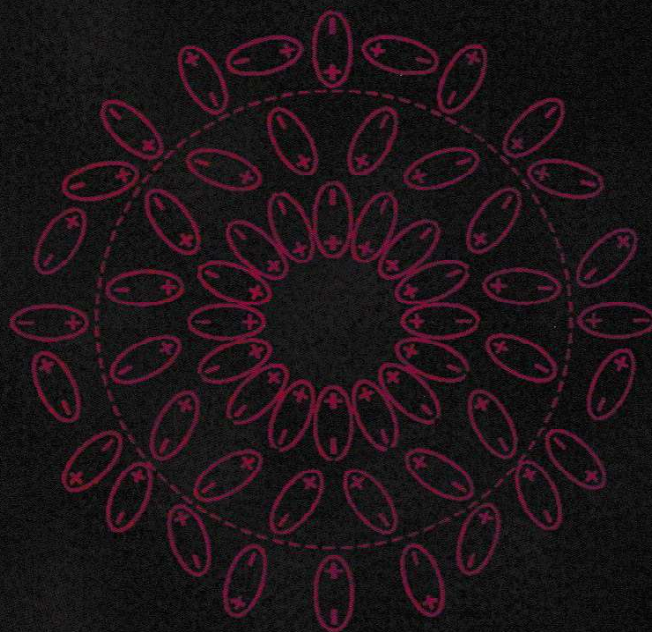


В. П. Железный, Ю. В. Семенюк, О. Я. Хлиева,
Н. Н. Лукьянов, А. Г. Никулин, А. С. Никулина

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ



Часть 1.
**Теплофизические свойства
нанofлюидов**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Одесская национальная академия пищевых технологий

**В. П. Железный, Ю. В. Семенюк, О. Я. Хлиева,
Н. Н. Лукьянов, А. Г. Никулин, А. С. Никулина**

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Часть 1.
Теплофизические свойства нанофлюидов

Под редакцией В. П. Железного

Монография

Одесса
«Фенікс»
2019

УДК 621.564.2:536

П 26

*Рекомендовано к печати Ученым Советом
Одесской национальной академии пищевых технологий.
Протокол № 10 от 7 мая 2019 г.*

Рецензенты:

доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой общей физики и физики теплоэнергетических и химических процессов Одесского национального университета им. И.И. Мечникова **В. Я. Гоцульский**;

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии воды и топлива Одесского национального политехнического университета **В. П. Кишневский**;

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой компьютерной инженерии Одесской национальной академии пищевых технологий **С. В. Артеменко**.

Перспективы применения нанотехнологий в холодильной технике.

П 26 Часть 1. Теплофизические свойства нанофлюидов : монография / В. П. Железный, Ю. В. Семенюк, О. Я. Хлиева, Н. Н. Лукьянов, А. Г. Никулин, А. С. Никулина; под ред. В. П. Железного. – Одесса : «Фенікс», 2019. – 313 с.

ISBN 978-966-928-414-3

В монографии приведены полученные в последние годы на кафедре теплофизики и прикладной экологии Одесской национальной академии пищевых технологий результаты экспериментально-расчетных исследований теплофизических свойств различных нанофлюидов, перспективных для применения в холодильной технике. Наряду с экспериментальной информацией о вязкости, теплопроводности, плотности, теплоемкости, поверхностном натяжении и давлении насыщенных паров нанофлюидов, приведены методы прогнозирования указанных свойств. Рассмотрены технологии приготовления нанофлюидов, вопросы оценки их коллоидной устойчивости.

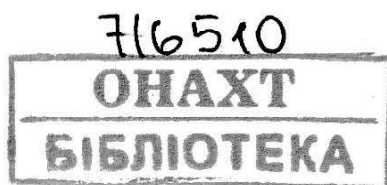
Монография предназначена для студентов, аспирантов, инженеров и научных сотрудников, которые занимаются проектированием, созданием и эксплуатацией холодильного и теплоэнергетического оборудования.

УДК 621.564.2:536

ISBN 978-966-428-414-3

© В.П. Железный и др., 2019

© ОНАПТ, 2019



СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ	11
Список литературы.....	14
2 АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ И ПРОБЛЕМ ВНЕДРЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ХОЛОДИЛЬНУЮ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ.....	16
Список литературы.....	28
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ	31
3.1 Установка для исследования устойчивости нанофлюидов	31
3.2 Экспериментальная установка для исследования давления насыщенных паров нанофлюидов и растворов хладагент / масло.....	32
3.3 Экспериментальная установка для исследования поверхностного натяжения нанофлюидов и растворов хладагент / масло	36
3.4 Экспериментальная установка для исследования плотности растворов хладагент / масло и нанофлюидов.....	39
3.5 Экспериментальная установка для измерения вязкости растворов хладагент / масло и нанофлюидов.....	41
3.6 Экспериментальная установка для исследования теплопроводности нанофлюидов.	43
3.6.1 Конструкции измерительных ячеек и методики проведения измерений.....	43
3.6.2 Описание экспериментальной установки для измерения теплопроводности нанофлюидов при атмосферном давлении и температурах выше 273 К	51
3.6.3 Экспериментальная установка для исследования теплопроводности в широком интервале параметров состояния	53
3.7 Экспериментальная установка для исследования калорических свойств нанофлюидов	55
Список условных обозначений	61
Список литературы.....	62
4 СПОСОБЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ НАНОФЛЮИДОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИХ КОЛОИДНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ	63
4.1 Обзор методик оценки размера наночастиц в нанофлюиде	64
4.1.1 Возможности различных методов определения размера наночастиц в нанофлюиде.....	64

4.1.2 Метод спектротурбидиметрии для оценки размера наночастиц в нанофлюиде	67
4.2 Исследование технологий приготовления нанофлюидов, перспективных в качестве хладоносителей и рабочих тел для холодильных систем.....	71
4.2.1 Технологии приготовления нанофлюидов, перспективных в качестве хладоносителей и рабочих тел для холодильных систем	72
4.2.2 Результаты экспериментальных исследований устойчивости нанофлюидов при использовании различных технологий их приготовления	74
4.2.3 Результаты экспериментального исследования целесообразности применения поверхностно-активных веществ при приготовлении нанофлюидов	82
4.3 Исследование агрегативной устойчивости нанофлюидов, перспективных для применения в качестве хладоносителей в холодильном оборудовании	91
4.3.1 Экспериментальное исследование устойчивости нанофлюидов перспективных для применения в качестве хладоносителей при хранении в стационарных условиях	91
4.3.2 Исследование влияния устойчивости нанофлюидов, созданных на основе галондозамещенных хладагентов, при их кипении	95
Список условных обозначений	96
Список литературы.....	96
5 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАБОЧИХ ТЕЛ-НАНОФЛЮИДОВ И НАНОХЛАДОНОСИТЕЛЕЙ	101
5.1 Исследование теплопроводности нанофлюидов	102
5.1.1 Обзор и анализ исследований теплопроводности нанофлюидов с частицами Al_2O_3	104
5.1.2 Влияние концентрации наночастиц, их размера и формы на теплопроводность нанофлюидов.....	105
5.1.3 Влияние температуры на теплопроводность нанофлюидов.....	106
5.1.4 Влияние методик проведения эксперимента на значение теплопроводности нанофлюидов.....	107
5.1.5 Влияние конвективной составляющей на теплопроводность нанофлюидов	109
5.1.6 Влияние теплообмена излучением на теплопроводность нанофлюидов	110

5.1.7 Экспериментальное исследование теплопроводности нанофлюидов	111
5.1.7.1 Результаты контрольных опытов	111
5.1.7.2 Результаты измерений теплопроводности нанофлюидов изопропиловый спирт / наночастицы Al_2O_3	113
5.1.7.3 Анализ моделей для расчета теплопроводности нанофлюидов	115
5.1.7.4 Анализ экспериментальных данных о теплопроводности системы изопропиловый спирт / Al_2O_3	122
5.1.7.5 Экспериментальное исследование теплопроводности хладоносителей ХНТ-40 и нанофлюидов на его основе	124
5.1.7.6 Экспериментальное исследование теплопроводности некоторых минеральных и синтетических компрессорных минеральных масел	129
5.2. Исследование вязкости нанофлюидов	133
5.2.1 Обзор и анализ опубликованных данных по вязкости нанофлюидов с наночастицами окислов металлов	133
5.2.2 Выбор объектов исследования	140
5.2.3 Результаты измерений вязкости объектов исследования	141
5.2.4 Обзор моделей для расчета вязкости нанофлюидов	144
5.2.5 Анализ и обобщение данных о вязкости нанофлюидов	149
5.3 Исследование плотности нанофлюидов	151
5.3.1 Результаты исследования плотности нанофлюидов изопропиловый спирт / наночастицы Al_2O_3	153
5.3.2 Моделирование мольного объема нанофлюидов	158
5.4 Исследование поверхностного натяжения нанофлюидов	162
5.5 Исследование давления насыщенных паров нанофлюидов	178
5.6 Экспериментальное исследование теплоемкости и фазовых переходов растворов изопропанол / наночастицы Al_2O_3 при низких температурах	186
5.6.1 Материалы и объекты исследования	188
5.6.2 Описание экспериментальной установки	190
5.6.3 Результаты экспериментального исследования	194
5.6.4 Анализ неопределенностей измеряемых величин	202
5.6.5 Обсуждение полученных результатов и моделирование	204
5.7 Влияние наночастиц Al_2O_3 на термодинамические свойства изопропилового спирта	213

5.7.1 Экспериментальное изучение термодинамических свойств нанофлюидов	219
5.7.1.1 Результаты экспериментального изучения термодинамических свойств нанофлюидов	220
5.7.1.2 Анализ неопределенности измеренных величин.....	230
5.7.1.3 Анализ экспериментальных данных о термодинамических свойствах нанофлюидов	231
5.7.2 Модель прогнозирования мольной изобарной теплоемкости нанофлюидов	235
5.8 Результаты исследования влияния примесей наночастиц на параметры фазовых равновесий жидкость – жидкость.....	251
Список условных обозначений	257
Список литературы.....	260
6 МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОФЛЮИДОВ	274
6.1 Результаты экспериментально-расчетного исследования теплофизических свойств растворов R600a/минеральное масло, R600a/минеральное масло/наночастицы Al_2O_3 и R600a/минеральное масло/наночастицы TiO_2	276
6.2 Методика прогнозирования теплофизических свойств растворов хладагента R600a с компрессорным маслом и наномаслом.....	282
6.3 Анализ полученных экспериментальных данных	293
Список условных обозначений	303
Список литературы.....	304
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	309

ВВЕДЕНИЕ

Наножидкости (нанофлюиды) представляют собой коллоидные системы с твердыми частицами, размер которых, как правило, не превышает 100 нм. В качестве базовых жидкостей, в которые добавляют наночастицы, обычно используются такие широко применяемые вещества как вода, одноатомные и многоатомные спирты, технические масла, расплавы солей и т.д.

Научные исследования, выполненные в конце 1990-х годов и первых десятилетиях XXI века, показали, что добавление очень малых количеств наночастиц приводит к значительному увеличению теплопроводности базовых жидкостей. В последние годы nanoфлюиды стали объектом исследования для многих ученых. На начальном этапе изучения свойств nanoфлюидов влияние примесей наночастиц на теплопроводность базовых жидкостей рассматривалось как «аномальное». Однако более поздние работы различных авторов указывают, что свойства nanoфлюидов могут рассматриваться в рамках термодинамических моделей, применяемых к коллоидным растворам.

Некоторые исследователи приводят данные о том, что иногда примеси наночастиц оксида алюминия и оксида меди, напротив, приводят к снижению коэффициентов теплопроводности и диффузии. Однако большинство имеющихся экспериментальных данных указывают на то, что теплопроводность базовых жидкостей увеличивается, а интенсивность процессов теплообмена с участием nanoфлюидов значительно повышается при добавлении даже незначительного количества наночастиц. Кроме того, примеси некоторых наночастиц в рабочих жидкостях приводят к уменьшению потерь энергии на трение в различных элементах оборудования. Указанные свойства nanoфлюидов будут способствовать появлению нового класса технических жидкостей, использование которых приведет к интенсификации процессов теплообмена, снижению массогабаритных характеристик оборудования и повышению его энергетической эффективности.

За последние годы опубликовано большое количество научных исследований (статей, трудов конференций), посвященных изучению свойств nanoфлюидов и их использованию в различных отраслях промышленности.

К числу возможных практических применений nanoфлюидов в технике можно с уверенностью отнести:

- охлаждение миниатюрных электронных компонентов, что позволит разработать новое поколение компьютерных процессоров;
- использование в качестве тепло- и хладоносителей в различных теплообменных аппаратах, в том числе в холодильных системах;

- использование в качестве рабочих тел с целью повышения энергетической эффективности различных типов холодильного оборудования;
- охлаждение небольших двигателей внутреннего сгорания;
- применение нанофлюидов в космической технике;
- интенсификация процессов охлаждения ядерных реакторов и т.д.

Однако на пути промышленного внедрения технически перспективных нанофлюидов имеются серьезные практические проблемы. Одной из таких проблем является адаптация полученных в лабораторных условиях нанофлюидов к технологическим возможностям производства коммерческих продуктов. Другая проблема связана с отсутствием комплексных исследований характеристик нанофлюидов определенного состава: от изучения их коллоидной стабильности, термодинамических свойств и свойств переноса до процессов теплообмена с участием нанофлюидов и оценки влияния примесей наночастиц в теплоносителях или рабочих телах на показатели энергетической эффективности оборудования, в котором они используются.

Поэтому задача оценки целесообразности применения нанотехнологий в промышленности является сложной. Понятно, что при решении этой задачи нельзя ограничиваться только экономическими критериями и показателями энергетической эффективности. На смену традиционным методам оценки экономической или энергетической эффективности должны прийти и быть внедрены в повседневную практику методы анализа эколого-энергетической эффективности оборудования.

Предлагаемая читателю монография является первой частью работы, в которой авторы предприняли попытку рассмотреть основные особенности приготовления нанофлюидов, изучения их стабильности и влияние наночастиц на теплофизические свойства базовых жидкостей. Для решения этой задачи были проведены комплексные исследования технологий приготовления различных нанофлюидов с использованием в качестве базовых жидкостей как модельных, так и применяемых в холодильной технике веществ (компрессорных масел, растворов хладагентов в маслах, хладоносителей), а также экспериментальное изучение их коллоидной стабильности и теплофизических свойств.

При подготовке к изданию второй части монографии авторами будут рассмотрены результаты экспериментальных и расчетных исследований влияния наночастиц на интенсивность процессов теплообмена при кипении, приведены экспериментальные данные о параметрах эффективности холодильных компрессорных систем при использовании нанофлюидов.

Все исследования выполнены аспирантами и сотрудниками кафедры

теплофизики и прикладной экологии Учебно-научного института холода, криотехнологий и экзoэнергетики им. В.С Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий под руководством профессора В.П. Железного.

Первые два раздела представляемой первой части монографии посвящены оценке перспектив применения нанофлюидов в холодильной промышленности. Третий раздел посвящен описанию лабораторного оборудования, которое использовалось для исследования агрегативной устойчивости создаваемых образцов нанофлюидов, изучения теплофизических свойств нанофлюидов. Четвертый раздел монографии посвящен некоторым аспектам технологии приготовления нанофлюидов и изучения их агрегативной устойчивости. Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств нанофлюидов приведены в пятом разделе монографии. Авторы уделили большое внимание именно комплексному изучению теплофизических свойств нанофлюидов, включая измерения вязкости, теплопроводности, давления насыщенных паров, поверхностного натяжения, теплоемкости для образцов идентичного состава. Такой подход к изучению свойств нанофлюидов позволяет наиболее глубоко исследовать влияние наночастиц на свойства базовых жидкостей, создать базу справочных данных для последующего моделирования их свойств. В шестом разделе монографии изложены некоторые аспекты моделирования как свойств нанофлюидов на основе чистых веществ, так и теплофизических свойств растворов хладагент / компрессорное масло / наночастицы, что имеет важное значение для анализа процессов в аппаратах парокомпрессионного холодильного оборудования.

В монографии приводится обширный оригинальный фактический материал, который может быть использован другими авторами. Определенную ценность представляют предложенные методы расчета, позволяющие производить прогнозирование теплофизических свойств нанофлюидов с привлечением ограниченного объема эмпирической информации.

Основной целью предлагаемой читателю монографии является подробное изложение проблемных вопросов, связанных с изучением свойств нанофлюидов и их практическим применением. Поэтому монография ориентирована как на научных сотрудников и аспирантов, занимающихся изучением теплофизических свойств сложных термодинамических систем и вопросами теплообмена в аппаратах холодильного оборудования, так и на широкий круг специалистов, основной задачей которых является решение проблемы повышения энергетической эффективности оборудования.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору В.Я. Гоцульскому, профессору В.П. Кишневному и профессору С.В. Артеменко, взявшим на себя труд рецензирования рукописи монографии. Авторы также признательны аспирантам и сотрудникам кафедры теплофизики и прикладной экологии Мельнику А.В., Лукьяновой Т.В., Мотовому И.В., Рябикину С.С., Шимчуку Н.А. за большую помощь при подготовке рукописи к печати.