

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А.Н. ТУПОЛЕВА-КАИ»

На правах рукописи



ШИШКИН АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R134A В КАНАЛАХ СО  
ВСТАВКАМИ В ВИДЕ ОРЕБРЕННЫХ СКРУЧЕННЫХ ЛЕНТ

Специальность: 01.04.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
С. Э. Тарасевич

Казань — 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Современное состояние вопроса исследования и постановка задачи .....	13
1.1 Интенсификация теплообмена в каналах со вставками в виде скрученных лент модифицированной геометрии .....	13
1.2 Особенности структуры двухфазных течений в трубах со вставленными скрученными лентами .....	16
1.3 Особенности структуры двухфазных течений в трубах со вставленными скрученными лентами, имеющими ребра на поверхности .....	21
1.4 Карты режимов двухфазных течений в различных каналах .....	24
1.5 Теплоотдача при течении хладагентов в прямолинейных трубах, и каналах со вставленной скрученной лентой .....	30
1.5.1 Теплоотдача при кипении хладагентов в прямолинейных каналах .....	31
1.5.2 Теплоотдача при кипении хладагентов в каналах со вставленной скрученной лентой .....	32
1.6 Выводы. Цели и задачи исследования .....	37
Глава 2. Экспериментальный стенд. Методика проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных .....	40
2.1 Описание экспериментального стенда для исследования теплоотдачи одно- и двухфазных потоков хладагента R134a в различных каналах .....	40
2.2 Рабочий участок .....	49
2.3 Система измерений .....	56
2.4 Методика проведения эксперимента .....	64
2.5 Методика обработки экспериментальных данных .....	65
2.6 Неопределенность измерений .....	68
2.7 Тестовые опыты по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции и пузырькового кипения .....	73
Глава 3. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.....	78
3.1 Теплоотдача в каналах со вставленными скрученными лентами при однофазном течении хладагента R134a .....	78
3.2 Теплоотдача в каналах со вставленной скрученной лентой при кипении хладагента R134a .....	80
3.3 Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами .....	86

3.4 Теплоотдача в каналах со вставленной ребренной скрученной лентой при кипении хладагента R134a .....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	103
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	109

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность исследования:** Потребность в компактных и эффективных теплообменных аппаратах существует в различных отраслях промышленности: авиационной и ракетно-космической технике, в парогенераторах и конденсаторах ядерных энергоустановок, воздухоохладителях судовых холодильных установок, тепловых электростанций; коммунальной энергетике, холодильной и криогенной технике; химической; пищевой, фармацевтической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Интерес к интенсификации теплообмена возник одновременно с решением задач проектирования теплообменных аппаратов с ограниченными весогабаритными характеристиками имеющими высокую надежность при эксплуатации. Теплообменные аппараты с различными интенсификаторами могут выравнять и снижать рабочие температуры стенок, предотвращая разрушение активной зоны тепловыделения в случае аварийных ситуаций, увеличивая надежность и безопасность работы.

К одному из способов интенсификации теплообмена относится закрутка потока. Среди многообразия конструктивных элементов позволяющих закручивать поток, широкое применение в использовании получили вставки в виде скрученных лент, т.к. недороги в изготовлении и могут быть легко использованы для модернизации существующих кожухотрубных теплообменников. Кроме того, конструкция теплообменников с использованием скрученных лент позволяет существенно сократить весогабаритные характеристики при заданной тепловой нагрузке, тем самым снижая капиталовложения.

В настоящее время область применения скрученных лент не ограничивается только применением в кожухотрубных теплообменниках, например охлаждение диверторной кассеты ITER (Международный термоядерный реактор) осуществляется недогретым до температуры насыщения, закрученным с

помощью вставленных на всю длину скрученных лент, потоком воды при уровне тепловых нагрузок до 20 МВт/м<sup>2</sup>.

Использование скрученных лент позволяет обеспечивать безаварийное и эффективное охлаждение различных энергонапряженных элементов при высоких плотностях теплового потока, расширяя область применения в качестве турбулизаторов закручивающих пристенные слои при однофазном течении теплоносителя, при течении двухфазных потоков обеспечивают увеличение коэффициента теплоотдачи, за счет закрутки потока происходит выравнивание температурных неоднородностей в азимутальном направлении.

Настоящая диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами имеющими ребра на своей поверхности.

**Степень разработанности:** исследованию теплоотдачи двухфазных течений уделяется достаточно много внимания, о чем говорит большое количество докладов, монографий и статей по данной тематике: Кутателадзе С.С., Стыриковича М.А., Кутепова А.М., Стермана Л.С., Стюшина Н.Г., Лабунцова Д.А., Боришанского В.М., Левитана Л.Л., Боровского Л.Я., Клименко В.В., Малышева А.А., Даниловой Г.Н., Азарского В.М., Земского В.В., Букина В.Г., Шуршева В.Ф., Козлова Б.К., Baker O., Hewitt G.F., Roberts D.N., Soliman H.M., Azer N.Z., Уолис Г., Mandhane J. M., Циклаури Г.В., Данилина В.С., Селезнева Л.И., Gregory G.A., Aziz K., Taitel Y., Dukler A.E., Григорьева В.А., Павлова Ю.М., Аметисова Е.В., Tandon T.N., Varma H.K., Gupta C. P., Varajas A.M., Panton R.L., Агафоновой Н.Д., Благовещенского А.Я., Thome J.R., El Hajal J. Такое внимание к теме обусловлено ее широким практическим применением при работе различных технических систем, в том числе в ядерной энергетике, аэрокосмическом комплексе, теплоэнергетике, нефтегазовой переработке. Большой интерес представляет структура закрученных двухфазных течений. Закрутка потока при высоких паросодержаниях может способствовать увеличению области бескризисного теплообмена при кипении за счет сепарации жидкой фазы на

поверхность. Очевидно, что процессы теплообмена закрученных двухфазных течений отличаются от прямолинейных. Полученные результаты в работах по исследованию теплообмена и гидродинамики двухфазных закрученных течений Ибрагимова М.Х., Номофилова Е.В., Субботина В.И., Берглеса А.И., Щукина В.К., Manglik, R.M., Klaczak A., Назмеева Ю.Г., Николаева Н.А., Agrawal K.N., Varma H.K., Lai S., Халатова А.А., Тарасевича С.Э., Яковлева А.Б., А.Н., Дедова А.В., Комова А.Т., Ягова В.В., Захарова Е.М., Минеева Ю.В., Дзюбенко Б.В., Кузьма-Китчы Ю.А., Кутепова А.М., Свириденко И.П., Федик И.И., Харитоновна В.В., Холпанова Л.П., Kanizawa F.T., Ribatski G., имеют ограниченный характер применения рекомендаций по расчету коэффициента теплоотдачи в каналах с закруткой потока.

На основе проведенного обзора поставлена **основная цель** работы: разработка рекомендаций по расчету теплоотдачи каналов со вставками в виде оребренных скрученных лент, необходимых для создания эффективных теплообменных аппаратов общего и специального назначения на основе выявленных механизмов интенсификации теплоотдачи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Разработать и создать экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи двухфазного потока при течении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

2. Провести экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

3. На основе экспериментальных данных получить обобщающие зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

4. Разработать практические рекомендации по использованию интенсификаторов теплообмена в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

**Научная новизна:**

1. Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент с одновременной видеофиксацией режима течения на выходе из рабочего участка при числах Рейнольдса подсчитанного по скорости циркуляции жидкости  $Re_0=31000\div 85000$  и плотности теплового потока  $q=100\div 250$  кВт/м<sup>2</sup>.

2. Выявлено влияние безразмерных геометрических и режимных параметров на теплоотдачу при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

3. На основе визуального наблюдения выявлены режимы течения реализуемые в условиях кипения хладагента R134 в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

4. Получена обобщающая зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

5. Разработаны практические рекомендации по использованию интенсификаторов теплообмена в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

Отмеченные выше научные результаты составляют основное содержание положений, выносимых на защиту диссертации.

**Теоретическая и практическая значимость работы:** полученные обобщающие зависимости для определения теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент могут быть использованы на предприятиях при проектировании нового эффективного теплообменного оборудования, так и для модернизации уже существующего оборудования.

Материалы работы могут быть использованы в учебном процессе и на предприятиях, занимающихся проектированием и изготовлением теплообменных аппаратов и энергетического оборудования. Созданный автором

экспериментальный стенд используется для проведения лабораторных работ в учебном процессе и для выполнения научных исследований по другим тематикам.

Основные результаты диссертационной работы вошли в научно-технические отчеты следующих проектов:

1. ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по проекту «Разработка ресурсосберегающих технологий использования криогенных топлив» государственный контракт № П2467 от «09» ноября 2009 г. (руководитель к.т.н. Яковлев А.Б.);

2. Проект №2.1.2/12279 аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)» по теме «Тепломассообмен и гидродинамика в каналах с шероховатыми поверхностями и закруткой потока» (руководитель д.т.н., проф. Тарасевич С.Э.);

3. Проект РФФИ 09-08-00224-а «Экспериментальное исследование и численный расчет теплообмена и гидродинамики в каналах с микро и макрошероховатыми поверхностями при одно- и двухфазных течениях» (руководитель к.т.н., доцент Яковлев А.Б.);

4. Проект РФФИ 12-08-33032 мол\_а\_вед «Разработка научно-технических решений по интенсификации теплоотдачи при свободной и вынужденной конвекции одно- и двухфазных теплоносителей в компактных системах охлаждения» (руководитель к.т.н. Рыжков Д.В.);

5. Проект РФФИ 13-08-0469 А «Экспериментальное и численное исследование теплообмена и гидродинамики в каналах с различными закручивающими вставками при одно- и двухфазных течениях» (руководитель к.т.н. Яковлев А.Б.);

6. Проект РФФИ 14-08-31178 мол\_а «Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик двухфазных течений при кипении хладагентов R134a и R507a в каналах различной формы» (руководитель Шишкин А.В.);



7. Проект РФФИ 14-08-31305 мол\_а «Разработка и исследование теплогидравлических характеристик теплообменных аппаратов для транспортных систем с различными типами интенсификаторов теплоотдачи» (руководитель Яркаев М.З.);

8. Проект №14.Z50.31.0003 от «04» марта 2014 г. «Создание многопрофильной, комплексной лаборатории моделирования физико-технических процессов при решении сопряженных задач аэромеханики, теплофизики, акустики и вибростойкости, вентиляции и микроклимата, экологии и мониторинга эксплуатации грузовых автомобилей и их агрегатов». (руководитель д.ф-м.н., проф. Исаев С.А.);

9. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (соглашении о субсидии N14.577.21.0151 от 28.11.2014, идентификатор проекта RFMEFI57714X0151). (руководитель д.ф-м.н., проф. Тукмаков А.Л.);

10. Проектная часть государственного задания N13.262.201.2014К. «Разработка эффективного поршневого уплотнения для двигателей внутреннего сгорания, работающих на сжиженном газообразном топливе с добавлением воды в рабочем процессе». (руководитель д.т.н., проф. Гуреев В.М.).

**Методология и методы исследования:** объектом исследования являются каналы со вставками в виде оребренных скрученных лент. Для получения информации о теплоотдаче при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент при различных геометрических и режимных параметрах использовались экспериментальные методы исследования. В экспериментах реализовывался омический нагрев рабочего участка (ГОСТ Р 8.655-2009). Вынужденное течение в трубах реализовывалось на экспериментальном стенде с аттестованными приборами измерений расходов (ГОСТ Р 50193.3-92), температуры (ГОСТ Р 8.585-2001 ГСИ) и давления (ГОСТ 22520-85).

Визуализация режимов течения производилась высокоскоростной видеосъемкой.

**Степень достоверности результатов:** подтверждаются проведением тестовых опытов и хорошим согласованием полученных результатов с результатами других исследователей; использованием поверенных приборов и измерительной системы; выполнением процедур тарировки и калибровки датчиков; проведением процедуры оценки неопределенности измерений в соответствии с ГОСТ Р 54500.3-2011; использованием современных компьютерных, аппаратных и программных средств для обработки данных; соответствием полученных результатов физическим представлениям о процессах тепломассообмена в условиях одно- и двухфазного течения потока.

**Апробация результатов работы:** полученные основные результаты докладывались и получили положительные отзывы на отечественных и зарубежных конференциях:

1. Международной молодёжной научной конференции «XVII Туполевские чтения» (г. Казань, 2009 г.);
2. Международной молодёжной научной конференции «XVIII Туполевские чтения» (г. Казань, 2010 г.);
3. Международной молодёжной научной конференции «XIX Туполевские чтения» (г. Казань, 2011 г.);
4. Международном машиностроительном конгрессе «ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (США, г. Денвер, 2011 г.);
5. Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды. Веществ материалов и изделий» (г. Казань, 2011 г.);

6. Шестой международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ» (г. Казань, 2011);

7. Четвертой международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных течениях» (г. Москва, 2011 г.);

8. VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН Алемасова В.Е. (г. Казань, 2012 г.);

9. Международной молодежной научной конференции «XX Туполевские чтения» (г. Казань, 2012 г.);

10. Международном симпозиуме «15th International Symposium on Flow Visualization» (Беларусь, г. Минск, 2012 г.);

11. Минском международном форуме по теплообмену «XIV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum» (Беларусь, г. Минск, 2012 г.);

12. XIX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика Леонтьева А.И. «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических технологиях» (г. Орехово – Зуево, 2013 г.);

13. Международной молодежной научной конференции «XXI Туполевские чтения» (г. Казань, 2013 г.);

14. Международной конференции по теплообмену «15th International Heat Transfer Conference» (Япония, г. Киото, 2014 г.);

15. Пятой международной конференции «Теплообмен и гидродинамика в закрученных течениях» (г. Казань, 2015 г.);

16. Минском международном форуме по теплообмену «XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum» (Беларусь, г. Минск, 2016 г.);

Работа отмечена различными наградами:

1. Диплом за высокий научный уровень представленного доклада международной молодежной научной конференции «XVIII Туполевские чтения» Казань, 20-22 мая 2010 г.;

2. Диплом за лучший доклад четвертой международной конференции Теплообмен и гидродинамика в закрученных течениях на тему: «Структура адиабатных двухфазных течений в различных каналах при низких давлениях» Москва, МЭИ, 18-20 октября 2011г.;

3. Диплом II степени за высокий научный уровень представленного доклада международной молодежной научной конференции «XX Туполевские чтения» Казань, 22-24 мая 2012 г.;

4. Лауреат стипендии Правительства Российской Федерации за 2012 год;

5. Диплом за лучший доклад «Карты режимов двухфазных течений в каналах различной формы» на XIX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Орехово-Зуево 20-24 мая 2013г.;

6. Победитель и научный руководитель НИР молодежного гранта РФФИ «Мой первый грант» РФФИ 14-08-31178 мол\_а\_2014;

По материалам диссертации опубликовано 23 печатных работы (4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК; 1 статья в изданиях из списка Web of Science; 12 докладов в сборниках трудов конференций и 6 тезисов доклада);

Автор выражает благодарность коллективу кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения» КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева в частности научному руководителю профессору, д-ру техн. наук Тарасевичу С.Э.; канд. техн. наук Яковлеву А.Б.; канд. техн. наук Щелчкову А.В.; профессору д-ру техн. наук Попову И.А.; профессору, д-ру техн. наук Гортышову Ю.Ф. за идеи, положенные в основу диссертации, ценные методические советы и помощь в подготовке диссертации; директору ООО «Аррет» Качалову А.В. за оказанную помощь при проведении монтажных и пуско-наладочных работ экспериментального стенда, инженерно-техническому персоналу: Нурееву Р.К., Колкунову В.С. за консультации и всестороннюю помощь в организации проведения экспериментальных исследований.

## Глава 1. Современное состояние вопроса исследования и постановка задачи

### 1.1. Интенсификация теплообмена в каналах со вставками в виде скрученных лент модифицированной геометрии

Одним из способов интенсификации теплообмена является закрутка потока. Закрутка потока в каналах может быть организована различными способами: змеевики, тангенциальный вход, шнеки, спиральные вставки, вставки в виде скрученных лент, профильные нарезки стенок канала. Однако наибольший интерес в литературе отведен скрученным лентам (Рис. 1.1), так они просты в изготовлении, и данные вставки можно применить в модернизации уже действующих теплообменных аппаратах, в связи, с чем в отечественной и зарубежной литературе исследованию теплообмена при вынужденной конвекции и пузырькового кипения в каналах со вставленными скрученными лентами посвящено множество работ [1-22].

В последнее время наряду с исследованиями классических скрученных лент, большое внимание стали уделять скрученным лентам модифицированной геометрии [23, 24, 25].

В работах [23, 24, 25] представлен широкий обзор скрученных лент с различной геометрией, в таблице 1.1 представлены схематичные изображения модифицированных скрученных лент.

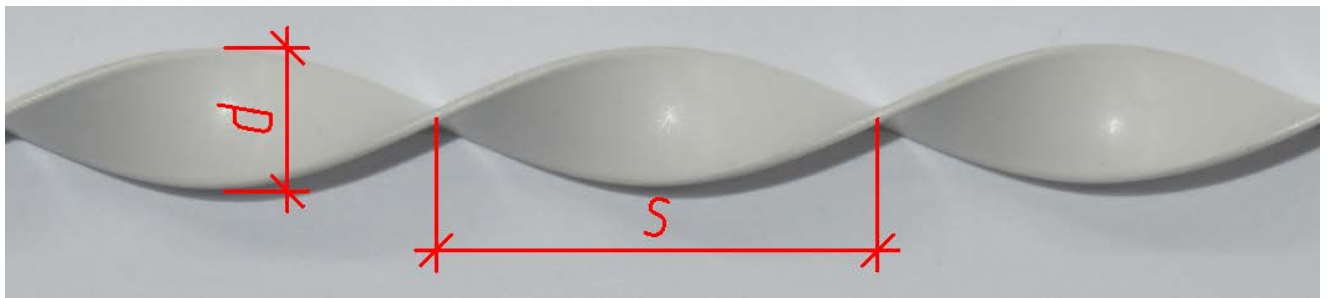
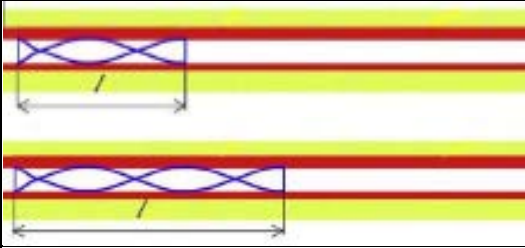
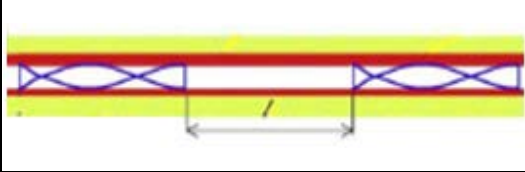
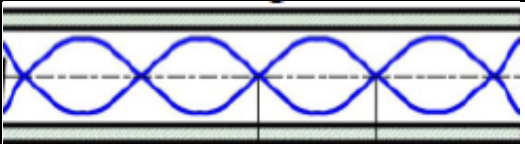
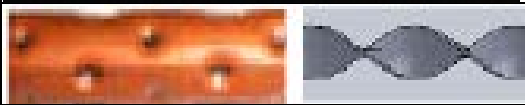

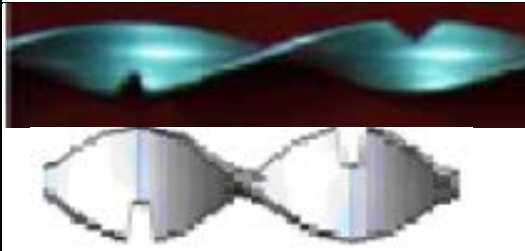
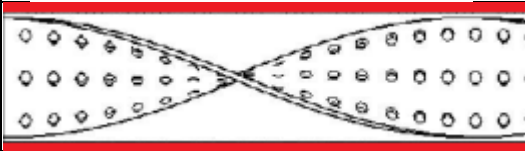




Рис. 1.1 — Классическая скрученная лента.

Таблица 1.1 – Скрученные ленты модифицированной геометрией.

№ п/п	Авторы	Схематичное изображение модифицированной скрученной ленты	Описание
1	[26, 27]		Установка скрученных лент с различными относительными длинами
2	[28, 29, 30]		Дискретно разнесенные скрученные ленты с различными относительными длинами
3	[31]		Установка ленты с щелевым зазором между стенкой
4	[32]		Установка ленты в «облуненную» трубу
5	[33,34, 35,36]		Скрученная лента с периодическим изменением закрутки по длине
6	[37, 38]		Скрученные ленты с различными вырезами
7	[39]		Скрученная лента с перфорацией
8	[40, 41]		Рассеченные скрученные ленты
9	[42]		Скрученная лента с отогнутыми сегментами по периферии

10	[43, 44]		Установка двух скрученных лент в спирально-накатанную трубу
11	[45]		Установка скрученной ленты в канал совместно с коническими кольцами
12	[46]		Скрученная лента с вырезанной центральной частью
13	[47]		Скрученная лента с разделительными перегородками
14	[24]		Скрученная лента с ребрами на поверхности установленными против направления закрутки

Исследования теплоотдачи в каналах с вышеприведенными скрученными лентами различной геометрии проведены при вынужденной конвекции теплоносителя. Авторы данных работ отмечают увеличение коэффициента теплоотдачи и гидросопротивления в каналах с модифицированными скрученными лентами по сравнению со скрученными лентами классической геометрии, особенно в ламинарной области [24], так же авторы едины во мнении о сложном механизме взаимодействия потока с измененной образующей скрученной ленты на структуру потока, и указывают на необходимость поиска оптимальных геометрических параметров в дальнейших исследованиях.

При обзоре литературы находящейся в открытом доступе установлено, что исследования теплоотдачи при кипении жидкости в каналах с закруткой потока выполнены только с использованием классических скрученных лент имеющие различные относительные шаги закрутки  $s/d$  [3, 5, 10, 21, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54]. Большинство исследований были выполнены для галогенуглеводородных хладагентов при горизонтальном расположении рабочего участка с

использованием электрического нагрева. Эксперименты проводились для лент с относительными шагами закрутки  $s/d$  от 2,5 до 15 для диаметров труб  $d$  от 3,8 до 15,9 мм изготовленных из нержавеющей стали и алюминия при низких массовых скоростях  $\rho w$  менее 350 кг/м<sup>2</sup>с.

## **1.2 Особенности структуры двухфазных течений в трубах со вставленными скрученными лентами**

В работах [55, 56] представлены визуальные исследования режимов адиабатного двухфазного (воздушно-водяного) течения в трубах со вставленной скрученной лентой при  $p=0,1\div 0,25$  МПа. Экспериментальный участок представлял собой стеклянную трубу длиной  $L=800$  мм, с внутренним диаметром  $d=18$  мм и вставленной скрученной лентой со степенями закрутки  $s/d=2,5\div 6$ . Половина канала была заполнена накаченной водой резиновой камерой для предотвращения неравномерности течения в двух половинах канала и перетечек из одной половины в другую, связанную с неплотным прилеганием ленты. При визуальном исследовании структуры воздушно-водяного потока в трубах со вставленной лентой, были выделены пробковый, волновой, кольцевой, дисперсный и шнуровидный режимы. При малых скоростях двухфазные течения в трубе со скрученной лентой близки к течениям в прямых трубах.

При малых значениях массового газосодержания  $X$  в горизонтальной трубе с лентой наблюдается движение газовых пузырей у стенки аналогично пробковому режиму течения в горизонтальных трубах при относительно малых скоростях пузыри, как и в горизонтальных трубах, находятся в верхней части сечения канала (Рис. 1.2). С увеличением объема газа размеры пузырей увеличиваются, они принимают более продолговатую форму. В связи с винтовым движением происходит скопление газа под лентой, а затем прорыв в виде пузырей в подъемную часть канала.





← направление течения

Рис. 1.2 — Фотографии пробкового режима течения в канале со скрученной лентой.

С увеличением объемного газосодержания в горизонтальном канале происходит слияние всех пузырей, и наблюдается режим близкий к волновому течению в горизонтальных трубах (Рис. 1.3). При этом в верхней части сечения канала движется газ, а в нижней – жидкость, на поверхности которой наблюдаются волны. Таким образом, происходит постоянное «переваливание» жидкости с ленты на стенку канала.



← направление течения

Рис. 1.3 — Фотографии волнового режима течения в канале со скрученной лентой.

С дальнейшим увеличением газосодержания до массовых значений  $X < X_k$  наблюдается кольцевой режим. При этом поток жидкости в поперечном сечении имеет форму неправильного кольца; центральная часть потока занята газом (Рис. 1.4, а). На поверхности слоя жидкости наблюдаются волны, амплитуда которых уменьшается с увеличением скорости потока.

При больших скоростях течения ( $Re_{см} > 70000$ ) как в горизонтальных, так и вертикальных трубах со скрученной лентой даже при значительном увеличении количества жидкости наблюдается неполный кольцевой режим (Рис. 1.4, б; Рис. 1.5): у задней по потоку кромки ленты наблюдается сухая полоска, которая

обусловлена подковообразной формой сечения канала с лентой и возникновением некоторого разрежения в этой области. Таким образом, основная доля жидкости скапливается у передней по потоку кромки ленты (Рис. 1.4, б). В связи с неравномерным распределением жидкости по стенке трубы, а также течением значительной доли жидкой фазы по самой ленте разрывы в кольцевой пленке (сухие пятна) на стенке трубы при наличии ленты появляются при более низком газосодержании, чем в трубе без ленты. Это подтверждается и результатами других исследований [57, 58] – установка в трубу скрученной ленты приводит к увеличению количества сухих пятен на стенке при двухфазных течениях при аналогичных режимных параметрах, что, в прочем, не приводит к ухудшению теплообмена за счет изменения характера течения и интенсификации массообмена в таких каналах.

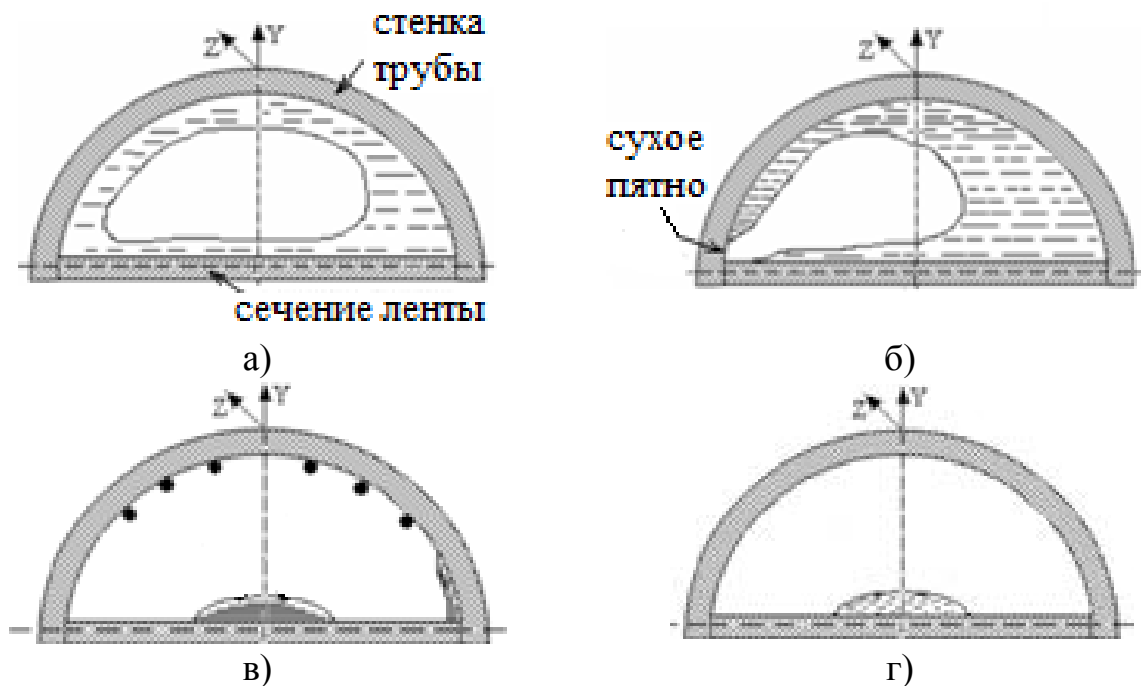


Рис. 1.4 — Картины двухфазных течений в поперечном сечении трубы со вставленной скрученной лентой: а) кольцевой режим; б) неполный кольцевой режим; в) дисперсный режим со шнуром на ленте и вторым шнуром на стенке у передней кромки; г) шнуровидный режим.

При повышении массового газосодержания до величины  $X > X_k$  в пленке появляются сухие пятна, а с дальнейшим ростом  $X$  по стенкам начинают двигаться отдельные струйки и капли жидкости, и наблюдается дисперсный

режим. При этом некоторая часть жидкости не отбрасывается к стенке трубы, а движется в форме шнура по центральной части ленты. Часть жидкости при уменьшении паросодержания может двигаться в виде второго шнура по стенке трубы вдоль передней кромки ленты (Рис. 1.4, в).

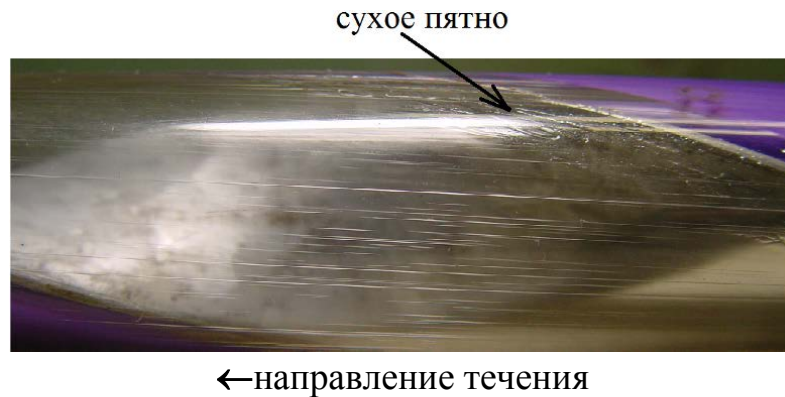


Рис. 1.5 — Фотография неполного кольцевого режима течения.

В каналах со скрученной лентой капли образуются в основном не при отрыве их со шнура, а при разрыве пленки на стенке трубы. Таким образом, постоянного массообмена между каплями и шнуром, не наблюдается. Это обусловлено значительным градиентом центробежного ускорения по радиусу канала с лентой (на ленте ускорение близко к нулю, а у стенки может достигать нескольких тысяч  $\text{м/с}^2$ ).

При  $X > X_d$  вся жидкость движется в виде отдельного «шнура» на ленте, и можно наблюдать шнуровидный режим (Рис. 1.4, г). Форма шнура может быть различной (Рис. 1.6). Возможно возникновение двухшнурного режима аналогичного представленному на рисунке 1.6(в), но без капель или с эпизодическим их выпадением на стенку.

В работах [55, 59] были определены границы кольцевого и дисперсного режимов двухфазного адиабатного течения в трубах со вставленной скрученной лентой. При этом под кольцевым режимом течения также понимаются все режимы, при которых отсутствуют сухие пятна на стенке, и знание границ которых особенно важно при исследовании кризиса кипения. Отмечено, что

границы кольцевого режима в трубах со скрученной лентой при различных положениях (горизонтальное или вертикальное расположение канала) близки.

Некоторое отличие по границам кольцевого и особенно дисперсного режимов наблюдается при  $20000 < Re_{см} < 100000$  – границы в вертикальном канале проходят при более высоких значениях  $X$ , что обусловлено более равномерным распределением жидкости по периметру сечения вертикального канала. При  $Re_{см} > 100000$  разница между границами незначительна, т.е. влияние гравитационных сил не сказывается. Заметного влияния степени закрутки в рассмотренном диапазоне на границы режимов не обнаружено.

а)  $X=0,76$ б)  $X=0,80$ в)  $X=0,85$ г)  $X=0,97$ 

← направление течения

Рис. 1.6 — Эволюция шнуровидных течений в трубе со вставленной скрученной лентой при изменении газосодержания (жидкость подкрашена темной краской):  $G=7$  г/с,  $p=0,13$  МПа,  $s/d=3$ .

Как отмечено, одной из важных особенностей структуры двухфазных течений в трубах со вставленной скрученной лентой является то, что часть жидкой фазы (а при большом газосодержании вся жидкость) всегда движется в виде струи (шнура) по центральной части ленты, не являющейся активной теплообменной поверхностью. При кипении это может приводить к увеличению необходимой для полного испарения жидкости длины.

### **1.3 Особенности структуры двухфазных течений в трубах со вставленными скрученными лентами, имеющими ребра на поверхности**

Для интенсификации тепломассообмена при одно- и двухфазных течениях в трубах со вставленной скрученной лентой и, в частности, для предотвращения устойчивых шнуровидных течений на ленте на ее поверхности могут быть установлены ребра под углом к ее оси [60, 61]. Это позволяет смещать часть теплоносителя, движущегося вдоль центральной части самой ленты, непосредственно к теплообменной поверхности канала, в который вставлена скрученная лента, а также дискретно турбулизовать поток и, как следствие, интенсифицировать тепломассообмен в канале. Различные варианты таких интенсифицирующих устройств показаны на рисунке 1.7.

Устройство состоит из скрученной плоской ленты *1* с боковыми торцами *2* и дискретно расположенных на ленте ребер *3* под углом к ее оси по направлению или против направления скручивания ленты (Рис. 1.7). При этом часть потока, движущаяся вдоль центральной части ленты, будет смещаться либо к передней, либо к задней по потоку образующей ленты соответственно. Ребра могут быть закреплены на ленте пайкой, сваркой, клейкой, выполнены в виде навитой на ленту проволоки, а также другим способом. При навивке по направлению скручивания ленты обеспечивается плотное прилегание проволоки ко всей поверхности ленты без дополнительного крепления другими способами. Ребра могут занимать всю ширину ленты, либо ее часть и располагаться с некоторым

шагом как по всей длине ленты, так и на некотором ее участке. Высота, ширина и форма поперечного сечения ребер могут быть постоянными или переменными по их длине.

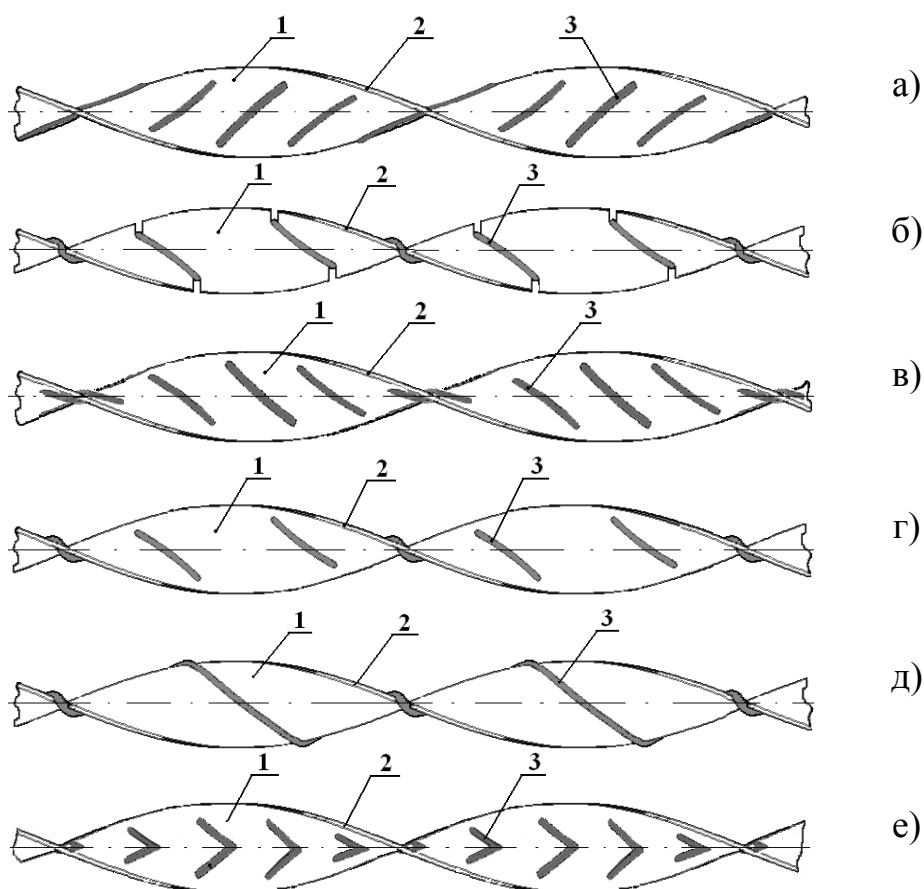
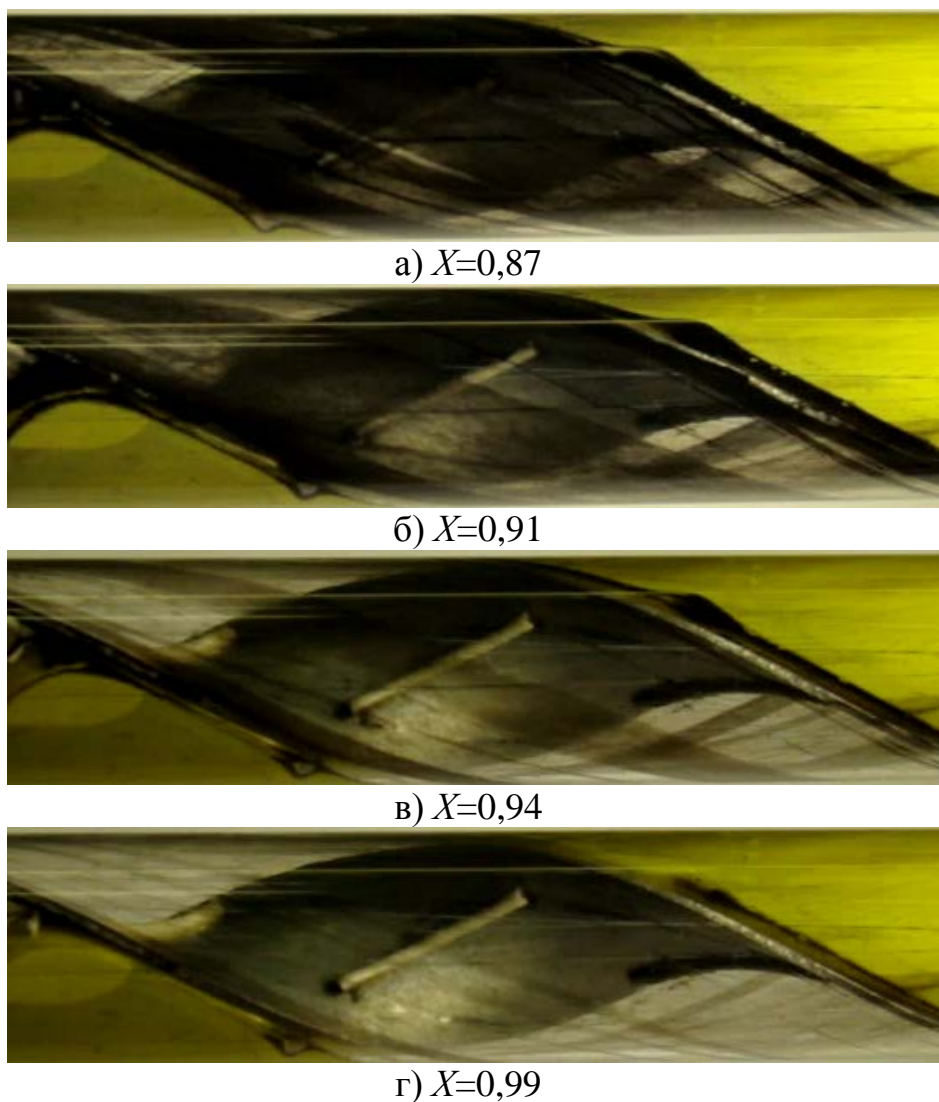


Рис. 1.7 — Скрученная лента с ребрами на ее поверхности под углом к оси ленты: а) ребра расположены против направления; б) ребра расположены по направлению скручивания; в) ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания с выступом ребер над боковыми торцами ленты; г) ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания, при этом на боковых торцах ленты имеются пазы, в которые заглублены ребра; д) ребра в виде проволоки навитой на ленту через отверстия в ленте по направлению ее скручивания; е) шевронные ребра

Результаты исследований [60, 61] показали, что наличие ребер на ленте действительно приводит к отсутствию шнура на ленте, что должно позитивно сказаться при использовании данного устройства при кипении. Наилучшие результаты по разрушению шнуровидных течений на ленте и устойчивости кольцевого течения (без сухих пятен) на стенке трубы показало применение интенсификатора в виде скрученной ленты с ребрами на ее поверхности,

расположенными под углом  $45^\circ$  к оси ленты против направления ее скручивания (Рис. 1.7, а): при этом жидкость более равномерно распределяется по поверхности трубы (Рис. 1.8).



← направление движения

Рис. 1.8 — Эволюция двухфазных течений при изменении  $X$  в канале скрученной лентой с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом к оси ленты против направления ее скручивания (жидкость подкрашена темной краской, половина канала заглушена):  $G=14,5$  г/с,  $p=0,15$  МПа,  $s/d=3$ , высота ребер  $h=1$  мм, шаг между ребрами  $s=18$  мм.

При расположении ребер по направлению скручивания ленты (Рис. 1.7, б-д) шнур на ленте также отсутствует, но основная доля жидкости, как и в трубе с обычной скрученной лентой, скапливается у передней по потоку кромки ленты. При расположении ребер против направления скручивания ленты (Рис. 1.7, а)

поток, движущийся вдоль ребер, набегают к передней по потоку кромке ленты и несколько «отодвигают» жидкость из этой области в сторону задней кромки ленты.

В работе [60] авторы отмечают, что расположение ребер по всей ширине ленты, когда торцы ребер находятся вблизи стенок трубы, может приводить к образованию дополнительных сухих областей за ребрами вследствие появления вихревых застойных зон. Кроме того, применение лент с ребрами способствует дополнительной интенсификации теплообмена (по сравнению с использованием обычных лент) при однофазных течениях, особенно при ламинарном течении.

Представленные данные получены для адиабатных (водо-воздушных) течений, что связано со сложностью подобных исследований в условиях теплообмена и фазовых переходов. Исследования приведены при относительно низких давлениях. Поэтому картины течения в реальных условиях кипения или конденсации могут существенно отличаться от представленных.

#### **1.4 Карты режимов двухфазных течений в различных каналах**

Для двухфазных течений наиболее важным аспектом является распределение жидкой и газообразной фазы в канале. Их соответствующее распределение и определяет режим течения. Коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления тесно связаны с местной структурой потока, таким образом прогнозирование картины течения двухфазного потока является важным при моделировании испарения и конденсации. Все известные программные комплексы (TRAC, RELAP5, SANTARE, ANLET) для улучшенной оценки теплогидравлических контуров ядерных энергетических установок основаны на моделях использующих эмпирические зависимости вид которых зависит от режима течения [62]. Поэтому в систему замыкающих соотношений включают соотношения для границ между различными режимами течения



двухфазного потока (карты режимов течения), соответственно для верификации модели необходимо иметь надежные карты по режимам двухфазных течений.

Аналогично для прогнозирования перехода от ламинарного режима течения к турбулентному в однофазных потоках, карты режимов двухфазных течений используются для прогнозирования перехода от одного типа картины двухфазного потока к другому.

В настоящее время разработано множество методов определения режимов двухфазных течений, что само по себе свидетельствует об отсутствии общепринятой методики расчета. Обычно используется двумерная система координат, позволяющая на плоскости изобразить области течения, такие графики принято называть картами режимов двухфазных потоков. Координаты таких карт отличаются друг от друга, что лишний раз свидетельствует о различных подходах к исследованию двухфазных течений.

В таблице 1.2 приведены результаты обзора карт режимов двухфазных течений в прямых каналах на основе переработанного и дополненного автором обзора, выполненного в работе [62]. Большинство карт режимов составлены по результатам экспериментов, выполненных в адиабатных условиях (тепловой поток  $Q=0$ ). Как видно, выбор координат карт режимов двухфазных течений достаточно многообразен в виду большого количества факторов влияющих на структуру течения. Однако можно выделить основные две группы карт режимов двухфазных течений, в качестве координат в которых взяты приведенные скорости жидкой  $w_{ж}$  и газообразной фазы  $w_{г}$ , либо – массовая скорость жидкости  $\rho w$  и относительное массовое паросодержание  $X$ . Так же в качестве координат часто используют объемное паросодержание  $\beta$ ; число Фруда  $Fr$ ; параметры Бейкера  $\lambda, \psi$ ; Локкарта-Мартинелли  $X_{tt}$ ; число Рейнольдса, подсчитанное по скорости циркуляции жидкости  $Re_0$ ; число Рейнольдса, подсчитанное по параметрам гомогенной смеси  $Re_{см}$ . Следует так же отметить, что нет единой системы классификации режимов двухфазных течений и границ переходов между режимами, хотя большинство исследователей подразделяют картины течения на

четыре основных класса: стратифицированный (волновой) режим, снрядный режим, кольцевой режим и пузырьковый режим. Каждый основной класс часто делят на подклассы.

Таблица 1.2 — Карты режимов прямолинейных двухфазных течений.

Авторы	Компоненты	Направление течения	Диаметр канала, м	Координаты	Тепловой поток
[62]	Пар-вода; воздух-вода	↑; →	Модель	$(Fr_{ж})^{0,5} \left(\frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}}\right)^{0,25} =$ $= f\left(X \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} - 1\right)\right)$	Q≠0; Q=0
[63]	Воздух-вода	↑	0,025	$\beta = f(Fr)$	Q=0
[64]	Воздух-вода	→	0,1÷0,025	$G_X/\lambda = f((1-X)\lambda\psi/X)$	Q=0
[65]	Пар-вода	↑	0,01	$\rho w = f(X)$	Q≠0
[66]	Пар-вода	→	0,00615	$\rho w = f(X)$	Q≠0
[67]	Пар-вода	↑	0,00564	$\rho w = f(X)$	Q≠0
[68]	Воздух-вода	↑	Модель	$\rho_{г} w_{г}^2 = f(\rho_{ж} w_{ж}^2)$	Q=0
[69]	R12	→	0,0127	$G_X/\lambda = f((1-X)\lambda\psi/X);$ $w_{ж} = f(w_{г}); G = f(X)$	Q≠0
[70]	Воздух-вода	→	0,0127÷ 0,1651	$w_{ж} = f(w_{г})$	Q=0
[71]	Воздух-вода	→; ↑	Модель	$Fr_{ж} = f(X_{tt})$ $T = f(X_{tt})$	Q=0
[72]	Воздух-вода; Пар-вода	→; ↑	0,0065	$w_{ж} = f(w_{г})$	Q=0 Q≠0
[73]	Пар-вода	→	Модель	$\frac{G_X}{\sqrt{dg\rho_{г}(\rho_{ж} - \rho_{г})}} = f(X_{tt})$	Q≠0
[74]	Воздух-вода	→	0,025	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[75]	Воздух-вода	↑	0,025; 0,051	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[76]	R12/R113	→	0,0048÷ 0,025	$w_{сж} = f(w_{сг})$	Q≠0
[77]	R12/R22	→	0,0048÷ 0,0159	$J_g^* = f(a)$	Q≠0
[78]	R12	→	0,006÷ 0,01	$w_0 = f(X)$	Q≠0

[79]	Воздух-вода	↑	0,05074	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[80]	Воздух-вода	→; ↑	0,004÷ 0,0123	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[81]	Воздух-вода	→	0,15; 0,17; 0,3	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[82]	Воздух-вода	→	0,024	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[83]	Воздух-вода	→	0,001÷ 0,005	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[84]	Пар-вода	↑	0,008	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[85]	Воздух-вода	→	0,0016	$w_{ж0} = f(w_{г0})$	Q=0
[86]	R410a	→	0,008	$\rho w = f(X)$	Q≠0

Очевидно, что режимы закрученных двухфазных течений отличаются от прямолинейных. Центробежная сила, возникающая при вращательном движении, отбрасывает капли и более крупные включения жидкости из газового потока, занимающего центр канала, на стенку. В настоящее время существует дефицит работ по исследованию режимов двухфазных течений в каналах с закруткой потока [87,88].

Авторы работы [87] определили границы и представили карту режимов двухфазного (водо-воздушного) течения в каналах со вставленной скрученной лентой (Рис. 1.9). В качестве координат были выбраны относительное массовое паросодержание  $X$  и число Рейнольдса, рассчитанное по скорости циркуляции жидкости  $X = f(Re_0)$ . Авторы [87] отмечают, что представленная карта режимов удобна для прогнозирования смены режимов течения при изменении газосодержания.

В работе [88] проводилось исследование структуры двухфазного течения при кипении хладагента R134a в канале со вставленной скрученной лентой. Исследования проводились в диапазоне изменения массовой скорости  $\rho w$  от 75 до 250 кг/м<sup>2</sup>с в канале с внутренним диаметром  $d=15.9$  мм, со скрученными лентами имеющие относительные шаги закрутки  $s/d = 3, 4, 9, 14$ . В результате исследования были выявлены: стратифицированный (волновой), снарядный, кольцевой-расслоенный, кольцевой. Карта режимов двухфазных течений при

кипении хладагента R134a в каналах со вставленной скрученной лентой полученная в работе [88] (Рис. 1.10) отражает только области существования режимов и не может быть использована для прогнозирования перехода от одного типа режима к другому.

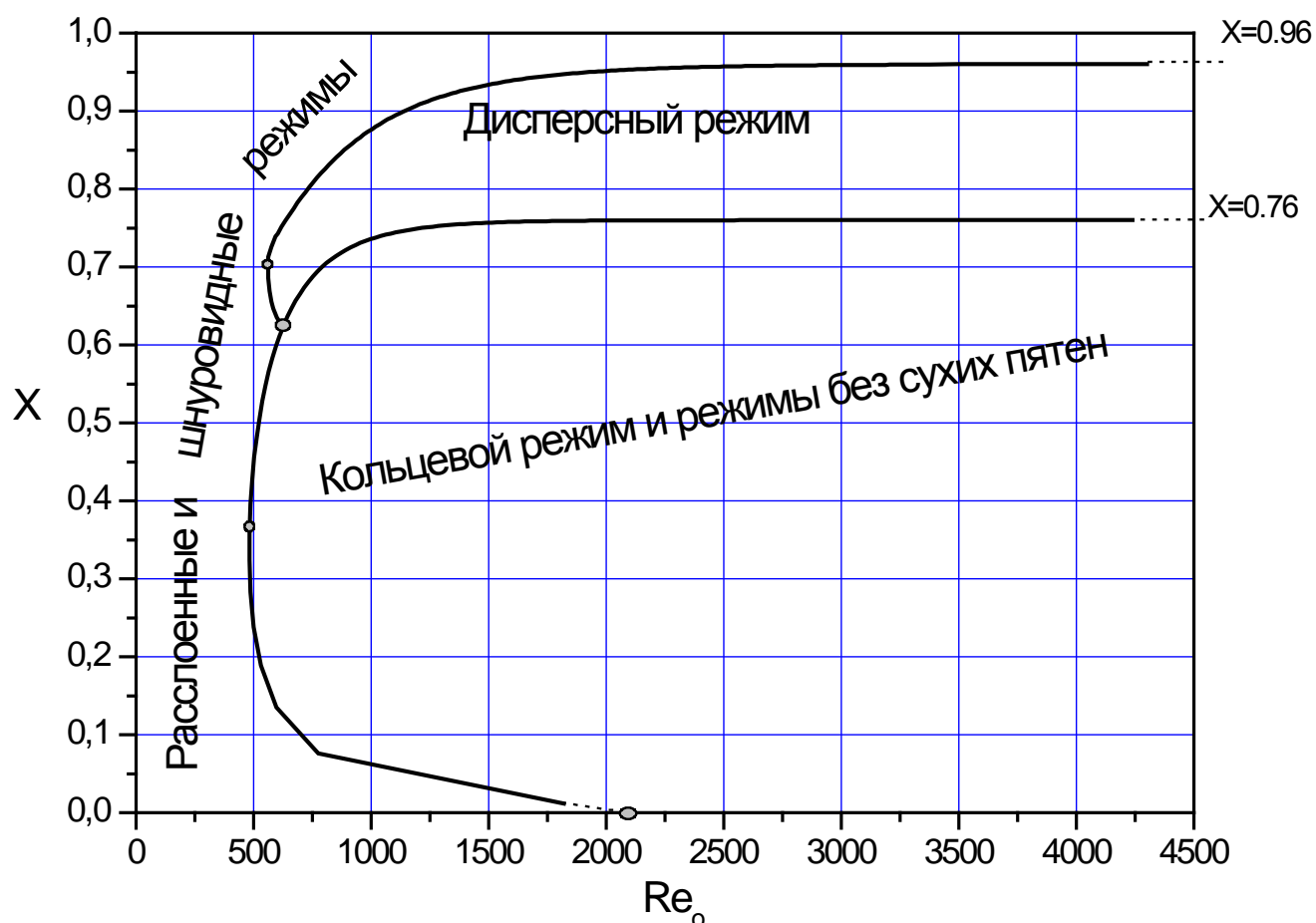


Рис. 1.9 — Общий вид карты режимов течения  $X = f(Re_0)$  в трубах со вставленной скрученной лентой [87].

Идентификацию режимов течений большинство авторов производили визуально, что вносит существенную погрешность при составлении карты режимов течений, и в описании границ режимов течений.

Большинство исследований карт режимов двухфазных течений проведены в адиабатных условиях. Результаты, полученные при таких исследованиях носят качественный характер, в реальных условиях данные имеют существенные отличия. Поэтому для усовершенствования карт режимов течения требуются экспериментальные данные полученные в диабатных условиях.

В настоящее время не существует универсальной карты режимов двухфазных течений, подходящих для любых диаметров каналов, в каждом конкретном случае требуется индивидуально составленная карта режимов течений учитывающая физические свойства рабочего тела, геометрические свойства канала, а также расположение канала относительно пространства, и режимных параметрах.

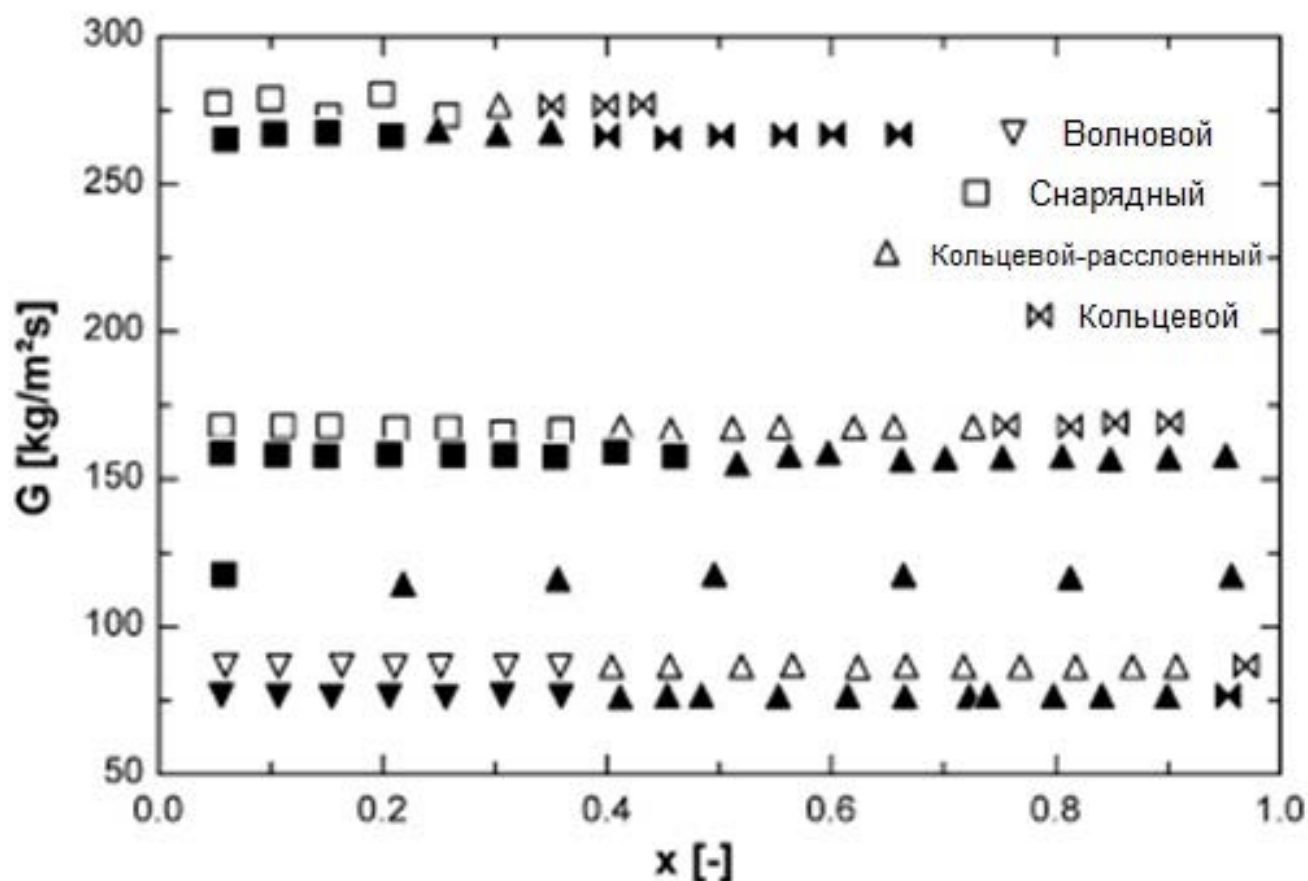


Рис. 1.10 — Карта режимов течения при кипении R134a в трубах со вставленной скрученной лентой [88].

Экспериментальному исследованию режимов двухфазных течений с закруткой потока в литературе уделено недостаточно внимания, определение и прогнозирование режима течения имеет важное значение при расчете температур стенок высоконагруженных элементов систем охлаждения различных энергетических установок требуются надежные данные о структуре потока. Поэтому актуальность исследований посвященной данной тематике сохраняется по настоящее время и играет большую роль в усовершенствовании расчетных

кодов программных комплексов, и модернизации теплообменного оборудования различного назначения.

### 1.5 Теплоотдача однофазного потока при течении хладагентов в прямолинейных трубах, и каналах со вставленной скрученной лентой

При вынужденном движении однофазного потока хладагента R134a в прямолинейных трубах для определения коэффициента теплоотдачи общепринято использовать известные зависимости В. Гниелински (1.1) [89] и Диттуса-Боелтера (1.3) [90], авторы [49, 50, 51] использовали расчетные значения полученные по (1.1) и (1.3) для определения достоверности экспериментальных данных по теплоотдаче при однофазном течении R134a в прямых трубах с внутренними диаметрами  $d=7.5$  и  $15.9$  мм, отклонение экспериментальных данных от расчетных значений составило  $\pm 20\%$ .

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\left(\frac{\xi}{8}\right) (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)}} \quad (1.1)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления рассчитанный по уравнению Г.К. Филоненко [91]:

$$\xi = (1,82 \lg Re - 1,64)^{-2} \quad (1.2)$$

$$h_{\text{одн}} = 0,023 Re_{\text{ж}}^{0,8} Pr_{\text{ж}}^{0,4} (\lambda_{\text{ж}}/d_{\text{вн}}); \quad (1.3)$$

Ю.В. Минеев [52] для определения достоверности экспериментальных данных и работоспособности экспериментального стенда сопоставлял данные по теплоотдаче при однофазном течении R407C в прямой трубе с внутренним диаметром  $d=12$  мм со значениями, рассчитанными по классической зависимости М.А. Михеева для воды (1.4) [92]:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} \quad (1.4)$$

В результате данного сопоставления, погрешность не превышала  $\pm 18\%$ .

Для расчета коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции R12 в каналах со вставленной скрученной лентой Дженсен и Бенслер [51] рекомендуют использовать корреляцию (1.5) Лопины и Берглеса [10]:

$$Nu = F \left\{ 0,023 \left( \left( \frac{\sqrt{4y^2 + \pi^2}}{2y} \right) Re_h \right)^{0,8} Pr^{0,4} + 0,193 \left[ \left( \frac{Re_h}{y} \right)^2 \left( \frac{D_h}{D} \right) \beta \Delta T Pr \right]^{1/3} \right\} \quad (1.5)$$

Ю.В. Минеев [52] сделал вывод на основе анализа результатов экспериментального исследования, для теоретического определения коэффициента теплоотдачи при течении R407C однофазного закрученного потока можно использовать критериальную зависимость (1.6), предложенную В.К. Щукиным [93]:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} Nu = 0,3 Re^{0,33} Pr^{0,43} De^{0,27} \frac{\lambda}{d} \quad (1.6)$$

Представленная зависимость (1.6) хорошо описывает опытные данные [52] при однофазном течении и максимальная погрешность не превышает 16%.

### 1.5.1 Теплоотдача при кипении хладагентов в прямолинейных каналах

Коэффициент теплоотдачи при кипении хладагента R134a в прямолинейных трубах может быть рассчитан по методикам Лю-Винтертона [94], Войтана [95], и Кандликара [96]. Авторы работы [50] провели сравнение экспериментальных данных с расчетными значениями коэффициента теплоотдачи при кипении полученными по данным методикам, лучший результат показала методика Лю-Винтертона (1.7), которая описывает 89% данных при кипении недогретой и насыщенной жидкости в пределах погрешности  $\pm 30\%$ . Методика Войтана предсказывает 73% данных в аналогичной группе ошибок, наихудшей оказалась методика Кандликара.

$$h_{дв}^2 = (Sh_{пуз})^2 + (Fh_{одн})^2; \quad (1.7)$$

$$F = 0,35 \left[ 1 + xPr_{ж} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} - 1 \right) \right]; S = 1/(1 + 0.55F^{0,1}Re^{0,16}).$$

где,  $h_{одн}$  – расчетная зависимость Диттуса-Боелтера [90],  $h_{пуз}$  – расчет по зависимости Купера [97]:

$$h_{пуз} = 55 \left( \frac{P}{P_{крит}} \right)^{0,12-0,087In\varepsilon} \left[ -0,4343In \left( \frac{P}{P_{крит}} \right) \right]^{-0,55} M^{0,5} q^{0,67}. \quad (1.8)$$

где,  $\varepsilon$  – шероховатость поверхности канала,  $M$  – молекулярная масса.

В работе [98] было проведено сравнение экспериментальных данных при кипении R134a при течении в прямолинейных трубах с расчетными значениями [94], [96], [97] [99], [100], [101], [102], [103], [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], в результате которого установлено, что наилучшим образом описывает экспериментальные данные зависимость Гунгора-Винтертона [101] (1.9) с погрешностью от  $-25,4\%$  до  $+36,6\%$ .

$$h_{пр} = h_{одн} \left[ 1 + 3000Bo^{0,86} + 1,12 \left( \frac{x}{1-x} \right)^{0,75} \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho_{г}} \right)^{0,41} \right]; \quad (1.9)$$

Зависимости [107], [109], [97], [102], [106] удовлетворительным образом описывают экспериментальные данные с погрешностями 39,1%, 44,2%, 44,3%, 44,7 и 45,1% соответственно, остальные зависимости дают неудовлетворительный результат. Авторы работы [50] так же рекомендовали зависимость (1.9) для определения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в прямой трубе с внутренним диаметром  $d=7.5$  мм, отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по зависимости (1.9) находится в пределах от  $-15\%$  до  $+10\%$ .

### 1.5.2 Теплоотдача при кипении хладагентов в каналах со вставленной скрученной лентой

Кедзиерский и Ким [53] на основе собственных экспериментальных данных при кипении и конденсации хладагентов R-12, R-22, R-152a, R-134a, R-290, R-



32/R-134a, R-32/R-152a, R-290/R-134a и R-134a/R-600a в каналах с вставленной скрученной лентой с относительным шагом закрутки  $s/d=4,15$  предложили зависимость для определения коэффициента теплоотдачи (1.10), авторы [53] утверждают, что отклонение экспериментальных данных аналогичной работы [54] от значений, рассчитанных по уравнению (1.10) составляет 30÷40%.

$$Nu = 1,356Sw^{\alpha_1}Pr^{\alpha_2} \left( \frac{P}{P_{\text{крит}}} \right)^{\alpha_3} [-\ln(Pr)]^{\alpha_4} Bo^{\alpha_5}, \quad (1.10)$$

где:  $\alpha_1 = 0,993 - 1,181x + 0,899x^2$ ;

$$\alpha_2 = 1,108 - 2,366x + 1,451x^2$$

$$\alpha_3 = -2,383 + 5,255x + 1,791x^2$$

$$\alpha_4 = -3,195 + 6,668x$$

$$\alpha_5 = 1,073 - 2,679x + 1,443x^2$$

$$Sw = \frac{Re_s}{\sqrt{y}};$$

$$Re_s = Re \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2y}\right)^2}}{1 - \frac{4\delta}{\pi d}}.$$

В работе [50] проведено экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении R134a в каналах с внутренним диаметром  $d=7,5$ мм со вставленными скрученными лентами с относительными шагами закрутки  $s/d=6, 9, 12, 15$  при массовых скоростях  $\rho w=54, 85, 114, 136$  кг/м<sup>2</sup>с. Авторы [50] отметили изменение коэффициента теплоотдачи от 0,8 до 1,7 раза. Наибольшее увеличение теплоотдачи было зафиксировано в канале со скрученной лентой имеющей наименьший относительный шаг закрутки равный  $s/d=6$  в области режимных параметров паросодержания  $X=0,4\div 0,6$  и массой скорости  $\rho w=54\div 85$  кг/м<sup>2</sup>с, объясняя это тем, что в области этих параметров в канале без вставки (ленты) наблюдается волновой режим течения. Установка ленты меняет волновой режим течения на кольцевой. При массовой скорости  $\rho w=136$  кг/м<sup>2</sup>с структура потока всегда остается кольцевой и установка лент при малых значениях паросодержания

не приводит к существенному изменению коэффициента теплоотдачи при изменении относительного шага закрутки  $s/d$  от 15 до 6, увеличение теплоотдачи составляет 24%, при более низких скоростях 11÷15%.

Авторы работы [50] представили, результаты сравнения экспериментальных данных со значениями рассчитанными по (1.10), согласно данного сравнения отклонение экспериментальных данных от расчетных находится в пределах от –65% до +25%. В связи с этим авторы [50] предложили следующую корреляцию (1.11), основанную на критериальной модели Агравала и Вармы (1.12) [54]:

$$\frac{h_{\text{скр}}}{h_{\text{пр}}} = 0,0056 Re_0^{2,214} Bo^{1,532} y^{-0,5} + 1,2156; \quad (1.11)$$

где,  $h_{\text{пр}}$  – расчет по методике Гунгора и Винтертона [101].

$$\frac{h_{\text{скр}}}{h_{\text{пр}}} = 0,002944 Re_0^{2,247} Bo^{1,624} y^{-0,5219}. \quad (1.12)$$

Корреляция (1.11) описывает экспериментальные данные [50] в пределах погрешности  $\pm 25\%$ . В идентичном исследовании [49] 95% экспериментальных данных при кипении R134a в канале с внутренним диаметром  $d=15,9$ мм со вставленными скрученными лентами с относительными шагами закрутки  $s/d=9\div 14$  при массовых скоростях  $\rho w=75\div 200$  кг/м<sup>2</sup>с, с точностью  $\pm 30\%$  описываются зависимостью (1.11).

Авторы [49] провели сравнение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными лентами с методикой Дженсена-Бенслера (1.13) [51], зависимость (1.13) является модификацией методики Чена [98]:

$$h_{\text{скр}} = S h_{NB} + F h_c; \quad (1.13)$$

$h_{NB}$  – расчет по уравнению Форстера-Зубера [115]:

$$h_{NB} = 0,00122 \left( \frac{\lambda_{\text{ж}}^{0,79} C_p^{0,45} \rho_{\text{ж}}^{0,49} g^{0,25}}{\sigma^{0,5} \mu_{\text{ж}}^{0,29} r^{0,24} \rho_{\Gamma}^{0,24}} \right) \Delta T_s^{0,24} \Delta p_s^{0,75}; \quad (1.14)$$

где  $S$  – коэффициент подавления пузырькового кипения предложенный Беннеттом и др. [116]:

$$S = \left( \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\alpha F X_0} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\alpha \frac{F X_0}{\lambda_{\text{ж}}} \right) \right]; \quad (1.15)$$

$$X_0 = 0,041 \left[ \frac{g_c \sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})} \right]^{1/2}; \quad (1.16)$$

$$\text{для } \frac{1}{\chi} \leq 0,1 \quad F = 1,0;$$

$$\text{для } \frac{1}{\chi} > 0,1 \quad F = 2,35 \left( \frac{1}{\chi} + 0,213 \right)^{0,736}.$$

В работе [49] показано, что отклонение экспериментальных данных от рассчитанных по зависимости (1.13) составляет  $-60\%$  до  $+30\%$ . Зависимость (1.13) получена в результате обработки экспериментальных данных при кипении хладагента R113 при вертикальном расположении каналов с внутренним диаметром  $d=8.1$  мм и  $d=13.92$  мм, массовой скорости хладагента  $\rho_w=120$  и  $1600$  кг/м<sup>2</sup>с, плотностях теплового потока  $q=0\div 50$  кВт/м<sup>2</sup>, в то время как экспериментальный банк данных [50] был получен при кипении хладагента R134a в горизонтальном канале с внутренним диаметром  $d=7.5$ , относительных шагах закрутки  $s/d=6\div 15$ , массовой скорости хладагента  $\rho_w=54\div 136$  кг/м<sup>2</sup>с, плотностях теплового потока  $q=1.8\div 5.3$  кВт/м<sup>2</sup>, авторы [49] не рекомендуют использовать зависимость (1.13) для определения коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a.

Ю.В. Минеев [52] при анализе экспериментальных данных при кипении хладагента R407C внутри трубы с ленточными турбулизаторами утверждает, что уменьшение шага турбулизатора вызывает рост коэффициента теплоотдачи за счет изменения скорости течения парожидкостной смеси и улучшения смачиваемости внутренней поверхности трубы жидкостью. Действительно, повышение параметра  $d/s$  положительно сказывается на теплообмен при кипении R407C, особенно при малых тепловых потоках. Объясняя тем, что увеличение параметра  $d/s$  приводит к росту скорости течения жидкости, а следовательно, и инерционной массовой силы. Отбрасывание более тяжелых частиц жидкости к стенке трубы за счет центробежной силы способствует улучшению

смачиваемости внутренней поверхности трубы, что приводит к существенному (по сравнению с гладкой трубой) увеличению коэффициента теплоотдачи. Так при  $q=1,5-2$  кВт/м<sup>2</sup> и уменьшении относительного шага закрутки в исследуемом диапазоне ( $0 < d/s < 0,059$ ) коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  возрастал в среднем в 1,5-1,7 раза, в то время как при  $q < 1,5$  кВт/м<sup>2</sup> эта величина составляла 2 и более. При малых значениях  $q$  интенсивность механизма переноса теплоты, обусловленного процессом парообразования, ничтожно мала по сравнению с интенсивностью конвективного теплообмена, который, в свою очередь, определяется скоростью потока.

Автор [52] на основе результатов проведенного экспериментального исследования по кипению смесового озонобезопасного хладагента R407C внутри трубы с ленточными турбулизаторами получил эмпирическую формулу для расчета коэффициента теплоотдачи (1.17):

$$\alpha = 5,59 w \rho^{0,56} q^{0,6} (d/s)^{0,13} P^{0,21} \beta^{1,13}; \quad (1.17)$$

Область применения данной зависимости:  $\rho w = 32 \div 150$ ;  $q = 0.5 \div 4$  кВт/м<sup>2</sup>;  $d/s = 0.03 \div 0.06$ ;  $p = 0.22 \div 0.32$  МПа;  $\beta = 0.1 \div 0.9$ ; рабочее вещество – R407c.

Ю.В. Минеев [52], в результате обработки собственных экспериментальных данных и данных других авторов [117, 118, 119] вывел зависимость (1.18) для определения критерия Нуссельта в интенсифицированной ленточными турбулизаторами трубе при условии полного смачивания:

$$Nu = 0,05 Re^{0,33} Pr^{0,43} De^{0,27} Pe^{0,6} K_p^{0,2}; \quad (1.18)$$

где:  $K_p = Pd/\sigma$  – комплекс, определяющий влияние давления при кипении.

Область применения выражения (1.16):  $Re = 1000 \div 17000$ ;  $De = 100 \div 300$ ;  $Pr = 2.5 \div 7$ ;  $K_p = 0.2 \div 0.33$ ;  $Pe = 33 \div 190$ . При сравнении экспериментальных и расчетных значений критерия Нуссельта  $Nu$  при кипении смеси R407C в горизонтальной трубе с ленточной вставкой погрешность определения  $Nu$  по формулам (1.18) составляет  $\pm 25\%$ . В работе [52] отмечено, что формула (1.18) может так же использоваться при определении коэффициента теплоотдачи в каналах со вставленной скрученной лентой при различных конструктивных

параметрах закрутки  $s/d$  и диаметрах труб  $d$ , это также подтверждается сопоставлением результатов экспериментальных исследований по теплообмену при течении двухфазных закрученных потоков [117, 118].

Автор [52] утверждает, что применение ленточных вставок приводит к существенному увеличению коэффициента теплоотдачи (до 1,8 раз), особенно при малом шаге турбулизатора ( $d/s=0,126$ ) и больших значениях истинного объемного паросодержания, которые соответствуют расслоенному режиму течения. Эффективность применения ленточных турбулизаторов исследуемого шага в волновом режиме несколько ниже (до 1,5 раз). Еще меньше эффект от применения турбулизаторов в снаряжном режиме (до 1,4 раз). Этот факт можно объяснить тем, что закрутка потока приводит к центрифугированию более тяжелой фазы (т.е. воды) к периферии, в то время, как воздух смещается к центру трубы. Рост паросодержания при этом только способствует такому разделению, поэтому в тех режимах, которые для гладкой трубы характеризуются понижением коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  с ростом  $\beta$  (расслоенный, волновой), для трубы с ленточной вставкой наблюдается значительная интенсификация теплоотдачи.

## 1.6. Выводы. Цели и задачи исследования

При анализе данных литературного обзора, установлено, что в настоящее время хорошо изучены процессы теплообмена и гидродинамики в каналах со вставленными скрученными (классическими) лентами при однофазном течении рабочего вещества. Получены обобщающие зависимости для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления [1,2, 10-17, 20, 24-47]. Отмечена тенденция роста работ посвященных исследованию теплоотдачи и гидродинамики в каналах с различными модификациями геометрии скрученных лент при вынужденной конвекции, однако диапазон исследованных режимных параметров, геометрий и рабочих тел весьма ограничен, авторы [1,2, 10-17, 20, 24-47] отмечают необходимость проведения дополнительных исследований.

Работы по исследованию теплоотдачи кипения жидкости в каналах с закруткой потока выполнены только с использованием классических скрученных лент [3, 5, 21, 48-54], в большинстве из которых в качестве рабочего тела использовались галогенуглеводородные хладагенты при горизонтальном расположении рабочего участка с использованием электрического нагрева для лент с относительными шагами закрутки  $s/d$  от 2,5 до 15 для диаметров труб  $d$  от 3,8 до 15,9 мм изготовленных из нержавеющей стали и алюминия при низких массовых скоростях и низких плотностях теплового потока  $\rho w$  менее  $350 \text{ кг/м}^2\text{с}$  и  $q=50 \text{ кВт/м}^2$  соответственно.

Информация о теплоотдаче при кипении в каналах со вставленными скрученными лентами модифицированной геометрии находящейся в открытом доступе практически отсутствует. Как отмечено ранее, одной из важных особенностей структуры двухфазных течений в трубах со вставленной скрученной лентой является наличие шнуровидного режима течения, как негативного фактора. Согласно результатов исследований [60, 61] установлено, что наличие ребер на ленте, действительно приводит к предотвращению шнуровидного режима в канале, что должно позитивно сказываться при использовании данного устройства в условиях кипения, однако данные исследований [60, 61] получены для адиабатных (водо-воздушных) течений, что связано со сложностью подобных исследований в условиях теплообмена и фазовых переходов и требуют дополнительных исследований в реальных условиях работы теплообменного оборудования.

В связи с вышеизложенным в настоящей диссертационной работе поставленные следующие основные задачи:

1. Разработать и создать экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

2. Провести экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде оребренных скрученных лент.

3. На основе экспериментальных данных получить обобщающие зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставками в виде орребренных скрученных лент.

4. Разработать практические рекомендации по использованию интенсификаторов теплообмена в каналах со вставками в виде орребренных скрученных лент.