

На правах рукописи



ДОЛЖИКОВ АНТОН СЕРГЕЕВИЧ

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАБОЧИХ
ТЕЛ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2017

Работа выполнена на кафедре низких температур федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель: **Могорычный Владимир Иванович**
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры низких температур ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**Официальные
оппоненты:**

Семенов Виктор Юрьевич
доктор технических наук, начальник лаборатории криогенных технологий, безопасности и процессов разделения газов ПАО «Криогенмаш»

Гончарова Галина Юрьевна
доктор технических наук, профессор кафедры холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация: ООО «Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий — ВНИИГАЗ»

Защита диссертации состоится 16 февраля 2018 г. в 11 часов 45 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, корпус Т, ауд. Т-209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и на сайте [www. mpei.ru](http://www.mpei.ru).

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах) с подписями, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.17, Ученый совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.04
к.т.н.



А.К. Ястребов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последние годы наблюдается возрастание интереса к использованию многокомпонентных рабочих тел в низкотемпературных установках. Это связано во многом с запретом на использование ряда хладагентов, подпадающих под действие Монреальского и Киотского протоколов, и активным поиском веществ, способных их заменить. А также тем фактом, что во многих случаях использование смесей позволяет повысить энергетическую эффективность низкотемпературных систем. Однако, расчет рекуперативного теплообменника таких систем опирается, главным образом, на эмпирические зависимости, которые не позволяют разработать оптимальную конструкцию теплообменника. Отчасти это связано с тем, что процесс кипения смесей недостаточно изучен, вследствие чего на данный момент отсутствуют соотношения, позволяющие прогнозировать коэффициент теплоотдачи в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел. Недостаток подробных экспериментальных данных по коэффициенту теплоотдачи при кипении смесей, ставит вопрос о необходимости проведения опытов и расширения базы экспериментальных данных.

Цели и задачи

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию теплообмена в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературных установках, при их вынужденном течении в горизонтальной обогреваемой трубе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Проектирование и монтаж экспериментального стенда для исследования теплообмена в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел;
- Апробация методики определения коэффициента теплоотдачи при кипении смесей;
- Проведение серии экспериментов по исследованию теплообмена в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел;
- Обработка и анализ полученных экспериментальных данных.

Научная новизна работы

Получены новые экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении многокомпонентных смесей: углеводородных (метан, этилен, пропан, изобутан) и фреоновых (R-14, R-23, R-22, R-236fa), при их вынужденном течении в горизонтальной обогреваемой трубе.

Практическая ценность работы

Предполагается, что полученные экспериментальные данные помогут лучше понять механизмы теплоотдачи в двухфазных системах. Эти результаты могут

быть использованы для проверки существующих соотношений, либо послужить основой для создания новых, путем включения в них эмпирических констант.

Достоверность результатов работы

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов диссертационной работы обеспечивается и подтверждается:

- Тщательной проработкой методов измерения, использованием дублирующих методов измерения, результатами анализа погрешностей измерений;
- Своевременной поверкой используемой аппаратуры, предварительной тарировкой всех используемых первичных датчиков;
- Системой автоматического сбора информации, которая позволяет быстро и надежно снимать большое количество первичных измерений;
- Воспроизводимостью результатов эксперимента и согласованностью их с имеющимися в литературе данными, полученными в близких условиях.

Положения, выносимые на защиту

1. Конструкция экспериментального стенда и методика определения коэффициента теплоотдачи при кипении многокомпонентных смесей;
2. Результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении многокомпонентных смесей: углеводородных (метан, этилен, пропан, изобутан) и фреоновых (R-14, R-23, R-22, R-236fa), при их вынужденном течении в горизонтальной обогреваемой трубе.

Личный вклад автора

Автором диссертации создан экспериментальный стенд с автоматизированной системой сбора и обработки информации, предназначенный для исследования теплообмена в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел при их вынужденном течении в трубе. Проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении углеводородных и фреоновых смесей для условий вынужденного течения в горизонтальной трубе. Выполнена обработка полученных экспериментальных данных и произведено их сравнение с расчетными значениями, полученными из различных соотношений.

Публикации

Основные результаты и положения диссертационной работы изложены в 7 публикациях, из них 2 в рецензируемых журналах из списка ВАК, 5 работ в сборниках трудов и тезисов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация общим объемом 110 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка цитируемых источников и приложений. Список цитируемых источников составляет 79 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели, выделены научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен обзор современного состояния исследований по тематике диссертационной работы. Раздел 1.1 посвящен количественным характеристикам, используемым для описания двухфазных потоков. В разделе 1.2 приведен обзор результатов работ других авторов по исследованию теплообмена при кипении многокомпонентных смесей. Отмечено, что на данный момент существует мало работ, посвященных данной тематике. Раздел 1.3 посвящен описанию существующих соотношений, позволяющих прогнозировать коэффициент теплоотдачи (КТО) при кипении многокомпонентных рабочих тел. В конце главы приведены выводы.

Во второй главе представлено описание методики проведения исследований и подробная конструкция экспериментального стенда, используемого для определения коэффициента теплоотдачи при кипении многокомпонентных смесей. Кроме того, приводится описание процедуры поверки установки и анализ неопределенностей эксперимента.

Для получения экспериментальных данных автором работы создан экспериментальный стенд, построенный на базе дроссельной холодильной машины. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Основными частями установки являются компрессорный блок и низкотемпературная камера. Компрессорный блок состоит из компрессора, сжимающего поток рабочего тела; маслоотделителя, возвращающего масло обратно в компрессор из потока рабочего тела; конденсатора, охлаждающего поток рабочего тела перед входом его в низкотемпературную камеру. Перед входом в компрессор установлен участок измерения расхода. Измерение состава смеси производится хроматографом.

Низкотемпературная камера представляет собой холодильный ларь. Внутри него установлены следующие элементы: рекуперативный теплообменник, в котором осуществляется регенерация холода: обратный поток охлаждает прямой, тем самым улучшая энергетические характеристики цикла; дроссель, на котором снижается давление и, соответственно, происходит охлаждение потока рабочего тела; нагреватель, с помощью которого регулируется температура потока перед входом в экспериментальный участок; экспериментальный участок, где происходит измерение КТО; испаритель, служащий для поддержания низкой температуры в камере, что позволяет уменьшить теплопритоки к экспериментальному участку. Все элементы установки, расположенные в низкотемпературной камере, находятся в изоляции из вспененного каучука. Установка снабжена системой автоматического сбора информации, позволяющей сразу сохранять экспериментальные данные на компьютере. В зависимости от состава смеси и необходимого температурного уровня, время выхода установки на режим составляет 60 – 90 мин.

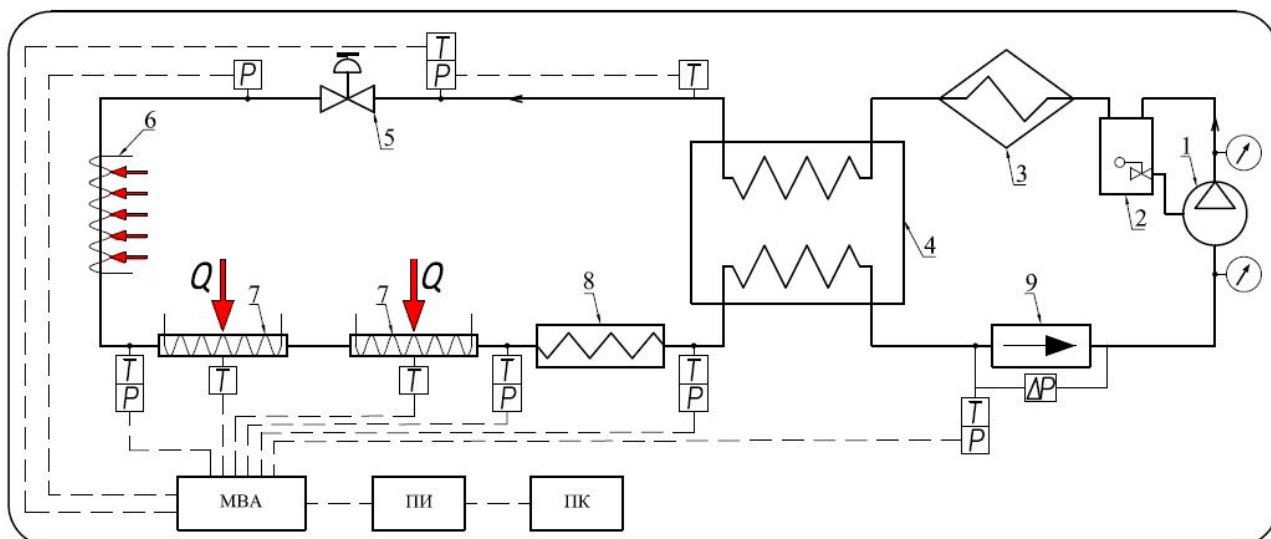


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – компрессор; 2 – маслоотделитель; 3 – конденсатор; 4 - рекуперативный теплообменник; 5 – дроссель; 6 – нагреватель; 7 – экспериментальный участок; 8 – испаритель; 9 – участок измерения расхода; МВА – модуль ввода аналоговый; ПИ – преобразователь интерфейса; ПК – компьютер; Т – датчик температуры; Р – датчик давления; ΔP – датчик перепада давления

Методика определения коэффициента теплоотдачи заключается в том, что к экспериментальному участку определенной геометрии подводится заданное количество тепла, измеряя распределение температур в радиальном направлении и температуру потока рабочего тела, из соотношения Ньютона-Рихмана можно определить значение КТО.

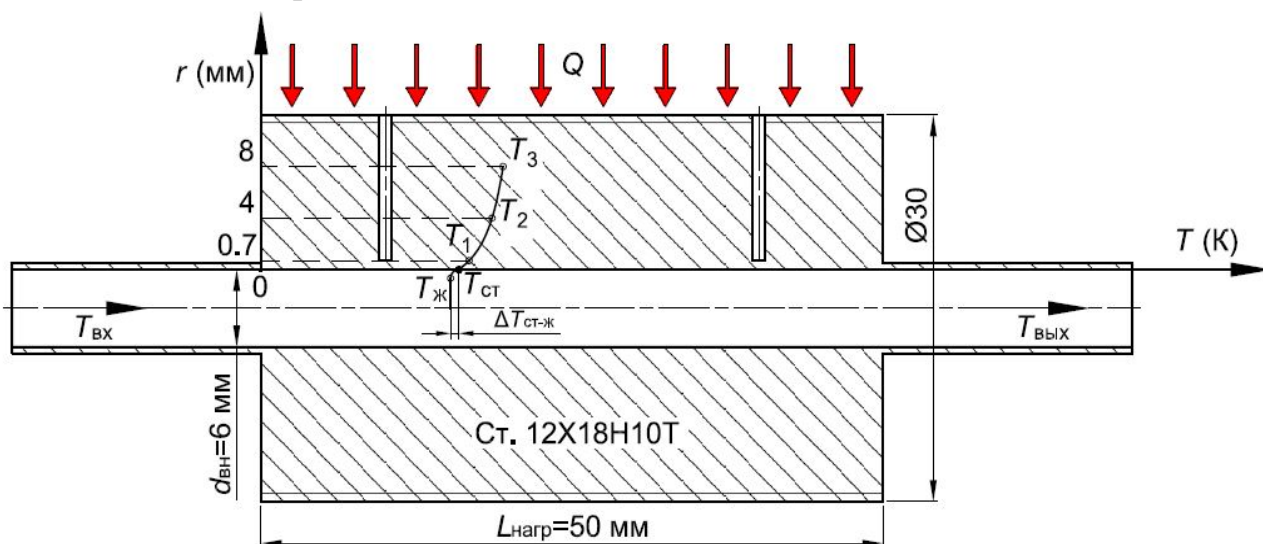


Рис. 2. Методика определения коэффициента теплоотдачи:

r – радиус; $T_{вх}$ – температура потока на входе; $T_{вых}$ – температура потока на выходе; $T_{ж}$ – среднее значение температуры потока; T_1, T_2, T_3 – измеренные значения температур, используемые для получения экстраполированного значения температуры стенки; $T_{ст}$ – температура стенки; $\Delta T_{ст-ж}$ – разница температур между поверхностью стенки и потоком

Аналитическое выражение для определения КТО имеет вид:

$$\alpha_{\text{эксп}} = \frac{Q_{\text{подв}}}{F \Delta T_{\text{ср}}}; \quad (1)$$

$$F = \pi d_{\text{вн}} L_{\text{наг}}; \quad (2)$$

$$\Delta T_{\text{ср}} = \frac{\Delta T_{\text{ст-вх}} + \Delta T_{\text{ст-вых}}}{2}; \quad (3)$$

$$\Delta T_{\text{ст-вх}} = T_{\text{ст}} - T_{\text{вх}}; \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{ст-вых}} = T_{\text{ст}} - T_{\text{вых}}; \quad (5)$$

$$Q_{\text{эл}} = UI; \quad (6)$$

$$Q_{\text{подв}} = Q_{\text{эл}} + Q_{\text{тп}}, \quad (7)$$

где F – площадь внутренней поверхности обогреваемого блока; $d_{\text{вн}}$ и $L_{\text{наг}}$ – внутренний диаметр и длина обогреваемого блока, соответственно; $\Delta T_{\text{ср}}$ – средний температурный напор; $\Delta T_{\text{ст-вх}}$ и $\Delta T_{\text{ст-вых}}$ – перепад температур между потоком рабочего тела и стенкой обогреваемого блока на входе и выходе из него, соответственно; $Q_{\text{эл}}$ – тепловая мощность, выделяющаяся при прохождении электрического тока по проводнику; U и I – значения напряжения и тока, соответственно; $Q_{\text{подв}}$ – количество тепла, подводимого к потоку рабочего тела; $Q_{\text{тп}}$ – теплопритоки к экспериментальному участку. Температура потока на входе и выходе экспериментального участка измеряется хромель-копелевыми термопарами. Кроме того, произведено дублирование измерения температуры потока с помощью платиновых термометров сопротивления, установленных в специальных пазах коннектора. Значение температуры стенки обогреваемого блока определяется из выражения (8), полученного из уравнения теплопередачи для цилиндрической стенки, путем экстраполяции измеренного распределения температур в радиальном направлении стенки нагревателя.

$$T_{\text{ст}} = \frac{T_1 - T_3 \frac{\ln \frac{r_1}{r_{\text{ст}}}}{\ln \frac{r_3}{r_{\text{ст}}}}}{1 - \frac{\ln \frac{r_1}{r_{\text{ст}}}}{\ln \frac{r_3}{r_{\text{ст}}}}}, \quad (8)$$

где r_1 , r_3 и $r_{\text{ст}}$ – радиус положения термопар 1, 3 и стенки относительно продольной оси обогреваемого блока соответственно. Аналогичные выражения для определения температуры стенки можно записать через показания термопар 1,2 и 2,3 соответственно. Это позволяет повысить точность нахождения определяемой величины.

Экспериментальный участок (рисунок 3) состоит из двух одинаковых, соединенных вместе, обогреваемых блоков (для повышения достоверности экспериментальных данных). Каждый обогреваемый блок представляет собой толстостенный цилиндр из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, длиной 50 мм и диаметром 30 мм. Для удобства наматывания манганиновой проволоки на наружной поверхности блока имеется резьба, в пазах которой укладывается провод. Для прохождения потока рабочего тела в нем предусмотрено сквозное отверстие диаметром 6 мм. В толстостенной части цилиндра, с отступом 10 мм от каждого края, в радиальном направлении просверлены три отверстия диаметром 1 мм каждое, для установки хромель-копелевых термопар.

Все первичные средства измерения (термопары, ПТС, датчики давления и перепада давления) прошли поверку и градуировку. Кроме того, была произведена проверка теплового баланса экспериментального участка как при температуре окружающей среды, так и при низких температурах (вплоть до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Далее производились тестовые измерения КТО при течении газообразного азота (при температуре окружающей среды) и фреона R-22 ($T = -29\text{ }^{\circ}\text{C}$). Измеренные значения КТО хорошо согласуются с экспериментальными данными других авторов и расчетными значениями, полученными с использованием различных соотношений. Оценка неопределенности измерений показала, что она не превышает 25 % для всех полученных экспериментальных данных. В конце главы приведены выводы.

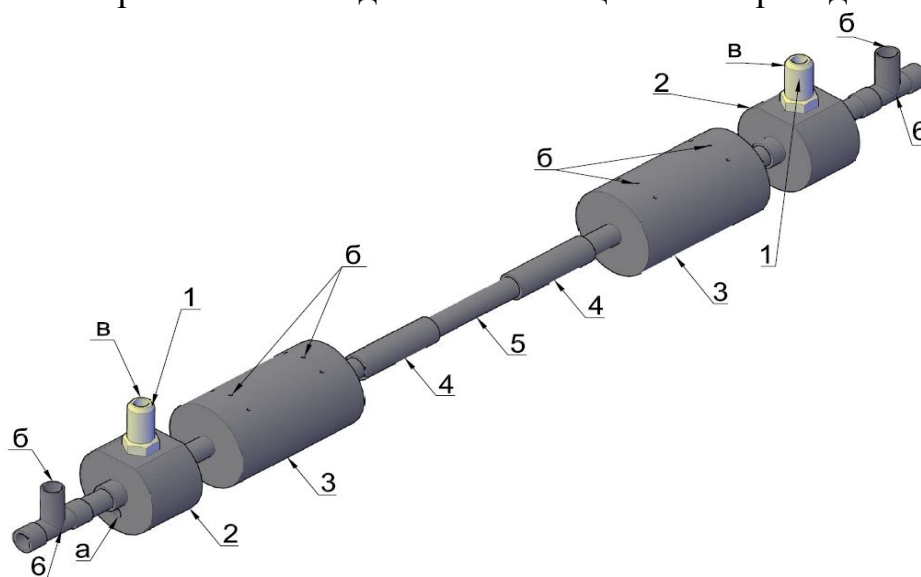


Рис. 3. Общий вид экспериментального участка

1 – штуцер; 2 – коннектор; 3 – обогреваемый блок; 4 – муфта; 5 – трубка; 6 – тройник; места установки: а - ПТС; б - термопары; в - датчики давления

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении многокомпонентных рабочих тел.

Получено достаточно большое количество (более 100 точек) экспериментальных данных при кипении в горизонтальной трубе диаметром 6 мм потоков зеотропных смесей (углеводородных и фреоновых) с большими температурными гландами. Эти данные приведены в виде графиков зависимостей КТО от средней температуры потока и балансового паросодержания. В таблице 1 приведены параметры потока исследуемых смесей.

Таблица 1. Параметры потока исследуемых смесей

№	Смесь	Состав моль	P кПа	j кг/м ² с	q кВт/м ²	$d_{\text{вн}}$ мм	$T_{\text{кип}}$ К	$T_{\text{рос}}$ К
1	CH ₄ /C ₂ H ₄ /C ₃ H ₈	0,45/0,35/0,2	370	105	12	6	139	226
2	CH ₄ /C ₂ H ₄ /C ₃ H ₈ /C ₄ H ₁₀	0,4/0,2/0,2/0,2	350	130	12	6	138	259
3	R14/R23/R22/R236fa	0,4/0,2/0,2/0,2	370	320	12	6	170	266
4	R14/R23/R236fa	0,4/0,3/0,3	360	280	12	6	168	273

В опыте №1 проводилось исследование углеводородной смеси: метана, этилена и пропана, с мольными долями 0,45, 0,35 и 0,2 соответственно. Была проведена серия экспериментов с данным составом смеси, результаты которых представлены на рисунках 4 и 5 в зависимости от средней температуры потока рабочего тела и балансового паросодержания. Неопределенность полученных экспериментальных данных в данном опыте не превышала 23 %. Кроме того, на этих рисунках представлены экспериментальные данные Barraza по кипению смеси $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ (0,45/0,35/0,2 моль). Исследуемая смесь и смесь в эксперименте Barraza имеют несколько различный состав, кроме того, опыты проводились при различающихся параметрах потока, однако, наблюдается качественное совпадение в поведении КТО. Более подробная информация о параметрах экспериментов представлена в таблице 2.

Таблица 2. Параметры потока в опыте №1

Автор	Смесь	Состав моль	$d_{\text{вн}}$, мм	$P_{\text{кип}}$, кПа	j , кг/м ² с	q , кВт/м ²
Barraza	$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$	0,45/0,35/0,2	3	790	147	40
Должиков	$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_3\text{H}_8$	0,45/0,35/0,2	6	370	105	12

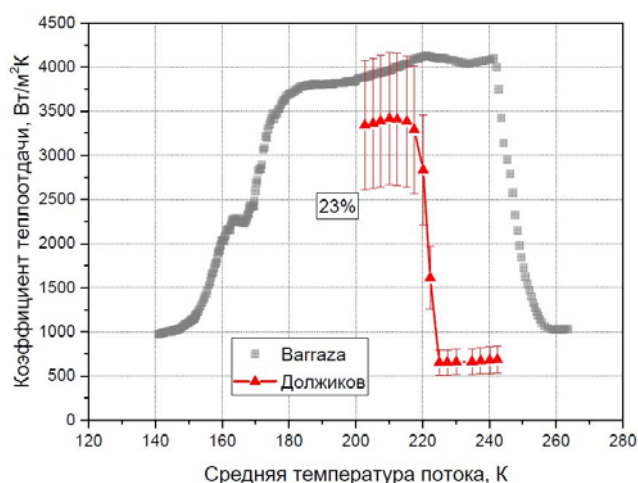


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи от средней температуры потока

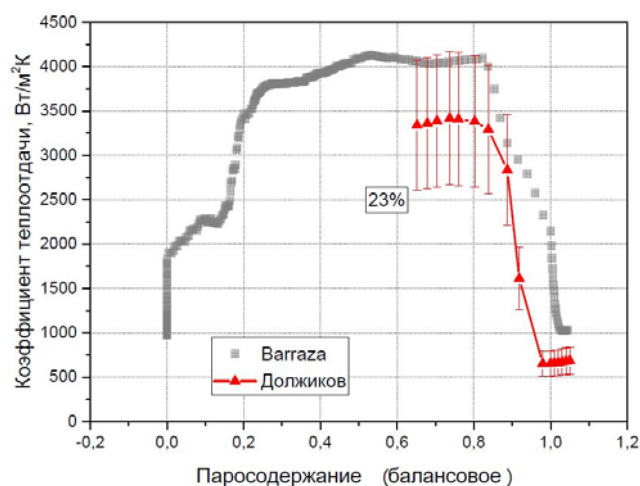


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от балансового паросодержания

КТО в опыте №1 автора работы несколько ниже чем в опыте Barraza. Это связано с тем, что в первом случае диаметр канала экспериментального участка 6 мм, а во втором — 3 мм. Также в опыте №1 автора работы несколько меньшая плотность потока массы и теплового потока, что также сказывается на величине КТО. Еще можно отметить различие давлений кипения, при которых производились измерения, что сказывается на том, что кривая КТО автора работы несколько смещена влево, по сравнению с результатами Barraza. В остальном же наблюдается хорошее качественное совпадение экспериментальных данных обоих авторов. В обоих случаях можно увидеть так называемую “п-образную” кривую, характерную для процесса кипения многокомпонентных рабочих тел. В начале наблюдается резкий скачок КТО, связанный с переходом преобладающего механизма теплоотдачи с конвекции

на кипение. Затем наблюдается площадка, на которой значение КТО более-менее постоянно. И в конце происходит резкое снижение КТО, связанное с тем, что пар начинает контактировать со стенкой канала. К сожалению, в связи с конструктивными особенностями экспериментальной установки, не удалось получить полную (во всем диапазоне температур кипения) кривую изменения КТО, тем не менее имеющиеся результаты несут в себе ценную информацию.

Следующее исследуемое рабочее тело — это смесь углеводородов: метана, этилена, пропана и изобутана, с мольными долями 0,4, 0,2, 0,2 и 0,2 соответственно. Была проведена серия экспериментов с данным составом смеси, результаты которых представлены на рисунках 6 и 7. Неопределенность полученных экспериментальных данных в опыте №2 не превышала 20 %. Кроме того, на этих рисунках представлены экспериментальные данные Barraza по кипению смеси $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ (0,45/0,35/0,2 моль). Исследуемая смесь в опыте №2 и смесь в эксперименте Barraza имеют несколько различный состав, кроме того, опыты проводились при различающихся параметрах потока, однако, наблюдается качественное совпадение в поведении КТО. Более подробная информация о параметрах экспериментов представлена в таблице 3.

Таблица 3. Параметры потока в опыте №2

Автор	Смесь	Состав моль	$d_{\text{вн}}$, мм	$P_{\text{кipp}}$, кПа	j , кг/м ² с	q , кВт/м ²
Barraza	$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$	0,45/0,35/0,2	3	790	147	40
Должиков	$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8/(\text{CH}_3)_3\text{CH}$	0,4/0,2/0,2/0,2	6	350	130	12

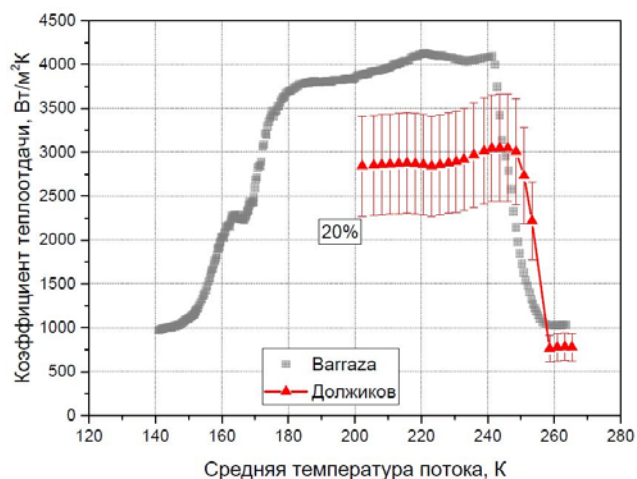


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи от средней температуры потока

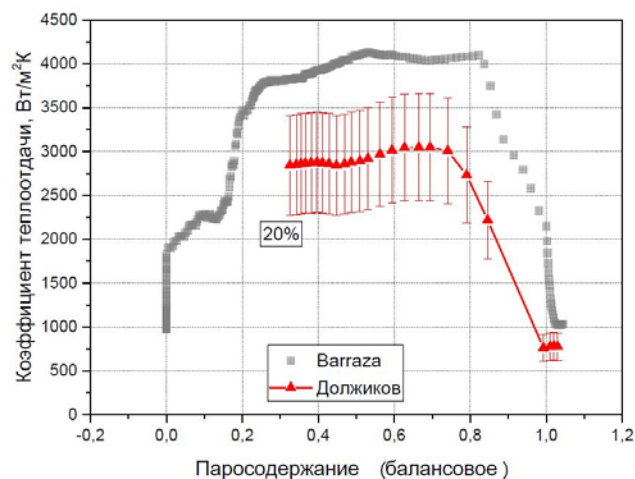


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоотдачи от балансового паросодержания

Как и в предыдущем опыте, в обоих случаях можно увидеть так называемую “п-образную” кривую (“шляпа”), характерную для процесса кипения многокомпонентных рабочих тел.

В опыте №3 в качестве рабочего тела использовалась смесь фреонов: R-14, R-23, R-22 и R-236fa, с мольными долями 0,4, 0,2, 0,2 и 0,2 соответственно. Была проведена серия экспериментов с данным составом смеси, результаты которых представлены на рисунках 8 и 9. Неопределенность полученных экспериментальных данных в опыте №3 не превышала 17 %. Кроме того, на

этих рисунках представлены экспериментальные данные Barraza по кипению смеси R14/R23/R32/R134a (0,35/0,15/0,15/0,35 моль). Исследуемая смесь в опыте №3 и смесь в эксперименте Barraza имеют несколько различный состав, а опыты проводились при различающихся параметрах потока, однако, наблюдается качественное совпадение в поведении КТО. Более подробная информация о параметрах экспериментов представлена в таблице 4.

Таблица 4. Параметры потока в опыте №3

Автор	Смесь	Состав моль	$d_{\text{вн}}$, мм	$P_{\text{кип}}$, кПа	j , кг/м ² с	q , кВт/м ²
Barraza	R14/R23/R32/R134a	0,35/0,15/0,15/0,35	3	790	148	28
Должиков	R14/R23/R22/R236fa	0,4/0,2/0,2/0,2	6	370	320	12

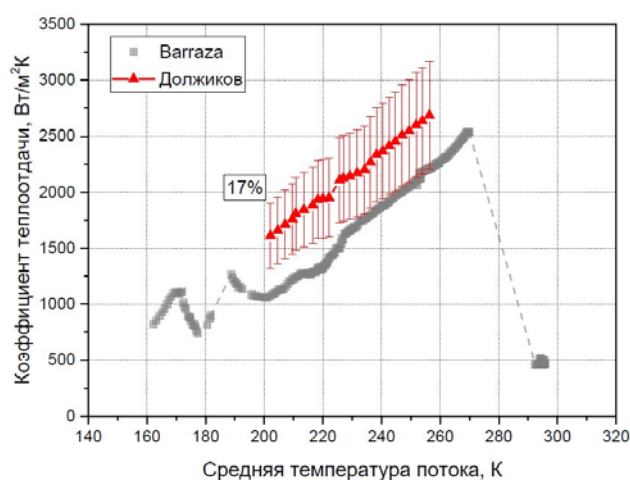


Рис. 8. Зависимость коэффициента

теплоотдачи от средней температуры потока

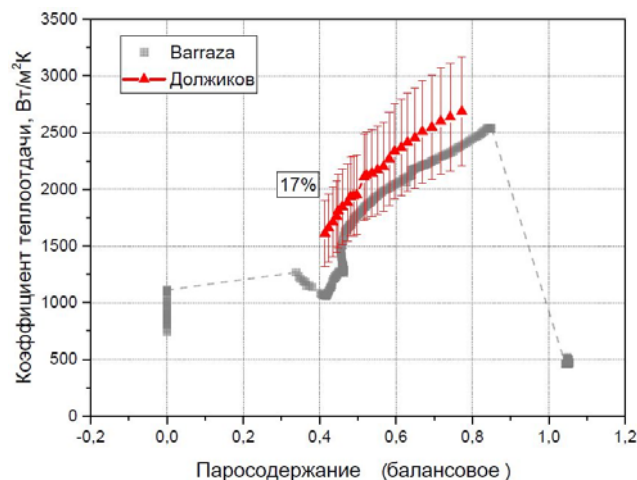


Рис. 9. Зависимость коэффициента

теплоотдачи от балансового паросодержания

КТО в опыте автора работы несколько выше чем в эксперименте Barraza на фреоновой смеси. Экспериментальные данные обоих авторов указывают на рост КТО на протяжении всей двухфазной области. В отличие от углеводородных смесей у фреоновой смеси наблюдается существенное увеличение КТО по мере роста паросодержания потока. Максимальное значение КТО достигается в области балансовых паросодержаний 0,8 – 0,9. В абсолютных же значениях КТО при кипении фреоновых смесей оказался несколько ниже чем у углеводородных смесей.

Следующее исследуемое рабочее тело — это смесь фреонов: R-14, R-23 и R-236fa, с мольными долями 0,4, 0,3 и 0,3 соответственно. Была проведена серия экспериментов с данным составом смеси, результаты которых представлены на рисунках 10 и 11. Неопределенность полученных экспериментальных данных в опыте №4 не превышала 19 %. Кроме того, на этих рисунках представлены экспериментальные данные Barraza по кипению смеси R14/R23/R32/R134a (0,35/0,15/0,15/0,35 моль). Исследуемая смесь в опыте №4 и смесь в эксперименте Barraza имеют несколько различный состав, а опыты проводились при различающихся параметрах потока, однако, наблюдается качественное совпадение в поведении КТО. Более подробная информация о параметрах экспериментов представлена в таблице 5.

Таблица 5. Параметры потока в опыте №4

Автор	Смесь	Состав моль	$d_{\text{вн}}$, мм	$P_{\text{кип}}$, кПа	j , кг/м ² с	q , кВт/м ²
Barraza	R14/R23/R32/R134a	0,35/0,15/0,15/0,35	3	790	148	28
Должиков	R14/R23/R236fa	0,4/0,3/0,3	6	360	280	12

Как и в предыдущем опыте, экспериментальные значения КТО автора работы несколько выше чем в эксперименте Barraza на фреоновой смеси. Результаты обоих авторов указывают на рост КТО на протяжении всей двухфазной области. В отличие от углеводородных смесей у фреоновой смеси наблюдается существенное увеличение КТО по мере роста паросодержания потока. Максимальное значение КТО достигается в области балансовых паросодержаний 0,8 – 0,9. В абсолютных же значениях КТО при кипении фреоновых смесей оказался несколько ниже чем у углеводородных смесей.

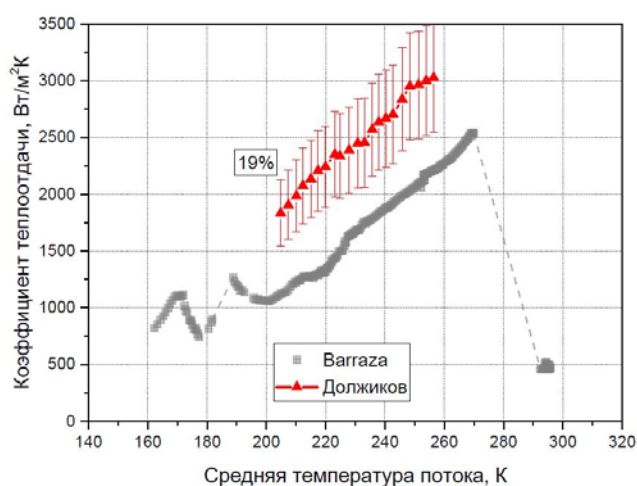


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплоотдачи от средней температуры

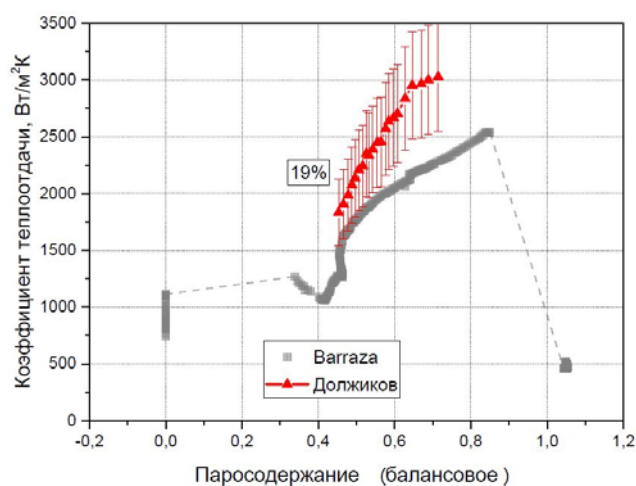


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от балансового паросодержания

Полученные экспериментальные данные довольно хорошо согласуются с существующими представлениями о процессе кипения многокомпонентных смесей. Сопоставление с имеющимися экспериментальными данными Barraza также дает хорошее совпадение. Можно сказать, что были получены новые экспериментальные данные по КТО при кипении многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературной технике.

В четвертой главе приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных. Расчетные значения КТО были получены из соотношений Mishra, Granryd, Little и гомогенной модели (таблица 6).

Для оценки применимости каждой методики произведена оценка среднего отклонения соотношения (СО) от экспериментальных данных. СО определяется как отношение суммы относительных неопределенностей к общему количеству экспериментальных точек (N). Относительная неопределенность представляет собой отношение абсолютной неопределенности между измеренным и расчетным значениями к экспериментальному значению.

$$CO = \frac{1}{N} \sum \left(\frac{|\alpha_{\text{эксп}} - \alpha_{\text{расч}}|}{\alpha_{\text{эксп}}} \right) 100\%. \quad (9)$$

Таблица 6. Соотношения для определения КТО при кипении смесей

Модель	Соотношение
Mishra	$\alpha = C \alpha_{\text{ж}} \left(\frac{1}{X_{\text{тт}}} \right)^m Bo^n;$ $\alpha_{\text{ж}} = 0,023 Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,4} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{вн}}};$ $Bo = \frac{q}{jr};$ $C=21,75; m=0,29; n=0,23.$
Granryd	$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{\text{ж}} F(X_{\text{тт}})} + \frac{x c_{p\text{п}}}{\alpha_{\text{п}} \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p} \frac{x}{c_{lv}};$ $C_{lv} = 2;$ $F(X_{\text{тт}}) = 2,37 \left(0,29 + \frac{1}{X_{\text{тт}}} \right)^{0,85};$ $X_{\text{тт}} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}}{\mu_{\text{п}}} \right)^{0,1};$ $x = \frac{h_{\text{см}} - h'}{h'' - h'}.$
Little	$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_{\text{ст-пл}}} + \frac{x c_{p\text{п}}}{\alpha_{\text{пл-п}} \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p} \frac{x c_{p\text{п}}}{(1-x) c_{p\text{ж}} + x c_{p\text{п}}};$ $\alpha_{\text{ст-пл}} = 0,023 \left(\frac{Re_{\text{ж}}}{1 + \sqrt{\varphi_{\text{п}}}} \right)^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,4} \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{вн}} (1 + \sqrt{\varphi_{\text{п}}})};$ $\alpha_{\text{пл-п}} = 0,023 \left(\frac{Re_{\text{п}}}{\sqrt{\varphi_{\text{п}}}} \right)^{0,8} Pr_{\text{п}}^{0,4} \frac{\lambda_{\text{п}}}{d_{\text{вн}} \sqrt{\varphi_{\text{п}}}};$ $\varphi_{\text{п}} = \left(1 + \frac{(1-x)\rho_{\text{п}}}{x\rho_{\text{ж}}} \sqrt{1 - x \left(1 - \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} \right)} \right)^{-1}.$
Гомогенная	$\alpha = 0,023 \left(\frac{\lambda_{\text{см}}}{d_{\text{вн}}} \right) Re_{\text{см}}^{0,8} Pr_{\text{см}}^{0,4};$ $\lambda_{\text{см}} = (1-x)\lambda_{\text{ж}} + x\lambda_{\text{п}};$ $\frac{1}{\mu_{\text{см}}} = \frac{x}{\mu_{\text{п}}} + \frac{(1-x)}{\mu_{\text{ж}}}.$

где α – КТО при кипении смеси; $\alpha_{\text{ж}}$ – КТО, рассчитанный по формуле Диттуса-Белтера для жидкой фазы; $\alpha_{\text{п}}$ – КТО, рассчитанный по формуле Диттуса-Белтера для паровой фазы; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр участка; λ – теплопроводность; Bo – число кипения; q – плотность теплового потока; j – плотность потока массы; r – теплота парообразования; x – балансовое паросодержание; c_p – изобарная теплоемкость; h – энтальпия; $X_{\text{тт}}$ – параметр Локкарта-Мартинелли; $\alpha_{\text{ст-пл}}$ – КТО между стенкой и пленкой жидкости; $\alpha_{\text{пл-п}}$ – КТО между пленкой жидкости и паровым ядром; $\varphi_{\text{п}}$ – истинное объемное паросодержание; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость; индексы: ж – жидкость; п – пар; см – смесь.

Расчет теплофизических свойств исследуемых смесей производился с помощью программного пакета REFPROP.

В таблице 7 приведены СО для всех экспериментальных данных, полученных автором данной работы.

Таблица 7. CO расчетных значений от экспериментальных данных Должикова

№ опыта	Среднее отклонение соотношения (CO), %			
	Mishra	Granryd	Little	Гомогенная модель
1	60,8	56,3	68,1	57,1
2	44,9	33,7	45,2	42,3
3	27,2	22,1	30,5	26,3
4	47,3	36,4	41,7	34,9

В таблице 8 приведены CO для всех экспериментальных данных из опытов Barraza.

Таблица 8. CO расчетных значений от экспериментальных данных Barraza

№ опыта	Среднее отклонение соотношения (CO), %			
	Mishra	Granryd	Little	Гомогенная модель
1; 2	19,6	31,6	34,6	52,5
3; 4	25,9	29,8	33,2	48,3

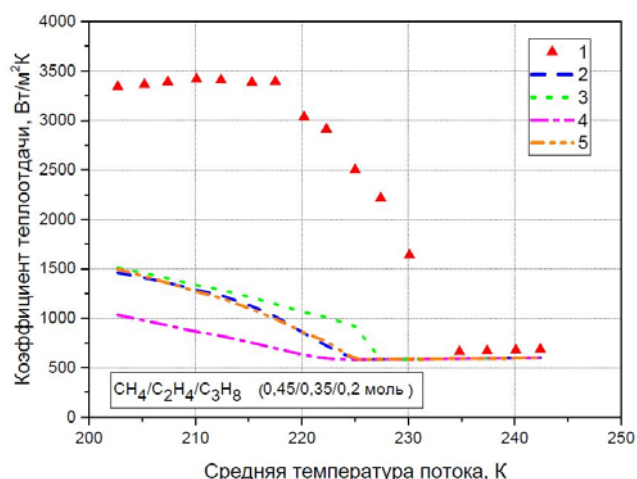


Рис. 12. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: 1 – эксперимент Должиков (опыт 1); 2 – Mishra; 3 – Granryd; 4 – Little; 5 – гомогенная модель

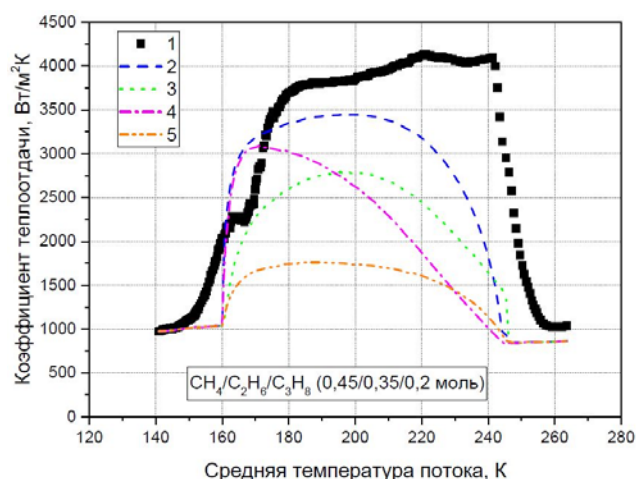


Рис. 13. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: 1 – эксперимент Barraza (опыт 1); 2 – Mishra; 3 – Granryd; 4 – Little; 5 – гомогенная модель

На рисунке 12 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для опыта №1 с углеводородной смесью $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_3\text{H}_8$ (0,45/0,35/0,2 моль). Из него видно, что ни одна из использованных методик не дает хорошего совпадения с экспериментальными данными.

На рисунке 13 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для опыта Barraza с углеводородной смесью $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8$ (0,45/0,35/0,2 моль). Из него также видно, что только соотношение Mishra дает относительно хорошее соответствие с экспериментальными данными и только для области невысоких паросодержаний. В области высоких паросодержаний наблюдается значительное расхождение расчетных и экспериментальных данных.

На рисунке 14 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для опыта №2 с углеводородной смесью $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_3\text{H}_8/(\text{CH}_3)_3\text{CH}$

(0,4/0,2/0,2/0,2 моль). Из него видно, что также, как и в предыдущем опыте ни одна из использованных методик не дает хорошего совпадения с экспериментальными данными. Возможно это связано с отсутствием соотношений, позволяющих прогнозировать КТО при кипении многокомпонентных рабочих тел, а также тем фактом, что большая часть экспериментальных данных лежит в области высоких паросодержаний, где соотношения дают худшую аппроксимацию опытных значений.

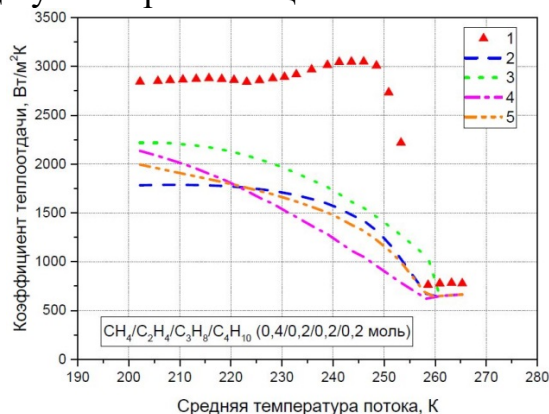


Рис. 14. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: 1 – эксперимент Должигов (опыт 2); 2 – Mishra; 3 – Granryd; 4 – Little; 5 – гомогенная модель

На рисунке 15 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для опыта 3 с фреоновой смесью R14/R23/R22/R236fa (0,4/0,2/0,2/0,2 моль). Из него видно, что ни одна из использованных методик не дает хорошего совпадения с экспериментальными данными. В данном случае даже не наблюдается качественного совпадения в поведении расчетных и экспериментальных значений КТО. В то время как в опыте наблюдается устойчивый рост КТО с увеличением средней температуры потока, в расчетных методиках получается диаметрально противоположное поведение, заключающееся в уменьшении КТО с увеличением средней температуры потока.

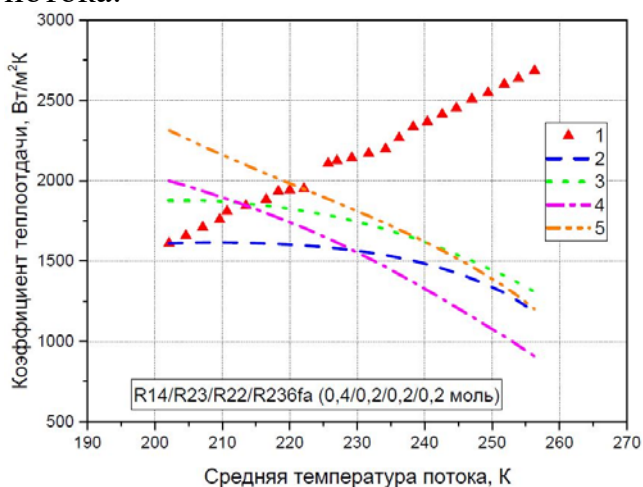


Рис. 15. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: 1 – эксперимент Должигов (опыт 3); 2 – Mishra; 3 – Granryd; 4 – Little; 5 – гомогенная модель

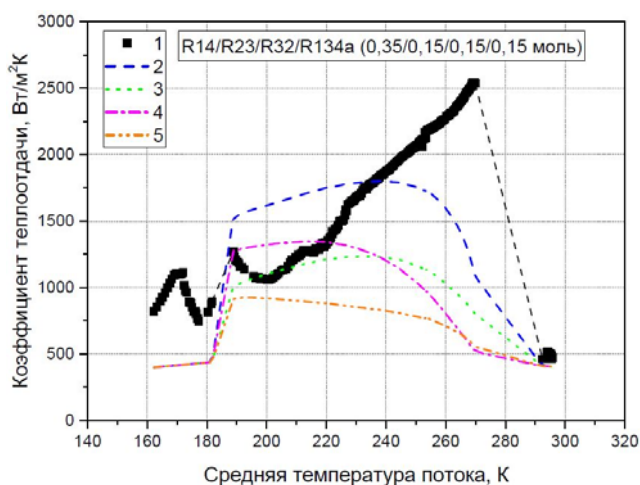


Рис. 16. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: 1 – эксперимент Barraza (опыт 3); 2 – Mishra; 3 – Granryd; 4 – Little; 5 – гомогенная модель

На рисунке 16 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для опыта Barraza с фреоновой смесью R14/R23/R32/R134a (0,35/0,15/0,15/0,35 моль). Из него также видно, что ни одно из соотношений не дает хорошего соответствия с экспериментальными данными. Есть небольшой участок, где наблюдается совпадение эксперимента с расчетами, но это скорее удачное совпадение, нежели закономерность. Так как в общем наблюдается абсолютное расхождение даже в качественном поведении изменения КТО, не говоря уже о количественных значениях. В то время как в эксперименте наблюдается рост КТО на протяжении всей двухфазной области, в расчетах КТО начинает с определенного момента стабильно уменьшаться (в области высоких паросодержаний).

На рисунке 17 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для опыта 4 с фреоновой смесью R14/R23/R236fa (0,4/0,3/0,3 моль). Из него видно, что ни одна из использованных методик не дает хорошего совпадения с экспериментальными данными. В данном случае также, как и в опыте 3 не наблюдается качественного совпадения в поведении расчетных и экспериментальных значений КТО. В то время как в опыте наблюдается устойчивый рост КТО с увеличением средней температуры потока, в расчетных методиках получается диаметрально противоположное поведение, заключающееся в уменьшении КТО с увеличением средней температуры потока.

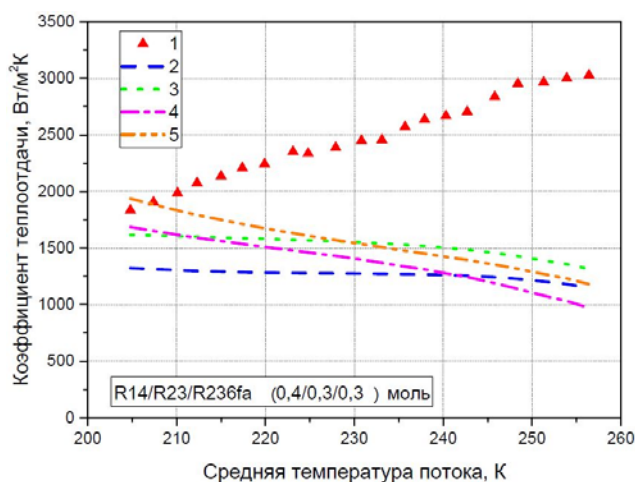


Рис. 17. Сравнение экспериментальных и расчетных данных: 1 – эксперимент Должигов (опыт 4); 2 – Mishra; 3 – Granryd; 4 – Little; 5 – гомогенная модель

В таблицах 7 и 8 представлены СО для соотношений, приведенных в таблице 6, с целью понять их применимость для условий эксперимента. В результате сравнения оказалось, что ни одна из используемых методик не дает хорошего совпадения с экспериментальными данными. Метод Mishra имеет явные ограничения, так как необходимо определять экспериментальные коэффициенты для каждой новой смеси. Он неплохо согласуется с экспериментальными данными Barraza по кипению углеводородных смесей, особенно в области невысоких паросодержаний. Соотношение Granryd не показало хорошего совпадения с экспериментальными данными (в большинстве опытов $СО > 30\%$). Еще хуже показала себя модель Little (в

большинстве опытов $CO > 40\%$). Гомогенная модель также не дала хорошего совпадения, однако ей удавалось описывать увеличение КТО в двухфазной области. Возможно, введение поправочных коэффициентов, позволило бы использовать данную модель для прогнозирования КТО в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел, однако для этого необходимо накапливать экспериментальные данные. В общем же, резюмируя полученные результаты, можно сказать что на данный момент не существует методики прогнозирования КТО в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел.

Заключение

В диссертационной работе изложены результаты по исследованию теплообмена в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел, используемых в низкотемпературной технике. Результаты, полученные в данной работе, будут полезными при проектировании теплообменного оборудования, используемого в низкотемпературных установках. На основании выполнения данной работы можно сделать следующие выводы:

- Создана экспериментальная установка с автоматизированной системой сбора и обработки информации, предназначенная для исследования теплообмена в процессе кипения многокомпонентных смесей при их вынужденном течении в трубе; разработан и апробирован метод измерения коэффициента теплоотдачи в процессе кипения многокомпонентных рабочих тел;
- Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи в процессе кипения многокомпонентных смесей: углеводородных (метан, этилен, пропан, изобутан) и фреоновых (R-14, R-23, R-22, R-236fa), при их вынужденном течении в горизонтальной трубе. Получены новые экспериментальные данные по теплоотдаче при кипении следующих многокомпонентных рабочих тел:
 - 1) $CH_4/C_2H_4/C_3H_8$ (0,45/0,35/0,2 моль);
 - 2) $CH_4/C_2H_4/C_3H_8/C_4H_{10}$ (0,4/0,2/0,2/0,2 моль);
 - 3) R14/R23/R22/R236fa (0,4/0,2/0,2/0,2 моль);
 - 4) R14/R23/R236fa (0,4/0,3/0,3 моль).

Опытные данные хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследований теплоотдачи при кипении многокомпонентных смесей;

- Сравнение имеющихся экспериментальных данных с расчетными значениями, полученными с использованием различных методик, показало, что на данный момент не существует соотношений, позволяющих прогнозировать коэффициент теплоотдачи в процессе кипения многокомпонентных смесей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Должиков А.С., Могорычный В.И. Экспериментальное исследование процесса кипения многокомпонентных рабочих тел // Машиностроение и инженерное образование. 2017, №1 (50), стр. 6-15.
2. Должиков А.С., Могорычный В.И. Процессы кипения и конденсации

многокомпонентных рабочих тел в микротеплообменниках // Успехи прикладной физики. 2017, №2, стр. 103-112.

Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов:

1. Должиков А.С. Исследование процесса кипения многокомпонентных смесей в длинных каналах различной геометрии // XXII Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Материалы конференции. – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. – Том 4, секция 41, с. 69.
2. Должиков А.С., Могорычный В.И. Процессы кипения и конденсации многокомпонентных рабочих тел // XXIV Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Труды конференции. – М.: НПО «Орион», 24-27 мая 2016. - с. 309-313.
3. Должиков А.С., Могорычный В.И. Исследование процесса кипения многокомпонентных смесей в длинных каналах различной геометрии // XXI Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Материалы конференции. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – Том 4, секция 42, с. 52.
4. Должиков А.С., Могорычный В.И. Низкотемпературная дроссельная система, работающая на многокомпонентном рабочем теле // XIX Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Материалы конференции. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – Том 4, секция 42, с. 52.
5. Должиков А.С., Могорычный В.И. Исследование процесса кипения многокомпонентных смесей в длинных каналах различной геометрии // III Международная конференция «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур». Сборник научных трудов. – М.: Университет машиностроения, 2013. – с. 91.

Печ.л. _____

Тираж _____

Заказ _____

Полиграфический центр МЭИ, Москва, Красноказарменная 13