

На правах рукописи

ДАДОНОВ ПЕТР ВАСИЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В
КОНДЕНСАТОРЕ С ТРУБАМИ
В ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

*Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук*

Томск 2001

доктор технических наук
Петрик Павел Трофимович

доктор технических наук
Сорокопуд Александр Филиппович

ОАО «Азот», г. Кемерово

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета

2001 г.

L. J. J.

А.С. Заворин

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В последнее время уделяется большое внимание исследованию тепломассообменных процессов в зернистых средах, что связано с широкой областью применения таких процессов в различных инженерных приложениях. Зернистые материалы применяются в аппаратах насадочного типа для увеличения поверхности контакта фаз, в химических реакторах с зернистым слоем катализатора, в регенеративных теплообменниках, в ядерных реакторах и других аппаратах.

В теплоэнергетике расширяется использование глубинного тепла Земли, которое извлекают методом “подземного котла”. Широкое распространение получили методы интенсификации нефтеотдачи нефтяных пластов и увеличения добычи вязких сортов нефти, основанные на паротепловом воздействии на пласты. Из работ Петрика П.Т., Богомолова А.Р. известно, что зернистый слой может оказывать интенсифицирующее влияние на теплообмен при конденсации. Для установления возможности применения зернистых слоев как интенсификаторов теплообмена в промышленных теплообменниках необходимо более детальное изучение данного процесса.

В настоящее время имеется ограниченное количество работ, посвященных исследованию теплообмена при конденсации пара на поверхности, помещенной в зернистый слой. Впервые эти процессы были рассмотрены в работах П. Ченга, В.Е. Накорякова, П.Т. Петрика.

Известно, что более интенсивно теплообмен протекает при горизонтальном расположении труб. Однако, из-за натекания конденсата с труб, расположенных выше, на нижние трубы эффективность конденсаторов с горизонтальным расположением труб снижается. Одной из задач исследования являлось определение таких углов наклона трубы, при которых конденсат принятого рабочего вещества R227 стекает безотрывно вдоль трубы, а также определение эффективности работы конденсатора в таких условиях.

Цель работы

Задачей настоящего исследования является получение экспериментальных данных о теплообмене при пленочной конденсации на трубах произвольной ориентации, помещенных в зернистый слой, с достаточной степенью достоверности в широком диапазоне изменения параметров, влияющих на процесс, для установления закономерности теплообмена и получения зависимостей для расчета конденсаторов с трубами, помещенными в зернистый слой.

Научная новизна

1. Впервые выполнены экспериментальные исследования по теплообмену при конденсации неподвижного пара хладона R227 на гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой, расположенных под различным углом наклона к горизонту, в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

2. Предложена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации на гладкой трубе, расположенной под различным углом наклона к горизонту.

3. Предложена эмпирическая зависимость для расчета характерного геометрического размера.

4. Предложена зависимость для расчета количества жидкости отводимой зернистым слоем в зависимости от тепловой нагрузки.

5. Разработана методика автоматизированного сбора и обработки информации для исследования теплообмена при фазовых превращениях на поверхностях с зернистым слоем.

Автор защищает

1. Методы экспериментального исследования и экспериментальное оборудование для проведения опытов по теплообмену при фазовых превращениях в зернистых средах.

2. Результаты экспериментального исследования теплообмена при пленочной конденсации чистого пара на гладкой наклонной трубе.

3. Результаты экспериментального исследования теплообмена при пленочной конденсации на наклонной трубе, помещенной в зернистый слой.

Практическая ценность

1. Предложена зависимость, позволяющая оценить количество жидкости, отводимой зернистым слоем от поверхности теплообмена, и, следовательно, оценить интенсифицирующее действие засыпки. Предложена зависимость расчета характерного геометрического размера, позволяющая выполнить обобщение экспериментальных данных в безразмерных координатах $Nu^* = f(Re^*)$ для всех углов наклона рабочего участка от 0° до 90° .

2. Результаты работы используются в учебном процессе в курсах "Процессы и аппараты химической технологии", "Теоретические основы теплотехники", "Основы автоматизированного проектирования", курсовом и дипломном проектировании.

3. Предложена методика расчета конденсаторов с трубами, помещенными в зернистый слой.

Апробация работы

Основные научные результаты, включенные в диссертацию, докладывались на VI Всероссийской конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 2000г.; на 4-й Международной научно-практической конференции «Природные интеллектуальные ресурсы Сибири», г. Кемерово, 2000г.; а также на научно-методических семинарах и научных конференциях КузГТУ, г. Кемерово, 1996-2001гг.

Личное участие автора

Автором выполнены работы по разработке и созданию экспериментальных стендов. Разработана и освоена методика проведения экспериментов. Разработано программное обеспечение для проведения опытов и обработки полу-

ченных данных. Проведены эксперименты, результаты которых представлены в данной работе. В постановке задачи исследования, обсуждении методики экспериментов и полученных результатов принимали участие канд. техн. наук И.В. Дворовенко, канд. техн. наук А.Р. Богомолов.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 119 страниц текста, в том числе 32 рисунка и графика, 39 таблиц, список литературных источников составляет 70 наименования.

Содержание работы

В первой главе рассматривается современное состояние вопроса о теплообмене при пленочной конденсации на гладких наклонных трубах и поверхностях, помещенных в зернистой среде.

Выполненный анализ работ других авторов по теплообмену при пленочной конденсации на гладких наклонных трубах показал, что имеющиеся зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи либо сложны, либо не могут быть применены для всех углов наклона трубы. Кроме того, отсутствуют обобщения в безразмерных координатах для наклонных труб; нет рекомендаций по расчету характерного геометрического размера. Также в доступной нам литературе не было обнаружено данных по исследованию теплообмена при пленочной конденсации на наклонных трубах, помещенных в зернистый слой.

На основе анализа теоретических и экспериментальных работ выполнена постановка задач настоящего исследования.

Во второй главе приведена методика проведения опытов по теплообмену при конденсации на гладкой наклонной трубе и трубе, помещенной в зернистый слой; описан экспериментальный стенд; обоснован выбор рабочего вещества, в качестве которого использовался хладагент R227; описана методика сбора и обработки информации с помощью ЭВМ. Сделан анализ погрешности измерений при определении коэффициента теплоотдачи.

Для исследования теплообмена при конденсации на гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой, было разработано и изготовлено специальное экспериментальное оборудование рис.1.

Основной частью стенда является емкость, состоящая из двух, расположенных под углом друг к другу полостей, играющих роль кипятильника 1 и конденсатора 2. В конденсаторе было установлено два опытных участка 3 и 4. Каждый рабочий участок состоит из медной трубки наружным диаметром 8 мм и длиной 400 мм. В экспериментах были использованы слои из частиц диаметром 0,8 и 1,1 мм. Для изменения угла наклона рабочих участков стенд был оснащен шарнирной опорой 14.

Отвод тепла при конденсации от участков проводился охлаждающей водой, поступающей из магистрали через бак постоянного уровня 5. Энергообес-

печение стенда осуществлялось путем подачи нагретой воды из снабженного насосом термостата 10. Регулировка и контроль постоянства расхода греющей воды осуществлялись с помощью вентиля 11 и ротаметра 12. Кипятильник и конденсатор были снабжены вентилями 19, 20 и 21 для вакуумирования емкости и заполнения ее рабочим веществом.

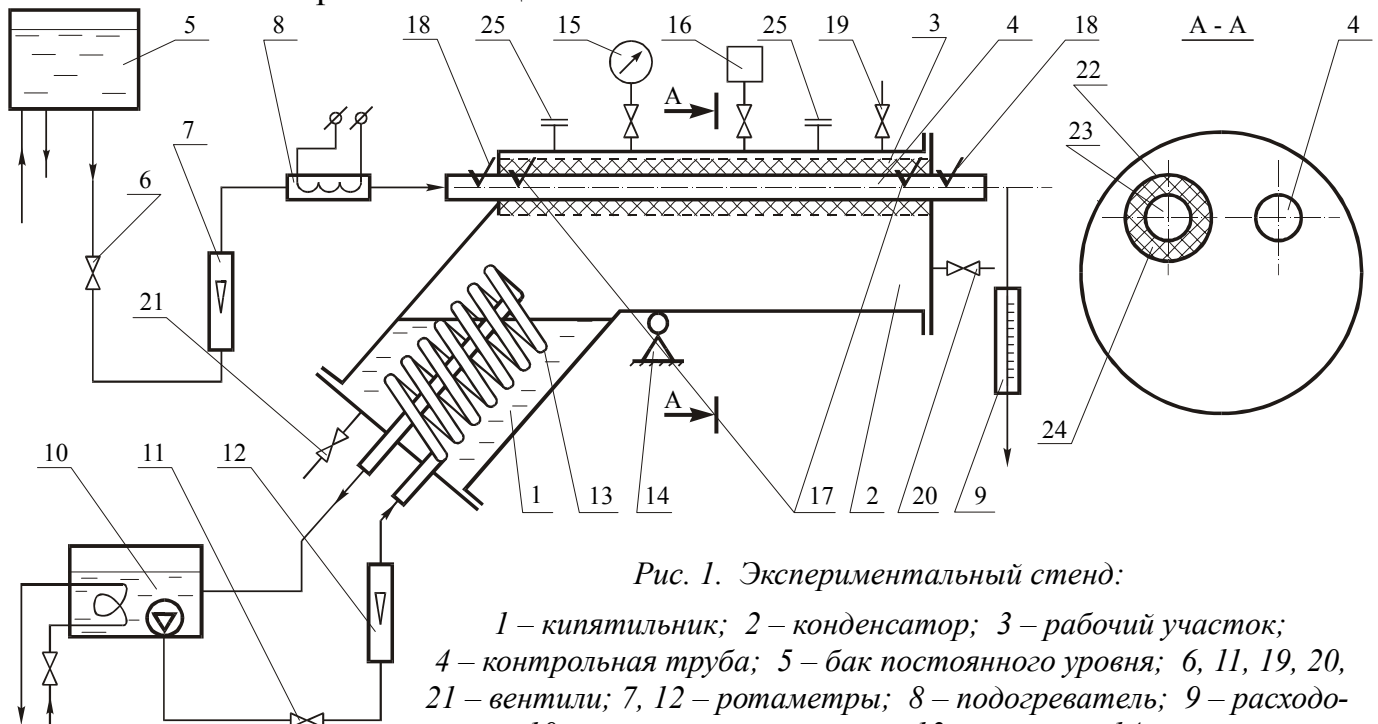


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

1 – кипятыльник; 2 – конденсатор; 3 – рабочий участок;
4 – контрольная труба; 5 – бак постоянного уровня; 6, 11, 19, 20, 21 – вентили; 7, 12 – ротаметры; 8 – подогреватель; 9 – расходомер; 10 – термостат с насосом; 13 – змеевик; 14 – шарнирная опора; 15 – манометр; 16 – датчик давления “Сапфир”; 17, 18 – термопары; 22 – сетка; 23 – рабочая труба; 24 – зернистый слой; 25 – иштуцера для вывода термопар

Перед запуском стенда в работу его заполняли рабочей жидкостью. Заправка стенда рабочим веществом осуществлялась так, чтобы избежать попадания в рабочий объем конденсатора неконденсирующихся примесей, так как даже небольшие неучтенные концентрации неконденсирующихся примесей в рабочем объеме могут привести к серьезным ошибкам в изучении процесса.

В процессе экспериментальных исследований производили измерения следующих параметров: расход охлаждающей воды с помощью индивидуального ротаметра РС-5 с контрольной проверкой расхода объемным методом; температуру охлаждающей воды на входе и выходе рабочего или контрольного участка с помощью хромель-копелевых термопар; температуру стенки трубки десятью термопарами, зачеканенными по окружности в двух сечениях трубки; давление в емкости конденсатора с помощью датчика давления типа “Сапфир” и образцового манометра кл. 0.15; угол наклона рабочего участка к горизонту определялся с помощью катетометра В-630.

Каждый датчик имел индивидуальную тарировочную зависимость своих показаний от физических величин, которые он измерял. Все применяемые в измерениях датчики имели электрические выходные сигналы, что позволило осуществить автоматизированное проведение экспериментального исследования с применением измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) на базе IBM со-

вместимого компьютера. Для этого было разработано специальное устройство сопряжения компьютера и цифровых приборов. Работа ИВК осуществлялась по программам, написанным на языке Turbo Pascal. Программы выполняли несколько функций: тарировку датчиков, контроль изучаемого теплофизического процесса, измерение параметров в стационарном режиме и первичную обработку данных. Статистическая обработка опытных данных производилась на IBM-совместимом компьютере, с использованием систем управления базами данных.

Использованная методика проведения опытов позволила получить хорошо воспроизводимые результаты. Максимальная погрешность определения коэффициента теплоотдачи в экспериментах по конденсации не превышала $\pm 10\%$.

В третьей главе рассматриваются результаты экспериментальных исследований теплообмена при конденсации на наклонной гладкой трубе.

Целью данных исследований являлась проверка методики проведения эксперимента на наклонных трубах, сопоставление полученных данных с данными других авторов, а также исследование возможности использования озонобезопасного хладагента R227 в конденсаторах холодильных машин.

Первичная обработка экспериментальных данных по исследованию теплообмена при конденсации хладагента R227 представлена на рис. 2 в координатах $\alpha = f(\Delta T)$.

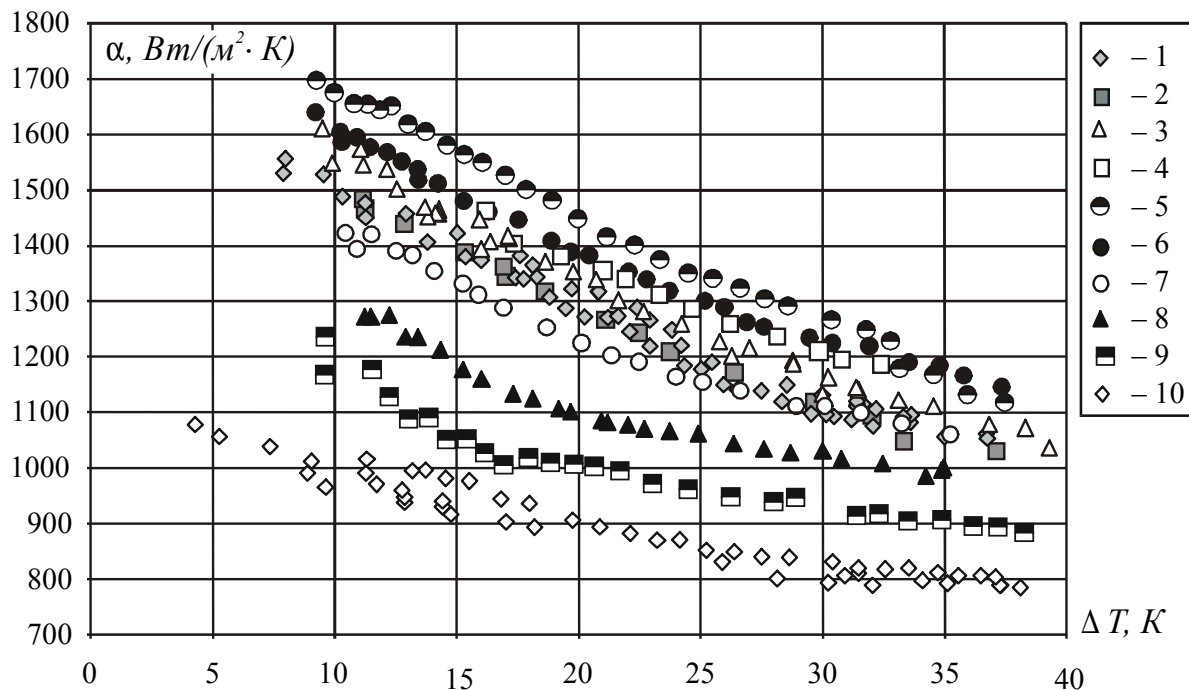


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации хладагента R227 от температурного напора при углах наклона:

1 – 0°; 2 – 10°; 3 – 20°; 4 – 30°; 5 – 40°; 6 – 50°; 7 – 60°; 8 – 70°; 9 – 80°; 10 – 90°.

Из графиков видно, что имеет место расслоение экспериментальных данных в зависимости от угла наклона рабочего участка.

Литературный обзор показал, что большинство авторов обрабатывали свои экспериментальные данные в координатах $\alpha_n/\alpha_z = f(\varphi)$. На рис. 3 представлена обработка экспериментальных данных в этих координатах. Из графиков видно, что коэффициент теплоотдачи практически остается постоянным в диапазоне изменения углов наклона трубы от 0 до 30°, дальнейшее увеличение угла наклона трубы приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи до его минимального значения, которое соответствует вертикальному расположению трубы. В ходе экспериментов было отмечено, что при углах наклона трубы к горизонту около 35-40° прекращается сток конденсата с трубы в виде отдельных струй, вся жидкость стекает в нижней части трубы. Это явление без заметного ухудшения теплообмена может исключить натекание конденсата на нижние трубы в кожухотрубчатом конденсаторе, что повышает интенсивность его работы.

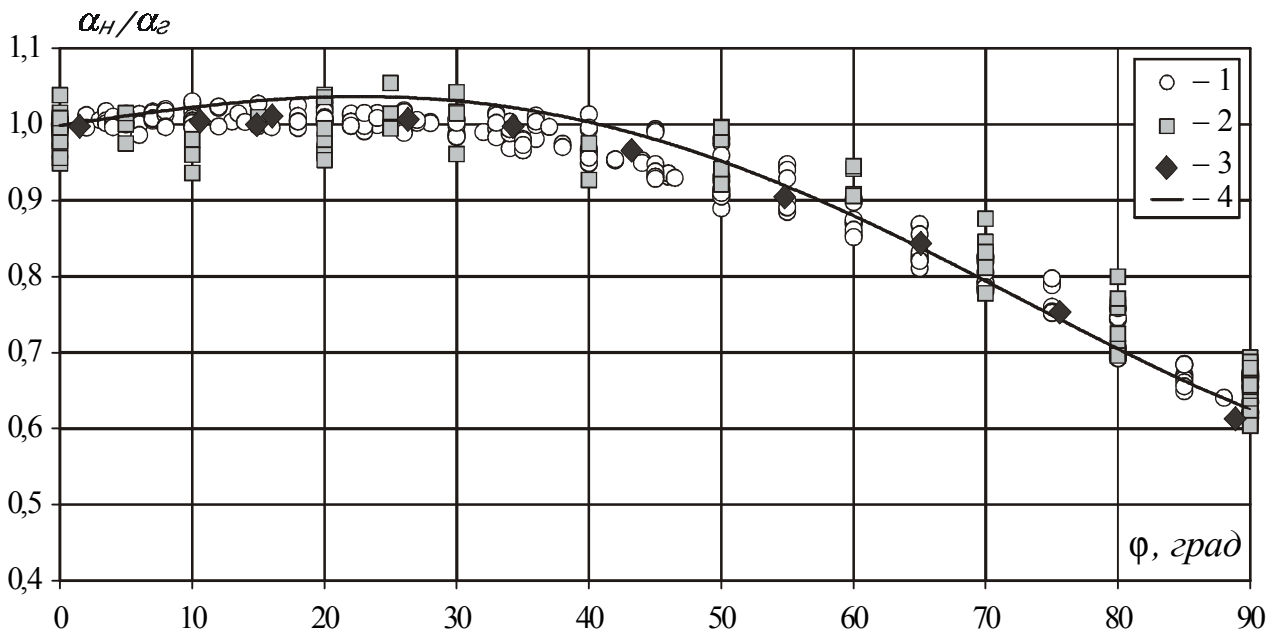


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от угла наклона:

1 — R 113; 2 — R 227; 3 — данные, полученные Бузником В.М.; 4 — расчет по уравнению (1)

Для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации на гладких наклонных трубах α_n и обобщения экспериментальных данных в координатах $\alpha_n/\alpha_z = f(\varphi)$ нами предложена зависимость:

$$\alpha_n = A_t \left[n \sqrt{\left(\frac{(\sin \varphi)^n}{L} \right) + \left(\frac{(\cos \varphi)^n}{\pi d} \right)} \right]^{1/4}, \quad (1)$$

где $A_t = 0,92 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r g}{\mu \Delta t}}$ — переменная, учитывающая влияние свойства вещества и температурного напора.

Данная зависимость в предельных случаях переходит в уравнение для горизонтальной трубы при $\varphi = 0^\circ$ $\sin \varphi = 0$ и, следовательно, $\alpha_n = \alpha_z$, для вертикальной трубы $\varphi = 90^\circ$ $\cos \varphi = 0$ и $\alpha_n = \alpha_v$.

При $n=3/4$, как видно из рис. 3, экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с рассчитанными по уравнению (1).

Для обобщения экспериментальных данных в координатах $Nu^* = f(Re^*)$ необходимо знать характерный геометрический размер, входящий в формулу расчета пленочного критерия Re^* . В доступных нам источниках не было обнаружено каких-либо рекомендаций по расчету характерного геометрического размера. В нашей работе для определения характерного геометрического размера гладкой наклонной трубы была предложена следующая зависимость

$$L_n = \left(\left(\frac{\sin \varphi}{\pi d} \right)^{4/3} + \left(\frac{\cos \varphi}{L} \right)^{4/3} \right)^{-3/4}, \quad (2)$$

полученная путем преобразования уравнения (1). Модифицированный критерий Нуссельта рассчитывался по уравнению:

$$Nu^* = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g(\cos \varphi + \sin \varphi)} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

На рис. 4 представлена обработка экспериментальных данных в этих координатах.

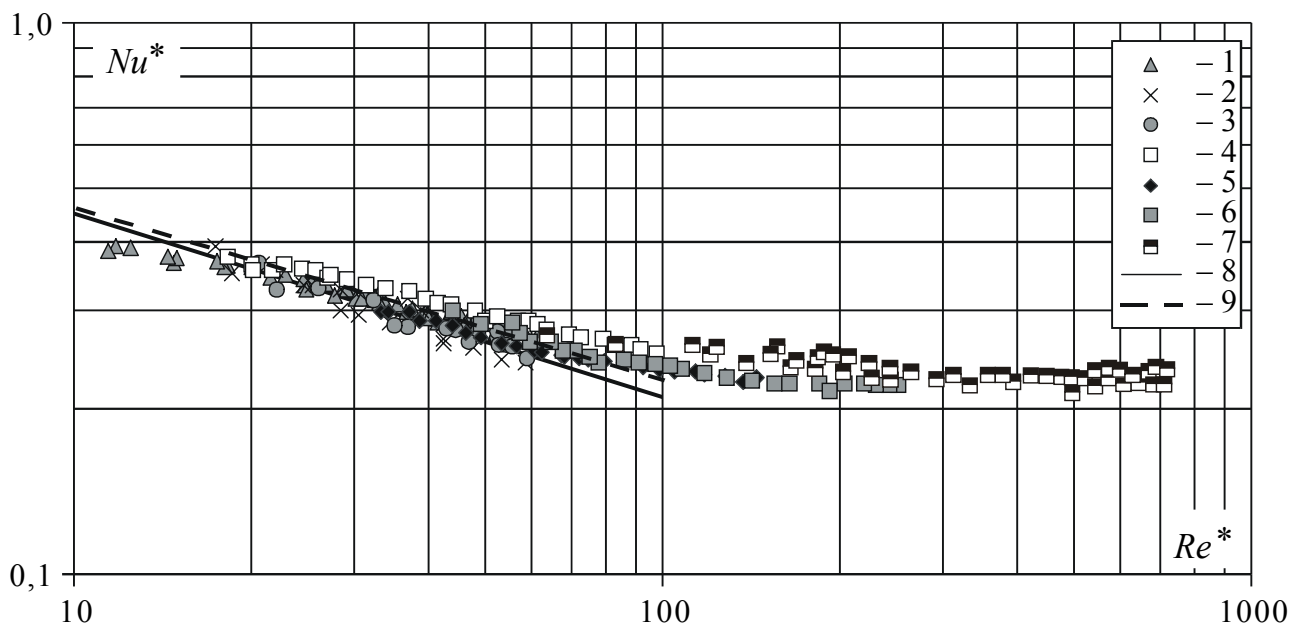


Рис. 4. Теплообмен при конденсации хладагента R227 на наклонной трубе при углах наклона: 1 – 0°; 2 – 10°; 3 – 30°; 4 – 50°; 5 – 70°; 6 – 80°; 7 – 90°; 8 – расчет по уравнению (4); 9 – линия, осредняющая экспериментальные данные Гогонина И.И., Дорохова А.Р., Сосунова В.И. по теплообмену при конденсации хладагента R12 на горизонтальном цилиндре

Из графиков видно, что при ламинарном течении пленки конденсата ($Re^* < 100$) экспериментальные данные удовлетворительно обобщаются зависимостью вида:

$$Nu^* = C Re^{-1/3} \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности C в нашем случае равен 0,97.

Представленные на графиках данные показывают, что во всем диапазоне изменения определяющих параметров закономерность теплообмена при конденсации не отличается от зависимости теплообмена традиционно применяемых в качестве теплоносителей хладонов. Таким образом, хладон R227 может быть использован в холодильных машинах. Полученная в результате исследований расчетная формула (1) позволила разработать методику расчета конденсатора с гладкими наклонными трубами.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований теплообмена при конденсации чистого насыщенного пара хладагona R227 на поверхности трубы, помещенной в зернистый слой, расположенной под произвольным углом к горизонту.

На рис. 5, 6 данные экспериментальных исследований представлены в координатах $\alpha = f(\Delta T)$ при условии одинаковых температур насыщения. Из графиков видно, что имеет место расслоение экспериментальных данных в зависимости от угла наклона трубы.

Для всех углов наклона можно выделить две зоны различного поведения α при увеличении ΔT . При малых значениях ΔT происходит рост α до некоторого максимального значения, после которого при дальнейшем увеличении ΔT происходит уменьшение коэффициента теплоотдачи. Можно отметить, что процесс теплообмена при конденсации на трубе с засыпкой идет более интенсивно, чем на гладкой трубе рис. 9, 10.

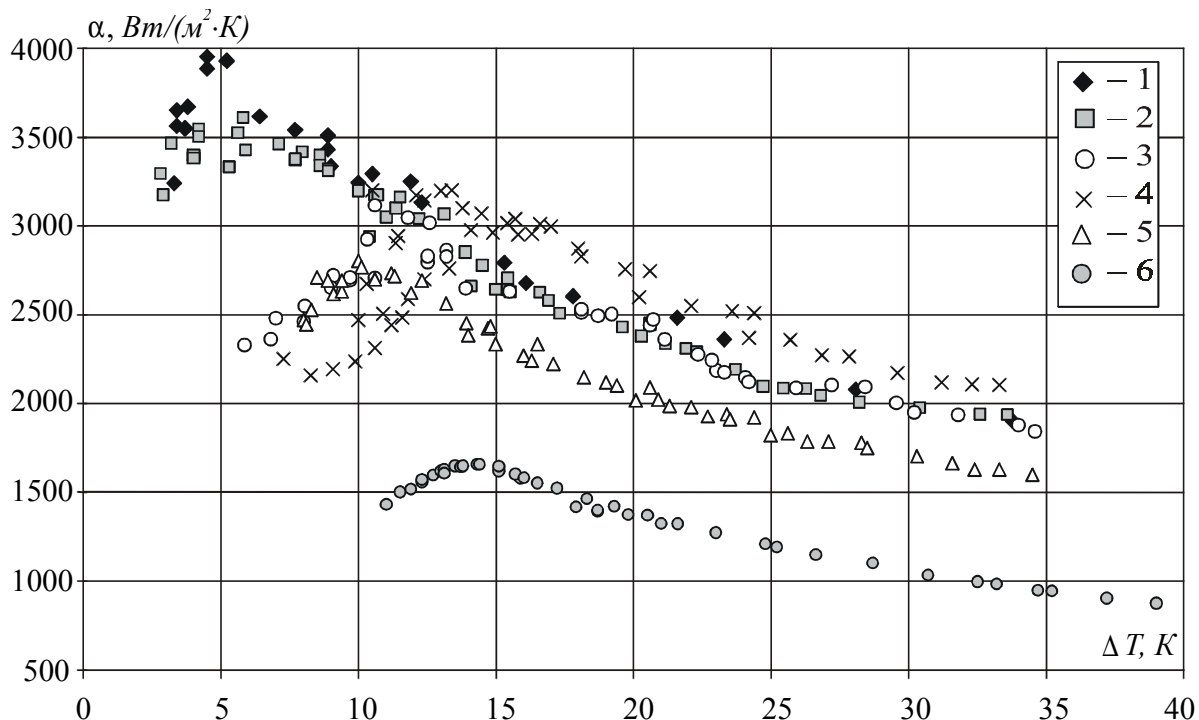


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации хладагona R227 от температурного напора для засыпки диаметром 0,8 мм при углах наклона: 1 – 0°; 2 – 10°; 3 – 30°; 4 – 50°; 5 – 70°; 6 – 90°

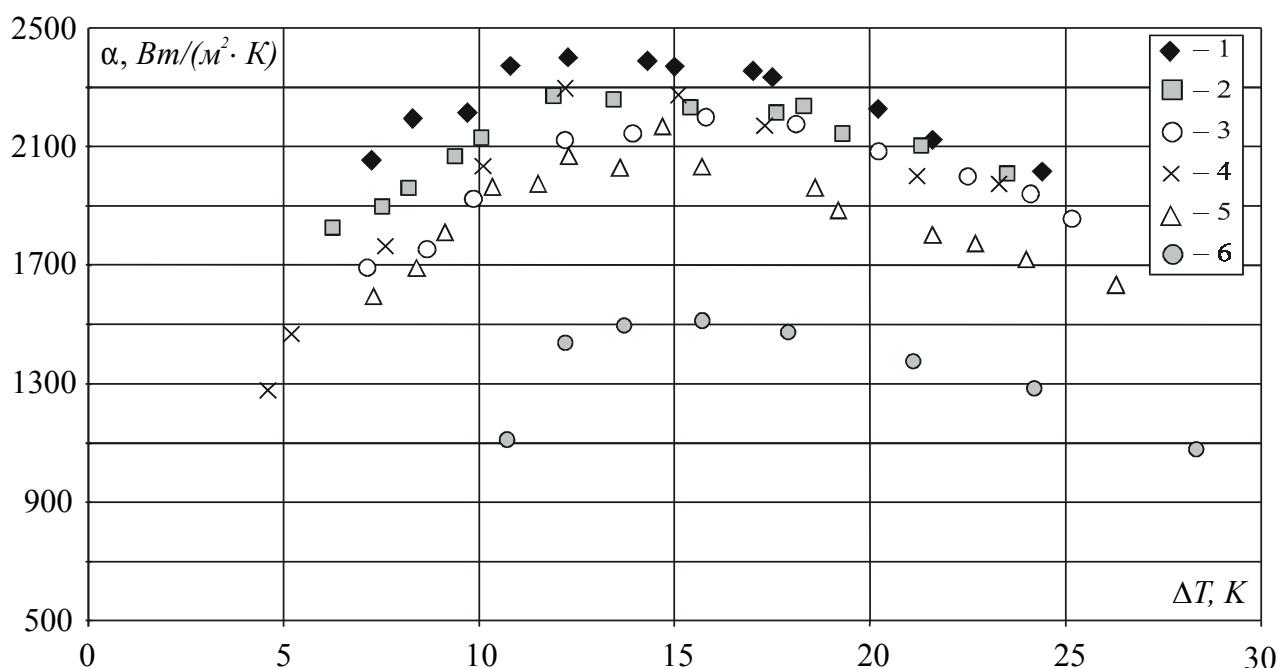


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации хладона R227 от температурного напора для засыпки диаметром 1,1 мм при углах наклона: 1 – 0° ; 2 – 10° ; 3 – 30° ; 4 – 50° ; 5 – 70° ; 6 – 90°

В экспериментальных работах Петрика П.Т., Богомолова А.Р., Афанасьева Ю.О. по исследованию процесса теплообмена при конденсации на трубах, помещенных в зернистый слой, было показано, что более высокие коэффициенты теплоотдачи для трубы с засыпкой, по сравнению с гладкой трубой, достигаются в результате отвода части конденсата от поверхности теплообмена.

Вышеупомянутые авторы предложили физическую модель теплообмена при пленочной конденсации насыщенного пара на вертикальном цилиндре в зернистом материале с учетом отвода конденсата. Одним из принятых допущений было постоянство скорости отвода засыпкой конденсата.

Из анализа графиков, представленных на рис. 5 и рис. 6, можно сделать предположение, что скорость отвода меняется с изменением температурного напора. Таким образом, существующие модели не позволяют нам оценить количество отводимого засыпкой конденсата при различных значениях ΔT .

При рассмотрении данной задачи мы исходили из того, что ввиду явления отвода, при конденсации на трубе с засыпкой образуются два потока конденсата: часть жидкости отводится от поверхности теплообмена, создавая радиальный поток, а другая часть конденсата остается на поверхности трубы, образуя пленку, и, следовательно, создает термическое сопротивление процессу.

Для оценки количества жидкости, отводимой засыпкой от поверхности теплообмена, представим общее количество сконденсировавшейся жидкости в виде суммы количества жидкости, отведенной засыпкой G_{om} , кг/(с·м²), и количества жидкости, остающейся на поверхности трубы $G_{ост}$, кг/(с·м²):

$$G = G_{om} + G_{ост} . \quad (5)$$

Общее количество конденсата можно рассчитать как отношение полного теплового потока к удельной теплоте парообразования:

$$G = q / r . \quad (6)$$

Для определения $G_{ост}$ предположили, что толщина пленки на трубе с засыпкой равна толщине пленки для гладкой трубы и рассчитывается по уравнению Нуссельта. Тогда количество конденсата на трубе равно:

$$G_{ост} = \alpha_{ост} \Delta T / r . \quad (7)$$

где $\alpha_{ост}$ – коэффициент теплоотдачи, рассчитанный по формуле Нуссельта.

Подставив уравнения (6) и (7) в уравнение (5), получим зависимость для определения G_{om} :

$$G_{om} = (q - \alpha_{ост} \Delta T) / r . \quad (8)$$

Характерный геометрический размер, входящий в формулу $\alpha_{ост}$, рассчитывался по уравнению (2).

На рис. 7, 8 данные экспериментальных исследований представлены в виде зависимости $G_{ост} = f(G_{om})$.

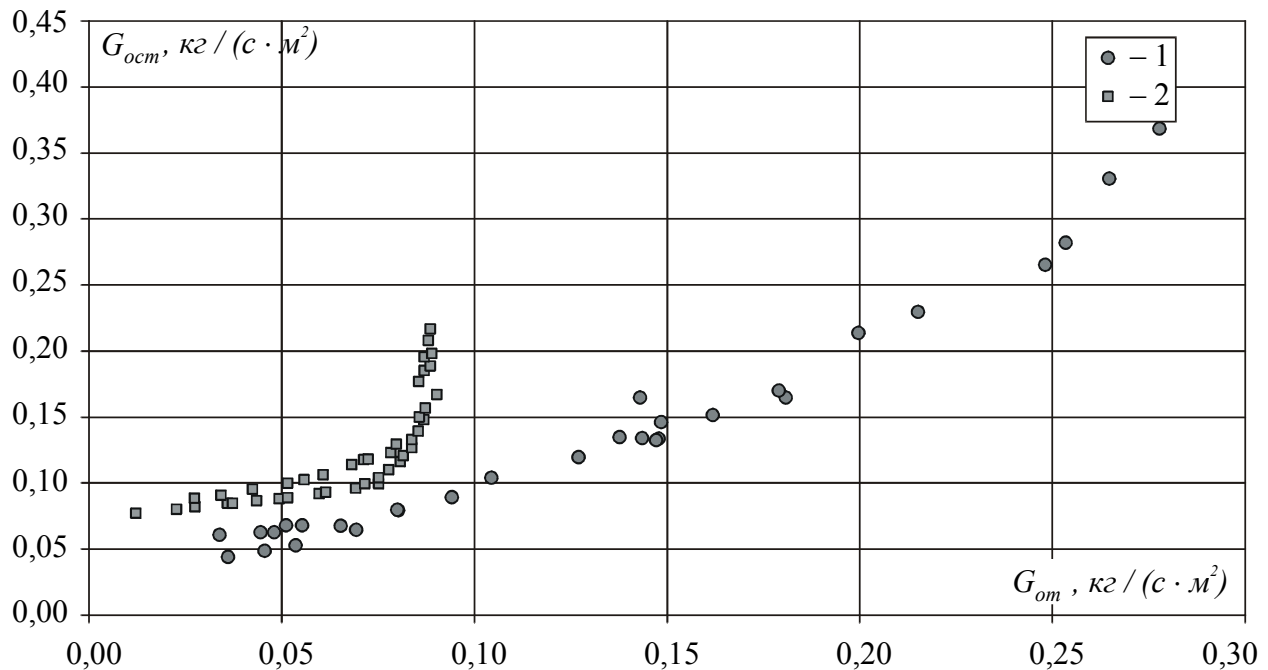


Рис. 7. Зависимость количества конденсата, оставшегося на поверхности трубы, от количества отведенного засыпкой конденсата для засыпки 0,8мм для углов наклона: 1 – 0°; 2 – 90 °

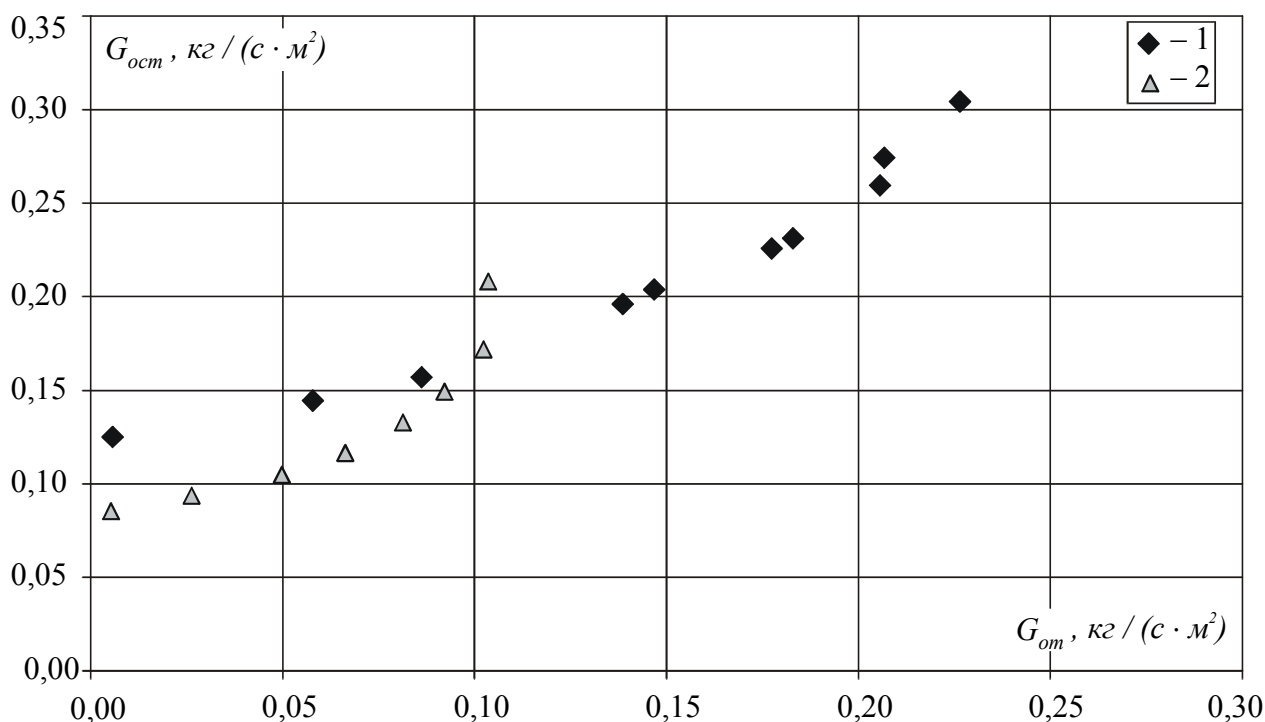


Рис. 8. Зависимость количества конденсата, оставшегося на поверхности трубы, от количества отведенного засыпкой конденсата для засыпки 1,1 мм для углов наклона: 1 – 0° ; 2 – 90°

Из графика видно, что для всех углов наклона можно выделить два режима отвода конденсата засыпкой. Вначале, до определенного значения, с ростом расхода конденсата количество отводимой засыпкой жидкости растет, при этом толщина пленки на поверхности трубы практически не изменяется. Дальнейшее увеличение расхода приводит к снижению интенсивности отвода конденсата и росту толщины пленки. Кроме того, видно, что интенсивность отвода зависит от угла наклона рабочего участка.

Изменение скорости отвода с увеличением температурного напора можно объяснить тем, что при небольших расходах конденсата размер частиц засыпки значительно превышает толщину пленки, и они почти не оказывают влияния на течение жидкости. При этом коэффициент теплоотдачи для трубы с засыпкой практически равен коэффициенту теплоотдачи для гладкой трубы. При достижении определенной толщины пленки начинается отвод конденсата засыпкой, в первую очередь это происходит в нижней части трубы, где скапливается основная часть конденсата, и пленка имеет большую толщину. Дальнейшее увеличение расхода приводит к росту поверхности трубы, на которой идет процесс отвода. В этом случае, как отмечалось при анализе графиков рис. 7, 8, толщина пленки конденсата практически не увеличивается. Данному режиму отвода соответствует восходящая ветвь графика $\alpha = f(\Delta T)$. Дальнейшее увеличение расхода приводит к снижению интенсивности отвода и росту пленки конденсата, при этом коэффициент теплоотдачи уменьшается.

Для обобщения экспериментальных данных в безразмерных координатах $Nu^* = f(Re^*)$ и определения влияния отвода на интенсивность тепло-

обмена необходимо знать характерный геометрический размер L_n , входящий в формулу расчета пленочного критерия Рейнольдса. В наших экспериментах для расчета L_n для трубы различной ориентации к горизонту мы использовали зависимость (2), полученную для гладкой трубы:

$$L_n = \left(\left(\frac{\sin \varphi}{\pi d} \right)^{4/3} + \left(\frac{\cos \varphi}{L} \right)^{4/3} \right)^{-3/4} . \quad (9)$$

Как отмечалось выше, только часть жидкости остается на поверхности теплообмена и образует пленку конденсата, поэтому в формулу расчета пленочного критерия Рейнольдса входит не полный тепловой поток q , а только его часть:

$$q_{ост} = \alpha_{ост} \Delta T , \quad (10)$$

где $q_{ост}$ – тепловой поток, выделяющийся при образовании пленки конденсата.

На рис.9, 10 представлена обработка экспериментальных данных в координатах $Nu^* = f(Re^*)$. Из графиков видно, что экспериментальные данные для области с постоянной скоростью роста пленки конденсата хорошо обобщаются зависимостью вида:

$$Nu^* = A \cdot Re^{-n} , \quad (11)$$

где A и n – эмпирические константы.

При обработке наших экспериментальных данных для обеих засыпок получены значения $A=5$, $n=1/2$.

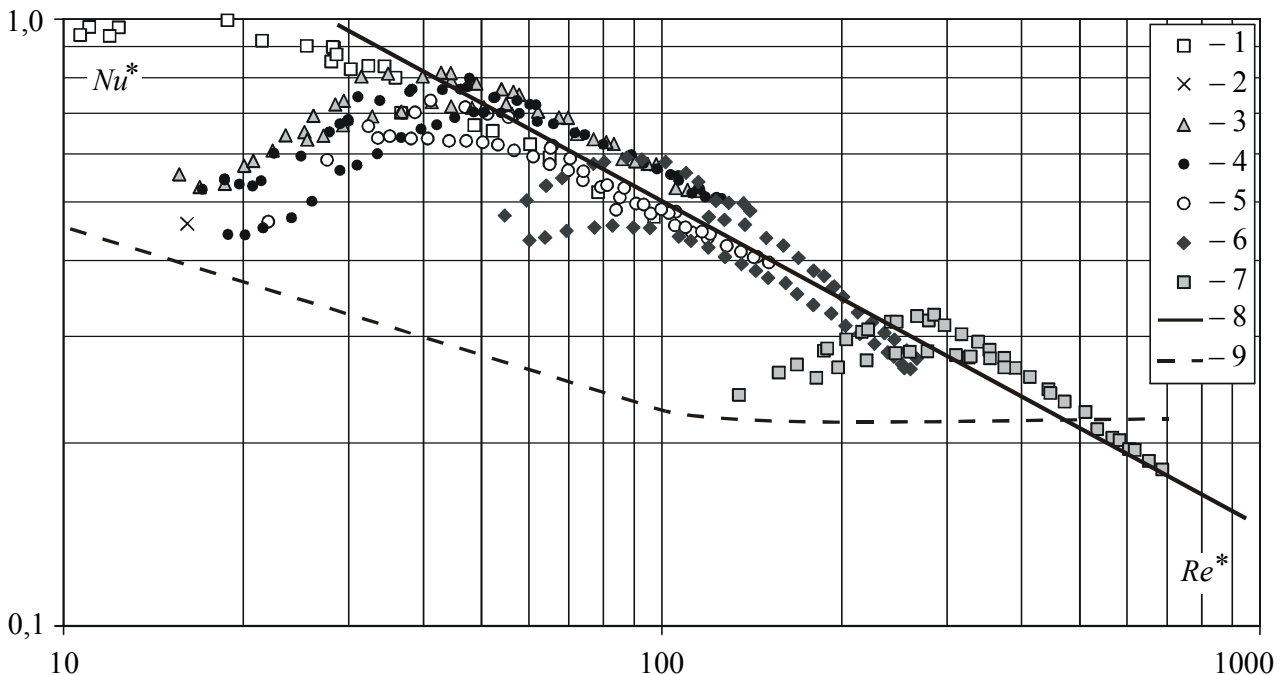


Рис. 9. Зависимость критерия Nu^* от числа Re^* для засыпки 0,8 мм для углов наклона: 1 – 0° ; 2 – 20° ; 3 – 30° ; 4 – 40° ; 5 – 60° ; 6 – 80° ; 7 – 90° ; 8 – расчет по уравнению (11); 9 – данные, полученные автором на гладкой наклонной трубе

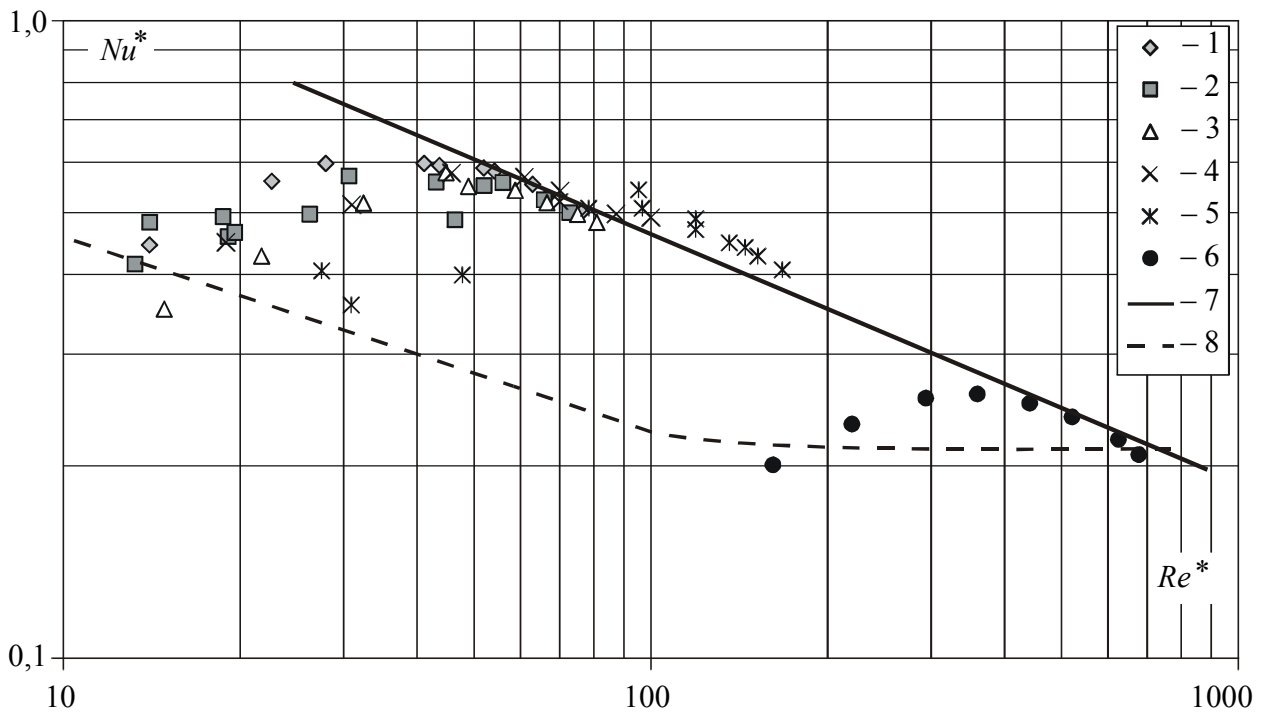


Рис. 10. Зависимость критерия Nu^* от числа Re^* для засыпки 1,1 мм для углов наклона: 1 – 0° ; 2 – 20° ; 3 – 30° ; 4 – 40° ; 5 – 60° ; 6 – 90° ; 7 – расчет по уравнению (11); 8 – данные, полученные автором на гладкой наклонной трубе

Как отмечалось ранее, при отношениях толщины пленки к диаметру частицы $\delta/d_q \ll 1$ соблюдается закономерность аналогичная закономерности теплообмена при конденсации на гладких поверхностях; при отношениях $\delta/d_q \gg 1$ закономерность теплообмена описывается зависимостью В.Е. Накорякова. При этом показатель степени при числе Рейнольдса изменяется от $n=1/3$ при $\delta/d_q \ll 1$, до 1 при $\delta/d_q \gg 1$. В экспериментах при использовании засыпки из шариков 0,8 и 1,1 мм, по нашим оценкам, толщина пленки достигает диаметра частицы. То есть соотношение δ/d_q таково, что частицы слоя начинают оказывать влияние на гидродинамику течения пленки конденсата (поэтому $n > 1/3$), но не настолько, чтобы можно было полагать, что течение носит фильтрационный характер, при котором $n=1$.

На рис. 11 результаты экспериментальных исследований представлены в виде зависимости $\alpha_n/\alpha_c = f(\varphi)$ при $\Delta T = idem$.

Из графика видно, что коэффициент теплоотдачи практически не изменяется в диапазоне углов от 0 до 40° , при больших углах наклона рабочего участка происходит снижение коэффициента теплоотдачи.

Кроме того, можно отметить, что для зернистого слоя 0,8 мм при угле наклона 30° величина коэффициента теплоотдачи имеет максимальное значение.

Полученные в результате исследований расчетные формулы позволили разработать методику расчета конденсатора с трубами, помещенными в зернистый слой.

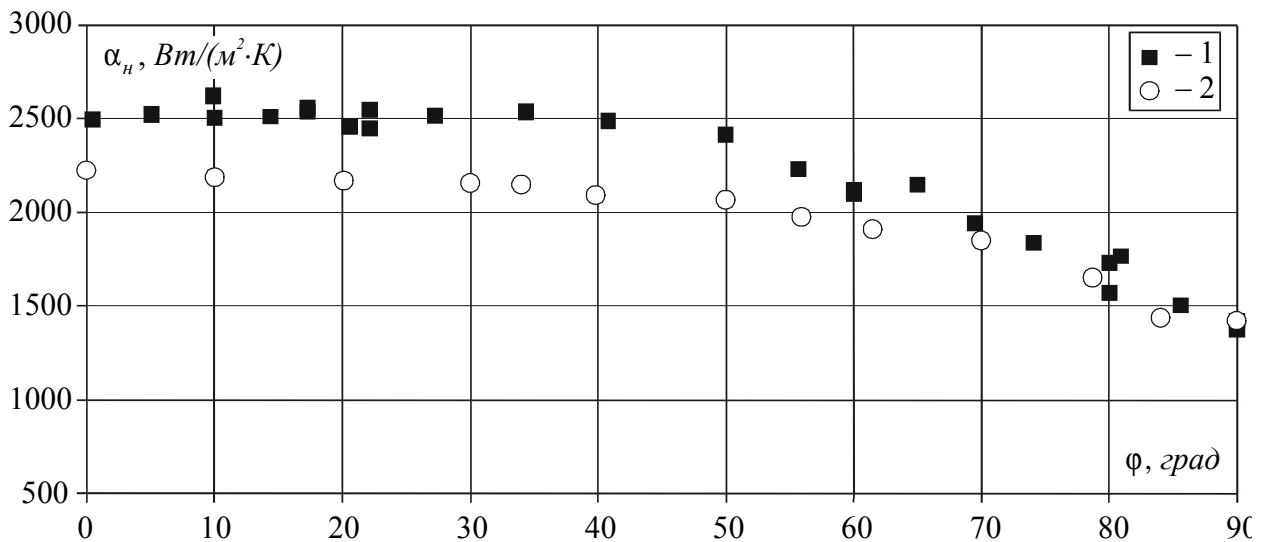


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от угла наклона трубы при $\Delta T = 20^\circ\text{C}$
1 – шарики $d=0,8$ мм; 2 – шарики $d=1,1$ мм

Выводы:

1. Разработана методика и экспериментальное оборудование для проведения экспериментальных исследований теплообмена при конденсации на трубах различной ориентации, помещенных в зернистый слой.
2. Впервые выполнены экспериментальные исследования по теплообмену при конденсации неподвижного пара хладона R227 на гладкой трубе и трубе, помещенной в зернистый слой, расположенной под различным углом наклона к горизонту, в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Показано, что хладон R227 может быть использован как рабочее вещество в конденсаторах холодильных машин.
3. Получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при конденсации на трубе, расположенной под различным углом наклона к горизонту.
4. Получена зависимость для обобщения экспериментальных данных по конденсации на трубах различной ориентации в безразмерных координатах $Nu^* = f(Re^*)$.
5. Получена зависимость для расчета количества жидкости, отводимой засыпкой от поверхности теплообмена, при конденсации на трубе, помещенной в зернистый слой.
6. На основании выполненных исследований предложена методика расчета конденсатора с гладкими наклонными трубами и трубами, помещенными в зернистый слой, интенсифицирующего теплообмен.

Обозначения

d, L – диаметр и длина рабочего участка, м; $d_{\text{ч}}$ – диаметр частицы слоя, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; ΔT – разность температур стенки трубы и пара рабочего вещества, К; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); φ – угол наклона трубы, °; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; $Re^* = q L_{\text{н}} / (r\mu)$ – пленочный критерий Рейнольдса.

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в работах:

1. Петрик П.Т., Дворовенко И.В., Дадонов П.В., Петрик И.П., Каськов А.А., Якутин К.В. Теплообмен в пристенной зоне при фильтрации через зернистый слой // Вестн. КузГТУ. – 1997. – №1. – с.83-86.
2. Петрик П.Т., Дворовенко И.В., Дадонов П.В., Гуцал К.В., Азиханов С.С. Гидродинамика при фильтрации жидкости в зернистый слой от вертикальной трубы // Вестн. КузГТУ, 1998. – №1. – с. 29-31.
3. Петрик П.Т., Богомолов А.Р., Дворовенко И.В., Дадонов П.В., Теплообмен при конденсации хладагента R227 и R113 на наклонных трубах // Вестн. КузГТУ, 2000. – №6. – с. 12-13.
4. Петрик П.Т., Богомолов А.Р., Дворовенко И.В., Дадонов П.В. Теплообмен при конденсации R227 на трубах, помещенных в зернистый слой. // Вестн. КузГТУ, 2001. – №1. – с. 11-13.
5. Петрик П.Т., Дадонов П.В., Дворовенко И.В., Богомолов А.Р. Исследование теплообмена при конденсации фреонов на наклонной гладкой трубе // Вестн. международной академии холода, 2001. – №3. – с.33-34.
6. Дадонов П.В. Теплообмен при конденсации перфтората R236 на гладких трубах // Тезисы VI Всероссийской конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г.Новосибирск, 2000г. – с.138-139.