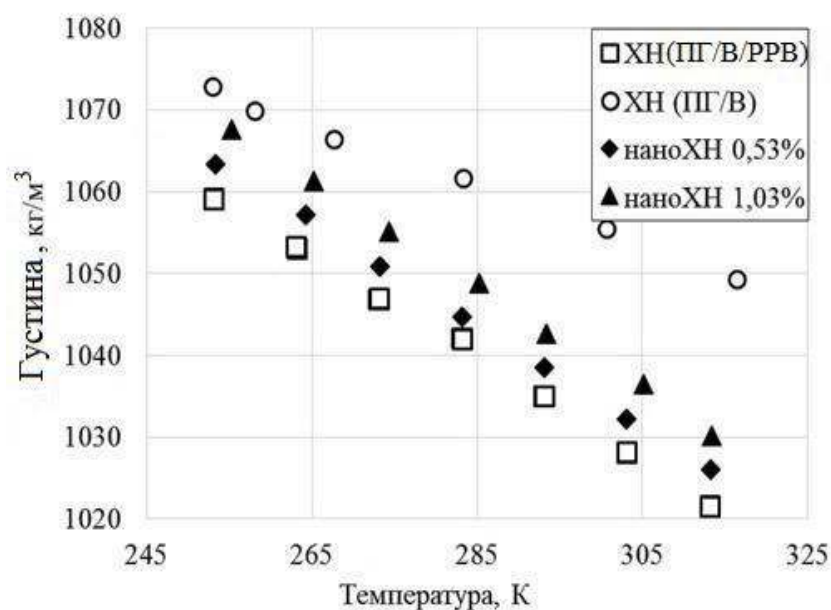


Рис.3.5 – Температурна залежність густини холодоносіїв і нанохолодоносіїв в інтервалі температур 253-313К.

Таблиця 3.3 – Експериментальні значення густини об'єктів дослідження

ХН (ПГ/В)		ХН (ПГ/В/РРВ)		наноХН 0,53%		наноХН 1,03%	
Т, К	$\rho, \text{кг/м}^3$	Т, К	$\rho, \text{кг/м}^3$	Т, К	$\rho, \text{кг/м}^3$	Т, К	$\rho, \text{кг/м}^3$
253,02	1072,8	253,2	1059,20	253,31	1063,4	255,31	253,31

продовження таблиці 3.3

258,19	1069,8	253,1	1059,03	264,25	1057,2	265,25	264,25
267,68	1066,4	253,1	1059,09	273,18	1050,9	274,28	273,18
283,34	1061,6	263,2	1053,04	283,13	1044,7	285,23	283,13
300,65	1055,4	263,1	1053,22	293,14	1038,4	293,34	293,14
316,41	1049,3	263,0	1053,22	303,05	1032,2	305,15	303,05
–	–	273,2	1046,77	313,25	1026,0	313,35	313,25
–	–	273,0	1046,84	–	–	–	–
–	–	273,2	1046,89	–	–	–	–
–	–	283,14	1042,06	–	–	–	–
–	–	283,22	1042,01	–	–	–	–
–	–	283,24	1041,89	–	–	–	–
–	–	293,12	1034,96	–	–	–	–
–	–	293,08	1035,00	–	–	–	–
–	–	293,21	1035,03	–	–	–	–
–	–	303,14	1028,07	–	–	–	–
–	–	303,13	1028,10	–	–	–	–
–	–	303,09	1028,12	–	–	–	–
–	–	313,22	1021,56	–	–	–	–
–	–	313,23	1021,42	–	–	–	–
–	–	313,15	1021,40	–	–	–	–

3.4 Результати експериментального дослідження в'язкості холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгіколю

Дане дослідження присвячене експериментальному визначенню в'язкості нанохолодоносіїв на основі пропіленгіколю при низьких температурах, характерних для області застосування в холодильному обладнанні. Ряд авторів підкреслюють, що основна проблема застосування наночастинок в якості добавок до

тепло- і холодоносія – це значне підвищення відносної в'язкості (щодо базової рідини) при низьких температурах [10-11].

Отримані експериментальні дані для розглянутих в дослідженні холодоносіїв наведені на рисунку 3.6 і в таблиці 3.4.

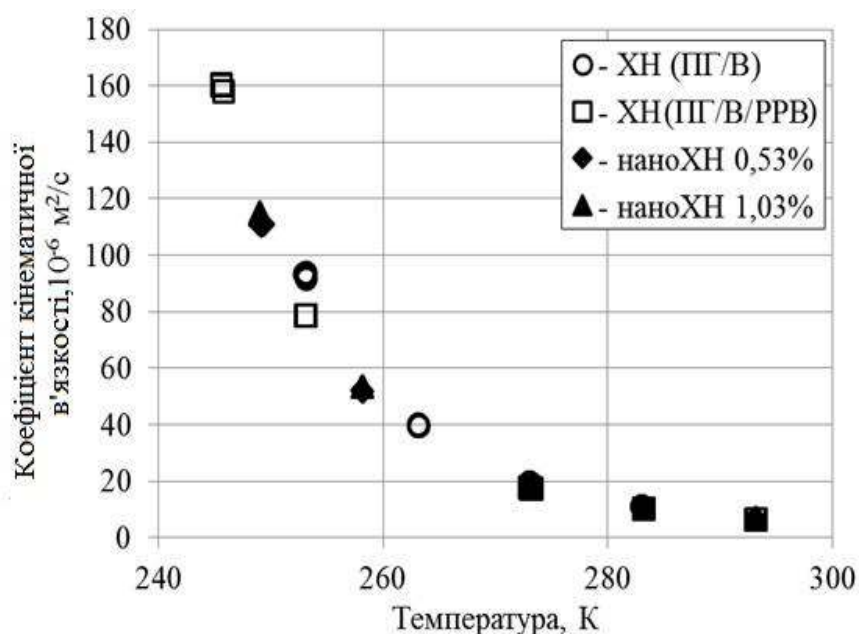


Рис.3.6 Температурна залежність в'язкості холодоносіїв і нанохолодоносіїв

Таблиця 3.4 – Експериментальні значення в'язкості об'єктів дослідження

ХН (ПГ/В)		ХН (ПГ/В/РРВ)		наноХН 0,53%		наноХН 1,03%	
Т, К	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Т, К	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Т, К	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	Т, К	$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
251,71	107,3	253,2	93,68	249,37	111,0	248,97	115,3
251,69	107,6	253,0	93,40	249,00	110,9	249,00	114,5
251,69	107,5	253,1	91,88	249,17	110,7	249,06	114,7
262,6	49,60	263,1	39,78	258,12	51,98	258,18	53,47
262,57	49,47	263,2	39,73	258,14	51,96	258,12	53,46
262,6	49,29	263,1	39,94	258,18	51,79	258,16	53,25
283,92	13,39	273,1	19,22	273,11	18,22	273,29	18,20
283,87	13,52	273,0	19,26	273,14	18,17	273,24	18,25

продовження таблиці 3.4

283,84	13,52	273,0	19,21	273,19	18,18	273,29	18,37
295,55	6,635	283,1	10,75	283,15	10,59	283,17	10,91
295,75	6,511	283,0	10,80	283,18	10,62	283,17	10,87
295,75	6,430	283,1	10,79	283,13	10,61	283,15	10,89
–	–	303,3	3,778	293,13	6,657	293,15	6,829
–	–	303,3	3,774	293,15	6,648	293,22	6,820
–	–	303,3	3,773	293,14	6,635	293,19	6,834

Отримані експериментальні дані про в'язкість холодоносіїв були апроксимовані рівнянням Вальтера (3.3) з коефіцієнтами, наведеними в таблиці 3.5

Таблиця 3.5 Емпіричні коефіцієнти в рівнянні (3.3)

Коефіцієнти	ХН (ПГ/В)	ХН (ПГ/В/РРВ)	наноХН 0,53%	наноХН 1,03%
<i>A</i>	2,3164485	1,3908	1,942936	1,930044
<i>B</i>	12,61037	12,72117	11,91202	11,99541
<i>C</i>	5,123776	5,174600	4,839401	4,8750207

$$\lg(\lg(v + A)) = B - C \cdot \lg(T), \quad (3.3)$$

де v – кінематична в'язкість, $\text{мм}^2/\text{с}$; T – температура, К.

Відхилення експериментальних даних від апроксимаційної залежності (3.3) розраховувалися за такою формулою:

$$\text{dev} = \left(\frac{(v^{\text{експ.}} - v^{\text{роз.}})}{v^{\text{роз.}}} \right) = 100\%, \quad (3.4)$$

де $v_{\text{експ}}$ – експериментальні значення в'язкості; $v_{\text{роз.}}$ – розрахункове за рівнянням (3.4) значення в'язкості.

Відхилення експериментальних даних по в'язкості досліджуваних зразків від розрахованих за рівнянням (3.3) наведені на рис.(3.7).

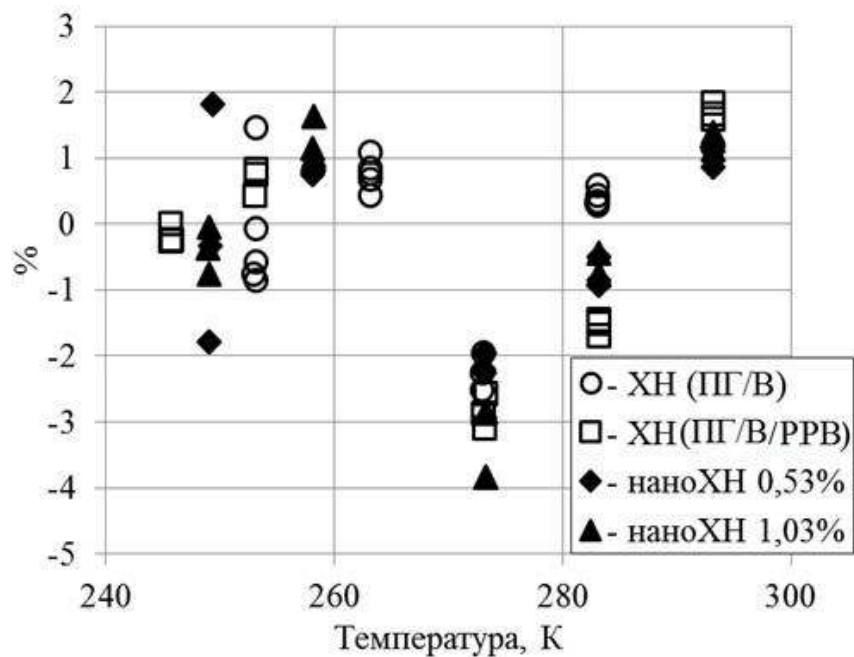


Рис. 3.7 – Відносне відхилення експериментальних значень в'язкості холодоносіїв від розрахованих за рівнянням (3.4)

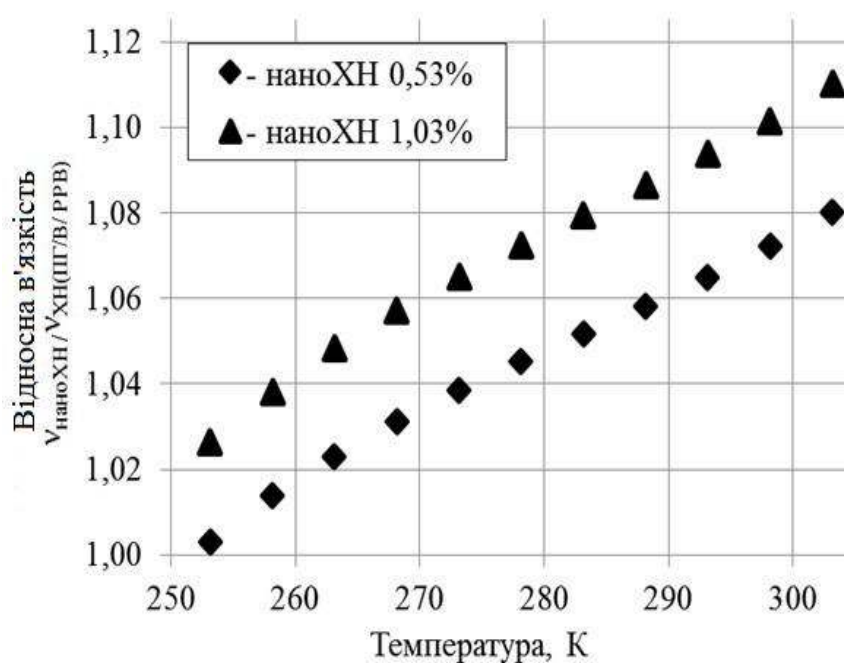


Рис. 3.8 – Температурна залежність відношення в'язкості нанохолодоносіїв до в'язкості холодоносія ХН (ПГ/В/РРВ)

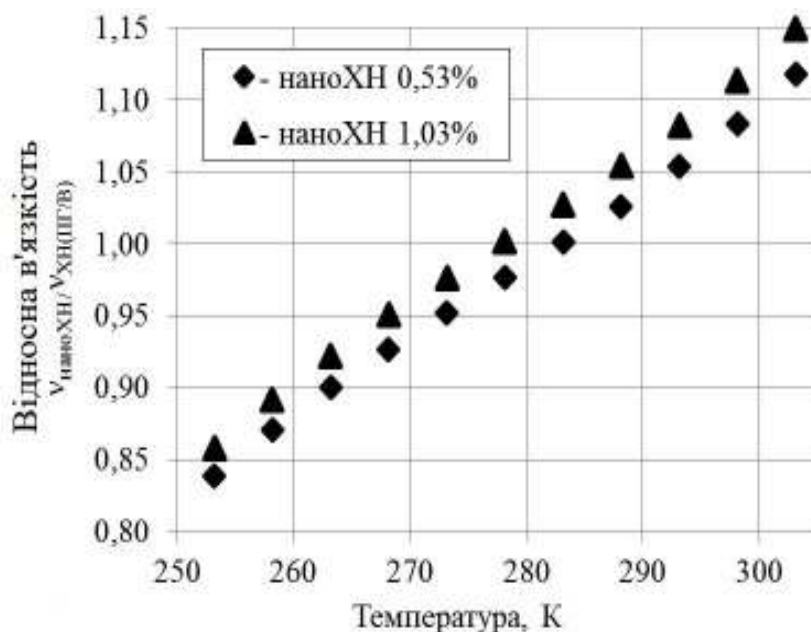


Рис.3.9 – Температурна залежність ставлення в'язкості нанохолодоносіїв до в'язкості холодоносія ХН (ПГ/В)

З наведеної на рисунках 3.8 і 3.9 інформації можна зробити висновок, що добавки наночастинок Al_2O_3 у холодоносії на основі водних розчинів пропіленгліколю та РРВ призводять до незначного підвищення в'язкості при низьких температурах. Більш значне підвищення в'язкості спостерігається при високих температурах. Цей висновок є важливим, оскільки визначає перспективи застосування розглянутих нанохолодоносіїв у холодильній техніці. Саме при низьких температурах (253-273 К) в'язкість традиційних холодоносіїв (водних розчинів пропіленгліколю) приймає високі значення. Добавки наночастинок сприятимуть збільшенню теплопровідності і підвищенню інтенсивності тепловіддачі лише при незначному зростанні в'язкості (див. рис.3.6) зростанні в'язкості. Ще більше перспектив у розглянутих холодоносіїв з'явиться при введенні до їх складу речовини, що регулює в'язкість.

Для компенсації негативного впливу наночастинок на в'язкість холодоносіїв у проведеному дослідженні запропоновано включати до складу холодоносіїв на основі води і гліколей та речовин, що регулюють в'язкість в кількості 5 мас.%. При розробці нового покоління нанохолодоносіїв слід враховувати різноманіття компонентів, які входять до їх складу: вода, гліколі, наночастинок, РРВ, інгібітори

корозії, протипінні компоненти і т.п.

Таким чином, оптимально підібрані концентрації наночастинок і речовини, понижуючої в'язкість, повинні забезпечити як збільшення коефіцієнта тепловіддачі при течії холодоносія в трубках теплообмінного обладнання холодильних систем, так і зниження споживання електроенергії на його циркуляцію по контуру системи непрямого охолодження холодильної установки.

Як видно з результатів, наведених на рис.3.8, добавки всього 5 мас.% речовини, що регулює в'язкість не тільки повністю компенсують ефект на в'язкість присутності наночастинок в холодоносії, а й призводять до істотного зниження в'язкості в порівнянні з в'язкістю холодоносія складу пропіленгліколь/вода 54/46 мас.%, що широко застосовується на практиці.

3.5 Результати експериментального і розрахункового дослідження теплоємності холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгліколя

Дослідження теплоємності базового холодоносія і нанохолодоносія проводилося методом монотонного нагрівання в адіабатному калориметрі [12]. Експеримент проводився в інтервалі температур від 243 до 328 К. Отримані експериментальні дані про теплоємності холодоносія і нанохолодоносія наведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Експериментальні значення теплоємності ХН (ПГ/В/РРВ) і наноХН 0,53%

ХН (ПГ/В/РРВ)		наноХН 0,53%	
Т, К	С _р , Дж/(кг·К)	Т, К	С _р , Дж/(кг·К)
243,15	3056,4	243,15	3006,0
248,15	3098,2	248,15	3049,7

продовження таблиці 3.5

253,15	3139,4	253,15	3092,9
258,15	3180,1	258,15	3135,6
263,15	3220,3	263,15	3177,8
268,15	3259,9	268,15	3219,5
273,15	3299,0	273,15	3260,8
278,15	3337,6	278,15	3301,5
283,15	3375,6	283,15	3341,8
288,15	3413,3	288,15	3381,7
293,15	3450,4	293,15	3421,1
298,15	3487,0	298,15	3460,0
303,15	3523,2	303,15	3498,6
308,15	3559,0	308,15	3536,7
313,15	3594,3	313,15	3574,4

Отримані експериментальні дані по теплоємності були апроксимовані рівнянням (3.5) з коефіцієнтами, наведеними в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 Емпіричні коефіцієнти в рівнянні (3.5)

Коефіцієнти	ХН (ПГ/В)	ХН (ПГ/В/РРВ)	наноХН 0,53%	наноХН 1,03%
<i>A</i>	0,00009591	0,00010815	0,000096026	0,000084106
<i>B</i>	0,05766174	0,053257	0,057539	0,062054

$$C_p = (A + B/T)^{-1}, \quad (3.5)$$

де C_p – теплоємність, Дж/(кг·К).

Оскільки концентрація наночастинок у базовій рідині невелика, теплоємність нанохолодоносіїв була розрахована за правилом адитивності (3.6) [13]:

$$C_{p,nf} = \frac{\varphi(\rho C_p)_n + (1-\varphi)(\rho C_p)_{bf}}{\varphi\rho_n + (1-\varphi)\rho_{bf}}, \quad (3.6)$$

де ρ_{bf} – густина наночастинок, ρ_v – густина базової рідини

Розраховані за апроксимаційними залежностями (3.5) і рівнянням (3.6) значення теплоємності наведені на рис.3.10 і 3.11

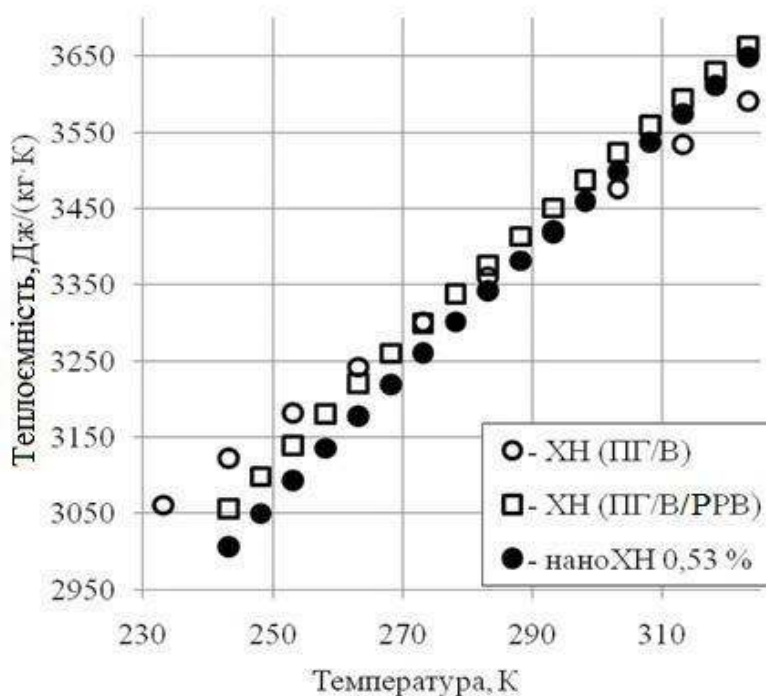


Рис.3.10 – Температурна залежність теплоємності холодоносія ХН (ПГ/В), ХН (ПГ/В/РРВ), наноХН 0.53 мас.% наночастинок, в інтервалі температур 243-328 К

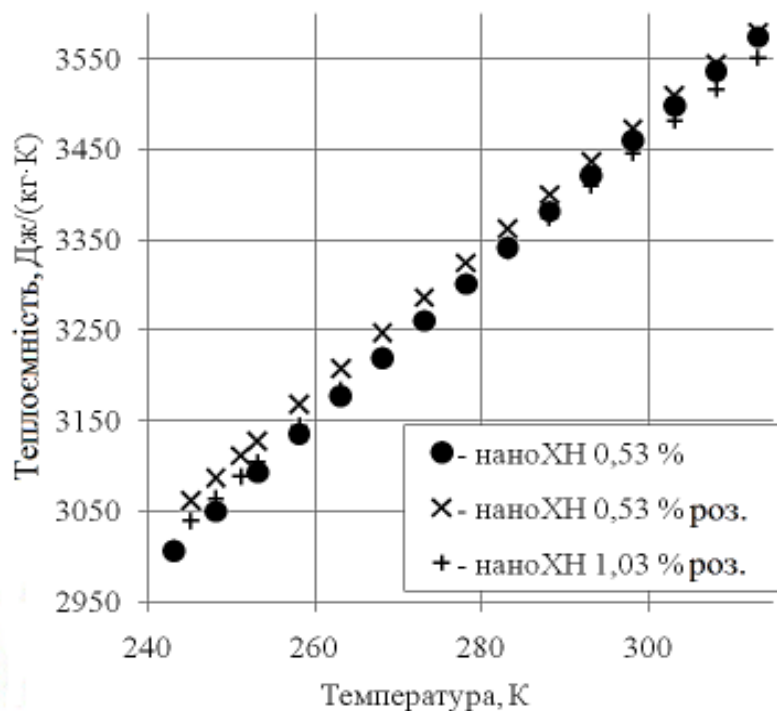


Рис.3.11 – Температурна залежність теплоємності холодоносія наноХН 0,53% і наноХН 1,03% в інтервалі температур 243-328 К

Як видно з рис. 3.10, добавки наночастинок призводять до зниження теплоємності нанофлюїда в порівнянні з базовою рідиною. Ряд авторів стверджує [13], що значення теплоємності нанофлюїдів можна оцінити за правилом адитивності з прийнятною для технічних розрахунків точністю. Як видно з рис. 3.11, теплоємність нанофлюїда, розрахована за апроксимаційною залежністю (3.5), непогано узгоджується з експериментом при температурах 290 К і вище. Разом з тим, при більш низьких температурах відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівнянням (3.6) значень стають більш суттєвими.

3.6 Результати експериментального і розрахункового дослідження теплопровідності холодоносіїв і нанохолодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгіколю

Величина теплопровідності була виміряна для одного об'єкта дослідження – ХН (ПГ/В). Для інших об'єктів дослідження теплопровідність була розрахована за

кореляцією (3.7) для сумішевих холодоносіїв без добавок наночастинок [14]. Інформація про температурні залежності теплопровідності компонентів сумішевого холодоносія була отримана з даних, наведених в [15, 16]:

$$\lambda_{см}^r = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \lambda_i^r \quad (3.7)$$

де w_i – масова частка i -го компонента в суміші, λ_i – теплопровідність компонента в суміші; r – показник степеня, який може приймати значення від мінус 2 до 1 [17].

Теплопровідність нанохолодоносіїв розраховувалася за формулою, наведеною в роботі [17]

$$\lambda_{nf} = \left[\frac{\lambda_{np} + 2 \cdot \lambda_{bf} + 2(\lambda_{np} - \lambda_{bf})(1 + \beta)^3 \varphi}{\lambda_{np} + 2 \cdot \lambda_{bf} - (\lambda_{np} - \lambda_{bf})(1 + \beta)^3 \varphi} \right] \lambda_{bf}, \quad (3.8)$$

де λ_{np} – теплопровідність наночастинок, Вт/(м·К); λ_{bf} – теплопровідність базової рідини була розрахована за методикою, запропонованою в [14], Вт/(м·К); β – відношення товщини шару адсорбуючої на поверхні наночастинок базової рідини до істинного радіусу наночастинок. У проведених розрахунках було прийнято значення $\beta = 0,1$ [17]. Отримані значення об'єктів дослідження наведені на рис. 3.12.

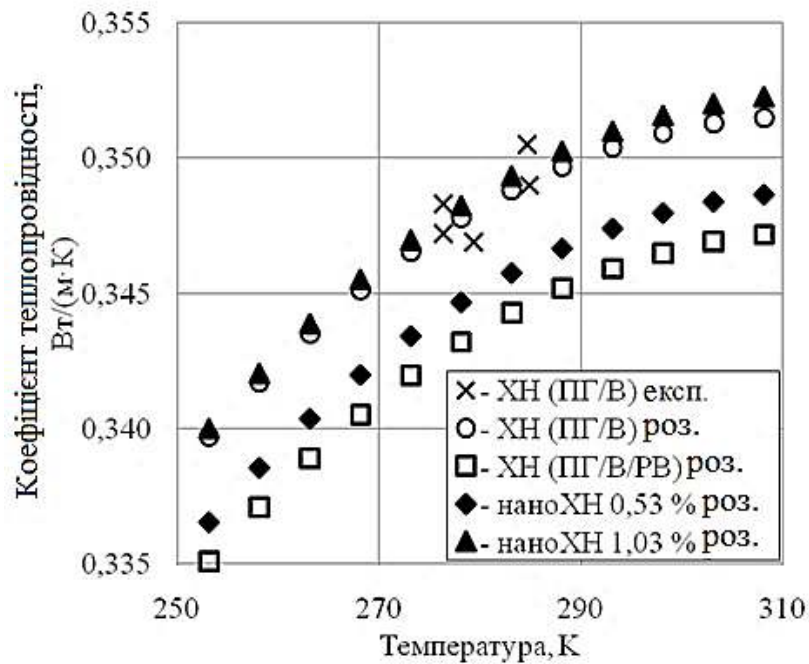


Рис.3.12 – Температурна залежність теплопровідності холодоносія ХН (ПГ/В), ХН (ПГ/В/РРВ), наноХН 0,53% і наноХН 1,03% в інтервалі температур 243-328 К

З рис.3.12 видно, що добавки речовини, що регулює в'язкість, призводять до зниження теплопровідності базового теплоносія, яка компенсується домішками наночастинок Al_2O_3 . Разом з тим, слід зазначити, що, як впливає з великої кількості робіт, присвячених дослідженню конвективної тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів, зростання теплопровідності не є єдиним механізмом інтенсифікації тепловіддачі.

3.7 Моделювання густини та в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв

Включення до складу холодоносіїв на основі етилегліколю і пропіленгліколю наночастинок металів та їх оксидів є перспективним напрямком підвищення ефективності холодильного обладнання. Добавки наночастинок у холодоносій сприяють збільшенню теплопровідності базового холодоносія, збільшенню коефіцієнтів тепловіддачі в теплообмінних апаратах [18, 19, 20, 21, 22]. Дані фактори будуть сприяти зменшенню матеріаломісткості обладнання. Разом з тим,

присутність наночастинок у багатоконпонентному холодоносії має негативний ефект, який пов'язаний зі збільшенням його в'язкості [18, 19, 20, 22].

Робіт, присвячених дослідженню властивостей нанохолодоносіїв на основі етиленгліколю або пропіленгліколю при низьких температурах, характерних для області застосування в холодильному обладнанні, на сьогоднішній день немає. Хоча є ряд робіт, що розглядають перспективи застосування таких нанофлюїдів, наприклад, в якості теплоносія для двигунів внутрішнього згорання [23]. Ряд авторів підкреслюють, що основна проблема застосування наночастинок в якості добавок до тепло- і холодоносія – це значне підвищення відносної в'язкості (щодо базової рідини) при низьких температурах [24,25].

З виконаного огляду опублікованих робіт, присвячених вивченню впливу добавок наночастинок на в'язкість [18, 19, 20, 22, 24, 25], можна зробити два висновки. По-перше, значне підвищення відносної в'язкості нанохолодоносіїв спостерігається при низьких температурах, де в найбільшій мірі проявляються орієнтаційні ефекти для молекул полярних рідин. По-друге, тип наночастинок, їх розмір і форма визначають величину ефекту зростання в'язкості нанофлюїдів.

Для компенсації негативного впливу добавок у наночастинок на в'язкість холодоносіїв пропонується включати до складу холодоносіїв на основі багатоатомних спиртів і води одноатомні спирти. Присутність одноатомних спиртів у розчинах вода/гліколі сприятиме як зниженню температури кристалізації теплоносіїв, так і зменшенню їх в'язкості при низьких температурах.

Таким чином, оптимально підібрані концентрації наночастинок і одноатомних спиртів повинні забезпечити як збільшення коефіцієнта тепловіддачі при течії холодоносія в трубках теплообмінного обладнання холодильних систем, так і зниження споживання електроенергії на його циркуляцію по контуру системи непрямого охолодження холодильної установки.

У роботі були розглянуті перспективи застосування в якості добавок таких спиртів як метанол, етанол, ізопропанол. Показано, що добавки ізопропанолу призводять до підвищення в'язкості розчинів пропіленгліколь/вода [26], а метанол є токсичною речовиною. Вибір етанолу в якості компонента холодоносія

продиктований кількома факторами: низьке значення в'язкості в інтервалі температур використання холодоносіїв, невелика токсичність, низька температура кристалізації (159 К), низька вартість і налагоджене промислове виробництво цієї речовини.

В даний час густина і в'язкість розчинів вода/етиленгліколь і вода/пропіленгліколь добре вивчені при температурах вище 273 К [26, 27, 28, 29, 30]. Причому слід зазначити, що інформації по даній властивості при низьких температурах, характерних для області застосування в холодильній техніці, мало [26, 30]. Для трикомпонентних розчинів одно- і багатоатомних спиртів з водою інформація про густину та в'язкість вкрай обмежена. У літературі є дані тільки для декількох трикомпонентних розчинів: вода/етанол/етиленгліколь [31] і метанол/етанол/пропіленгліколь [32] при температурах вище 293 К. Для розчинів пропіленгліколь/вода/етанол інформація про в'язкість в літературі відсутня.

При розробці нового покоління нанохолодоносіїв слід враховувати відмінність теплофізичних властивостей компонентів: вода, гліколі, одноатомні спирти, наночастинки, інгібітори корозії, протипінні компоненти і т.п., входять до їх складу. Тому проблема вибору оптимального складу холодоносія перетворюється у досить складну задачу. Вирішення цього завдання багато в чому залежить від досконалості методів прогнозування теплофізичних властивостей багатоконпонентних розчинів. Тому на першому етапі розробки нових нанохолодоносіїв доцільно зупинитися на експериментальному вивченні теплофізичних властивостей (перш за все, густини і в'язкості) холодоносіїв, що складаються з гліколей, води і етанолу. При наявності інформації про в'язкість таких трикомпонентних систем завдання вибору оптимального складу нанохолодоносія спрощується.

3.8 Методика прогнозування густини та в'язкості трикомпонентних розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь

Виконаний аналіз методів прогнозування теплофізичних властивостей речовин і розчинів рідин [33, 34] показує, що в умовах обмеженої

експериментальної інформації про густину багатоконпонентних розчинів (холодоносіїв) доцільно використовувати методику, запропоновану в роботах [35, 36]. В рамках цієї методики густина розчину може бути розрахована за формулою:

$$\Delta\rho = \rho_0 \cdot t^{\beta \cdot f(t)}, \quad (3.9)$$

де $\Delta\rho = \rho' - \rho''$ – різниця ортобаричних густин на лінії кипіння і конденсації; ρ_0 – коефіцієнт, який має значення критичної амплітуди для різниці ортобаричної густини, кг/м³; β – критичний індекс для різниці ортобаричної густини (в задачах прогнозування густини можна використовувати його теоретичне значення, $\beta = 0,3245$ [37]); $f(t)$ – універсальна кросоверна функція, значення якої в інтервалі наведених температур $0,005 > t > 0,65$ може бути розраховане за формулою [35, 36]:

$$f(t) = 1 - 0,03534 \cdot \frac{t^{1,5}}{\ln t} - 0,31656 \cdot \frac{t^2}{\ln t} + 0,34246 \cdot \frac{t^3}{\ln t}, \quad (3.10)$$

де $t = 1 - T/\bar{T}_C$ – зведена температура, в якій \bar{T}_C – псевдокритична температура розчину.

Оскільки холодоносії використовуються при низьких температурах при прогнозуванні критичних (псевдокритичних) параметрів розчинів густини насичених парів, ρ'' для багатоатомних спиртів (етиленгліколю та пропіленгліколю) у формулі (3.9) можна знехтувати.

На першому етапі дослідження за наявною в літературі інформацією про критичну температуру і густину компонентів розчинів при температурах, характерних для галузі використання холодоносіїв (інтервали температур для кожного компонента наведені в табл. 3.6), було визначено значення величини коефіцієнта ρ_0 в рівнянні (3.9). Значення густини на лінії насичення для води і етанолу були взяті з бази даних [38], для пропіленгліколю з [26, 28], для

етиленгліколю з [27, 30]. Дані по величинах T_c і ρ_0 , що входять в рівняння (3.9) для чистих компонентів, наведені в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Значення величин T_c і ρ_0 в апроксимації (3.9) густини для компонентів холодоносіїв

Речовина	M , кг/кмоль	T_c , К	ρ_0 , Кг/м ³ /діапазон температур вихідної інформації по густині, К	Дипольний момент, D
Вода	18,015	647,25 [40]	1292,3/280-375 [40]	1,855 [40]
Етанол	46,068	513,9 [40]	1083,2/260-350 [40]	1,6909 [40]
Етилен-гліколь	62,07	720±10 [45]	1386,7/263-350 [27, 30]	2,20±0,02 [26]
Пропілен- гліколь	76,09	676±1 [45]	1308,2/243-338 [26, 28]	3,63 [26]

З використанням наведеної в таблиці 3.8 інформації був виконаний аналіз відхилень, розрахованих за рівнянням (3.9) значень густини води, етанолу, пропіленгліколю та етиленгліколю від даних, наведених в [26,27, 28, 30, 38]:

$$\text{dev} = \left(\left(\rho^{l1} - \rho^{\text{calc}} \right) / \rho^{l1} \right) 100\% , \quad (3.11)$$

де ρ^{l1} – значення густини з літературних джерел; ρ^{calc} – розраховані за рівнянням (3.9) значення густини.

Максимальні значення відхилень розрахованих значень густини від даних, наведених в літературі [26,27, 28, 30, 40] (в інтервалі температур, наведеному в таблиці 3.8), склали ±0,5% для етиленгліколю та пропіленгліколю, ±1,0% для етанолу і ±2,0% для води.

Аналізуючи отриману інформацію слід зауважити, що компонентами холодоносіїв є речовини з високим значенням дипольного моменту, що мають схильність до асоціації (вода, етанол, пропіленгліколь, етиленгліколь). Відомо, що

для цього класу речовин точні методи прогнозування густини, як, втім, і інших теплофізичних властивостей, відсутні [33, 34]. Незважаючи на це, аналіз отриманих відхилень розрахованих значень густини від даних [26,27, 28, 30, 40] дозволяють зробити висновок про те, що при досить обмеженому обсязі вихідної інформації застосування малоконстантної кореляції (3.9) виправдано для вирішення поставленого в роботі завдання. Якість опису даних про густину пропіленгліколю і етиленгліколю взагалі можна порівняти з експериментальною похибкою вимірювання цієї термодинамічної властивості багатокомпонентних холодоносіїв при використанні кореляції (3.9), що буде задовольняти практичним вимогам при вирішенні задачі оптимізації їх складу.

На другому етапі дослідження, була розглянута можливість застосування кореляції (3.9) для прогнозування густини багатокомпонентних холодоносіїв при обмеженій кількості експериментальних даних.

Як показано в роботах [35, 36], величина мольного об'єму речовин в конденсованій рідкій фазі при $T = 0$ що підпорядковується правилу адитивності. Отже, величина коефіцієнта (критичної амплітуди) ρ_0 розчинів різного складу може бути розрахована за формулою

$$\rho_{0\text{mix}} = \frac{\sum_i x_i \cdot M_i}{\sum_i x_i \cdot V_{0i}}, \quad (3.12)$$

де x_i – молярна частка i -го компонента розчину, кмоль/кмоль; M_i – молекулярна маса i -го компонента розчину, кг/кмоль; V_{0i} – молярний об'єм i -го компонента розчину при $T = 0$ К, м³/кмоль

З урахуванням викладеного, при прогнозуванні густини багатокомпонентних холодоносіїв з використанням рівнянь (3.9), (3.10) і (3.12) в рівнянні (3.9) залишається один невідомий параметр – псевдокритична температура. Ця величина може бути визначена при описі обмежених експериментальних даних по густині розчинів рівнянням (3.9). Оскільки якісна інформація про густину

багатокомпонентних холодоносіїв в широкому інтервалі температур в літературі, як правило, відсутня, для апробації запропонованої методики прогнозування густини були розглянуті бінарні розчини вода/РРВ, вода/пропіленгліколь і вода/етиленгліколь. Дані про значення густини бінарних розчинів вода/РРВ були взяті з робіт [39, 30], інформація про густину бінарних розчинів вода/пропіленгліколь з [26].

Слід зазначити, що експериментальні дані про критичні параметри розчинів багатоатомних спиртів з водою в літературі відсутні, є лише експериментальні дані про критичні температури для розчину вода/РРВ [41]. При відсутності експериментальних даних, значення псевдокритичної температури в рамках запропонованої моделі прогнозування густини розчинів із задовільною для практичного застосування похибкою може бути визначено з використанням правила адитивності [33]

$$\bar{T}_C = \sum_i x_i \cdot T_{Ci}, \quad (3.13)$$

де T_{Ci} – критична температура i -го компонента розчину.

На рис.3.15 наведено концентраційні залежності критичної (для розчину вода/РРВ) і псевдокритичної (для розчинів вода/РРВ, вода/пропіленгліколь і вода/етиленгліколь) температур об'єктів дослідження. Значення псевдокритичної температури були отримані за двома методиками: з використанням рівняння (3.13) і як коефіцієнт при апроксимації з експериментальних даних про густину рівнянням (3.9) (при середній температурі інтервалу, в якому є інформація $\rho = f(t)$).

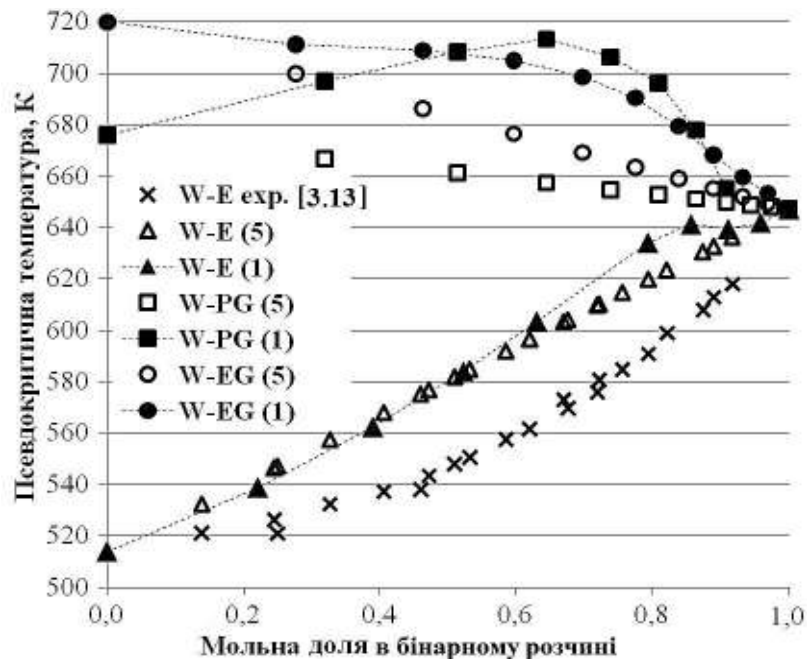


Рис.3.15 – Концентраційна залежність критичної температури для розчину вода/PPB (WE) по [40] і псевдокритичної температури для розчинів вода/PPB (WE), вода/пропіленгліколь (W-PG), вода/етиленгліколь (W-EG), визначена при апроксимації даних [26, 39, 27, 30] рівнянням (3.9) із використанням залежності (3.13)

З рис. 3.15 випливає, що значення псевдокритичної температури, визначені розрахунковими методами для розчинів вода/PPB, відрізняються між собою незначно. При цьому результати розрахунку \bar{T}_c суттєво відхиляються від експериментальних значень (для розчинів вода/PPB). Для розчинів речовини, що регулює в'язкість з водою, залежить \bar{T}_c від концентрації, отриманої при апроксимації обмежених даних, взятих з роботи [26, 39, 27, 30], рівнянням (3.9) і розрахованих за залежністю (3.13), відрізняються істотно. Однак, з огляду на форму залежності густини від температури, слід зауважити, що для розглянутих об'єктів дослідження похибка у визначенні псевдокритичної температури буде незначно впливати на похибку розрахунку густини удалині від критичної точки.

Відхилення розрахованих за рівнянням (3.9) значень густини від даних, наведених в [27], для декількох концентрацій розчинів вода/етиленгліколь в інтервалі температур 263-313К наведено на рис.3.16. Показано, що найбільші

відхилення розрахованих за кореляцією (3.9) значень густини від даних [27] характерні для розчинів з великим вмістом води. При мольних концентраціях води $x_1 = 0-80\%$ для перспективних для застосування холодоносіїв в інтервалі температур 263-313 К відхилення від даних [27] змінюються в межах $\pm 0,6\%$.

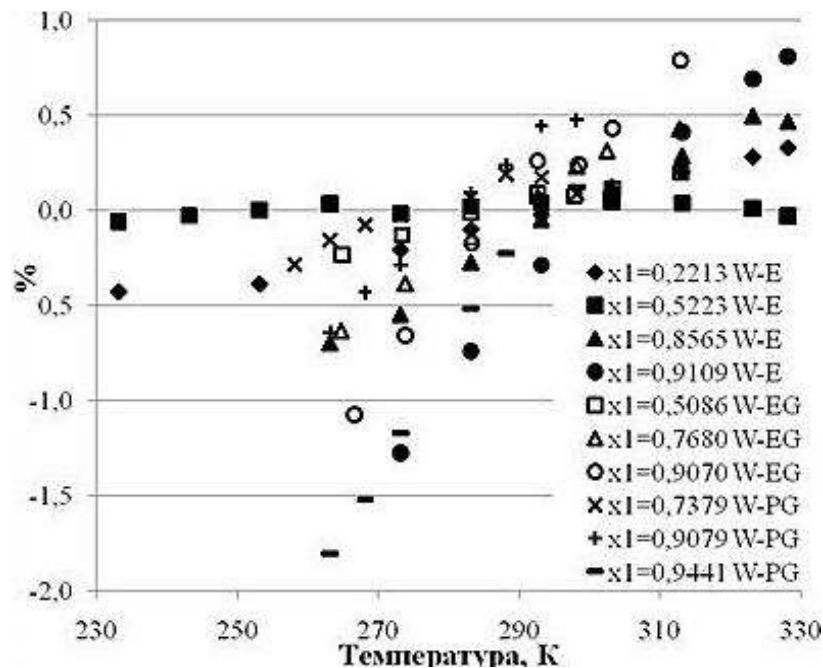


Рис.3.16 – Відхилення розрахованих за рівнянням (3.9) значень густини бінарних розчинів від даних, наведених в [27] – для розчину вода (x_1)/етиленгліколь (W-EG), в [26] – для розчину вода (x_1)/пропіленгліколь (W-PG) і в [39, 30] – для розчину вода (x_1)/PPB (WE) при визначенні \bar{T}_C з кореляції (3.9)

Слід зазначити, що при відсутності даних про значення \bar{T}_C , отриманих з обмежених за обсягом експериментальних даних по густині при їх апроксимації рівнянням (3.9), можна із задовільною для практичного застосування точністю використовувати значення \bar{T}_C розчину, які розраховані за рівнянням (3.13). При цьому максимальні відхилення розрахованих значень густини для розчину вода/етиленгліколь від даних [27] збільшаться незначно – до 1,4%.

В якості інтегрального критерію похибки обчислених значень густини багатокомпонентних розчинів рекомендується використовувати величину середнього відносного відхилення

$$AAPD = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \left(\rho^{[i]} - \rho^{\text{calc}} \right) / \rho^{[i]} \right|, \quad (3.14)$$

де N – кількість експериментальних точок у температурному інтервалі оцінки густини.

Середні відносні відхилення розрахованих значень густини від даних [27] для трьох складів розчину вода/етиленгліколь при визначенні \bar{T}_C з кореляції (3.9) і рівняння (3.13) наведено на рис.3.15.

Аналогічні результати були отримані і для розчинів вода/пропіленгліколь і вода/PPB (див. рис.3.16).

З урахуванням проведеної верифікації запропонованої методики прогнозування густини бінарних холодоносіїв вода/етанол, вода/етиленгліколь і вода/пропіленгліколь можна прийти до наступних висновків. По-перше, відхилення розрахункових значень густини від даних, наведених в [26, 39, 27, 30] при концентраціях води менше 80%, задовольняють поставленим в роботі завданням. По-друге, найбільші відхилення розрахованих значень густини бінарних розчинів вода/етанол, вода/етиленгліколь і вода/пропіленгліколь від довідкових даних [26, 39, 27, 30] проявляються при високій концентрації води в розчинах. Тобто тих розчинах, які не мають потенційної перспективи використання в холодильній техніці з огляду на порівняно високу температуру кристалізації [30].

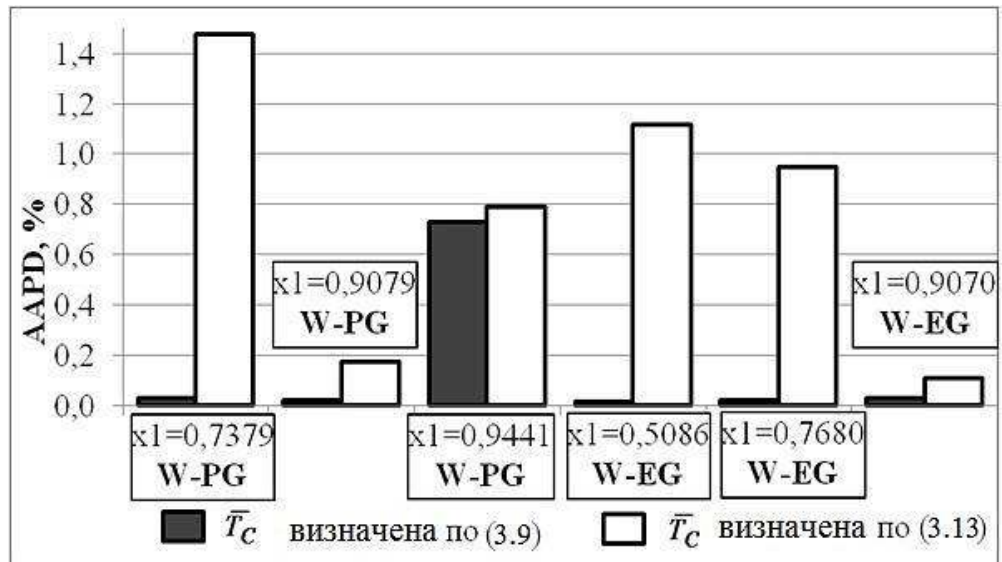


Рис.3.17 – Середнє відносне відхилення розрахованих значень густини бінарних розчинів від даних, наведених в [27] – для розчину вода (x_1)/етиленгліколь (W-EG) і в [26] – для розчину вода (x_1)/пропіленгліколь (W-PG) при визначенні \bar{T}_C з кореляції (3.9) і за рівнянням (3.13)

Проведена верифікація методики розрахунку густини водних розчинів з регуляторами в'язкості речовин показує, що рівняння (3.9) може бути використано для прогнозування густини багатокомпонентних холодоносіїв.

На підставі наведених у таблиці 3.6 експериментальних даних про густину трикомпонентного розчину вода/речовина, що регулює в'язкість/пропіленгліколь було отримано апроксимаційні рівняння залежності \bar{T}_C від масових концентрацій компонентів:

$$\bar{T}_C = 706,3 - 0,0002265 \cdot w_1^3 - 2,8535 \cdot w_2, \quad (3.15)$$

де w_1 і w_2 – масова частка води і етанолу в трикомпонентному розчині, відповідно, мас. %.

Дане рівняння можна застосувати для концентрацій води в трикомпонентному розчині w_1 від 46 до 75 мас. % (що відповідає температурі початку кристалізації

розчинів вода/пропіленгліколь від $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Вміст РРВ і пропіленгліколю може варіюватися в межах від 0 до 54 мас. %.

Відхилення експериментальних значень густини від розрахованих за рівняннями (3.9), (3.10), (3.12) і (3.13) для розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь наведені на рисунку 3.18.

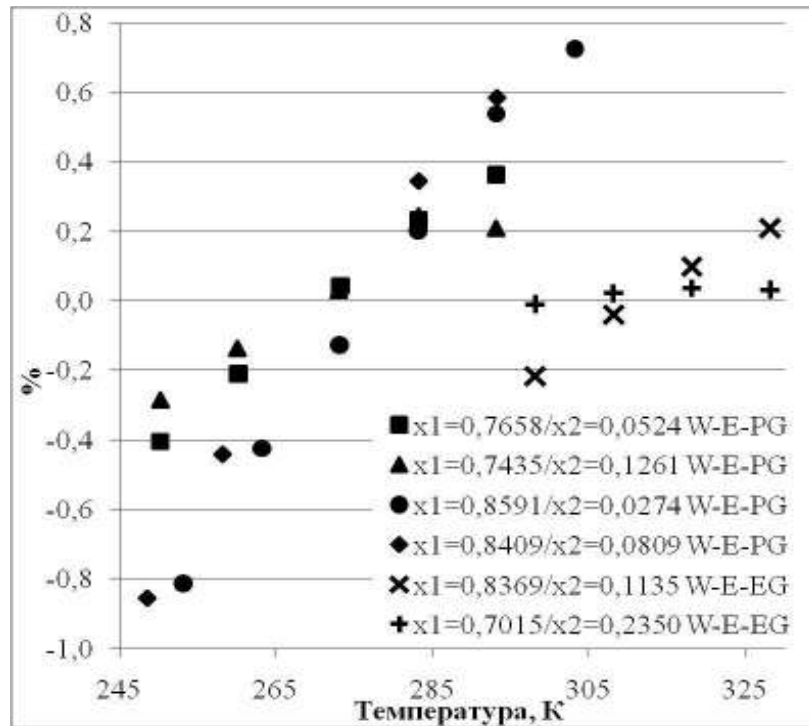


Рис.3.18 – Відхилення розрахованих за рівняннями (3.9), (3.10), (3.13) і (3.15) значень густини розчинів вода (x_1)/РРВ, (x_2)/пропіленгліколь (W-E-PG) від експериментальних даних, наведених у таблиці 3.1 і розчинів вода (x_1)/РРВ, (x_2)/етиленгліколь (W-E-EG) від даних, наведених в [13], при розрахунку \bar{T}_C по кореляції (3.9)

Як впливає з інформації, наведеної на рис.3.16, відхилення значень густини, розрахованої за рівняннями (3.9), (3.10), (3.12) і (3.15) для розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь від експериментальних даних, лежать в межах $\pm 0,5\%$ для складів із вмістом води 74-76 моль. %. Декілька великі відхилення спостерігаються для розчинів з вмістом води 84-86 моль. %. Результати виконаних за рівняннями (3.9), (3.10), (3.12) і (3.15) розрахунки густини трикомпонентних розчинів показали

задовільні для вирішення завдання вибору оптимального складу багатокомпонентного холодоносія відхилення експериментальних даних.

Для підтвердження цього висновку була проведена верифікація запропонованої методики прогнозування густини стосовно трикомпонентного холодоносія з використанням інформації про густину розчинів вода/PPВ/етиленгліколь різного складу в інтервалі температур 298,15-328,15 К, наведеному в [31]. Відхилення розрахованих за запропонованою в роботі моделі значень густини від експериментальних даних [31] наведені на рис.3.16.

Велика частина даних про в'язкість холодоносіїв, яка є в літературі, отримана при проведенні дорогих експериментальних досліджень, з подальшою екстраполяцією отриманих даних в область низьких температур. При розрахунковому визначенні в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв можуть використовуватися різні методи [33, 42]. Для отримання інформації про в'язкість багатокомпонентних холодоносіїв на основі наявних даних про густину і в'язкість чистих компонентів досить часто застосовуються кореляції, які отримані при узагальненні великої кількості емпіричної інформації з використанням різних правил змішування, методу самовідношення (self referencing method), LBC(Lohrenz-Bray-Clark) модель [43]. Крім зазначених методів, в практиці розрахунку в'язкості розчинів застосовують і теоретично обґрунтовані моделі (rough hard-sphere model, friction theory model, free volume model, VW (Vesovic-Wakeham) method [43].

Аналіз похибки прогнозування в'язкості розчинів з використанням різних моделей дозволяє прийти до висновку про те, що:

- запропоновані методи прогнозування в'язкості розчинів не забезпечують необхідної якості розрахункових даних;
- необхідна розробка нових моделей, що вимагають для свого застосування можливо меншу кількість вихідної інформації.

Виконаний аналіз методів прогнозування в'язкості розчинів показує, що в умовах обмеженої експериментальної інформації про в'язкість багатокомпонентних холодоносіїв доцільно використовувати методику, запропоновану в роботах [43, 44]. В рамках цієї методики в'язкість розчинів може бути розрахована за формулою:

$$\frac{1}{\eta_{\text{mix}}} = a_{\eta} (V_{\text{mix}} - Or_{\text{mix}})^{b_{\eta}}, \quad (3.16)$$

де a_{η} і b_{η} – емпіричні коефіцієнти; V_{mix} – молярний об'єм рідини при температурі визначення в'язкості, м³/моль; Or_{mix} – ортохор (молярний об'єм рідини при температурі кристалізації), м³/моль.

Розрахунок величини ортохора для індивідуальних речовин може бути розрахований за залежностями, які запропоновані в [44], Вихідною інформацією при розрахунку ортохора можуть бути дані про густину, поверхневий натяг, показник заломлення або мольний об'єм при температурі кипіння. Для багатоконпонентних холодоносіїв значення ортохора може бути розраховане по адитивності

$$Or_{\text{mix}} = \sum_i x_i \cdot Or_i, \quad (3.17)$$

де x_i – молярна частка і-го компонента розчину, кг_{моль}/кг_{моль}; Or_i – ортохор і-го компонента розчину, кг/кг_{моль}.

Досвід застосування залежності (3.16) показав, що вона добре описує експериментальні значення в'язкості неасоційованих речовин і розчинів в інтервалі значень наведених температур $0,005 \leq t \leq 0,45$. Значення наведеної температури для індивідуальних речовин розраховується за залежністю (3.18), а для розчинів – (3.19)

$$t = 1 - T/T_c, \quad (3.18)$$

$$t = 1 - T/\bar{T}_c, \quad (3.19)$$

де T_c – критична температура речовини, К; \bar{T}_c – псевдокритична температура розчину, К, яку в рамках запропонованої кореляції для прогнозування в'язкості, можна визначити з даних про густину розчину [44].

При розгляді можливостей застосування кореляції (3.16) для прогнозування в'язкості холодоносіїв при низьких температурах слід виділити кілька важливих факторів. По-перше, інтервал наведених температур застосування холодоносіїв $t > 0,45$, тобто виходить за межі автотемпературності запропонованих в літературі кореляцій. По-друге, в області низьких температур ($t > 0,45$) для полярних і асоційованих речовин будуть проявлятися орієнтаційні ефекти в міжмолекулярній взаємодії, які значно збільшують в'язкість рідини. При низьких температурах (коли тиск насичених парів холодоносіїв незначний) традиційно застосовуються критерії термодинамічної подібності, такі як фактор ацентричності або критерій Ріделя, але не в змозі розширити область автотемпературності кореляції (3.16).

Проведене дослідження показує, що для розширення діапазону застосування кореляції (3.16) доцільно застосування ψ -фактора (фактора складності міжмолекулярної взаємодії [45]). Слід підкреслити важливу можливість зазначеного критерію при дослідженні в'язкості холодоносіїв. Значення ψ -фактора для різних речовин і розчинів може бути розраховане з використанням доступної в літературних джерелах інформації, за запропонованою в роботах [44] кореляцією

$$\psi = 0,1 \cdot \ln(T_{nb}) - 0,122 \cdot \ln(V_{nb}) + 0,006, \quad (3.20)$$

де T_{nb} – температура кипіння, К; V_{nb} – молярний об'єм рідини при температурі кипіння, $\text{см}^3/\text{моль}^{-1}$.

На думку авторів, ψ -фактор характеризує відхилення величини міжмолекулярної взаємодії, яке характерне для різних полярних речовин, від взаємодії, яка реалізується в неполярних сферично-симетричних молекулах. Таким чином, ψ -фактор, на відміну від інших критеріїв термодинамічної подібності, є найбільш адаптованим до обліку орієнтаційних ефектів в полярних і асоційованих речовинах.

Виконаний аналіз відхилень, розрахованих по кореляції (3.16) значень в'язкості різних рідин від експериментальних даних, в діапазоні наведених температур $0,45 \leq t \leq 0,6$ залежать як від ψ -фактора, так і наведеної температури t .

З урахуванням цього висновку, авторами пропонується дотримуватися кореляції для прогнозування в'язкості компонентів холодоносіїв і самих холодоносіїв при низьких температурах, характерних для холодильного застосування

$$\frac{1}{\eta_{\text{mix}}} = a_{\eta} (V_{\text{mix}} - Or_{\text{mix}})^{b_{\eta}} \cdot (1 + \psi \cdot t^8). \quad (3.21)$$

Верифікація запропонованої формули проводилася для наступних речовин, перерахованих в таблиці 3.9, характерні параметри цих речовин і параметри вихідної інформації так само наведені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Характерні параметри і вихідна інформація для оцінки в'язкості для різних індивідуальних речовин

Речовина	M, кг/моль	T _c , K	T _{nb} , K	Дипольний момент, D	Ψ
Вода	18,015	647,25[40]	373,12[40]	1,855[40]	0,2403
Етанол	46,068	513,9[40]	351,39[40]	1,6909[40]	0,0876
Метанол	32,042	512,6[40]	337,63[40]	1,7[40]	0,130
Етиленгліколь	62,07	720 ± 10[45]	470,45[30]	2,20 ± 0,02[26]	0,112
Пропіленгліколь	76,09	676 ± 1[45]	461,35 [30]	3,63[26]	0,075
Етан	30,069	305,32[40]	184,57[40]	0[40]	0,0383
Ізобутан	58,122	407,81[40]	261,4[40]	0,132[40]	0,0034
Бутан	58,122	425,13[40]	272,66[40]	0,05[40]	0,009
Нонан	128,26	594,55[40]	423,91[40]	0,07[40]	-0,042
Додекан	170,33	658,1[40]	489,3[40]	0[40]	-0,065

В якості інтегрального критерію похибки обчислених значень в'язкості компонентів холодоносіїв рекомендується використовувати величину середнього відносного відхилення

$$AAPD = \frac{100\%}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left| \frac{\eta^{[i]} - \eta^{calc}}{\eta^{[i]}} \right|, \quad (3.22)$$

де N – кількість точок в інтервалі температур вихідної інформації про в'язкість речовин; $\eta^{[i]}$ – значення в'язкості з літературних джерел; η^{calc} – розраховані за рівнянням (3.16) значення в'язкості.

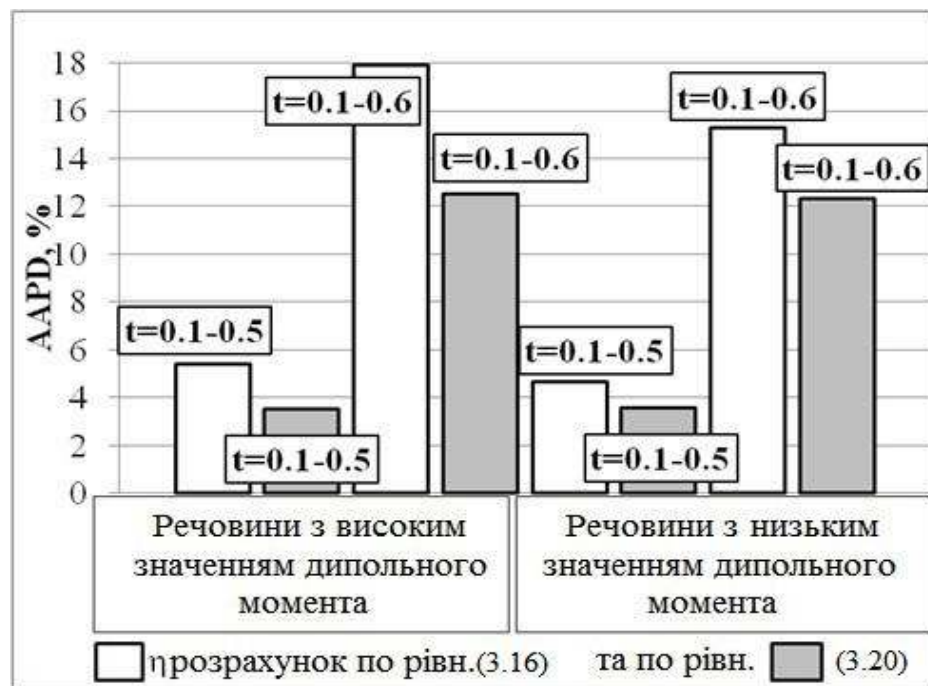


Рис.3.19 – Середні відносні відхилення між літературними і розрахованими по кореляції (3.16) і (3.20) значеннями в'язкості для двох груп індивідуальних речовин, наведених в таблиці 3.9, отримані з використанням вихідної інформації в інтервалах наведених температур: $t = 0,1-0,5$ і $t = 0,1-0,6$

З наведеної на рис.3.19 інформації випливає, що введення в структуру формули (3.16) ψ – фактора дозволяє підвищити якість прогнозування в'язкості компонентів холодоносіїв у широкому інтервалі температур.

При адаптації кореляції (3.20) до задачі прогнозування в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв автори пропонують розраховувати значення ψ –фактора для розчинів по адитивності

$$\psi_{\text{mix}} = \sum_i x_i \cdot \psi_i, \quad (3.23)$$

де ψ_i -фактор складності міжмолекулярної взаємодії i -го компонента розчину.

Верифікація запропонованої моделі прогнозування в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв на прикладі розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь проведена в роботі. Значення відхилень було розраховано за рівнянням

$$\text{dev} = \left(\frac{\eta^{\text{calc}} - \eta^{\text{exp}}}{\eta^{\text{exp}}} \right) 100\%, \quad (3.24)$$

де η^{exp} – експериментальне значення в'язкості.

За рівнянням (3.24) були розраховані відхилення оцінених з використанням моделі (3.20) значень в'язкості з даними експериментальних досліджень, наведених в таблиці 3.9. Результати проведеної верифікації демонструє рис. 3.20.

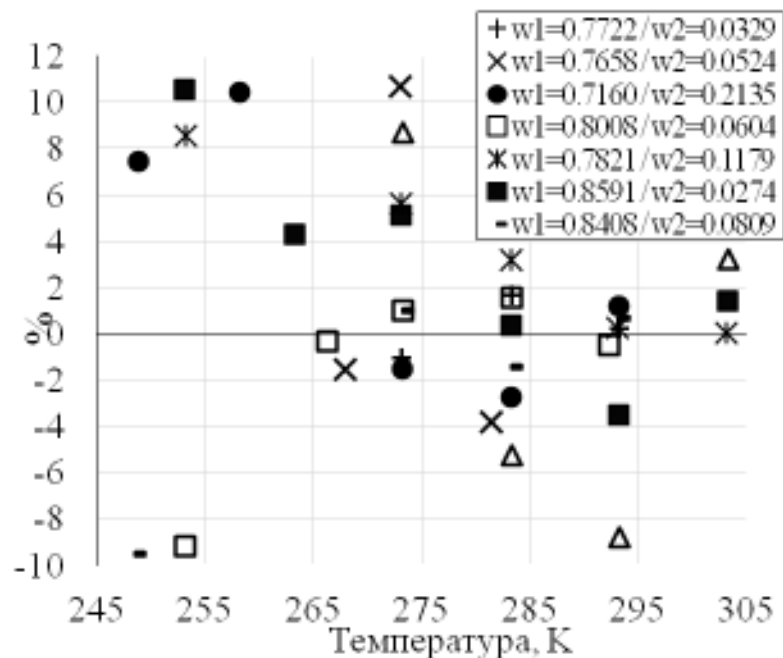


Рис.3.18 – Відхилення розрахованих за рівнянням (3.24) значень в'язкості розчинів вода (x1)/речовина, що регулює в'язкість, (x2)/пропіленгліколь від експериментальних даних, наведених у таблиці 3.9

З наведеної на рис.3.20 інформації випливає, що запропонована модель (див. формули (3.17), (3.18), (3.20)) забезпечує достатню точність прогнозування в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв. Найбільші відхилення спостерігаються при найнижчих температурах для холодоносіїв, у складі яких великий вміст води. Разом з тим, досить високу якість прогнозування в'язкості низькотемпературних холодоносіїв за запропонованою модель-рівняння (3.20) дозволяє вирішувати завдання попереднього вибору оптимального складу нових багатокомпонентних холодоносіїв. Визначений за запропонованою моделлю склад розчинів вода/PPB/пропіленгліколь можна використовувати в якості базової рідини для розробки нового нанохолодоносія.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1]. Dyment O.N., Kazanskiy K.S., Miroshnikov A.M. Glycols and other derivatives of ethylene and propylene oxides. Moskow. Khimiya. 1976. 376. P.
- [2]. Preisegger E., Flohr F., Krakat, G., Glück, A., Hunold D. Properties of Industrial Heat Transfer Media. In vdi heat atlaspp. Springer. Berlin Heidelberg, 2010. P. 419-512.
- [3]. Kapadi U. R., Hundiwale D. G., Patil N. B., Lande M. K., Patil P. R. Studies of viscosity and excess molar volume of binary mixtures of propane-1, 2 diol with water at various temperatures. Fluid phase equilibria. 2001. Vol. 192. № 1. P. 63-70.
- [4]. Wu D., Zhu H., Wang L. Critical issues in nanofluids preparation, characterization and thermal conductivity. Current nanoscience. 2009. Vol. 5. № 1. P. 103-112.
- [5]. Yu Wei, Xie Huaqing. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. Journal of nanomaterials. 2012. Vol. 17.
- [6]. 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.
- [7]. Li Y., Zhou S., Tung E., Schneider S. Review on development of nanofluid preparation and characterization. Powder Technology. 2009. Vol. 196. № 2. P. 89-101.
- [8]. 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.
- [9]. 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. P. 1359-1366.

[10]. Sundar L. S., Sharma K. V., Nai M. T., Singh M. K. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 25. P. 670-686.

[11]. Meyer J. P., Adio S. A., Sharifpur M. The viscosity of nanofluids: a review of the theoretical, empirical, and numerical models. *Heat transfer engineering*. 2016. Vol. 37. № 5. P. 387-421.

[12]. Лозовский Т. Л., Шимчук Н. А., Мотовой И. В., Железный В. П. Влияние примесей наночастиц Al_2O_3 на теплоемкость изопропилового спирта. *Холодильна техніка и технологія*. 2016. Vol. 52. № 1. P. 70-79.

[13]. Michaelides E. E. *Nanofluidics: Thermodynamic and Transport Properties*. Springer, USA. P. 334.

[14] Рід Р., Праусніц Дж., Шервуд Т. Властивості газів і рідин. Хімія, Ленинград. 1982. 592 с.

[15]. Lemmon, Eric W., Marcia L. Huber, Mark O. McLinden. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties—REFPROP. NIST standard reference database 23. 2002. Vol. 7.

[16]. Дымент О. Н., Казанский К. С., Мирошников А. М. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена. Химия, Москва. 1976. 376 с.

[17]. Yu W., Choi S.U.S. The role of international layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model. *Journal on nanoparticle research*. 2003. Vol. 5. P. 167-171.

[18]. 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. 8. № 85. P. 4-12.

[19]. Solangi K. H., Kazi S. N., Ruhur M., Badarudin A., Amiri A., Sadri R., Teng K. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids. *Energy*. 2015. Vol. 89. P. 1065-1086.

[20]. Efstathios E. S. Michaelides nanofluidics thermodynamic and transport properties. Springer international publishing switzerland. 2014. P. 335.

[21]. Zhelezny V. P. An application of nanotechnologies in refrigeration – perspectives and challenges. Proc. 11th IIR gustav lorentzen conference on natural refrigerants. China 2014.

[22]. Celen A., Aktas M., Mahian O., Dalkilic A., Wongwises S. A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and applications. International journal of refrigeration. 2014. Vol. 44. P. 125-140.

[23]. 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. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2011. Vol. 38. № 9. P. 1283-1290.

[24]. Sundar L. S., Sharma K. V., Naik M. T., Singh M. K. Empirical and theoretical correlations on viscosity of nanofluids: a review. Renewable and sustainable energy reviews. 2013. Vol. 25. P. 670-686.

[25]. Meyer J. P., Adio S. A., Sharifpur M., Nwosu P. N. The viscosity of nanofluids: a review of the theoretical, empirical, and numerical models. Heat Transfer Engineering. 2016. Vol. 37. № 5. P. 387-421.

[26]. Дымент О.Н., Казанский К.С., Мирошников А.М. Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена. 1976. 376 с.

[27]. Bohne D., Fischer S., Obermeier E. Thermal conductivity, density, viscosity, and prandtl-numbers of ethylene glycol-water mixtures. Berichte der bunsengesellschaft für physikalische chemie. 1984. Vol. 88. № 8. P. 739-742.

[28]. George N. V. Densities, dynamic viscosities, speeds of sound, and relative permittivity's for water+alkane diols (propane-1, 2-and-1, 3-diol and butane-1, 2-,-1, 3-,-1, 4-, and-2, 3-diol) at different temperatures. Sentry journal of chemical & engineering data. 2003. Vol. 48. № 6 P. 1529-1539.

[29]. Kapadi U. R., Hundiwale D. G., Patil N. B., Lande M. K., Patil P. R. Studies of viscosity and excess molar volume of binary mixtures of propane-1, 2 diol with water at various temperatures. Fluid phase equilibria. 2001. Vol. 192. № 1. P. 63-70.

[30]. Flohr F., Krakat G., Glück A., Hunold D.Ю., Preisegger E. Properties of Industrial Heat Transfer Media. In vdi heat atlas. Heidelberg. Berlin. 2010. P. 419-512.

[31]. Quijada-Maldonado E., Meindersma G. W., de Haan A. B. Viscosity and density data for the ternary system water (1)–ethanol (2)–ethylene glycol (3) between 298.15 K and 328.15 K. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2013. Vol. 57. P. 500-505.

[32]. Zarei A., Mirhidari N., Zangeneh Z. Densities, excess molar volumes, viscosity, and refractive indices of binary and ternary liquid mixtures of methanol (1)+ ethanol (2)+ 1, 2-propanediol (3) at P= 81.5 kPa. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2009. Vol. 54. № 3. P. 847-854.

[33]. Рід Р. Праусніц Дж., Шервуд Т. Властивості газів і рідин. Хімія, Ленінград. 1982. 592 с.

[34]. Морачевский А. Г., Сладков И. Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений (экспериментальные данные и методы расчета): Справ. Химия. СПб. 1996. 312 с.

[35]. Zhelezny V., Sechenyh V., Nikulina A. New Scaling Principles–Quantitative Structure Property Relationship Model (SP-QSPR) for Predicting the Physicochemical Properties of Substances at the Saturation Line. *Journal of chemical & engineering data*. 2014. Vol. 59. № 2. P. 485-493.

[36]. Железный В.П., Семенюк Ю.В. Теплофизические свойства растворов хладагентов в компрессорных маслах: монография. Фенікс, Одесса. 2013. 419 с.

[37]. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. Москва. 1987. 272 с.

[38]. Wei Yu, Huaqing Xie. A review on nanofluids: preparation, stability mechanisms, and applications. *Journal of nanomaterials - special issue on advanced nanohybrid materials: surface modification and applications*. 2012. P. 17.

[39]. Стабников В. Н., Ройтер И. М., Процюк Т. Б. Этиловый спирт. Пищевая промышленность. Москва. 1976. 273 с.

[40]. Lemmon, Eric W., Marcia L. Huber, and Mark O. McLinden. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties–REFPROP. NIST standard reference database 23. 2002. Vol. 7.

[41]. Hicks C. P., Young C. L. Gas-liquid critical properties of binary mixtures. *Chemical Reviews*. 1975. Vol. 75. № 2. P. 119-175.

[42]. Викторов М. М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. *Химия, Ленинград*. 1977. 360 с.

[43]. Sechenyh V. V., Zhelezny V. P. Predicting the viscosity of halogenated alkane mixtures at the boiling line. *Russian journal of physical chemistry*. 2010. Vol. 84. № 6. P. 1079-1081.

[44]. Zhelezny V., Sechenyh V., Nikulina A. New Scaling Principles–Quantitative Structure Property Relationship Model (SP-QSPR) for Predicting the Physicochemical Properties of Substances at the Saturation Line. *Journal of chemical & engineering data*. 2014. Vol. 59. № 2. P. 485–493.

[45]. Sladkov I. B. Calculating density of molecular liquids using Agrawal-Thodos equation. *Russian journal of applied chemistry*. 2002. Vol. 75. № 11. P. 1770-1773.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ ТА ВТРАТ НАПОРУ ПРИ ВИМУШЕНІЙ ЛАМІНАРНІЙ ТЕЧІЇ НАНОХОЛОДОНОСІЇВ

Як зазначалося в першому розділі, вплив домішок наночастинок на процес тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів є неоднозначним. До цього часу немає єдиної думки про фізичну природу механізмів, що збільшують коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів. Вважається, що збільшення теплопровідності є одним із значущих чинників інтенсифікації тепловіддачі за участю нанофлюїдів. З цієї причини нанофлюїди є перспективними теплоносіями для теплообмінного обладнання з ламінарним режимом течії рідини [1-6]. Разом з тим, як відзначають ряд авторів, зміна теплопровідності нанофлюїдів у порівнянні з базовою рідиною не є єдиним механізмом збільшення коефіцієнта тепловіддачі [1-9]. З урахуванням викладеного, можна констатувати, що детальні, фізично обґрунтовані уявлення про механізм інтенсифікації тепловіддачі за участю нанофлюїдів досі залишаються не розробленими. З цієї причини необхідні додаткові експериментальні дослідження, спрямовані на вивчення впливу наночастинок на інтенсивність тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів в трубах і каналах.

4.1 Методика проведення експериментальних досліджень коефіцієнта тепловіддачі

Для експериментального визначення значень місцевого (локального) коефіцієнта тепловіддачі в перерізі труби, в якій відбувається вимушена течія теплоносія, використовувалося рівняння

$$\alpha_{\text{exp}(X)} = q_{(X)} / (T_{w(X)} - T_{fl(X)}), \quad (4.1)$$

де $q_{(X)}$ – густина теплового потоку у визначеному перерізі X вимірювальної ділянки труби, Вт/м²; $T_{w(X)}$ – температура внутрішньої поверхні труби в визначеному перерізі

вимірювальної ділянки труби, К; $T_{fl(x)}$ – розрахункова температура холодоносія у визначеному перерізі труби, К.

Усереднення температури холодоносія у перерізі проводилося за наступною методикою. Середня температура холодоносія в перерізі труби оцінювалася як [10]:

$$T_{fl} = \frac{1}{\bar{v}} \int_0^{f_0} v_{(r)} T_{(r)} df, \quad (4.2)$$

де \bar{v} – середня швидкість потоку (визначена за значенням витрати холодоносія), м/с; $T_{(r)}$ – виміряне в експерименті значення температури холодоносія на відстані r від осі труби, К; $v_{(r)}$ – швидкість рідини на відстані r від осі труби при ламінарному режимі, яка визначалася за рівнянням (4.3), м/с [10]:

$$v_{(r)} = 2\bar{v} \left(1 - (r/r_0)^2 \right), \quad (4.3)$$

де r_0 – радіус труби, м.

Швидкість холодоносія в перерізі оцінювалася за формулою:

$$v = q / (\pi \cdot d^2 / 4), \quad (4.4)$$

де q – об'ємна витрата, л/год.

Число Рейнольдса розраховувалося за формулою:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (4.5)$$

де ω – швидкість потоку рідини відносно поверхні теплообміну, d – гідравлічний діаметр, ν – кінематична в'язкість.

В'язкість теплоносія визначалася при середньологарифмічній температурі, між $T_{XHвх}$ і $T_{XHвих}$, або при температурі холодоносія в кожному перерізі (для розрахунку

локальних КТВ).

Середня густина теплового потоку на ділянці труби довжиною $L = X_i - X_{i+1}$ (де X_i і X_{i+1} – відстані від входу холодоносія в робочу ділянку труби до перерізу X_i і X_{i+1} , відповідно, м)

$$q_{(X_i-X_{i+1})} = \frac{G_{fl} \cdot C_{pfl} (T_{fli} - T_{fli+1})}{\pi \cdot 2 \cdot r_0 \cdot (X_i - X_{i+1})}, \quad (4.6)$$

де G_{fl} – масова витрата холодоносія у трубі, кг/с; C_{pfl} – теплоємність холодоносія при середній температурі на ділянці $X_i - X_{i+1}$, Дж/(кг·К); T_{fli} і T_{fli+1} – середні у перерізі труби температури холодоносія в перерізі X_i і X_{i+1} , відповідно, К.

За отриманою залежністю $q_{(X_i-X_{i+1})} = f(l)$ була визначена величина $q_{(x)}$ для кожного розглянутого перерізу труби.

Для експериментального визначення середнього по довжині труби коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії теплоносія використовувалися рівняння:

$$q_{(X_1-X_6)} = \frac{G_{fl} \cdot C_{pfl} (T_{fl1} - T_{fl6})}{\pi \cdot 2 \cdot r_0 \cdot (X_1 - X_6)}, \quad (4.7)$$

$$\alpha_{exp} = q_{(X_1-X_6)} / (T_w - T_{fl}), \quad (4.8)$$

де T_w – середня температура внутрішньої поверхні вимірювальної ділянки труби, К; T_{fl} – середня по довжині вимірювальної ділянки температура холодоносія, К.

Для визначення коефіцієнта опору тертя при течії холодоносія в трубах використовувалася залежність (4.9):

$$f_{exp} = \frac{4 \cdot \Delta P \cdot r_0}{\bar{v}^2 \cdot \rho \cdot l}, \quad (4.9)$$

де ΔP – експериментально визначене значення втрат тиску на вимірювальній ділянці труби, Па; ρ – густина рідини при середній температурі теплоносія, кг/м³; l – довжина вимірювальної ділянки труби, м.

Теоретичне значення коефіцієнта тертя у трубі оцінювалося за формулою:

$$f_{\text{теор}} = 64/\text{Re}. \quad (4.10)$$

Залежність (4.10) може бути застосована для ламінарного режиму течії рідин в трубах і каналах.

4.2 Результати тарувального експерименту

Достовірність експериментальних даних при дослідженні коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів у трубах зазвичай підтверджується проведенням тарувального експерименту. У цьому дослідженні в рамках тарувального експерименту визначався коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії дистильованої води в інтервалі чисел Рейнольдса, характерних для ламінарного режиму. Отримані в експерименті значення чисел Нуссельта (як середніх по довжині, так і локальних) порівнювалися з теоретичними. Для цього було проведено аналіз наявних в літературі емпіричних залежностей для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії рідин в трубах і каналах при граничних умовах першого роду (постійному значенні температури стінки) [10-12].

В роботі [10,11] для розрахунку середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі для початкової термічної ділянки (сформований гідродинамічний примежевий шар) при $T_{cm} = \text{const}$ рекомендується використовувати залежність:

$$\overline{\text{Nu}} = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot (d/l) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}}{1 + 0,04 \cdot [(d/l) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}]^{2/3}}. \quad (4.11)$$

При розрахунку значень чисел подібності в рівнянні (4.11) дані з теплофізичних властивостях рідини приймаються при середній по довжині температурі потоку.

У роботах [10, 11] для розрахунку середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі для початкової термічної ділянки при $T_{cm} = \text{const}$ (а так само при

температурі стінки, що слабо змінюється по довжині) рекомендується використовувати залежність:

$$\overline{Nu} = 1,55 \left(\frac{Re \cdot Pr}{1/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \quad (4.12)$$

У роботах [10,14] рекомендується використовувати рівняння (4.12) при $\frac{1}{Re \cdot Pr} \cdot \frac{X}{D} \leq 0,05$.

В роботі [10] для розрахунку локального по довжині коефіцієнта тепловіддачі для початкової термічної ділянки при $T_{cm} = \text{const}$ (а так само при температурі стінки, що слабо змінюється по довжині) рекомендується використовувати залежність:

$$\overline{Nu} = 1,03 \left(\frac{Re_d \cdot Pr}{X/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \quad (4.13)$$

В роботі [10] рекомендується застосовувати рівняння (4.13) при $\frac{1}{Re \cdot Pr} \cdot \frac{X}{D} \leq 0,01$.

Властивості рідини в рівняннях (4.12) і (4.13) необхідно приймати при температурі, середній між температурою потоку і стінки.

Визначальним розміром, що вводиться в числа Nu і Re у всіх розглянутих рівняннях (4.11) – (4.13), є внутрішній діаметр труби.

Первинні експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі і результати тарувального експерименту наведені в табличних додатках.

Результати порівняння експериментальних значень середнього числа Нуссельта для дистильованої води з теоретичними значеннями, оціненими за залежностями (4.11) і (4.13), наведено на рис. 4.1. Локальні значення коефіцієнта тепловіддачі (експериментальні та теоретичні значення) для двох різних чисел Рейнольдса наведені на рис. 4.1.

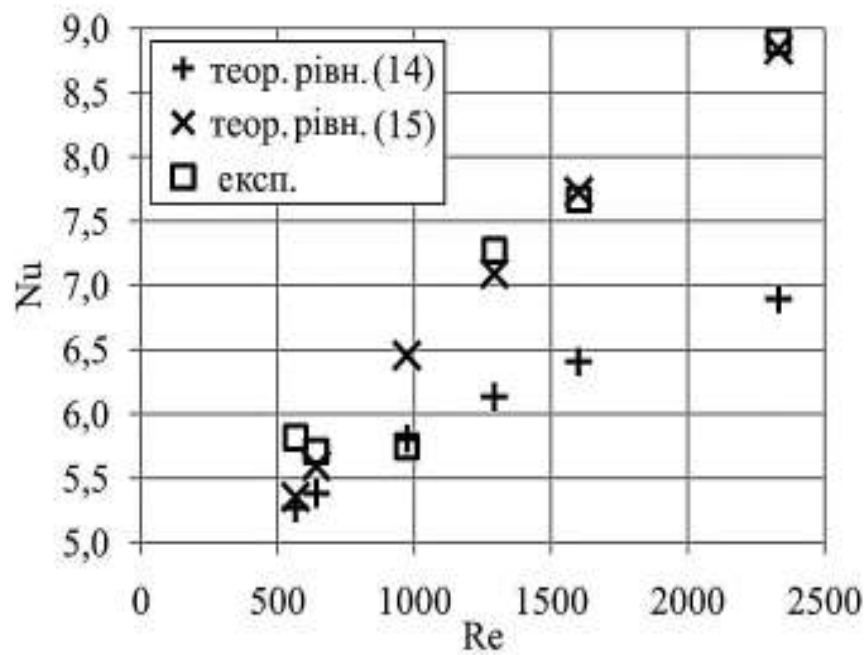
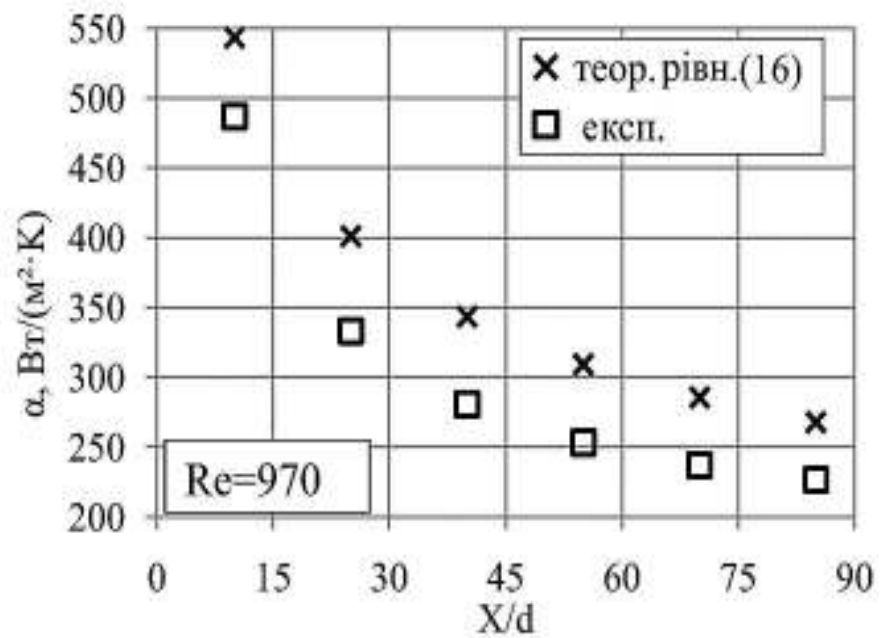
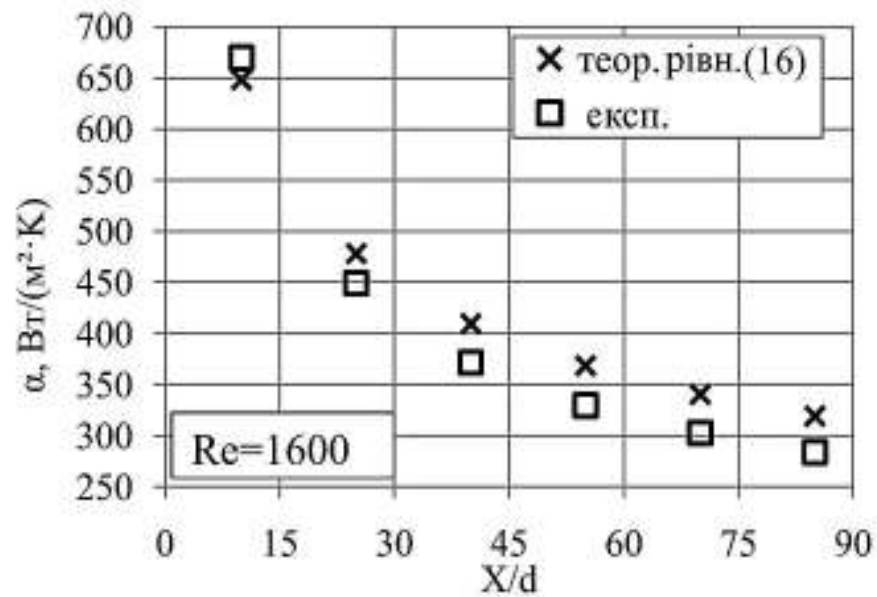


Рис.4.1 – Залежність середнього значення числа Нуссельта від числа Рейнольдса при вимушеній течії дистильованої води у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м (початкова термічна ділянка)



a



б

Рис.4.2 – Залежність локального коефіцієнта тепловіддачі по довжині початкової термічної ділянки при вимушеній течії дистильованої води у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м: а – $Re = 970$; б – $Re = 1600$

Як показує проведене дослідження (див. рис 4.1), є гарна відповідність отриманих експериментальних даних з результатами розрахунку за рівнянням (4.13) в інтервалі чисел $Re \leq 2300$. Цей висновок підтверджує коректність як одержуваних даних на експериментальній установці, так і методики обробки первинної вихідної інформації. Отримана в експерименті залежність локального коефіцієнта тепловіддачі по довжині початкової термічної ділянки (див. рис. 4.2) також задовільно узгоджується з розрахованими за рівнянням (4.13) значеннями коефіцієнта тепловіддачі.

4.3. Результати дослідження коефіцієнтів тепловіддачі і втрат тиску при ламінарній течії нанохолодоносіїв у трубі

Параметри, при яких проводився експеримент з визначення локальних і середніх коефіцієнтів тепловіддачі, а також втрат тиску при вимушеній течії холодоносіїв у трубі, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри теплоносіїв при проведенні експериментальних досліджень процесу конвективної тепловіддачі при вимушеній течії холодоносіїв у трубі

$T_{ХНex}$, К	\bar{v} , м/с	Re	$T_{ХНex}$, К	\bar{v} , м/с	Re
ХН (ПГ/В)			283,2	0,355	405
278,5	0,267	280	283,2	0,709	785
278,2	0,532	543	283,2	1,180	1372
273,4	0,267	192	наноХН 0,53%		
273,4	0,462	326	278,5	0,267	280
283,2	0,355	432	278,2	0,532	543
283,2	0,709	837	273,4	0,267	192
283,2	1,179	1294	273,4	0,462	326
ХН (ПГ/В/РРВ)			283,2	0,355	432
278,2	0,267	254	283,2	0,709	837
278,2	0,532	496	283,2	1,179	1294
273,4	0,267	182	наноХН 1,03%		
273,4	0,461	295	278,2	0,267	254
283,2	0,355	405	278,2	0,532	496
283,2	0,709	785	273,4	0,267	182
283,2	1,180	1372	273,4	0,461	295
278,2	0,532	496	283,2	0,355	405
273,4	0,267	182	283,2	0,709	785
273,4	0,461	295	283,2	1,180	1372

Первинні експериментальні дані отримані при дослідженні коефіцієнта тепловіддачі і втрат напору при вимушеній течії теплоносіїв наведені в додатку.

При розрахунку значень числа Нуссельта використовувалася наступна інформація: теплофізичні властивості холодоносія, експериментальні значення витрати холодоносія, температури теплообмінної поверхні, середньої у перерізі

температури холодоносія. Отримана в результаті проведених досліджень залежність середніх значень числа Нуссельта для різних холодоносіїв від числа Пекле для початкової термічної ділянки круглої труби представлена на рис. 4.3.

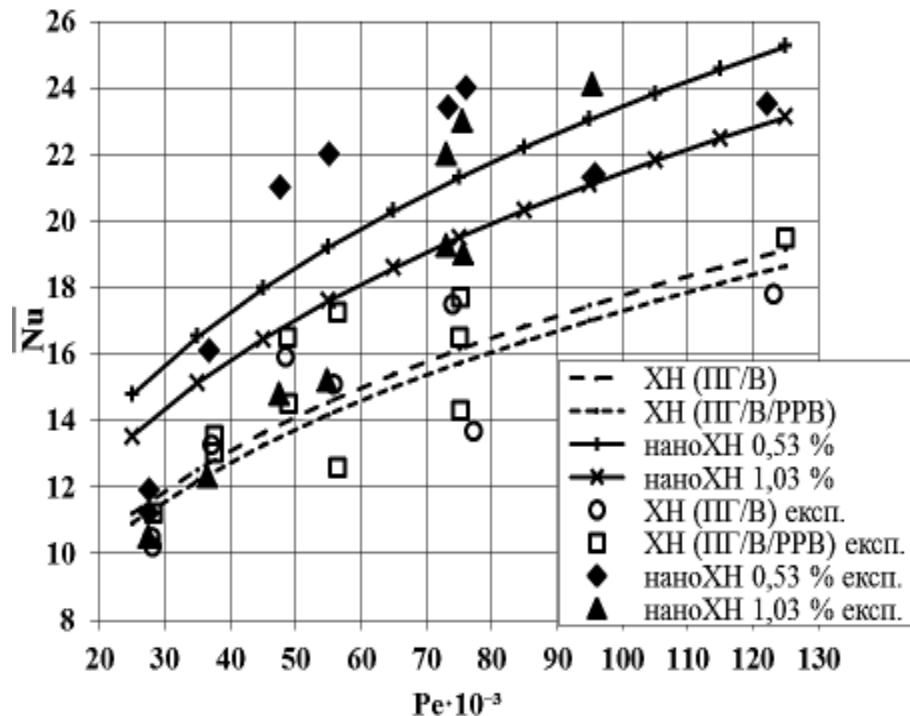


Рис.4.3 – Залежність середніх значень числа Нуссельта від числа Пекле при вимушеній течії холодоносіїв у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м (початкова термічна ділянка) для холодоносія ПГ/В, базового холодоносія ПГ/В/РРВ і нанохолодоносіїв нанохН 0,53% і нанохН 1,03%

Залежність локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі досліджуваних холодоносіїв у різних перерізах початкової термічної ділянки для числа $Re = 715 \pm 20$ наведено на рис.4.4. На цьому ж рисунку, крім експериментальних даних, також наведені розраховані за залежністю (4.13) значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі для базового холодоносія (ПГ/В/РРВ).

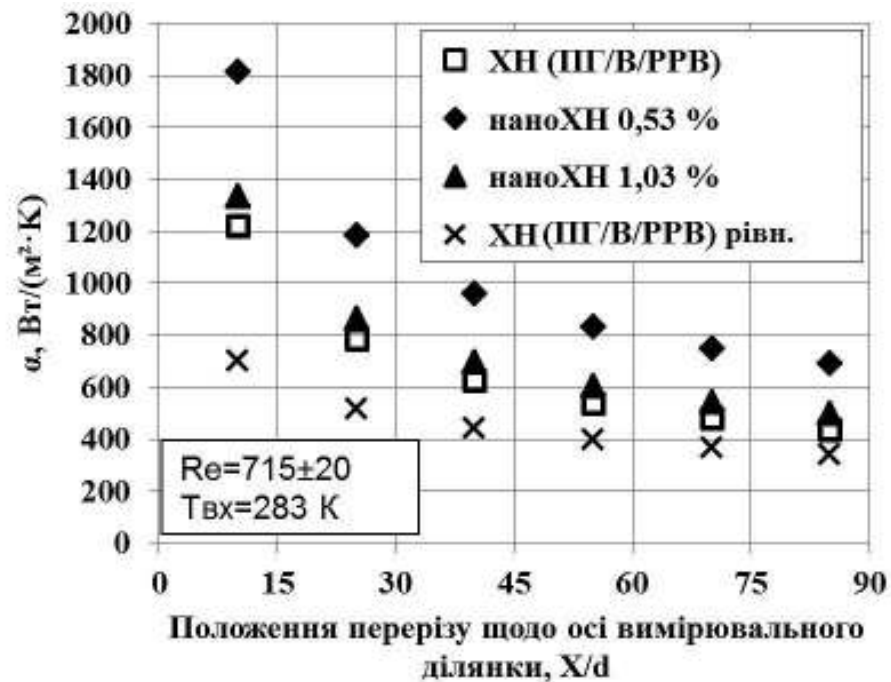


Рис.4.4 – Залежність локального коефіцієнта тепловіддачі по довжині початкової термічної ділянки при вимушеній течії холодоносіїв у трубі ($d = 0,01$ і $l = 0,85$ м)

Втрати тиску при ламінарній течії теплоносіїв у трубі були визначені для холодоносія ХН (ПГ/В/РРВ) і нанохолодоносія наноХН 1,03%. Вимірювання втрат тиску проводилися при режимах, наведених у таблиці 4.1. Відношення втрат тиску, визначених для наноХН 1,03% до втрат тиску для базового холодоносія ХН (ПГ/В/РРВ) в залежності від числа Рейнольдса, наведено на рис. 4.5.

З використанням експериментальних даних про втрати тиску за формулою (4.9) були розраховані значення коефіцієнту тертя – f . Залежності величини f від числа Рейнольдса для ХН (ПГ/В/РРВ) і наноХН 1,03% наведені на рис. 4.6.

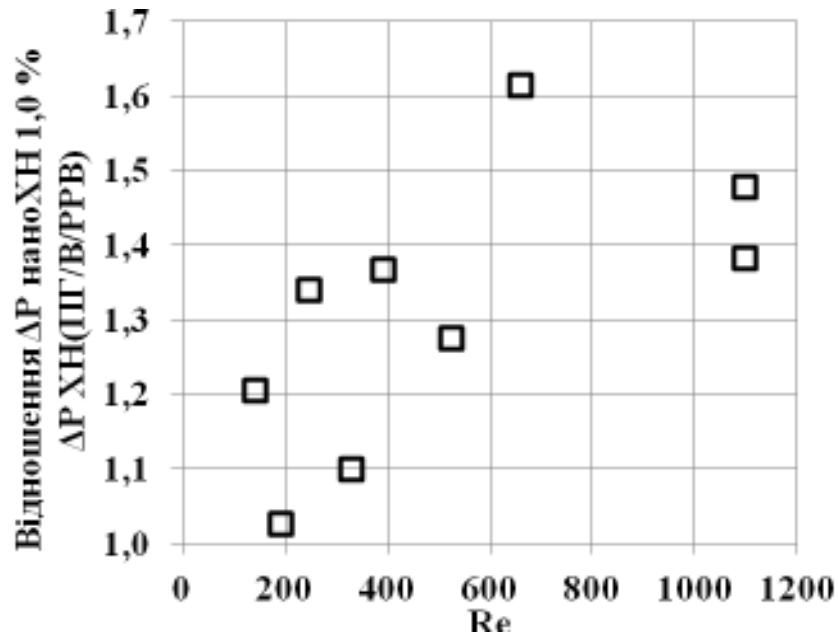


Рис.4.5 – Залежність відношення втрат тиску для nanoXH 1,0% до втрат тиску для базового холодоносія XH (ПГ/В/РРВ) від числа Рейнольдса

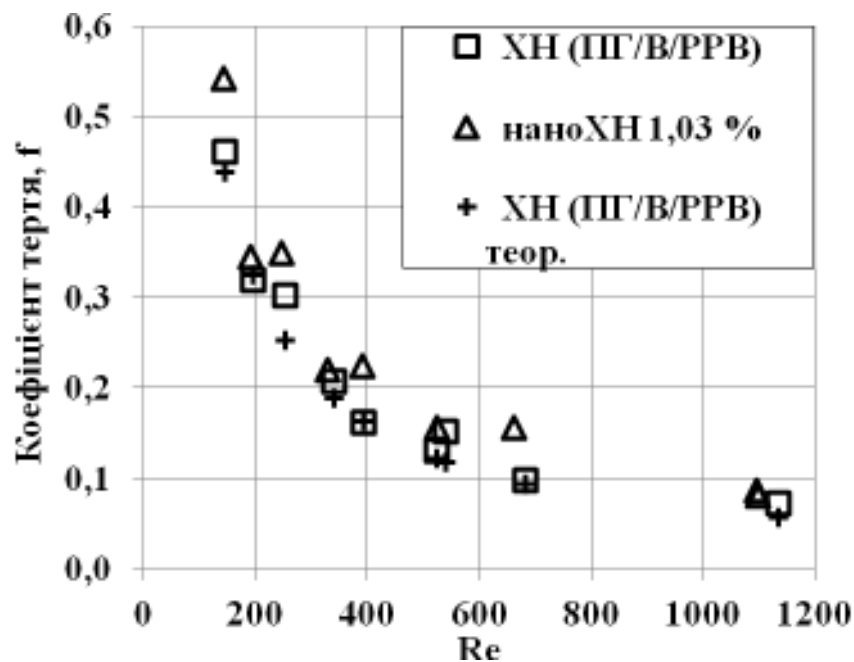


Рис.4.6 – Залежність коефіцієнта тертя по довжині від числа Рейнольдса для базового холодоносія ПГ/В/РРВ) і нанофлюїда nanoXH 1,03%

На рис. 4.6 додатково наведені теоретичні значення величини f для базового холодоносія XH (ПГ/В/РРВ), які розраховані за формулою (4.10). Дана інформація дозволить оцінити можливість використання традиційних залежностей для розрахунку f при оцінці втрат тиску при течії нанофлюїдів.

Результати експериментального дослідження, наведені на рис. 4.3, показують збільшення середнього по довжині числа Нуссельта для обох досліджених нанофлюїдів, у порівнянні з базовою рідиною. Разом з тим, вплив домішок наночастинок на інтенсивність теплообміну не пропорційний концентрації наночастинок. Інтенсивність тепловіддачі для нанохолодоносія із вмістом наночастинок 0,53 мас.% більше, ніж для нанохолодоносія з 1,03 мас.% наночастинок (див. рис. 4.3, 4.4). Слід зауважити, що аналогічні результати були отримані й іншими авторами. Так, в дослідженнях [7, 8] не з'являлися значні зміни коефіцієнта тепловіддачі в залежності від зміни концентрації наночастинок (максимальна концентрація становила 0,2 об.%). А в роботі [9] показано збільшення коефіцієнта тепловіддачі приблизно на 26% при концентрації 1,5 об.% наночастинок TiO_2 у воді і зменшення коефіцієнта тепловіддачі приблизно на 14% при концентрації наночастинок 2,0 об.%.

З урахуванням отриманих результатів експериментального дослідження коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів у трубі можна сформулювати висновок: збільшення теплопровідності не є єдиною причиною інтенсифікації процесу тепловіддачі.

Збільшення втрат тиску для нанофлюїда (див. рис.4.5) було очікуваним у зв'язку із зафіксованим в експериментальних дослідженнях збільшенням в'язкості холодоносіїв при додаванні в них наночастинок. З рис. 4.6 випливає, що для нанохолодоносія величина коефіцієнта тертя f дещо більше, ніж для базового холодоносія. Відповідно до отриманих результатів зроблено висновок про те, що збільшення в'язкості не є єдиним поясненням зростання втрат тиску при ламінарній течії нанохолодоносіїв у трубі.

Отримані результати вказують на досить складний характер впливу наночастинок на значення коефіцієнта тепловіддачі і збільшення втрат тиску при ламінарній течії нанохолодоносіїв у трубі. Більш детальне вивчення процесу тепловіддачі при ламінарній течії нанохолодоносіїв вимагає урахування не тільки інформації про їх теплофізичні властивості, але подальшого вивчення додаткових механізмів інтенсифікації теплообміну, пов'язаних з присутністю наночастинок.

Отримані в роботі дослідження необхідні для подальшого вдосконалення холодильної техніки з метою підвищення її енергоефективності. Дослідження можуть бути корисними також при розробці нових тепло- і холодоносіїв в інших галузях, таких як теплоенергетика, електроніка і т. д.

З урахуванням актуальності проблеми впровадження нанотехнологій в холодильну і енергетичну промисловість, автори вважають за доцільне проведення подальших досліджень впливу домішок наночастинок в тепло- і холодоносії на інтенсивність процесів тепловіддачі в теплообмінних апаратах.

4.4 Моделювання коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів в трубках

На підставі наведених у [14] експериментальних даних була виконана оцінка можливості використання різних кореляцій, запропонованих в роботах [15], для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній ламінарній течії нанофлюїдів.

Об'єктами дослідження, розглянутими в роботі [14], були:

- холодоносій складу пропіленгліколь/вода (54,00/46,00 мас.%) – ХН (ПГ/В);
- холодоносій складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість (РРВ) (48,60/46,52/4,88 мас.%) – ХН (ПГ/В/РРВ);
- нано холодоносій складу пропіленгліколь/вода/РРВ/наночастинки Al_2O_3 (48,24/46,38/4,85/0,53 мас.%) – наноХН 0,53%;
- нанохолодоносій складу пропіленгліколь/вода/РРВ/наночастинки Al_2O_3 (48,00/46,15/4,82/1,03 мас.%) – наноХН 1,03%.

При приготуванні нанофлюїда використовувалися наночастинки $\alpha-Al_2O_3$ (Wenzhou Jingcheng Chemical Co) з розміром в порошок 10 ± 5 нм (за даними виробника).

На першому етапі дослідження була виконана перевірка можливості використання для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів емпіричних залежностей, які були отримані для чистих рідин, але з використанням властивостей нанофлюїдів. При реалізації цього етапу дослідження,

розраховані за залежностями коефіцієнти тепловіддачі порівнювалися з отриманими в роботі експериментальними даними.

Розглянемо наявні в літературі емпіричні залежності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії рідин в трубах і каналах при граничних умовах першого роду (сталому значенні температури стінки) [14-19].

В роботі [15, 16] для розрахунку середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі для початкової термічної ділянки (сформований гідродинамічний примежевий шар) при $T_{cm} = \text{const}$, автори рекомендують використовувати залежність:

$$\overline{\text{Nu}} = 3,66 + \frac{0,0668 \cdot (d/l) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}}{1 + 0,04 \cdot [(d/l) \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}]^{2/3}}, \quad (4.14)$$

де d гідравлічний діаметр труби, l довжина вимірювальної ділянки.

При розрахунку значень чисел подібності в рівнянні (4.14) дані про теплофізичні властивості рідини приймаються при середній по довжині температурі потоку.

В роботі [15] автори для розрахунку середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі для початкової термічної ділянки при $T_{cm} = \text{const}$ рекомендують використовувати залежність:

$$\overline{\text{Nu}} = 1,86 \left(\frac{\text{Re} \cdot \text{Pr}}{l/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_{cm}} \right)^{0,14}. \quad (4.15)$$

На думку авторів, цю кореляцію рекомендується використовувати при $T_c = \text{const}$, $(0,60 \leq \text{Pr} \leq 5$ і $0,004 \leq (\mu_{жс}/\mu_{cm}) \leq 9,75)$ [15].

У роботах [16, 17] для розрахунку середнього по довжині коефіцієнту тепловіддачі для початкової термічної ділянки при $T_{cm} = \text{const}$ (а так само при слабо змінювальної температурі по довжині стінки) автори рекомендують при

$\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{X}{D} \leq 0,05$ використовувати залежність:

$$\overline{Nu} = 1,55 \left(\frac{Re \cdot Pr}{1/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_{см}} \right)^{0,14}. \quad (4.16)$$

Фізичні властивості рідини при розрахунку значень чисел подібності в рівнянні (4.15) вибираються для температури $t = t_c - Dt_n / 2$ (значення $\mu_{см}$ береться за середньою температурою стінки)

$$Dt_n = \frac{Dt_1 - Dt_2}{\ln \frac{Dt_1}{Dt_2}}, \quad (4.17)$$

де Dt_1, Dt_2 – місцеві температурні напори на початку і в кінці ділянки осереднення.

Визначальним розміром, що вводиться в числа Nu і Re , у всіх розглянутих кореляціях (4.14) – (4.16), є внутрішній діаметр труби.

Результати порівняння експериментальних значень середнього числа Нуссельта для об'єктів дослідження з теоретичними значеннями, розрахованими за залежностями (4.14), (4.15) і (4.16), наведені на рисунках 4.7–4.10.

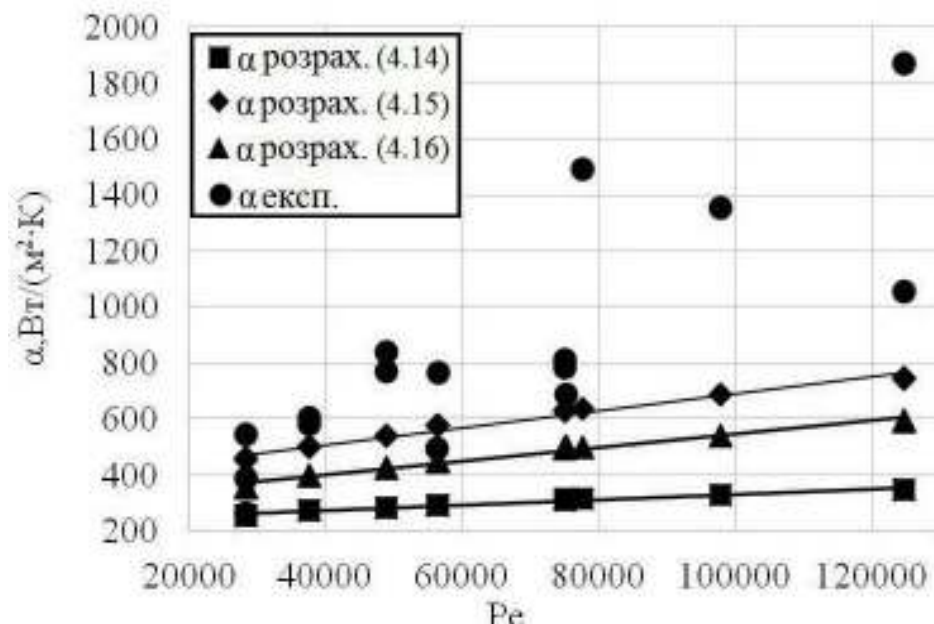


Рис.4.7 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії холодоносія (пропіленгліколь/вода/(PPВ) у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

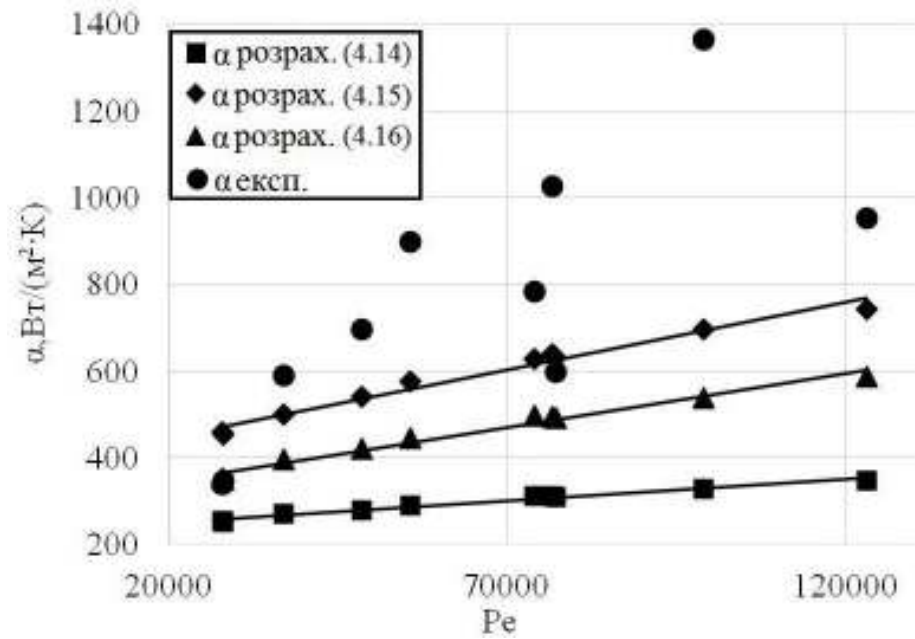


Рис.4.8 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії холодоносія складу пропіленгліколь/вода у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

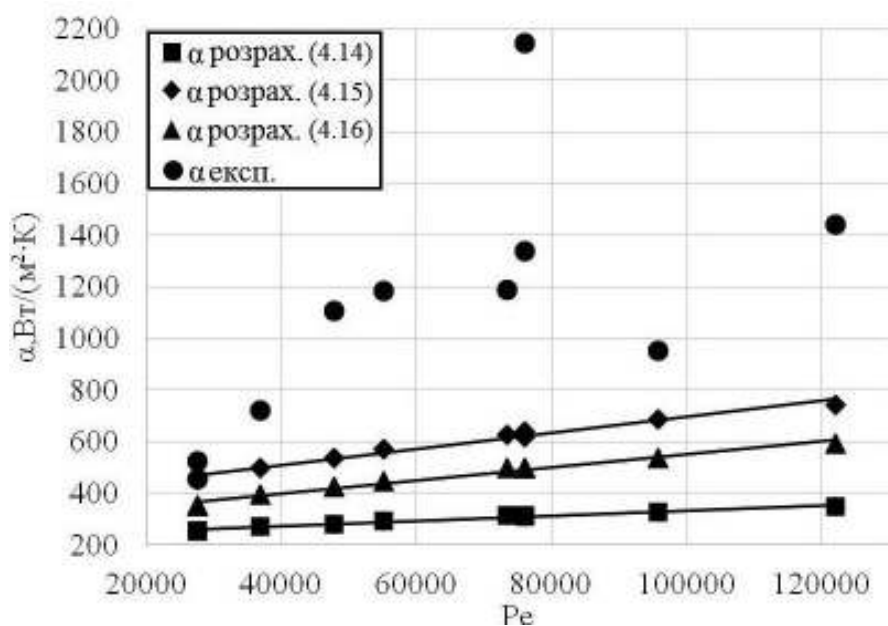


Рис.4.9 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній

течії нанохолодоносія складу пропіленгліколь/вода/PPB/наночастинки Al_2O_3 0,53% у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

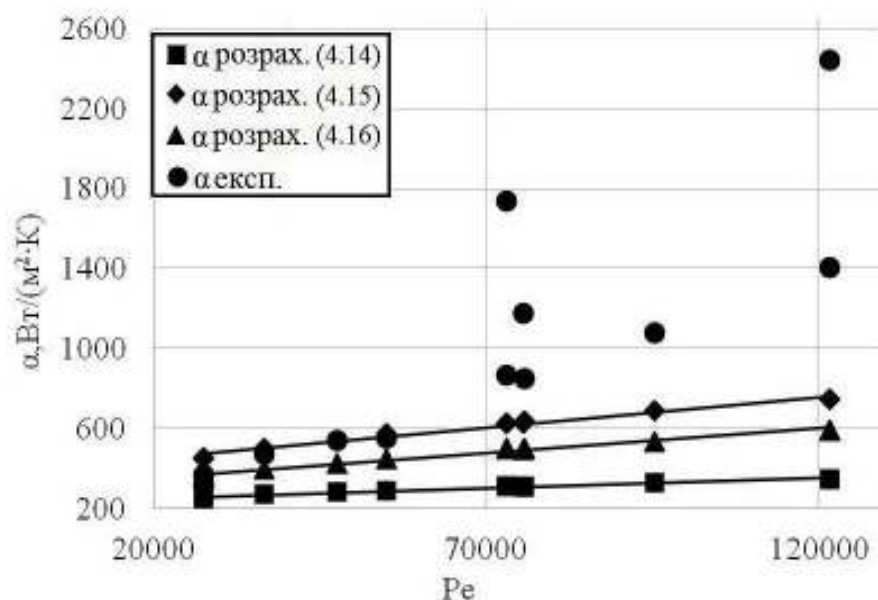


Рис.4.10 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанохолодоносія складу пропіленгліколь/вода/наночастинки Al_2O_3 1,03% у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

Як показує проведені дослідження (рис.4.7–4.10), коефіцієнт тепловіддачі, оцінений за залежностями ($\alpha_{\text{розрах.}} (4.14)$ і $\alpha_{\text{розрах.}} (4.17)$) суттєво відрізняються від експериментальних для всіх об'єктів дослідження. Найбільш прийнятний збіг теоретичного розрахунку і експерименту спостерігається для рівняння ($\alpha_{\text{розрах.}} (4.16)$) для базових рідин і то тільки при невеликих числах Рейнольдса. Для нанофлюїдів відхилення від прийнятих рівнянь істотні. Тому можна сформулювати наступний висновок:

- наявні емпіричні кореляції, запропоновані для чистих рідин, не підходять для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі для нанофлюїдів.

Тому на другому етапі дослідження були розглянуті кореляції для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів.

Так, в роботі [17], авторами була запропонована залежність для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів на основі води і наночастинок Si з об'ємною концентрацією наночастинок до $\varphi = 2,0\%$ в інтервалі чисел Re від 800 до 4000:

$$\text{Nu}_{\text{nf}} = 0.4328(1 + 11.258 \cdot \phi^{0.754} \text{Pe}_d^{0.218}) \text{Re}^{0.333} \text{Pr}^{0.4}. \quad (4.18)$$

Результати розрахунку коефіцієнта тепловіддачі з використанням Nu (4.18) представлені на рис.4.11 і 4.12.

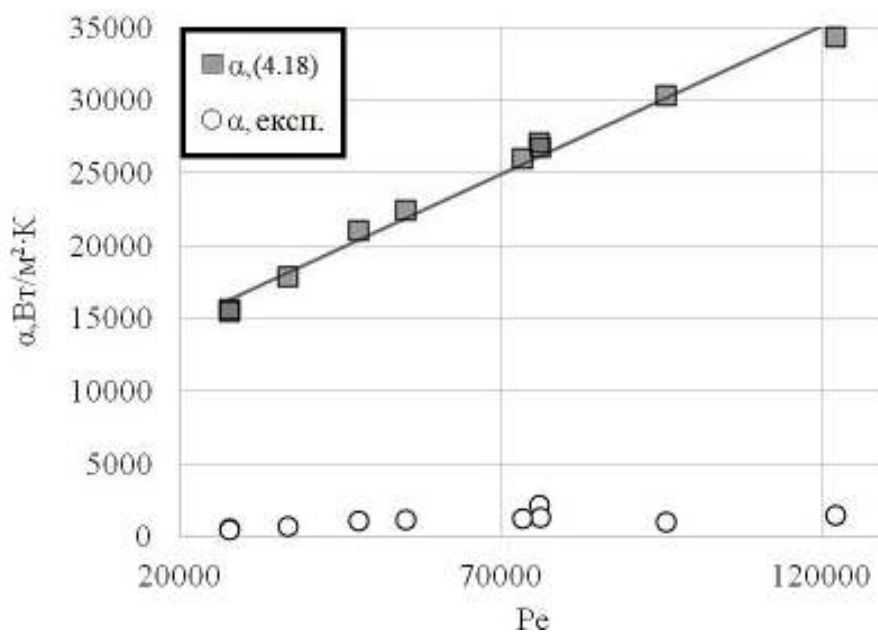


Рис. 4.11 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанохолодоносія складу пропіленгліколь/вода/PPB/наночастинки Al_2O_3 0,53% у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

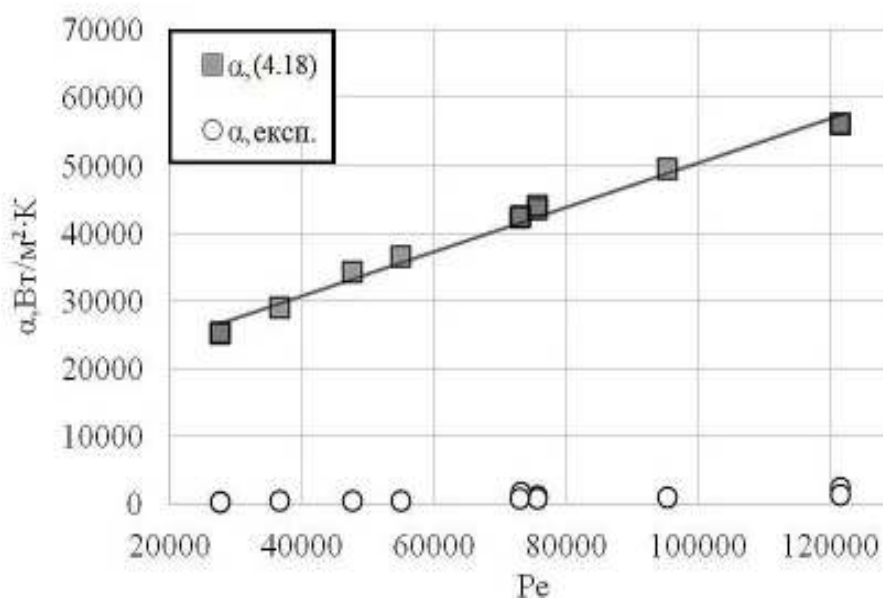


Рис. 4.12 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній

течії нанохолодоносія складу пропіленгліколь/вода/PPV/наночастинки Al_2O_3 1,03% у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

Як показує проведене дослідження (рис.4.11 і 4.12), коефіцієнт тепловіддачі, розрахований за залежністю (α [18]), суттєво відрізняється від експериментальних для всіх об'єктів дослідження.

Ануп (Аноор) зі співавторами в роботі [19] досліджували вплив розміру наночастинок на конвективний теплообмін нанофлюїдів вода/наночастинки Al_2O_3 при розвиненому ламінарному режимі течії. При обробці експериментальних даних авторами [19] була отримана залежність (4.19), яка може бути застосована при $500 < Re < 2000$, для об'ємної концентрації наночастинок $0 < \phi \leq 4,0\%$:

$$Nu_{nf} = 4.36 + \left[ax_+^{-b} (1 + \phi^c) \exp(-dx_+) \right] \left[1 + e \left(\frac{d_p}{d_{ref}} \right)^{-f} \right], \quad (4.19)$$

де $x_+ = \frac{x}{Re \cdot Pr \cdot d}$; $a = 6.219 \cdot 10^{-3}$, $b = 1.1522$, $c = 0.1533$, $d = 2.5228$, $e = 0.57825$, $f = 0.2183$; $d_{ref} = 100$ нм; d_p – діаметр наночастинок.

Дане рівняння було отримано за результатами експериментального дослідження нанофлюїда з діаметром наночастинок 45 та 150 нм.

Результати розрахунку коефіцієнта тепловіддачі з використанням кореляції (4.19) представлені на рис.4.13 і 4.14.

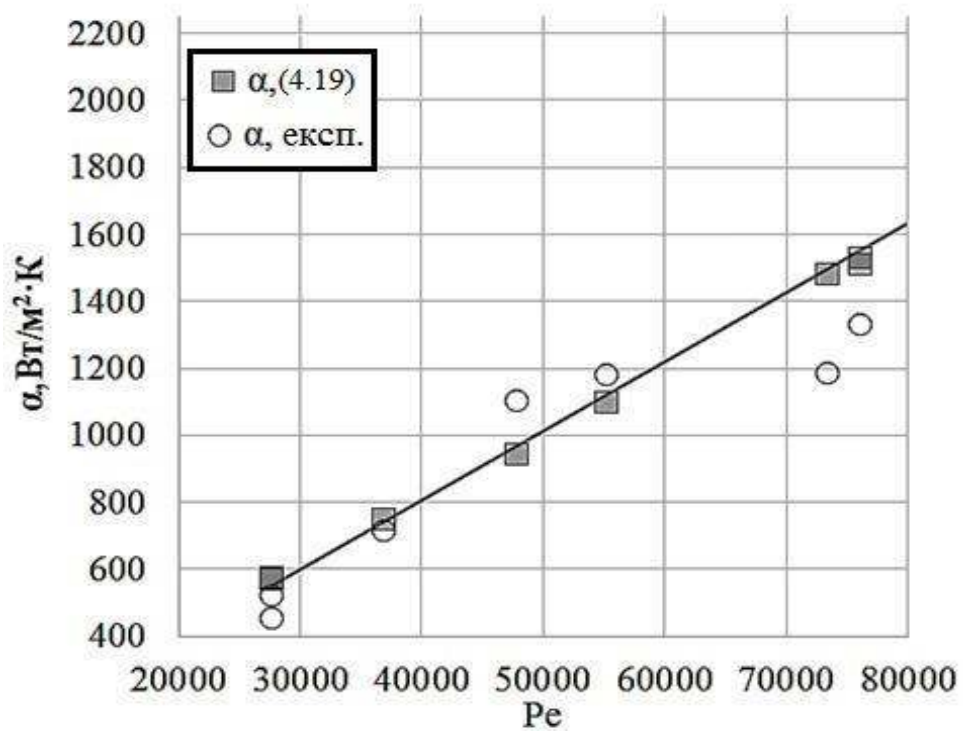


Рис. 4.13 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанохолодоносія складу пропіленгліколь/вода/PPВ/наночастинки Al_2O_3 0,53% у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

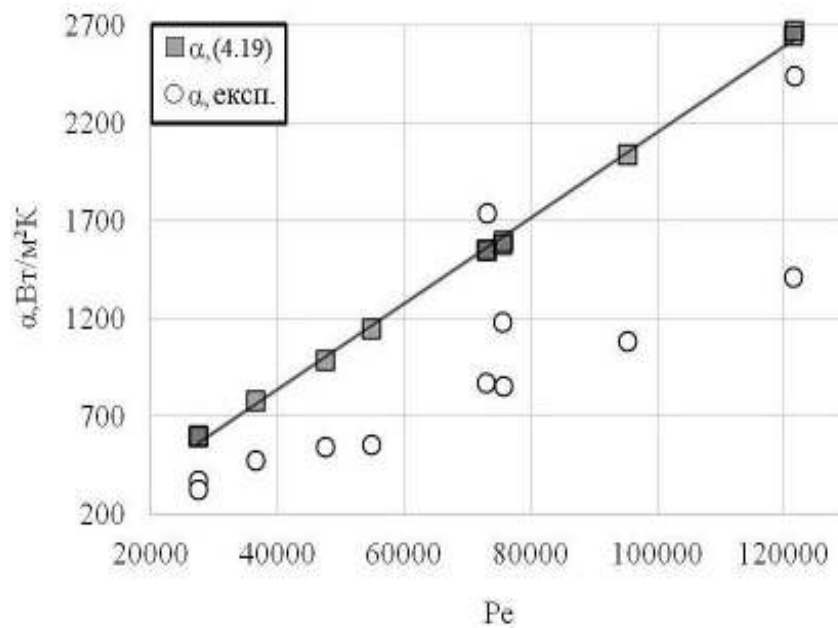


Рис.4.14 – Залежність середнього значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанохолодоносія складу пропіленгліколь/вода/PPV/наночастинки Al_2O_3 1,03% у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м

Як показує проведене дослідження (рис.4.13, 4.14), є задовільна відповідність отриманих експериментальних даних з результатами розрахунку по кореляції (4.19) в інтервалі чисел $Re \leq 2300$. Автори досліджували: холодоносій складу вода/наночастинки Al_2O_3 . Як видно з графіка, зліва розрахункова залежність має менше розкид ніж з розрахунковою залежністю на графіку зліва, тоді як у першому випадку концентрація наночастинок становить 0,53%, а у другому концентрація становить 1,03%.

Дослідження кореляцій показує, що не можна орієнтуватися на теплофізичні властивості досліджуваної речовини, тому що в кореляції (4.19) при концентрації наночастинок 0,53% впливають не тільки властивості, а й самі наночастинки, які можуть турболізувати потік, і вимагає більш докладного вивчення, як наночастинки турболізують потік.

Тому що за профілем він ламінарний, а всередині між шарами виникає додаткова турбулізація потоку, що не дозволяє використовувати ті рівняння, в яких основний акцент йде на властивості холодоносія.

Таким чином, потрібно знаходити додаткові коефіцієнти для даних рівнянь

стосовно тільки для експериментально вивченої суміші (холодоносія або нанохолодоносія)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1]. Heyhat M., Kowsary F., Rashidi A., Momenpour H., Amrollahi A. Experimental investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al_2O_3 nanofluids in fully developed flow regime. *Experimental thermal and fluid science*. 2013. Vol. 44. P. 483-489.
- [2]. Heris S.Z., Etemad S.G., Esfahany M.N. Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer. *International communications in heat and mass transfer*. 2006. Vol. 33. № 4. P. 529-535.
- [3]. Kim D., Kwon Y., Cho Y., Li C., Cheong S., Hwang Y., Lee J., Hong D., Moon S. Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions. *Current Applied Physics*. 2009. Vol. 9. № 2. P.119-123.
- [4]. Wen D., Ding Y. Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International journal of heat and mass transfer*. 2004. Vol. 47. № 24. P. 5181-5188.
- [5]. Naik M.T., Janardana G.R., Sundar L.S., Experimental investigation of heat transfer and friction factor with water-propylene glycol based CuO nanofluid in a tube with twisted tape inserts. *International communications in heat and mass transfer*. 2013. Vol. 46. P. 13-21.
- [6]. Yang Y., Zhang Z.G., Grulke E.A., Anderson W.B., Wu G. Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow. *International journal of heat and mass transfer*. 2005. Vol. 48. № 6. P. 1107-1116.
- [7]. Fotukian S.M., Esfahany M.N. Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube. *International communications in heat and mass transfer*. 2010. Vol. 37. № 2. P. 214-219.
- [8]. Fotukian. S.M., Esfahany M.N. Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ /water nanofluid inside a circular tube. *International journal of heat and fluid flow*. 2010. Vol. 31. № 4. P. 606-612.

[9]. Duangthongsuk W., Wongwises S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO_2 -water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. *International journal of heat and mass transfer*. 2010. Vol. 53. № 1. P. 334-344.

[10]. Ісаченко В. П., Сукомел А.С., Осипова В.А. Теплопередача. Энергоіздат, Москва. 1981. 416 с.

[11]. Рід Р., Праусніц Дж., Шервуд Т. Властивості газів і рідин. Хімія, Ленінград. 1982. 592 с.

[12]. Lemmon Eric W., Marcia L. Huber and Mark O. McLinden. NIST reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP. NIST standard reference database 23. 2002. Vol. 7.

[13]. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, sixth ed. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey. 2007. P. 589.

14. Хлієва О. Я., Рябикин С. С., Лук'янов Н. Н., Желєзний В. П. Експериментальне дослідження теплообміну і гідродинаміки при ламінарній течії нанохолодоносіїв на основі пропіленгліколю і наночастинок Al_2O_3 Молдова. 2016. С. 391-399

[15]. Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman. T.L., Lavine A.S., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, sixth ed. New Jersey. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. 2007. 589 p.

[16]. Петухов Б. С. Теплообмін і опір при ламінарній течії рідини в трубах. Енергія, Москва. 1967. Т. 3. 409 с.

[17]. Ісаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Тепловіддача. Енергія, Москва. 1981. 416 с.

[18]. Kakaç S., Pramuanjaroenkij A. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids –A state of the art review. *International journal of thermal sciences*. 2016. Vol. 100. P. 75-97.

[19]. Anoop K. B, Sundararajan T., Das S. K. Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing regio. *International journal of heat and mass transfer*. 2009. Vol. 52. № 9. P. 2189-2195.

ВИСНОВКИ

Проблема впровадження нанотехнологій в холодильному обладнанні аж до теперішнього часу залишається недостатньо вивченою. Основна причина ситуації, що склалася, полягає в складності урахування позитивних і негативних факторів впливу наночастинок на теплофізичні властивості холодоносіїв і коефіцієнти тепловіддачі при ламінарній течії холодоносіїв у трубі.

В дисертації отримані експериментальні дані про теплофізичні властивості (густини, в'язкості) трикомпонентних водних розчинів одно- і багатоатомних спиртів. Вперше вивчено вплив наночастинок Al_2O_3 на теплофізичні (густини, в'язкості і теплоємності) властивості системи вода/пропіленгліколь/PPB. Отримано експериментальні дані про значення локального і середнього коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів на основі водних розчинів пропіленгліколю, речовини, що регулює в'язкість і наночастинок Al_2O_3 в трубі в інтервалі чисел Рейнольдса, що відповідає ламінарному режиму течії.

1. Запропонована в дисертації методика приготування агрегативно стійкого нанофлюїда на основі водного розчину пропіленгліколя, речовини, що регулює в'язкість і наночастинок Al_2O_3 (0,53 мас.% і 1,03 мас.%) дозволила розробити нанохолодоносії без домішок поверхнево-активних речовин.

2. Нові моделі прогнозування густини і в'язкості на лінії насичення розчинів води, пропіленгліколя і PPB на відміну від існуючих моделей розрахунку не вимагає для свого використання значного обсягу експериментальної інформації, що забезпечує можливість розробки холодоносіїв оптимального складу.

3. Показано, що добавки наночастинок Al_2O_3 в багатокомпонентних холодоносіях сприяють незначному збільшенню в'язкості і зменшенню теплоємності. Однак негативний ефект збільшення в'язкості може бути успішно усунутий спеціальними речовинами, які знижують в'язкість, що визначає перспективу використання багатокомпонентних нанохолодоносіїв на практиці.

4. Створено оригінальну експериментальну установку для дослідження локальних та середніх коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії теплоносіїв і

холодоносіїв в трубі. Установка відрізняється від аналогічних можливістю дослідження локальних по довжині початкової термічної ділянки коефіцієнтів тепловіддачі при сталому гідродинамічному режимі течії теплоносіїв. Відмінною особливістю установки є можливість дослідження профілю температур на різних відстанях від входу в початкову термічну ділянку труби. Дана інформація є необхідною для виявлення і уточнення механізмів впливу добавок наночастинок на інтенсифікацію тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїда.

5. Вперше отримані експериментальні дані про коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів вода/пропіленгліколь/PPV з добавками 0,53 мас.% і 1,03 мас. % наночастинок Al_2O_3 в інтервалі чисел Рейнольдса 280-1372. Показано збільшення як локального, так і середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі в розглянутому інтервалі чисел Рейнольдса. Показано, що найбільший вплив наночастинок на інтенсивність тепловіддачі спостерігається при концентрації наночастинок в нанофлюїді 0,53 мас.%.

7. Виконаний аналіз основних механізмів збільшення тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів показує, що сучасні моделі розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів не є універсальними і адаптовані тільки до конкретних об'єктів дослідження. На підставі отриманих експериментальних даних запропоновано полуміричні рівняння для оцінки середнього коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїду вода/пропіленгліколь/PPV/наночастинок Al_2O_3 .

8. Результати, наведені в дисертації показують, що інтенсифікація теплообміну при ламінарній течії холодоносія в трубі не може бути пояснена тільки впливом наночастинок на теплофізичні властивості багатоконпонентного теплоносія. Необхідно також враховувати локальну турбулізацію при ламінарній течії теплоносія, в якому присутні наночастинок.

9. Результати наведені в дисертації, які відмічаються науковою новизною, передані для практичного застосування в ПрАТ «УКпостач».

Додаток

Додаток А

Первинні експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії: води, ПГ/РРВ/ Al_2O_3 , ПГ/В/РРВ, ПГ/В, в трубі.

Відсутність деяких значень обумовлена тим, що отримана кількість даних достатня для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в трубі.

Таблиця А.1 Первинні експериментальні дані (тарувальний експеримент) по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії води в трубі

Експеримент № 1						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	29,8	-	-	-	-	29,1
Температура стінки, °С	22,9	-	-	-	-	22,6
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	20,6	-	-	-	-	20,9
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	12,2	-	-	-	-	14,0
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	12,05	-	-	-	-	14,44
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	14,51	-	-	-	-	15,93
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{К}$	10,56					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{кг/с}$	0,0210					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{кг/с}$	0,2677					
Число Рейнольдса	2332					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05070					
Експеримент № 2						
Температура води в міжтрубному просторі, °С	29,8	-	-	-	-	29,3
Температура стінки, °С	23,9	-	-	-	-	23,8
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	21,6	-	-	-	-	21,8
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	13,0	-	-	-	-	14,2
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	12,33	-	-	-	-	15,44
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	15,13	-	-	-	-	16,79
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{К}$	10,56					

продовження таблиці А.1

Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0142					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,18057					
Число Рейнольдса	1601					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05703					
Експеримент № 3						
Температура води в міжтрубному просторі, °С	29,7	29,6	29,6	29,6	29,5	29,4
Температура стінки, °С	25,1	25,1	25	24,9	24,9	25,1
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6	22,6
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	13,6	13,6	13,7	13,5	13,6	13,6
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	13,09	14,18	15,44	16,21	17,93	18,57
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	15,93	16,36	16,85	17,08	17,78	18,07
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,55					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0112					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,14282					
Число Рейнольдса	1293					
Витрата гріючої води, кг/с	0,11204					
Експеримент № 4						
Температура води в міжтрубному просторі, °С	29,7	-	29,5	-	29,5	29,5
Температура стінки, °С	25,7	-	25,2	-	25,2	25,3
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	23,1	-	22,9	-	22,9	23,0
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	13,7	-	18,1	-	18,9	19,4
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	13,88	-	13,89	-	13,93	14,11
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	16,41	-	17,90	-	18,18	18,46

продовження таблиці А.1

Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	10,56					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0083					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,10548					
Число Рейнольдса	973					
Витрата гріючої води, кг/с	0,112045					
Експеримент № 5						
Температура води в міжтрубному просторі, $^{\circ}\text{C}$	29,8	-	29,6	-	29,5	29,5
Температура стінки, $^{\circ}\text{C}$	26,3	-	25,4	-	25,7	25,8
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	23,3	-	23,1	-	23,3	23,5
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	14,3	-	14,1	-	15,1	15,6
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	14,51	-	18,87	-	20,33	20,90
Средньоінтегральна температура холодоносія, $^{\circ}\text{C}$	16,95	-	18,47	-	19,43	19,88
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	10,55					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0054					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,06847					
Число Рейнольдса	642					
Витрата гріючої води, кг/с	0,112045					
Експеримент № 6						
Температура води в міжтрубному просторі, $^{\circ}\text{C}$	29,9	-	29,7	-	-	29,6
Температура стінки, $^{\circ}\text{C}$	26,2	-	26,4	-	-	26,1
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	22,9	-	23,0	-	-	23,7
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	14,1	-	14,2	-	-	16,1
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	14,11	-	18,62	-	-	21,10

продовження таблиці А.1

Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	16,64	-	18,46	-	-	20,20
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	10,53					
Витрати холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0048					
Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0606					
Число Рейнольдса	566					
Витрата гріючої води, кг/с	0,1120					

Таблиця А.2 Первинні експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанохолодоносія (ПГ/В/РРВ/Al₂O₃ 0,53 мас.%), в трубі

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,74	9,55	9,54	9,54	9,50	9,52
Температура стінки, °С	6,70	6,62	6,73	6,78	6,56	6,55
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,6	5,7	5,8	5,9	5,9	5,8
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,1	1,1	1,3	1,3	1,5	1,6
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	0,25	0,29	0,41	0,69	0,80	0,83
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	1,91	2,11	2,25	2,37	2,47	2,57
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	0,26					
Витрати холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0221					
Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,2669					
Число Рейнольдса	192					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0561					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,2089					

продовження таблиці А.2

Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,2116					
Експеримент № 2						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,60	9,37	9,39	9,39	9,34	-
Температура стінки, °С	6,26	6,09	6,00	5,89	5,87	-
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	4,9	5,1	5,1	5,3	5,4	-
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	0,9	1,4	1,5	1,7	1,6	-
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	1,78	2,12	2,15	2,32	2,35	-
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	1,83	2,03	2,17	2,29	2,39	-
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	0,24					
Витрати холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0382					
Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,4614					
Число Рейнольдса	259					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0561					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,2815					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,2895					
Експеримент № 3						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	6,78	6,71	6,72	6,74	6,76	-
Температура стінки, °С	4,50	4,35	4,26	4,38	4,25	-
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	3,5	3,6	3,6	3,8	3,8	-

продовження таблиці А.2

Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,2	1,3	1,5	1,5	1,7	-
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	0,78	0,79	1,25	1,25	1,26	-
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	1,72	1,76	1,98	2,03	2,12	-
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	0,63					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0608					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,7341					
Число Рейнольдса	408					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0556					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,4457					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,4475					
Експеримент № 4						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,1	18,0	17,8	17,8	17,8	17,8
Температура стінки, °С	14,2	14,2	14,1	14,3	14,4	14,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	12,4	12,7	12,7	12,8	13,0	13,1
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	7,0	7,0	7,2	7,3	7,5	7,4
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	5,93	6,21	6,23	6,46	6,66	6,85
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,11	8,28	8,34	8,53	8,72	8,78
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,34					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0266					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0220					
Число Рейнольдса	214					

продовження таблиці А.2

Витрата гріючої води, кг/с	0,0567					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,1878					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,1880					
Експеримент № 5						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,1	17,8	17,7	17,6	17,6	17,6
Температура стінки, °С	13,3	13,30	13,23	13,61	13,54	13,67
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,6	11,7	11,8	12,1	12,3	12,2
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,9	6,9	7,1	7,6	7,6	7,6
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,51	6,53	6,56	6,96	6,98	7,29
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,10	8,11	8,23	8,65	8,68	8,79
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	5,34					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0439					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,5322					
Число Рейнольдса	425					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0567					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,28529					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,28973					
Експеримент № 6						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	17,8	17,8	17,7	17,6	17,7	17,6
Температура стінки, °С	13,3	13,20	13,21	13,2	13,29	13,24

продовження таблиці А.2

Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,2	11,5	11,6	11,6	11,8	11,9
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,8	7,1	7,2	7,1	7,2	7,3
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,04	6,95	7,11	7,07	7,11	7,22
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	7,81	8,34	8,43	8,39	8,47	8,55
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,36					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0606					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,73485					
Число Рейнольдса	585					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,35073					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,36101					
Експеримент № 7						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,1	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5
Температура стінки, °С	13,17	12,9	12,9	12,95	12,94	12,94
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,1	11,1	11,2	11,4	11,6	11,7
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,90	6,90	7,10	7,0	7,10	7,0
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,42	6,64	6,78	6,76	6,85	6,92
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	7,97	8,02	8,18	8,18	8,29	8,28
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,35					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0764					

продовження таблиці А.2

Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,9254					
Число Рейнольдса	733					
Витрата гріючої води, кг/с	0,56729					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,44934					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,46220					
Експеримент № 8						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,6	19,6	19,6	19,5	19,5	19,4
Температура стінки, °С	17,0	16,8	16,8	16,9	17,1	17,0
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	15,5	15,7	15,7	15,9	16,1	16,1
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,9	12,1	12,1	12,3	12,4	12,3
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,32	11,63	11,66	11,85	11,92	11,98
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,72	12,92	12,96	13,15	13,24	13,24
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,35					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0292					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,3553					
Число Рейнольдса	362					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05678					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,5335					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	15628					
Експеримент № 9						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8	19,8	19,7	19,5	19,6	19,6

продовження таблиці А.2

Температура стінки, °С	16,5	16,3	16,3	16,4	16,4	16,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,7	14,9	15,0	15,2	15,2	15,2
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,3	11,34	11,39	11,59	11,64	11,61
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,13	11,34	11,39	11,59	11,64	11,61
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,25	12,38	12,47	12,63	12,66	12,66
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,35					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0583					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,7087					
Число Рейнольдса	704					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05678					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,31244					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,32302					
Експеримент № 10						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8	19,7	19,6	19,5	19,4	19,4
Температура стінки, °С	16,2	15,9	15,9	16,0	16,0	16,2
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,5	14,6	14,5	14,8	14,8	15,1
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,4	11,4	11,5	11,6	11,6	11,6
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	10,83	11,01	10,97	11,14	11,12	11,25
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,09	12,18	12,25	12,31	12,36	12,40
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,58					

Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0971
продовження таблиці А.2	
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	1,1796
Число Рейнольдса	1160
Витрата гріючої води, кг/с	0,0567
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	1,4967
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	1,5114

Таблиця А.3 Первинні експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанохолодоносія (**ПГ/РРВ/Al₂O₃ 1,03 мас.%**) в трубі

Експеримент № 1						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8	9,8	9,8	9,7	9,6	9,7
Температура стінки, °С	7,2	6,9	6,9	6,9	7,0	7,0
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,9	5,9	6,0	6,0	6,1	6,2
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,3	1,4	1,5	1,5	1,8	1,9
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	0,55	0,55	0,64	0,85	0,87	0,97
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,28	2,33	2,38	2,46	2,63	2,72
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	0,26					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,221					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,2671					
Число Рейнольдса	161					
Витрата гріючої води, кг/с	0,5618					
Експеримент № 2						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85

продовження таблиці А.3

Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8	9,7	9,7	9,7	9,6	9,5
Температура стінки, °С	6,7	6,6	6,6	6,53	6,48	6,6
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,4	5,5	5,6	5,64	5,61	5,7
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,5	1,6	1,9	1,88	1,90	2,0
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	0,97	1,00	1,13	1,17	1,17	1,28
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,42	2,46	2,62	2,65	2,65	2,75
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	0,24					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0382					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,4619					
Число Рейнольдса	280					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05618					
Експеримент № 3						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8	9,7	9,7	9,6	9,7	9,6
Температура стінки, °С	6,5	6,2	6,2	6,20	6,27	6,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,0	5,0	5,1	5,19	5,31	5,4
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,2	1,4	1,5	1,70	1,72	1,7
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	1,15	1,22	1,31	1,52	1,53	1,59
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,30	2,35	2,44	2,61	2,63	2,70

Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	0,26					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,608					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,7341					
Число Рейнольдса	443					
Витрата гріючої води, кг/с	0,5618					
Експеримент № 4						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,1	18,0	18,0	17,8	17,7	17,7
Температура стінки, °С	14,6	14,5	14,5	14,42	14,49	14,3
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	13,0	13,0	13,3	13,36	13,32	13,4
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	7,4	7,7	7,8	7,87	7,85	7,9
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,45	6,56	6,91	6,97	7,03	7,14
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,62	8,76	8,96	9,05	9,00	9,08
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	5,38					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,05672					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,2673					
Число Рейнольдса	229					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					
Експеримент № 5						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,2	18,1	17,9	17,8	17,8	17,8
Температура стінки, °С	13,9	13,7	13,7	13,77	13,79	14,0

продовження таблиці А.3

Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,9	12,2	12,3	12,44	12,55	12,7
Експеримент № 7						
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	7,1	7,4	7,3	7,40	7,49	7,5
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,85	6,91	6,95	7,06	7,05	7,15
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,43	8,57	8,55	8,69	8,72	8,83
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,38					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0440					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,5330					
Число Рейнольдса	450					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					
Експеримент № 6						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	17,8	17,7	17,6	17,6	17,5	17,4
Температура стінки, °С	13,6	13,5	13,3	13,40	13,49	13,5
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,5	11,8	11,9	11,88	12,00	12,2
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	7,1	7,2	7,3	7,38	7,40	7,5
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,87	7,15	7,17	7,24	7,26	7,27
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,32	8,49	8,59	8,61	8,67	8,74
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,38					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0606					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,7348					
Число Рейнольдса	618					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
--	------	------	------	------	------	------

продовження таблиці А.3

Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,0	17,8	17,9	17,6	17,6	17,6
Температура стінки, °С	13,6	13,5	13,5	13,56	13,56	13,5
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,3	11,4	11,5	11,73	11,82	12,0
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,9	6,9	6,9	7,05	7,11	7,2
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,07	6,31	6,40	6,57	6,55	6,64
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	7,92	8,00	8,06	8,25	8,27	8,33
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,39					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0764					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,9259					
Число Рейнольдса	761					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					

Експеримент № 8

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,7	19,5	19,4	19,3	19,3	19,4
Температура стінки, °С	16,7	16,7	16,8	16,77	16,79	16,9
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	15,4	15,7	15,8	15,84	15,86	15,9
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,7	12,1	12,0	12,07	12,06	12,2
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,16	11,37	11,39	11,42	11,52	11,61
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,57	12,84	12,83	12,86	12,92	13,00
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,35					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0292					

Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,3551
---	--------

продовження таблиці А.3

Число Рейнольдса	372
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672

Експеримент № 9						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,7	19,6	19,5	19,4	19,4	19,4
Температура стінки, °С	16,2	16,4	16,3	16,24	16,31	16,3
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,7	15,1	15,2	15,21	15,24	15,4
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,3	11,7	11,8	11,84	11,91	12,0
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,14	11,57	11,62	11,81	11,89	11,92
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,22	12,65	12,69	12,76	12,84	12,91
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,38					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0584					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,7094					
Число Рейнольдса	734					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					
Експеримент № 10						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8	19,8	19,7	19,6	19,6	19,5
Температура стінки, °С	16,2	16,1	16,1	16,34	16,30	16,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,4	14,8	14,9	15,05	15,21	15,3
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,4	11,7	11,7	11,76	11,98	11,9
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,17	12,45	12,51	12,59	12,72	12,71

Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	10,38
---	-------

продовження таблиці А.3

Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0971
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	1,1806
Число Рейнольдса	1214
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672

Таблиця А.4 Первинні експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії холодоносія (**ХН (ПГ/В/РВ)**), в трубі

Експеримент № 1						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8	9,7	9,7	9,7	9,7	9,5
Температура стінки, °С	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0	6,8
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,9	6,1	6,2	6,2	6,2	6,2
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,6	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	0,54	0,74	0,71	0,94	1,08	1,10
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,38	2,53	2,54	2,61	2,69	2,67
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	0,22					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0225					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,2673					
Число Рейнольдса	167					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05617					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,01647					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,01584					
Експеримент № 2						

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
--	------	------	------	------	------	------

продовження таблиці А.4

Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8	9,7	9,6	9,7	9,7	9,7
Температура стінки, °С	6,6	6,7	6,7	6,7	6,7	6,7
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	4,9	5,4	5,6	5,7	5,6	5,7
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	0,76	0,93	1,03	0,96	1,14	1,18
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,00	2,27	2,35	2,40	2,46	2,55
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	0,23					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0389					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,4616					
Число Рейнольдса	284					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05618					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,03212					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,02614					
Експеримент № 3						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,0	17,9	17,8	17,8	17,8	17,7
Температура стінки, °С	14,9	14,8	14,9	15,0	15,0	15,0
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	12,6	12,8	12,9	13,0	13,0	13,2
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	7,4	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,34	6,78	7,06	7,19	7,28	7,28

Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,51	8,80	8,97	9,04	9,08	9,11
--	------	------	------	------	------	------

продовження таблиці А.4

Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,37					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0224					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,2669					
Число Рейнольдса	236					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0567					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,01134					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,008811					
Експеримент № 4						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	1,64	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,3	18,1	18,1	17,9	18,0	18,0
Температура стінки, °С	14,0	14,1	14,1	14,1	14,3	14,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,9	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	7,2	7,3	7,4	7,4	7,4	7,5
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,26	6,39	6,35	6,43	6,60	6,64
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,24	8,39	8,44	8,44	8,57	8,63
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	5,31					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0447					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,5323					
Число Рейнольдса	461					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05673					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,02286					

Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,02193
--	---------

продовження таблиці А.4

Експеримент № 5						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	17,9	17,7	17,5	17,7	17,7	17,7
Температура стінки, °С	13,0	12,9	13,1	13,1	13,2	13,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,0	11,3	11,6	11,7	11,8	12,0
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,7	6,9	7,1	7,2	7,2	7,4
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,10	6,39	6,54	6,55	6,55	6,91
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	7,74	7,97	8,15	8,20	8,27	8,51
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	5,37					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0616					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,7341					
Число Рейнольдса	622					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,04060					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,03143					
Експеримент № 6						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	17,9	17,9	17,9	17,8	17,8	17,7
Температура стінки, °С	13,0	12,9	13,0	13,0	13,0	13,1
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	10,7	11,1	11,3	11,4	11,5	11,6
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,3	6,6	6,7	6,7	6,8	6,8
Температура холодоносія на відстані	5,99	6,33	6,43	6,47	6,51	6,51

2,406 мм від центра, °C						
-------------------------	--	--	--	--	--	--

продовження таблиці А.4

Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	7,51	7,79	7,91	7,97	8,02	8,04
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	5,34					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0776					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,9244					
Число Рейнольдса	774					
Витрата гріючої води, кг/с	0,05672					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,04584					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,04527					
Експеримент № 7						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8	19,8	19,6	19,6	19,6	19,6
Температура стінки, °С	17,0	16,9	16,8	16,8	17,0	16,99
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	15,6	15,7	15,7	15,8	16,0	16,0
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,9	12,0	12,0	12,1	12,3	12,3
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,42	11,73	11,87	11,94	12,01	12,00
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,78	12,94	13,01	13,06	13,22	13,22
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	10,35					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0297					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,3551					
Число Рейнольдса	388					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0567					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,002612					
Тиск в потоці холодоносія на виході з	0,012953					

вимірювальної ділянки, 10^5 Па	
----------------------------------	--

продовження таблиці А.4

Експеримент № 8						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8	19,7	19,7	19,7	19,5	19,5
Температура стінки, °С	16,5	16,3	16,4	16,3	16,4	16,38
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,8	14,8	15,1	15,1	15,2	15,2
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,4	11,5	11,7	11,6	11,7	11,6
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	10,92	10,97	11,21	11,17	11,20	11,29
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,23	12,28	12,49	12,45	12,51	12,51
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	10,35					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0593					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,7088					
Число Рейнольдса	752					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0567					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,02449					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,02516					
Експеримент № 9						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,9	19,7	19,7	19,6	19,5	19,4
Температура стінки, °С	16,1	16,0	15,9	15,9	16,0	16,09
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,4	14,6	14,6	14,7	14,8	14,9

Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,0	11,3	11,3	11,3	11,4	11,4
--	------	------	------	------	------	------

продовження таблиці А.4

Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	10,64	10,98	10,94	11,04	11,17	11,17
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	11,86	12,15	12,10	12,16	12,30	12,32
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	10,34					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0987					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	1,1793					
Число Рейнольдса	1233					
Витрата гріючої води, кг/с	0,0567					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,04954					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,04337					

Таблиця А.5 Первинні експериментальні дані по дослідженню коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії холодоносія (ПГ/В), в трубі

Експеримент № 1						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8					9,8
Температура стінки, °С	7,5					7,7
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	6,0					6,7
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	1,5					1,8
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	0,69					1,21
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,47					2,91
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	0,24					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0220					

Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,2666					
продовження таблиці А.5						
Число Рейнольдса	146					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,0184					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,0154					
Експеримент № 2						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,9					9,6
Температура стінки, °С	7,4					7,5
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,7					6,3
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	1,6					1,9
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	0,75					1,37
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,45					2,94
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	0,24					
Витрати холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0380					
Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,4612					
Число Рейнольдса	252					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,03155					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,02752					
Експеримент № 3						
Відстань від входу у вимірювальну	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85

ділянку до перерізу, м						
продовження таблиці А.5						
Температура води в міжтрубному просторі, °С	9,8					9,6
Температура стінки, °С	7,2					7,1
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	5,4					5,8
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	1,6					1,8
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	1,26					1,59
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	2,61					2,86
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	0,23					
Витрати холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0605					
Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,7343					
Число Рейнольдса	403					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,05229					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,04336					
Експеримент № 4						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,0					17,8
Температура стінки, °С	15,3					15,5
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	13,3					14,1
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	7,4					7,9
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,39					6,98
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,70					9,26
Температура холодоносія на вході	5,36					

$T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$						
продовження таблиці А.5						
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0219					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,2666					
Число Рейнольдса	210					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,01213					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,00853					
Експеримент № 5						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, $^{\circ}\text{C}$	18,3					18,1
Температура стінки, $^{\circ}\text{C}$	15,0					15,2
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	12,7					13,5
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	7,4					8,1
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, $^{\circ}\text{C}$	6,73					7,47
Средньоінтегральна температура холодоносія, $^{\circ}\text{C}$	8,69					9,40
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}, \text{ К}$	5,36					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,0438					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}, \text{ кг/с}$	0,5331					
Число Рейнольдса	420					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,02566					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,02271					
Експеримент № 6						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85

Температура води в міжтрубному просторі, °С	17,9					17,7
продовження таблиці А.5						
Температура стінки, °С	14,3					14,5
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,7					12,8
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	7,0					7,7
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,52					6,77
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,24					8,81
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	5,34					
Витрати холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,0603					
Швидкість холодоносія, $G_{ХН}$, кг/с	0,7334					
Число Рейнольдса	563					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,03952					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,0335					
Експеримент № 7						
Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	18,1					17,9
Температура стінки, °С	14,2					14,4
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	11,6					12,5
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	6,8					7,3
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	6,54					7,07
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	8,14					8,72
Температура холодоносія на вході $T_{ХН\text{ вх}}$, К	5,36					

Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0777
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,9458

продовження таблиці А.5

Число Рейнольдса	722
Витрата гріючої води, кг/с	112,045
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,05322
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,04741

Експеримент № 8

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8					19,7
Температура стінки, °С	17,7					17,9
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	16,2					16,8
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	12,4					12,8
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,64					12,16
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	13,19					13,69
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН вх}}$, К	10,53					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0291					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,3554					
Число Рейнольдса	355					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,01280					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,01145					

Експеримент № 9

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному	19,8					19,6

просторі, °С						
Температура стінки, °С	17,3					17,4

продовження таблиці А.5

Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	15,5					16,1
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	12,0					12,3
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,39					11,72
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,82					13,15
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	10,54					
Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0582					
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,70998					
Число Рейнольдса	693					
Витрата гріючої води, кг/с	112,045					
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,03027					
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,0272					

Експеримент № 10

Відстань від входу у вимірювальну ділянку до перерізу, м	0,10	0,25	0,40	0,55	0,70	0,85
Температура води в міжтрубному просторі, °С	19,8					19,7
Температура стінки, °С	16,9					17,0
Температура холодоносія на відстані 4,108 мм від центра, °С	14,8					15,5
Температура холодоносія на відстані 0,155 мм від центра, °С	11,5					11,8
Температура холодоносія на відстані 2,406 мм від центра, °С	11,15					11,21
Средньоінтегральна температура холодоносія, °С	12,41					12,65
Температура холодоносія на вході $T_{\text{ХН ВХ}}$, К	10,56					

Витрати холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	0,0967
Швидкість холодоносія, $G_{\text{ХН}}$, кг/с	1,1799
Число Рейнольдса	1127

продовження таблиці А.5

Витрата гріючої води, кг/с	112,045
Тиск в потоці холодоносія на вході в вимірювальну ділянку, 10^5 Па	0,05446
Тиск в потоці холодоносія на виході з вимірювальної ділянки, 10^5 Па	0,04798