

На правах рукописи

КРУГ АЛЕКСАНДР ФЕДОРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ С
ЗАКРУЧЕННОЙ ЛЕНТОЙ**

Специальность – 01.04.14
Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре инженерной теплофизики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Кузма-Кичта Юрий Альфредович

Официальные оппоненты: Дедов Алексей Викторович,
доктор технических наук, доцент, профессор
каф. Общей физики и ядерного синтеза
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Болтенко Эдуард Алексеевич
доктор технических наук, с.н.с., начальник
отдела нестандартных теплотехнических
измерений ОАО «Электрогорский научно-
исследовательский центр по безопасности
атомных электростанций»

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Объединенный институт
высоких температур» (ОИВТ РАН)

Защита состоится 21 июня 2013 года в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.04 при ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 17, корп. Т, кафедра инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина, комн. Т-206.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Отзывы на автореферат с подписями, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан «___» _____ 2013 г.

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

Ястребов А.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Закрутка потока с помощью ленты является простым и эффективным способом интенсификации тепломассообмена в энергонапряженных каналах ядерно-энергетических установок, теплообменников, аппаратов авиационной и ракетно-космической техники, химической промышленности. Использование закрутки потока с помощью ленты приводит к повышению мощности и безопасности теплообменных устройств за счет повышения критических тепловых нагрузок (КТН), выравнивания температурных неравномерностей, стабилизации течений, снижения солеотложений на стенках. Последнее время ведутся активные работы по созданию международного термоядерного реактора ITER. Одной из актуальных проблем является разработка системы охлаждения диверторов, при этом проведенные исследования показывают, что применение закрученной ленты в каналах охлаждения дивертора совместно с использованием потока недогретой жидкости является перспективным методом и позволяет при определенных условиях снимать тепловые нагрузки до 90 МВт/м^2 . При таких высоких тепловых нагрузках возникновение кризиса теплообмена может привести к весьма нежелательным последствиям, отказу оборудования и авариям. Поэтому при проектировании высоконагруженных элементов необходимо знание КТН для конкретных условий теплообмена. Сведения о кризисе теплоотдачи составляют не только базовую информацию для расчета и проектирования теплообменных устройств, но и определяют порой саму возможность существования того или иного технического проекта. Поэтому наличие массива данных по КТН в закрученных потоках и надежных рекомендаций, применимых в широком диапазоне параметров, представляется крайне необходимым. К данному моменту проведено достаточно много экспериментальных исследований по изучению влияния закрутки потока с помощью ленты на кризис теплообмена в трубах и получено большое

количество опытных данных и расчетных зависимостей. Однако имеющиеся экспериментальные данные по КТН получены в ограниченных диапазонах паросодержаний, массовых скоростей, давлений, длин участков нагрева и степеней закрутки ленты, носят противоречивый характер. Расчетные зависимости не согласуются между собой и с опытными данными и применимы лишь в узком диапазоне режимных параметров, что ограничивает использование закрутки потока для повышения надежности и эффективности элементов ядерной и термоядерной техники. Если для прямолинейных течений в трубах собраны массивы данных по КТН в широком диапазоне параметров, то для закрученных потоков они отсутствуют. Необходимо учитывать, что увеличение КТН при установке ленты сопровождается дополнительным падением давления, поэтому рост мощности на перемещение (прокачку) теплоносителя должен быть приемлемым. При этом одним из немаловажных вопросов, который остается открытым – это определение оптимального значения степени закрутки, при котором увеличение КТН не повлечет за собой чрезмерный рост гидравлического сопротивления. Таким образом, проведение экспериментального исследования влияния закрутки потока на кризис теплообмена, формирование массива данных по КТН и разработка расчетных рекомендаций в широком диапазоне режимных параметров представляют значительный научный и практический интерес.

Цель работы и задачи исследования

1. Экспериментальное исследование кризиса теплообмена при кипении недогретого закрученного потока воды в условиях неравномерного нагрева в малоизученной области низких массовых скоростей $\rho W < 500$ кг/(м²с). Измерение падения давления с целью уточнения методики его расчета при закрутке потока. Анализ достоверности решения обратной задачи теплопроводности и разработка методики диагностики режимов теплосъема по периметру трубы.

2. Формирование массива опытных данных по КТН при закрутке потока с помощью ленты в широком диапазоне параметров, охватывающих области кипения недогретой и насыщенной жидкости.
3. Анализ возможности применения существующих расчетных зависимостей для описания сформированного массива опытных данных по КТН.
4. Разработка уравнений для расчета КТН при закрутке потока с помощью ленты, описывающих с удовлетворительной точностью полученный массив опытных данных в широком диапазоне режимных параметров.
5. Поиск оптимальных параметров закрутки ленты, обеспечивающих требуемую КТН при минимальных гидравлических потерях. Разработка общих рекомендаций по использованию закручивающих поток лент.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. С помощью полученных из эксперимента данных и программного пакета ANES/NE рассчитаны значения КТН при кипении недогретой воды в закрученном потоке в условиях неравномерного нагрева, в малоизученной области низких массовых скоростей $\rho W < 500 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$. Проведены измерения потерь давления на трение в трубе с закрученной лентой.
2. Сформирован массив экспериментальных данных по КТН при закрутке потока воды с помощью ленты, содержащий 916 точек и охватывающий области кипения недогретой и насыщенной жидкости. Массив охватывает диапазоны массовых скоростей от 30 до 33000 $\text{кг}/\text{м}^2 \text{ с}$, давлений от 0.1 до 20.1 МПа, коэффициентов закрутки ленты от 1 до 34.5, длин участка нагрева от 0.007 до 4.87 м, диаметров труб от 1.6 до 20 мм, расположенных как вертикально, так и горизонтально, при их однородном и неоднородном нагреве.
3. С использованием собранного массива значений КТН получены уравнения, удовлетворительно описывающие данные массива. Уравнения рекомендованы как для закрученных, так и прямолинейных потоков в исследованном диапазоне режимных параметров.

4. На основании анализа опытных данных созданного массива по КТН установлено, что влияние начального термического участка проявляется в диапазоне относительной длины участка нагрева $L_H/d < 10$. Введение давления в предложенную зависимость, учитывающую влияние относительной длины участка нагрева, позволило обобщить опытные данные Оводкова А.А. и Дедова А.В. для коротких рабочих участков.

5. Предложена методика определения границ режимов теплосъема при неравномерном нагреве рабочего участка, позволяющая повысить надежность решения обратной задачи теплопроводности.

6. На основании полученных результатов по КТН и падению давления разработаны рекомендации по выбору оптимальных параметров закрученной ленты и ее практическому применению.

Практическая ценность работы

Полученный массив данных и расчетные рекомендации по КТН могут быть использованы при проектировании и разработке новых типов ядерных и термоядерных реакторов.

Достоверность полученных данных подтверждается:

– тщательной проработкой методик автоматизированных измерений, использованием современных измерительных средств и их обработкой на измерительно-вычислительном комплексе;

– воспроизводимостью полученных результатов и согласованностью их с имеющимися в литературе опытными данными и представлениями.

Автор выносит на защиту:

– методы и результаты экспериментального исследования кризиса теплообмена в трубе при закрутке с помощью ленты потока недогретой жидкости;

– рекомендации для расчета КТН при закрутке потока для недогретой и насыщенной жидкости, применимые в широком диапазоне режимных параметров.

Апробация работы. Результаты и положения работы изложены и

обсуждены: на третьей, четвертой и пятой Российских национальных конференциях по теплообмену (РНКТ), Москва, МЭИ, 2002, 2006г., 2010г.; на второй, третьей и четвертой международных конференциях «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках», Москва, МЭИ 2005 г., 2008 г., 2011 г.; на 12 и 14-том Минских Международных Форумах по тепломассообмену, 2004г., 2012 г.; на заседании кафедры инженерной теплофизики им. В.А. Кириллина (МЭИ, Москва, 20.06.2012г.).

Личный вклад автора заключается в формировании массива опытных данных по КТН при закрутке потока; написании и отладке программ численной реализации решения обратной задачи теплопроводности; проведении экспериментального исследования падения давления при течении воды в трубе с закрученной лентой; обработке и анализе результатов расчетных и экспериментальных исследований.

Публикации по работе. Материалы, изложенные в диссертационной работе, нашли отражение в 12 печатных работах, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Основной материал изложен на 172 страницах машинописного текста, включает 63 рисунка и 11 таблиц, 2 приложения на 37 страницах. Список литературы включает 99 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы и сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен обзор работ (табл.1), посвященных изучению кризиса теплообмена в трубах без ленты и с закрученной лентой. Представлены имеющиеся рекомендации для расчета КТН и падения давления. Обнаружены

различия расчетных данных по КТН, что обуславливает необходимость их усовершенствования. Для построения таких зависимостей необходимо сформировать массив опытных данных по КТН в широком диапазоне параметров.

Во второй главе описаны методика исследования и экспериментальная установка по изучению кризиса теплообмена в условиях высокоинтенсивного неравномерного нагрева горизонтально установленной трубы с закрученной лентой. КТН определены в малоизученной области низких массовых скоростей и давлений: $p=0.17\div 0.22$ МПа, $\rho W=200\div 280$ кг/м²с, $x=-0.12\div -0.03$. Потери давления на трение в трубе с закрученной лентой при течении воды измерены в диапазоне чисел $\rho W=200\div 5800$ кг/м²с ($2600 < Re < 48000$). Рабочий участок имеет сложную геометрию (Рис. 2). Это толстостенная медная труба с прорезями на внешней поверхности для уменьшения поперечных перетоков тепла. Внутренний диаметр канала – 8 мм, наружный диаметр – 21 мм. Длина участка, равная 50 мм, выбиралась из условия получения на его поверхности мегаваттных тепловых нагрузок и ограничивалась мощностью высоковольтного выпрямителя.

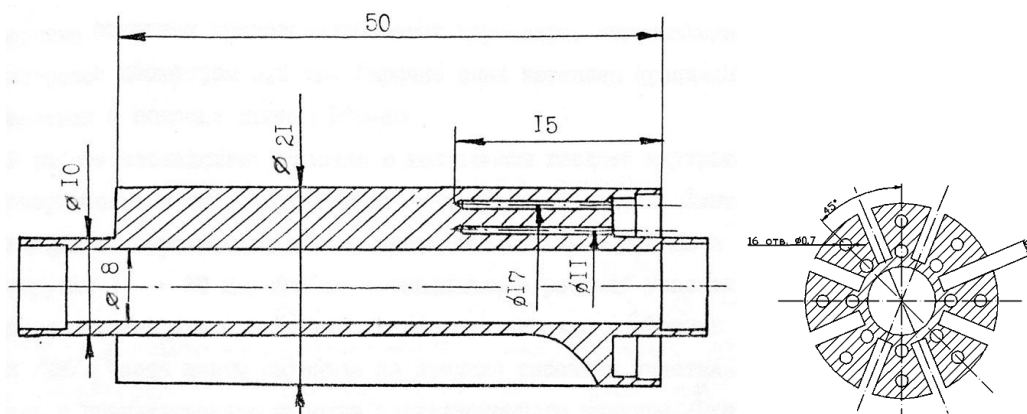


Рис. 2. Рабочий участок

В опытах измерялись расход, температура и давление воды на входе и выходе из рабочего участка, распределения температуры стенки T_c и интенсивности пульсаций по периметру трубы, пульсации давления, падение давления в рабочем участке при однофазной конвекции. Данные измерений использованы при решении обратной задачи теплопроводности для нахождения

распределения $T_c(\varphi)$, $\alpha(\varphi)$, $q_c(\varphi)$ по поверхности охлаждения и КТН.

На Рис. 3 представлены опытные данные по условиям теплосъема в случае одностороннего нагрева участка без закрученной ленты при $p=0.43$ МПа, $\rho W=200$ кг/(м²с). Кривая $q_u(T_u)$ получена, используя данные измерения температуры стенки на расстоянии 1.5 мм и 4.5 мм от поверхности охлаждения в лобовой точке ($\varphi=0$). На кривой $q_u(T_u)$ обнаружены три участка. На первом участке при незначительном повышении q_u наблюдается существенный рост температуры стенки. Начало кипения определяется по изменению среднеквадратических отклонений температуры стенки S_T и давления S_p (интенсивность пульсаций) с ростом температуры стенки. На этом участке интенсивности пульсаций температуры стенки S_T и давления S_p малы и поэтому сделан вывод, что теплоотдача осуществляется конвекцией в однофазном потоке. На втором участке зависимости $q_u(T_u)$ ($q_u > 1.2$ МВт/м²) резкое повышение тепловой нагрузки сопровождается незначительным увеличением температуры стенки. Интенсивность пульсаций давления резко возрастает, что свидетельствует об образовании паровых пузырей на стенке. Паровые пузыри, отрываясь от поверхности теплообмена, попадают в недогретую жидкость. Конденсация паровых пузырей в недогретой жидкости приводит к уменьшению их диаметров. При достижении критической величины паровые пузыри схлопываются, что вызывает пульсации давления. Теплоотдача в этой области осуществляется за счет кипения недогретой жидкости. Повышение интенсивности пульсаций температуры стенки обусловлено изменением локального коэффициента теплоотдачи вследствие поочередного омывания стенки жидкостью и паром. На третьем участке кривой $q_u(T_u)$, начиная с режима № 10-11, небольшое повышение тепловой нагрузки приводит к существенному росту температуры стенки, а интенсивности пульсаций температуры и давления уменьшаются. На основании данных измерений сделан вывод, что теплоотдача на этом участке осуществляется за счет пленочного кипения.

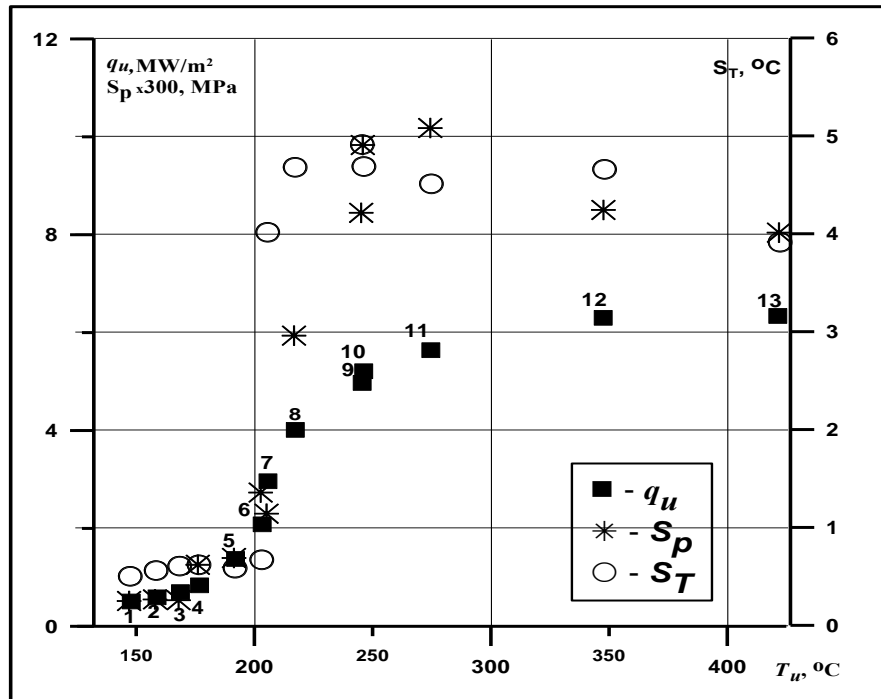


Рис. 3. Данные измерений зависимости $q_u(T_w)$, пульсаций температуры стенки и давления при $\varphi = 0^\circ$, $p=0.43$ МПа, $\rho W=200$ кг/(м²с).

В третьей главе приведены описание и решение обратной задачи теплопроводности (ОЗТ). Полученные из эксперимента данные являются исходными для нахождения распределения коэффициента теплоотдачи $\alpha(\varphi)$, температуры стенки $T_c(\varphi)$ и отводимой тепловой нагрузки $q_c(\varphi)$ по поверхности охлаждения путем решения обратной задачи теплопроводности. За искомую величину КТН принимается максимальная тепловая нагрузка на распределении $q_c(\varphi)$. Математическая модель ОЗТ включает в себя двумерное стационарное уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрических координатах, и граничные условия. Задача решалась методом подбора с привлечением информации о физическом процессе, полученной из наблюдений. Распределение коэффициентов теплоотдачи, принимавшееся за решение задачи, обеспечивает расчетное температурное поле в стенке трубы, отклоняющееся от измеренного на $R=5.5$ мм на величину невязки, которая зависит в данной задаче в основном от погрешности измерения температуры стенки. Температурное поле в сечении рабочего участка описывается в цилиндрических координатах двумерным

стационарным уравнением теплопроводности следующего вида:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(\lambda_c R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{R^2} \lambda_c \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) = 0$$

а) На внешней границе области – окружности $R_2 = 8.5$ мм заданы граничные условия 1-ого рода: $T_c(R_2, \varphi) = T_u(R_2, \varphi)$, где T_u – измеренное распределение температуры стенки при $R = R_2$,

б) На внутренней границе области – поверхности охлаждения ($R = R_{\text{внутр}} = R_1 = 4$ мм) заданы граничные условия – 3-ого рода: $\alpha(R_1, \varphi)(T_c(R_1, \varphi) - T_{\text{ж}}) = -\lambda_c \left(\frac{\partial T}{\partial R} \right)_{R, \varphi}$, где $T_{\text{ж}}$ – среднемассовая температура жидкости, $\alpha(R_1, \varphi)$ – распределение искомого коэффициента теплоотдачи, задается пользователем. $T_c(R_1, \varphi)$ – распределение искомой температуры на поверхности охлаждения.

в) Зазоры толщиной 0.7 мм моделируются контрольными объемами, на которых выполняется условие (начиная с радиуса $R=5.5$ мм) – 2-ого рода:

$$\lambda_c \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) \Big|_{\varphi=\varphi_j} = 0 \quad j=1 \div 8$$

Для режимов, соответствующих точкам излома на кривой $q_u(T_u)$ (границе первого и второго участков, а также второго и третьего участков) решалась обратная задача теплопроводности. Совместное рассмотрение результатов решения ОЗТ и данных по пульсациям температуры стенки и давления позволило идентифицировать начало кипения и возникновение пленочного кипения, а также существование различных режимов теплосъема по поверхности охлаждения. Согласно предложенной в работе методике определения границ режимов теплосъема рассчитываются температуры $T_{\text{нк}}$, $T_{\text{кр1}}$, $T_{\text{кр2}}$, соответствующие началу кипения, первой и второй критической тепловым нагрузкам, по известным зависимостям, и производится сопоставление их с распределением температуры на поверхности охлаждения $T_c(\varphi)$, полученным из решения ОЗТ. Дополнительно использованы данные о КТН рассчитанной, по уравнению (1). Выводы, сделанные на основе данных измерений, подтверждены результатами расчета теплоотдачи на основе решения ОЗТ и диагностикой режимов теплосъема. На Рис. 4 показан пример

диагностики режимов теплосъема. Обнаружено, что на участке трубы - $80^\circ < \varphi < +80^\circ$ происходит пленочное кипение, на участке $\varphi \approx \pm 80^\circ \div \pm 130^\circ$ – переходное кипение (II) и при $\varphi > \pm 130^\circ$ – пузырьковое кипение (III).

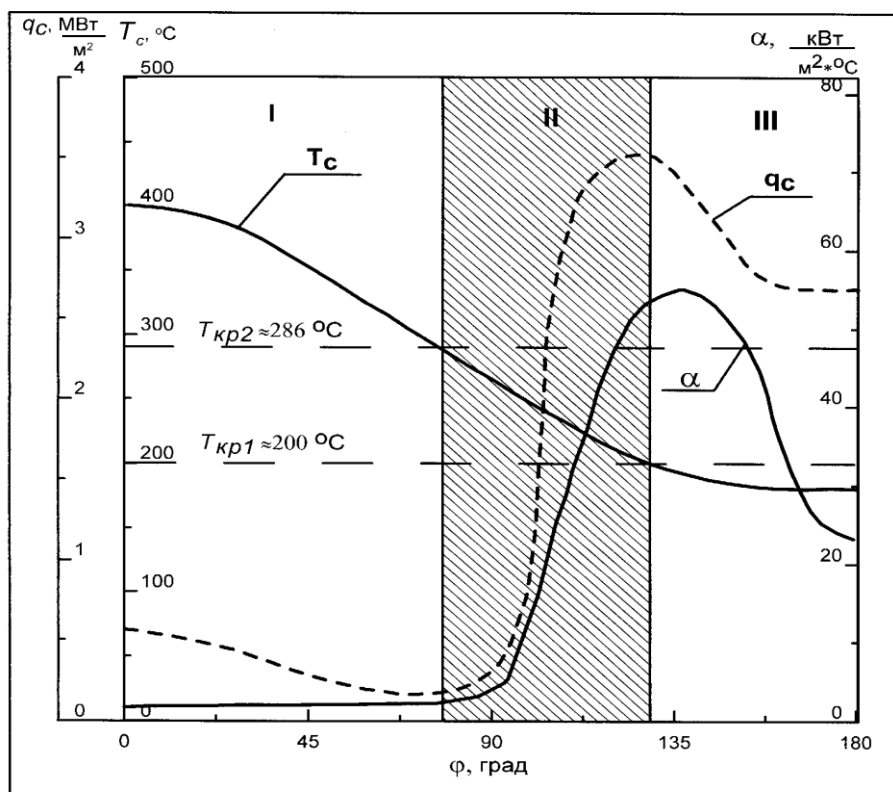


Рис. 4. Результаты решения ОЗТ при возникновении кризиса теплообмена в канале и диагностика режимов теплосъема

$$\rho W = 200 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с}); p = 0.43 \text{ МПа}; x = -0.055. q_{\text{подв}}(\varphi=0^\circ) = 6.28 \text{ МВт}/\text{м}^2$$

В четвертой главе представлен массив опытных данных, содержащий 916 значений КТН при закрутке потока с помощью ленты. Данные известных исследований КТН при кипении недогретой и насыщенной жидкости в закрученных с помощью ленты потоках представлены в таблице 1.

На основе собранного массива выполнен корреляционно-регрессивный анализ влияющих параметров, определены закономерности влияния этих параметров и получены обобщающие уравнения (1) и (2) для расчета КТН при закрутке потока с помощью ленты, которые применимы для недогретой и насыщенной жидкости соответственно. Уравнения получены в предположении, что неоднородность нагрева не влияет на значения КТН.

Табл. 1. Диапазоны параметров и значений $q_{кр}$ в известных исследованиях кризиса теплообмена для закрученного потока недогретой и насыщенной воды

№	Источник	Кол-во точек	p , МПа	ρW_2 , кг/м ² с	$x_{вых}$	y (180°)	$L_{нб}$, м	d , мм	L_H/d	$q_{кр}$, МВт/м ²
<i>Для течения недогретой жидкости ($x < 0$)</i>										
1.	Gambill 1961г.	28	0.1÷3.8	4260÷26960	-0.35÷0	2.3÷12.3	0.051÷0.441	3÷10	6.6÷88.2	8.7÷59.3
2.	Viskanta 1961г.	10	13.8	680÷2710	-0.06÷0	2.5÷5	0.46	8	57.6	1.7÷5.0
3.	Feinstein 1963г.	27	0.3	6570÷33000	-0.18, -0.13	2÷6	0.102	6	16	15.8÷87.4
4.	Дрижюс 1978г.	25	0.4÷1.34	4750÷19300	-0.27÷-0.06	2÷10	0.037÷0.141	1.6	23.1÷88	20.2÷81.3
5.	Koski, 1988г.	3	1.1	2900÷9500	-0.27	2	0.04	8	5.2	37.2÷60
6.	Оводков 1990г.	32	0.1÷0.8	200÷3000	-0.14÷0	1.88	0.035	8	4.4	2.4÷14.2
7.	Inasaka 1991г.	14	0.1	6400÷11500	-0.08÷-0.06	2.7÷8.7	0.1	6	16.7	7.3÷14.1
8.	Cattadori 1993г.	6	2.6÷3.6	5000÷14500	-0.29÷-0.09	1÷2	0.15÷0.30	8÷15	10÷20	26.5÷49.6
9.	Bergles 1994г.	42	0.1÷1.4	5100÷18300	-0.3÷-0.13	1.93÷9.26	0.007÷0.16	2.4÷6.5	2.7÷38.5	17÷68
10.	Kinoshita 1996г.	110	0.1÷1.5	4600÷9000	-0.24÷-0.04	2.67÷3.47	0.1	6	16.7÷17.1	8.5÷33.8
11.	Araki, 1996г.	15	1.0÷1.5	4000÷20000	-0.34÷-0.27	3	0.16	7	22.9	19.8÷45.9
12.	Schlosser 1999г.	47	1.0÷3.7	3000÷16000	-0.46÷-0.13	2	0.085÷0.115	10÷18	5.6÷11.5	16.8÷68.6
13.	Дедов, 2000г.	63	0.7÷1.5	540÷8800	-0.38÷-0.19	1.75	0.007	8	0.9	20.0÷78.3
14.	Малаховский 2009г.	15	0.7; 1.0	1100÷9900	-0.31÷-0.18	4.24; 8.26	0.02	4	5.0	11.4÷51.0
15.	Nata, 2010г.	137	0.8	4000÷14400	-0.28÷-0.11	2.39; 3.39; 4.45	0.05	6	9.9	9.8÷34.5
16.	Настоящая работа	6	0.17÷0.22	200÷280	-0.12÷-0.03	1.88	0.035	8	4.4	3.6÷7.8
	Итого($x<0$):	580	0.1÷13.8	200÷33000	-0.46÷0	1÷12.3	0.007÷0.46	1.6÷18	0.9÷88.2	1.7÷87.4
<i>Для насыщенной жидкости: ($x > 0$)</i>										
1.	Viskanta, 1961г.	44	13.8	680÷2710	0÷0.37	2.5÷5	0.46	8	57.6	1.7÷5.0
2.	Моеек, 1964г.	29	7.0	400÷1150	0.74÷0.95	5.5÷34.5	1.02	11	88.9	0.3÷1.2
3.	Matzner, 1965г.	27	6.9	1260÷4600	0.33÷0.88	15	4.87	10	480	1.0÷3.1
4.	Севастьянов 1965г.	29	0.17	20÷500	0.46÷0.99	3÷6	0.4÷1.2	8	50÷100	0.2÷3.8
5.	Mayinger, 1966г.	71	7.0÷10.0	2300÷3700	0÷0.23	2.32÷5.71	0.28	7	40	3.5÷6.2
6.	Brevi, 1971 г.	37	4.9	758÷1038	0.81÷0.86	3	2	10	200	1.3÷2.1
7.	ВТИ, 1966, 1988	99	4.9÷20.1	490÷2800	0.22÷0.98	10÷20	2.0	8÷20	100÷252	0.4÷1.8
	Итого($x>0$):	336	0.17÷20.1	50÷4600	0÷0.99	2.5÷34.5	0.28÷4.87	8÷20	40÷480	0.2÷6.2

Для недогретого потока воды уравнение имеет следующий вид:

$$q_{кр} = 0.5(\rho W)^n \cdot k_x k_l k_y, \quad (1)$$

где $q_{кр}$ – критическая тепловая нагрузка, МВт/м²; ρW – массовая скорость, кг/м²с; k_y , k_x , k_l – коэффициенты, учитывающие влияние закрутки потока, недогрева жидкости до температуры насыщения и начального термического участка соответственно. Степень $n = A(\log(\rho W))^{0.7}$, где множитель $A = 0.3094 \cdot p^{1/8} - 0.2201 \cdot p^{1/4} + 0.0377 \cdot p^{1/2} - 0.00235 \cdot p$, учитывает влияние давления p , МПа.

Уравнение для коэффициента, учитывающего недогрев жидкости, а также комбинированное влияние давления и массовой скорости имеет вид:

$k_x = [1 + k_p \cdot k_w \cdot (|x|)^{0.89}]^3$, где k_p , k_w – коэффициенты, учитывающие влияние давления и массовой скорости соответственно, x – массовое паросодержание на выходе из трубы,

$$k_p = -0.004 \cdot p^2 + 0.042 \cdot p + 0.99$$

$$k_w = -7.929 \cdot (\rho W / 1000)^{1/8} + 11.356 \cdot (\rho W / 1000)^{1/4} - 3.275 \cdot (\rho W / 1000)^{1/2} + 0.178 \cdot (\rho W / 1000).$$

Уравнение для коэффициента, учитывающего закрутку потока k_y , имеет

вид: $k_y = \left[1 + \frac{300}{y^{1.5} \cdot (\rho W)^{0.5}} \right]^{0.5}$, где y – степень закрутки ленты, равная

отношению шага закрутки ленты на 180° к диаметру трубы;

Уравнение для коэффициента, учитывающего относительную длину участка нагрева, получено с использованием подхода, предложенного В.А. Кургановым:

$$k_l = 1 + \frac{0.12}{(L_H/d)^{1/8}} \cdot \left[1 + \frac{10140}{(p/p_{кр})^{0.5} \cdot Re_{ж}^{3/4} \cdot (L_H/d)^{1.5}} \right] \cdot Pr_{ж}^{-0.5} \cdot e^{-0.03(L_H/d)^3},$$

где L_H – длина участка нагрева трубы, мм; d – диаметр трубы, мм; $Re_{ж}$ и $Pr_{ж}$ – числа Рейнольдса и Прандтля, рассчитанные по температуре жидкости на выходе из трубы; $p/p_{кр}$ – давление жидкости в трубе, отнесенное к критическому ($p_{кр} = 22.13$ МПа). Курганов В.А. разработал подход для расчета теплоотдачи на термическом начальном участке в случае движения

многоатомных газов, для которых влияние давления незначительно. В рассматриваемом случае давление существенно влияет на отрывной диаметр паровых пузырей, что приводит к различию объемных паросодержаний при одинаковых весовых паросодержаниях. В результате изменяется скорость движения пароводяной смеси и длина начального термического участка. Влияние коэффициента k_l на величину КТН проявляется при значениях $L_H/d < 10$. Введение давления в зависимость для расчета k_l позволило удовлетворительно обобщить опытные данные Оводкова А.А. и Дедова А.В., полученные на начальном термическом участке.

Результаты расчета по уравнению (1) представлены на Рис. 6. Уравнение (1) описывает 501 из 580 значений $q_{кр}$, что составляет (86%) полученного массива данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока недогретой жидкости с разбросом $\pm 30\%$.

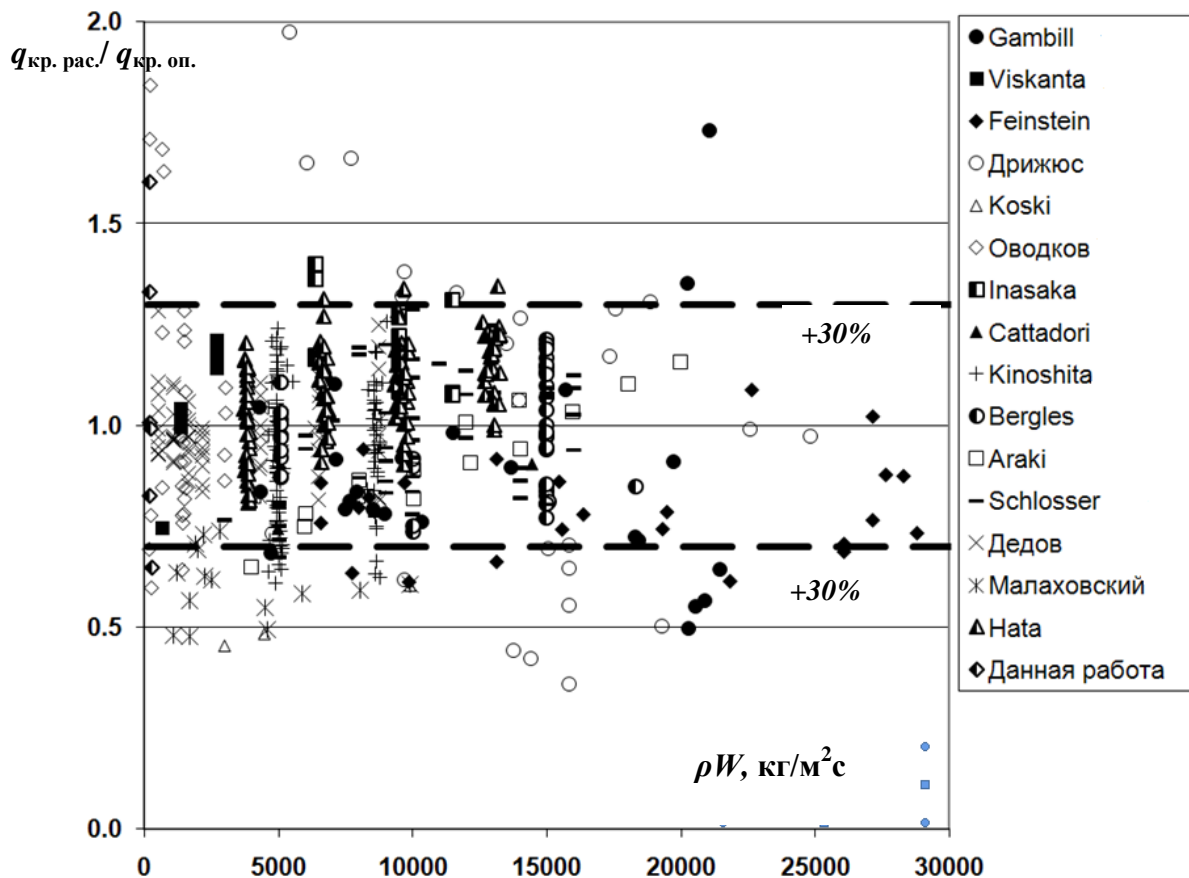


Рис. 6. Отношение критической тепловой нагрузки, рассчитанной по ур. (1), к полученной в опытах, в зависимости от ρW

Для насыщенной жидкости уравнение имеет следующий вид:

$$q_{кр} = 1.24 \cdot (\rho W)^n \cdot k_y k_x k_p, \quad (2)$$

где k_y , k_x , k_p – коэффициенты, учитывающие влияние закрутки, паросодержания теплоносителя и давления, степень $n = \sqrt{0.035 \cdot (1.25 - x)^{1/4} \cdot \log(\rho W)^{1/4}}$.

Уравнение для коэффициента, учитывающего паросодержание теплоносителя, имеет вид: $k_x = \left[0.66 + 0.25 \cdot (1 - x)^3 \right]^4$, где x – массовое паросодержание на выходе из трубы;

Уравнение для коэффициента, учитывающего закрутку потока, имеет вид:

$k_y = \left(1 + \frac{14}{(\rho W)^{0.37} \cdot y^{3/2}} \right)$, где y – степень закрутки ленты, равная отношению шага закрутки ленты на 180° к диаметру трубы;

Уравнение для коэффициента, учитывающего влияние давления, имеет вид:

$k_p = (1 + 0.035 p - 0.00622 p^2 + 0.000185 p^3) \cdot (1 - x)^{1/32}$, где p берется в МПа.

Уравнение для коэффициента, учитывающего начальный термический участок не используется, т.к. все данные по КТН получены на участках нагрева длиной более 280 мм (L_H/d не менее 40).

Результаты расчета по уравнению (2) представлены на Рис. 7.

Уравнение (2) описывает 241 точки из 336, что составляет 72% полученного массива данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока насыщенной жидкости с разбросом $\pm 30\%$.

Опытные данные массива получены в широком диапазоне параметров при горизонтальном и вертикальном расположении каналов охлаждения в подъемных и опускных течениях, выполненных из различных материалов, различной формы поперечного сечения, различных вариантов нагревов, а именно, посредством пропускания электрического тока и потоком заряженных частиц. Это дает возможность использовать уравнения (1) и (2) для широкого круга задач. Из-за того, что в области низких массовых скоростей $\rho W < 500$

кг/м²с высока погрешность измерений, не учитываются ориентация и неоднородность нагрева рабочего участка, данные массива не точно описываются уравнением (1). К тому же при низких скоростях отсутствует эффект повышения КТН в закрученном потоке воды по сравнению с прямолинейным.

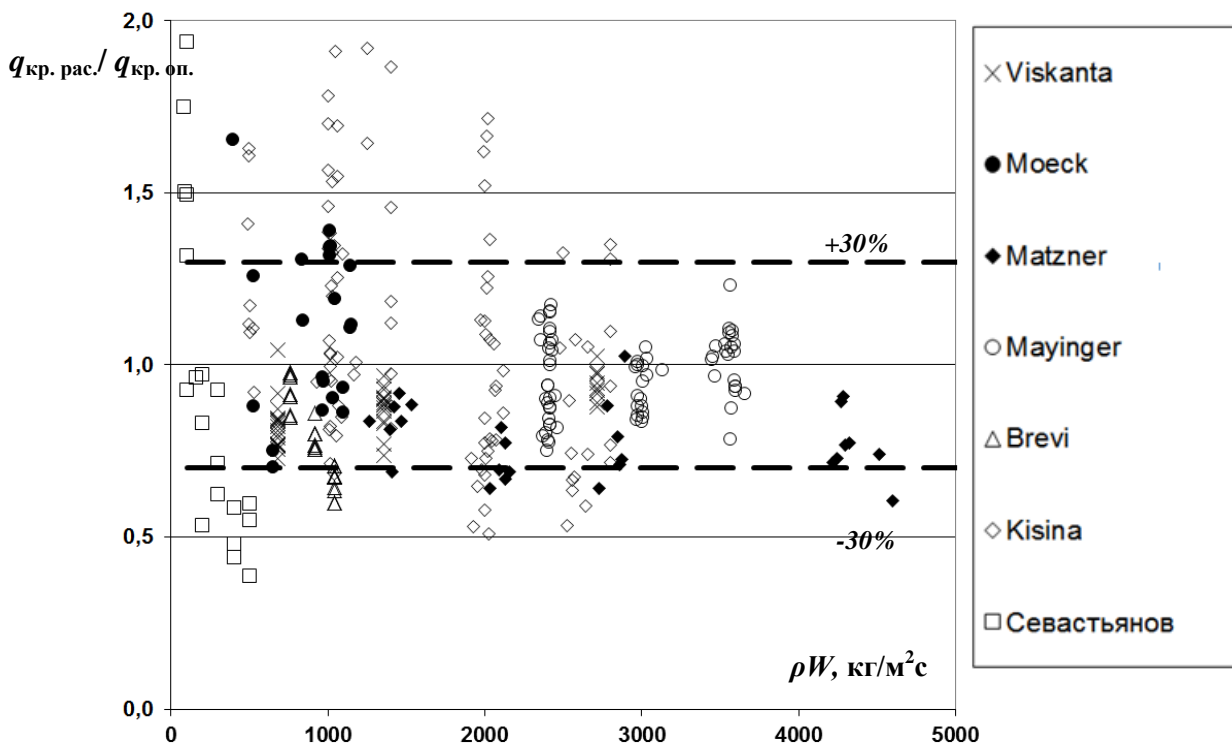


Рис. 7. Отношение критической тепловой нагрузки, рассчитанной по ур. (2), к полученной в опытах, в зависимости от ρW

Если из соотношений (1) и (2) исключить коэффициент, учитывающий влияние закрутки k_y , то их можно использовать для расчета критических тепловых нагрузок в прямолинейных потоках. Для оценки применимости полученных расчетных рекомендаций для расчета критических тепловых нагрузок в прямолинейных потоках проведено сравнение уравнения (1) с известными скелетными таблицами по $q_{кр}$. Обнаружено удовлетворительное согласование расчетных и табличных данных (разброс составляет $\pm 40\%$) для давлений меньше 15 МПа, что согласуется с областью применимости полученных уравнений (1) и (2). Предложенные в работе выражения для

расчета критической тепловой нагрузки и падения давления на рабочем участке позволяют проводить оценку эффективности использования закрученной ленты в широком диапазоне режимных параметров. Установлено, что рост потерь давления опережает повышение критических тепловых нагрузок, а использование закрученной ленты с степенью закрутки $y > 5$ нецелесообразно из-за малого роста критической тепловой нагрузки.

Выводы:

1. Проведено исследование кризиса теплообмена в трубе при закрутке потока воды с помощью ленты. С использованием данных измерений и программного пакета ANES/NE получены новые данные по КТН в мало изученной области низких массовых скоростей $\rho W < 500$ кг/(м²с) при кипении недогретой воды в закрученном потоке в условиях неравномерного нагрева. Измерены потери давления на трение в трубе с закрученной лентой при течении воды в диапазоне чисел $2600 < Re < 48000$, согласующиеся с известными данными.

2. Сформирован массив экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока воды с помощью ленты, содержащий 916 точек для недогретой и насыщенной жидкости. Массив охватывает диапазоны массовых скоростей от 30 до 33000 кг/м²с, давлений от 0.1 до 20.1 МПа, паросодержаний от – 0.46 до 0.99, коэффициентов закрутки ленты от 1 до 34.5, длин участка нагрева от 0.007 до 4.87 м, диаметров труб от 1.6 до 20 мм, расположенных как вертикально, так и горизонтально, при их однородном и неоднородном нагреве. На основе рассмотренных работ сформирован также массив экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам для прямолинейных потоков воды (269 точек).

3. Получены уравнения для расчета критических тепловых нагрузок в закрученных потоках для областей отрицательных и положительных паросодержаний. Показано, что предложенные уравнения в рассмотренных

условиях описывают опытные данные сформированного массива с разбросом $\pm 30\%$. Полученные уравнения применимы также при расчете критических тепловых нагрузок для прямолинейного течения воды в трубе.

4. На основании анализа созданного массива данных по критическим тепловым нагрузкам установлено, что влияние относительной длины участка нагрева на КТН проявляется в диапазоне $L_H/d < 10$. Получено уравнение, описывающее влияние относительной длины участка нагрева на КТН. Введение давления в предложенную зависимость позволило обобщить опытные данные Оводкова А.А. и Дедова А.В. для коротких рабочих участков.

5. Предложена методика определения границ режимов теплосъема по периметру охлаждаемой поверхности трубы при неравномерном нагреве рабочего участка, позволяющая повысить надежность решения обратной задачи теплопроводности. Методика основана на использовании результатов решения обратной задачи теплопроводности, данных по пульсациям температуры стенки и давления, а также зависимостей для расчета границ различных режимов кипения. Полученные в работе уравнения для критических тепловых нагрузок использованы для оценки коэффициента теплоотдачи при кипении, который необходим при решении ОЗТ.

6. На основании полученных результатов по критическим тепловым нагрузкам и падению давления предложены рекомендации по выбору оптимальных параметров закрученной ленты и ее применению.

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях:

1. Круг А.Ф., Комендантов А.С., Кузма-Кичта Ю.А., Обобщение данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока с помощью ленты. Теплоэнергетика. 2010, №3.

2. Круг А.Ф., Берглес А.Е., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Федорович Е.Д. Интенсификация теплообмена в закрученных кипящих потоках в четырех частях. Тепловые процессы в технике. №7. 2010. с. 294-299, №8. 2010. с. 342-349, №10. 2010. с. 442-460, №11. 2010. с. 498-506.

3. Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С. Повышение надежности и эффективности работы элементов ядерных и термоядерных

установок при закрутке потока с помощью ленты. "Энергосбережение и водоподготовка" №2, 2007 стр. 65-66.

4. Krug A.F., Bergles A.E., Komendantov A.S., Kuzma-Kichta Yu.A., Fedorovich E.D. Investigation of boiling crisis in swirl flows. 14 Минский международный форум по тепло- и массообмену, 10-13 сентября, 2012. Тезисы докладов и сообщений. Том 1, часть 2, стр. 394-398.

5. Круг А.Ф., Берглес А.Е., Комендантов А.С., Кузма-Кичта Ю.А., Федорович Е.Д. Исследование и применение закрученных потоков при кипении. Четвертая международная конференция теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках. 18-20 октября 2011 г. Москва, МЭИ, сборник докладов на CD.

6. Круг А.Ф., Комендантов А.С., Кузма-Кичта Ю.А. Уравнение для расчета критической тепловой нагрузки для закрученного с помощью ленты потока недогретой жидкости. РНКТ-5. 2010. Том 6. с. 98-101.

7. Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С. Обобщение данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока в прямых и спиральных трубах. Третья международная конференция «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» 21 - 23 октября 2008 г., Москва, Сборник тезисов докладов. с. 88.

8. Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Обобщение данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока в элементах ядерной и термоядерной техники. XIII Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Газотурбинные и Комбинированные установки и двигатели», 29-31 октября 2008, Москва. Сборник тезисов докладов. с. 64.

9. Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Глазков В.В. Обобщение экспериментальных данных по критическим тепловым нагрузкам при закрутке потока, РНКТ-4, 2006. Том 6. с. 245-248.

10. Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Батов Н.Г. Исследование кризиса теплообмена в горизонтальной трубе с односторонним нагревом. Вторая Российская конференция «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Москва. МЭИ. 15-17 марта 2005 г., Сборник тезисов докладов, стр. 105-106.

11. Круг А.Ф., Кузма-Кичта Ю.А., Комендантов А.С., Батов Н. Г. Исследование кризиса теплообмена в каналах с интенсификаторами теплосъема. Теплообмен. 12-й Межд. Форум. Минск 2004. с. 51-56.

12. Круг А.Ф., Кононов С.В., Комендантов А.С., Кузма-Кичта Ю.А.. Диагностика режимов теплосъема при одностороннем нагреве горизонтально расположенного канала. Труды Третьей российской национальной конференции по теплообмену. Т.8. Студенческая секция. М.: Издательство МЭИ, 2002, с. 73-76.

Печ.л. _____

Тираж _____

Заказ _____

Полиграфический центр МЭИ, Москва, Красноказарменная 13