

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛАХ МАЛОГО ДИАМЕТРА

**В.И. Белозеров, А.С. Горбач**

*ИАТЭ НИЯУ МИФИ*

*249020, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

**Р**

Описываются экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена в вынужденном потоке воды в каналах малого диаметра при невысоких давлениях. Актуальность исследований связана с ростом интереса к малым теплообменным аппаратам. Каналы малого диаметра активно используются в элементах компактных теплообменных устройств для современных инженерно-технических разработок.

Основная трудность при изучении процессов теплообмена в каналах малого диаметра состоит в отсутствии единых методик расчета коэффициентов гидравлического сопротивления и теплоотдачи в двухфазном потоке. Размер канала влияет на теплообмен и гидродинамику двухфазного потока, являясь одним из определяющих параметров, так как существующие внутренние масштабы (размер парового пузыря, диаметр жидкой капли, толщина пленки) могут стать соизмеримыми с диаметром канала, что может приводить к различным режимам течения. Очевидно, что в однофазных течениях нет оснований ожидать изменения в закономерностях переноса импульса и энергии с уменьшением размера канала пока остается справедливым приближение сплошной среды.

Проанализированы эксперименты отечественных учёных по исследованию распределения теплогидравлических параметров в каналах малого поперечного сечения во всем диапазоне изменения параметров потока в канале вплоть до кризисных режимов теплоотдачи, когда резко повышается температура стенки при медленном возрастании тепловой нагрузки. Проведено сравнение экспериментальных данных отечественных и зарубежных авторов по кризису теплообмена.

**Ключевые слова:** экспериментальный стенд, рабочий участок, подвод и отвод теплоты, кризис теплоотдачи, граница вскипания, результаты экспериментальных исследований.

Испарение жидкости, при котором появление пара сопровождается образованием новых поверхностей раздела между фазами в жидкостном объеме, называют кипением. В теплофизических установках (оборудовании) может происходить объемное, поверхностное или смешанное кипение. При кипении в большом объеме превышение плотности теплового потока  $q$  величины критической плотности  $q_{кр}$  приводит к резкому повышению температуры поверхности. В этом случае  $q_{кр}$  зависит, в основном, от свойств жидкости и пара, которые определяются давлением. Эта же величина используется и для случая вынужденного течения в каналах. При пузырьковом режиме кипения на по-

© В.И. Белозеров, А.С. Горбач, 2020

верхности нагрева образуется большое количество отдельных «пузырей» пара, которые выделяются из жидкости и при достижении некоторого размера от нее отрываются. Они разрушают вязкий подслой жидкости, прилегающий непосредственно к поверхности нагрева и создающий основное термическое сопротивление для конвективной теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения жидкостей. Поэтому теплоотдача при пузырьковом режиме кипения интенсивна, например, для воды при  $p = 1$  бар  $\alpha \leq 5 \cdot 10^4$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $q \leq 1,25 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $q$  – плотность теплового потока.

На характер кризиса теплоотдачи при вынужденном течении влияет гораздо большее число параметров, чем для случая кипения в большом объеме.

Кризис теплоотдачи – резкое ухудшение отвода тепла от теплоотдающей поверхности, сопровождающееся скачкообразным ростом её температуры. Вероятно, кризис связан с уменьшением количества жидкости, находящейся в контакте с теплоотдающей стенкой, в результате чего стенка начинает перегреваться. При течении недогретой до насыщения жидкости с повышением плотности теплового потока у стенки начинается пузырьковое, а затем пленочное кипение. В этом случае пленка пара экранирует стенку от основного потока жидкости, что приводит к резкому ухудшению теплоотдачи.

Введем в рассмотрение массовую скорость образования паровой фазы ( $\rho''w$ ) на поверхности нагрева и наибольшую возможную массовую скорость удаления пара от поверхности нагрева при данных условиях кипения. При росте плотности теплового потока  $q$  на теплоотдающей поверхности увеличивается и массовая скорость образования пара, и когда эта величина начинает превышать массовую скорость удаления пара, около поверхности нагрева образуется слой с повышенным паросодержанием. Этот слой затрудняет охлаждение поверхности. Поэтому при фиксированной плотности теплового потока температура поверхности повышается, а остатки жидкости в двухфазном слое испаряются, и поверхность нагрева покрывается пленкой пара. Это явление будем называть кризисом теплоотдачи первого рода при поверхностном кипении. Таким образом, величина плотности теплового потока при кризисе первого рода зависит от скорости отвода пара от поверхности нагрева, а следовательно, и от скорости течения кипящей жидкости, формы и размеров объема кипящей жидкости и других факторов, внешних по отношению к вязкому подслою.

Под кризисом теплообмена при кипении жидкости в канале обычно подразумевается резкое повышение температуры стенки при медленном возрастании тепловой нагрузки. Существующие гипотезы связывают наступление кризиса теплообмена с прекращением по тем или иным причинам контакта жидкости со стенкой (гидродинамическая гипотеза, гипотеза о прекращении расхода жидкости в пленке, текущей по стенкам канала; модель диффузии капель; гипотеза о кризисе теплообмена, связанном с запираем каналом). Высокие скорости жидкости недогретой до температуры насыщения при значительных тепловых потоках на стенке канала приводят к так называемому «быстрому кризису». В этом случае величина критического теплового потока зависит, в основном, от параметров потока в пристенной зоне, а не от условий центральной области потока. «Медленный кризис» наблюдается преимущественно при высоких паросодержаниях, весовых низких расходах и в режиме дисперсно-кольцевого течения. Величина критической тепловой нагрузки в этом случае зависит от параметров ядра потока, которые, вероятно, близки к средним параметрам течения. Условия в пристенной области в значительной мере также определяются течением в ядре. Высокие коэффициенты теплоотдачи в потоке, движущемся с высокой скоростью, приводят обычно к гораздо меньшему и более медленному повышению температуры стенки. В ряде случаев кризис теплообмена

может возникнуть, минуя процесс кипения [1 – 3]. При охлаждении активной зоны быстрого реактора, систем мощных радиолокационных установок, электронных генераторных ламп, различных мишеней может возникнуть сильный перегрев пристенного слоя жидкости. Температура поверхности тепловыделяющей стенки даже в условиях охлаждения недогретой жидкостью становится много выше температуры насыщения, но, несмотря на это, кипение оказывается подавленным [3 – 5]. Этому способствует высокая скорость потока, его гидродинамическая стабильность, недогрев ядра, сведение к минимуму растворенного в жидкости газа. Значительные скорости жидкости и малые диаметры приводят к большим интенсивностям теплоотдачи. Тепло от перегретого слоя жидкости передается охлажденному ядру путем интенсивной турбулентности. При низких давлениях возможны особенно значительные перегревы. Поэтому скорость роста парового пузыря при вскипании жидкости в пристенном слое оказывается очень высокой. Этот процесс может привести к закупорке канала пробкой пара, последующему опрокидыванию циркуляции, что вызовет прекращение охлаждения и разрушение канала при сохранении тепловыделения.

Экспериментальные исследования по распределению теплогидравлических параметров в круглых каналах малого диаметра предусматривали проведение опытов в диапазоне изменения температуры от комнатной вплоть до критических режимов теплоотдачи. В свое время В.П. Скриповым с сотрудниками проводились многочисленные опыты по определению предельных перегревов воды, эфира и других жидкостей [5, 6]. Эти исследования помогли полнее описать термодинамическое состояние системы жидкость-пар, выяснить пределы областей метастабильных состояний. По мнению Скрипова, термодинамический кризис определяется пределом термодинамически возможных перегревов жидкости. Термодинамический подход выдвигает на первый план температуру стенки  $t_w$  как основной определяющий параметр (при заданном внешнем давлении).

Несмотря на большое число работ по исследованию кризиса теплообмена в каналах [7 – 13] пока не ясны многие внутренние механизмы явления. Если сравнивать кризис теплообмена со случаем в большом объеме кипения, то на характер кризиса теплообмена при вынужденном течении в каналах влияет гораздо большее число параметров. Здесь тепло отводится от поверхности двумя процессами – вынужденной конвекцией и испарением. С увеличением плотности теплового потока доля тепла, снимаемая испарением, возрастает и перед наступлением кризиса увеличивается при возрастании давления. Поэтому плотность потока тепла приближенно можно связать с массовым потоком испаряемой жидкости:

$$q \approx G \cdot r, \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход;  $r$  – теплота испарения.

Рассмотрим совместно процессы массообмена и кризиса. Сделаем это на примере дисперсно-кольцевого режима двухфазного потока, который занимает наиболее значительный интервал паросодержания. Поток в этом режиме состоит из двух областей – пленки жидкости, движущейся по стенке с расходом  $G'_{пл}$ , и ядра потока, состоящего из пара  $G''$  и капель жидкости  $G'_к$ . В общем случае капли могут выпадать на поверхность пленки с некоторой интенсивностью, а с поверхности пленки происходит их унос вследствие механического взаимодействия с паром  $E_m$  и кипения внутри пленки  $E_k$ . Гипотезу о наступлении кризиса в дисперсно-кольцевом потоке обычно связывают с прекращением расхода жидкости в пленке. Уравнение баланса массы для пленки имеет вид

$$dG'_{пл}/dz = D - (E_m - E_k) - q/r, \quad (2)$$

где  $D$  – интенсивность выпадения капель на поверхность пленки;  $q/r$  – интенсив-

ность испарения пленки;  $z$  – высота плёнки. Проинтегрировав уравнение (2), можно определить  $z_{кр}$ , в сечении которого масса жидкости в пленке равнялась бы нулю, и связать его с  $q$ .

Но такой подход является приближенным, так как не всегда наступление кризиса связано с прекращением расхода жидкости в пленке – имеются режимы, когда при кризисе расход в пленке не равен нулю.

Результаты экспериментальных и теоретических работ показали, что разным комбинациям параметров (таким как давление, массовая скорость, паросодержание, плотность и др.) соответствуют разные процессы, определяющие кризис [12 – 15]. При низком давлении и невысоком паросодержании доля жидкости в пленке относительно велика. Это определяется устойчивостью пленки из-за больших значений поверхностного натяжения и малой плотности пара. Испарение пленки вызывается, в основном, пузырьковым уносом, и кризис наступает при конечном расходе жидкости в пленке. При паросодержании  $x > x_{гр}$  кризис связан с недостаточным орошением поверхности пленки каплями ( $D \approx 0$ ). С повышением давления доля жидкости в пленке становится меньше вследствие меньшей устойчивости пленки (из-за того, что будет меньше поверхностное натяжение и больше плотность пара). В этих условиях преобладает унос жидкости из пленки. Кризис в этом случае наступает при полном истощении пленки ( $G'_{пл} \approx 0$ ).

Во всех случаях, чем больше плотность теплового потока, тем выше скорость пара, оттекающего от стенки. Этот поток пара препятствует выпадению капель, а при малых  $q$  обеспечивается более интенсивное орошение стенки каплями.

В работах [13, 15] обнаружено прямое влияние диаметра канала на  $q_{кр}$  в экспериментах на воде и фреоне в пузырьковом режиме и обратное в дисперсно-кольцевом. Высказаны предположения, которые могут объяснить такой характер: в пузырьковом режиме увеличение диаметра приводит к улучшению массообмена между ядром потока и пристенным двухфазным слоем, т.е. улучшается отток пузырей от стенки, что увеличивает  $q_{кр}$ . В дисперсно-кольцевом режиме с увеличением диаметра возрастает доля жидкости в ядре потока и поэтому снижается  $q_{кр}$ . Это качественно подтверждается данными рис. 1, основанными на прямых измерениях [15 – 17].

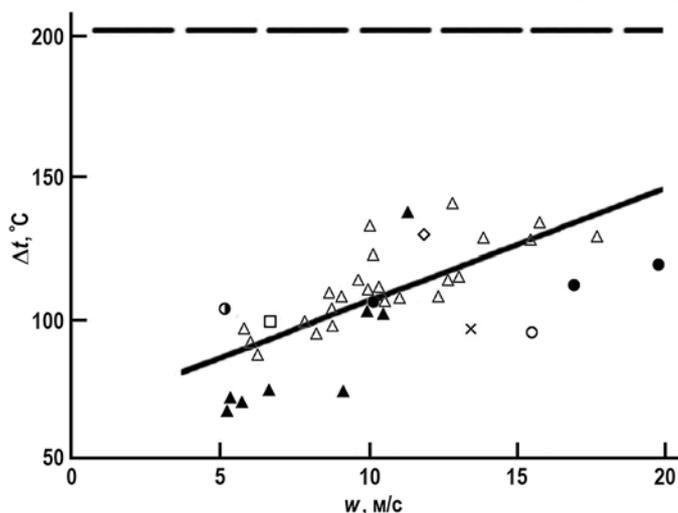


Рис. 1. Экспериментальные зависимости предельных перегревов от  $w$  ( $p = 1$  бар)

Эксперименты [1] показали, что поверхностное кипение возникало лишь при малых скоростях. При увеличении скорости и, соответственно, тепловой нагрузки кипение подавлялось. На рисунке показаны границы вскипания при  $p_{вых} = 1$  ата. В

таблице 1 приводятся значения параметров для экспериментальных точек этого рисунка.

Таблица 1

**Значения параметров для экспериментальных точек на рис. 1**

| Маркер | Диаметр капилляра, мм | Длина участка обогрева, мм | Температура жидкости на входе, °С |
|--------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| △      | 4,0 × 3,0             | 210                        | 20                                |
| ●      | 3,0 × 1,96            | 210                        | 20                                |
| ◇      | 4,0 × 3,0             | 270                        | 20                                |
| □      | 4,0 × 3,0             | 331                        | 20                                |
| ○      | 3,0 × 1,96            | 331                        | 20                                |
| ▲      | 1,95 × 0,96           | 210                        | 60                                |
| ⊙      | 1,53 × 1,2            | 210                        | 60                                |
| ×      | 4,0 × 3,0             | 210                        | 60                                |

Видно, что при диаметрах, близких к 4 мм, в основном, был зафиксирован режим поверхностного кипения. Для «вхождения» в область вскипания требовались большие расходы воды. Как говорилось ранее, вскипание происходило очень резко. Для воды при скоростях выше 9 м/с схема фиксации кризиса не успевала срабатывать, и экспериментальные участки разрушались. Кризис теплообмена в области поверхностного кипения может рассматриваться с точки зрения «гидродинамической гипотезы».

Данные о влиянии диаметра на критическую плотность теплового потока были получены в работах [17 – 24], причем численные значения этих работ различаются.

Вследствие этого была проведена серия опытов по определению величины критического теплового потока в исследованном диапазоне режимных параметров. Проведение экспериментов позволило получить и проанализировать распределение теплогидравлических параметров в каналах непосредственно как перед наступлением кризиса теплоотдачи, так и во время его.

Изложенные далеко не полные рассуждения о влиянии различных факторов на теплоотдачу при пузырьковом кипении жидкостей на поверхности нагрева указывают на сложность этого явления. Это обстоятельство затрудняет исследование процесса и приводит к тому, что в настоящее время не учитывается всё многообразие факторов, влияющих на теплообмен при кипении.

Экспериментальные исследования проводились с круглыми каналами из стали 1X18H10T и 1X18H9T длиной от 120 до 1450 мм с внутренними диаметрами от 0,64 до 4,0 мм. Скорости течения находились в пределах от 0,2 до 20 м/с. Диапазоны давлений на выходе 0,3 – 1 бар. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода (рН = 6,5). Расход в контуре создавался перекачиванием жидкости из напорного бака в сливной с помощью сжатого азота или с помощью теплового компрессора (рис. 2). Измерение расхода производилось объемным методом, а также расходомером постоянного перепада давления (ротаметром). Регулировка расхода в контуре осуществлялась с помощью байпасной линии и вентиля тонкой регулировки ВТ2. Водомерное стекло с системой отсчета не только позволяло контролировать уровень жидкости в напорном баке, но и служило еще одним методом определения расхода, если опыты проводились с давлением на выходе меньше 1 бара. Венти́ли системы перекачивания позволяли осуществить обратную перекачку жидкости после окончания эксперимента.

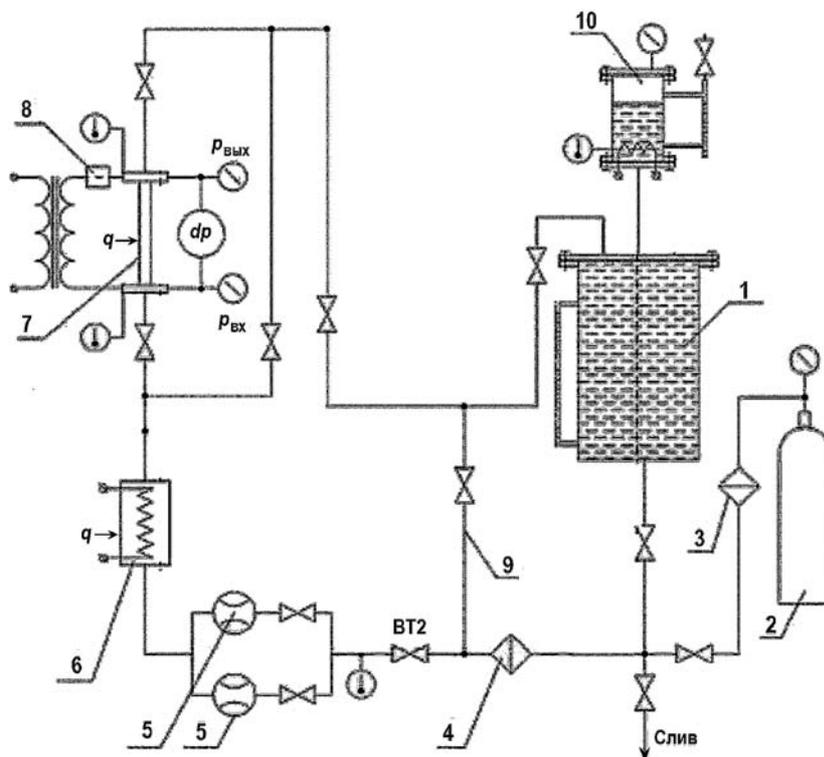


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – напорный бак; 2 – баллон с азотом; 3, 4 – фильтры; 5 – расходомеры; 6 – предварительный нагреватель; 7 – рабочий участок; 8 – датчик тока; 9 – байпасная линия; 10 – термокомпрессор

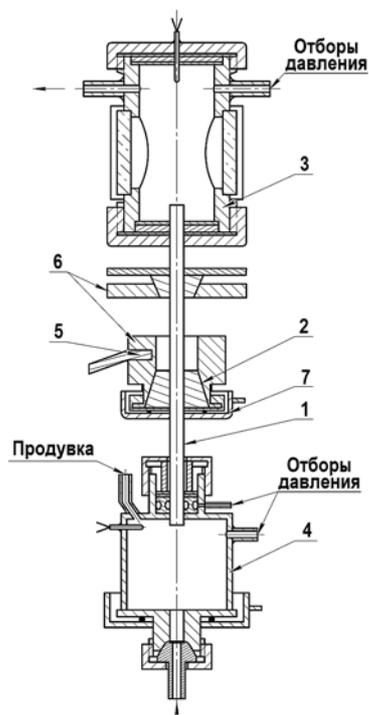


Рис. 3. Схема экспериментального участка: 1 – канал; 2 – конус; 3 – верхняя камера; 4 – нижняя камера; 5 – нижний токоподвод; 6 – токоподводящие шины; 7 – стакан с пружинами

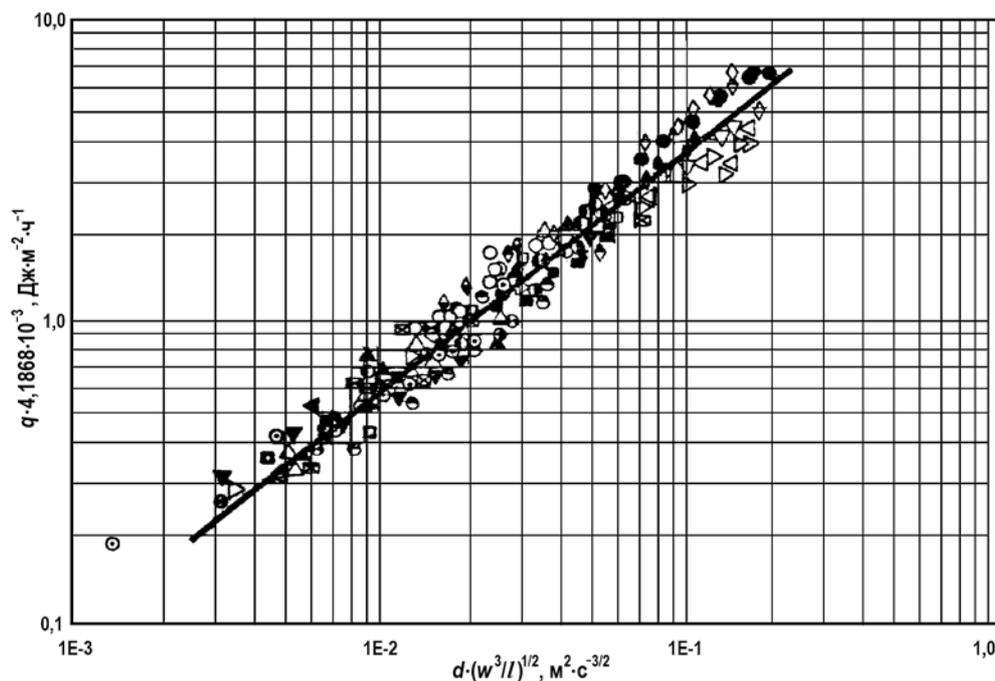


Рис. 4. Обобщение экспериментальных данных для воды

Электросиловая схема включала в себя регулировочный низковольтный трансформатор АОМКТ 100/0,5А, силовой трансформатор ОСУ-80 мощностью до 100 кВт, схему управления, приборы для определения мощности, выделяемой на экспериментальном участке.

Температура жидкости на входе и выходе из экспериментального участка измерялась медь-константановыми и хромель-копелевыми термопарами, температура наружной поверхности канала измерялась 16-ю – 20-ю термопарами с диаметрами термоэлектродов 0,2 мм. Термопары приваривались к стенке рабочего участка контактной сваркой, при этом в сечении устанавливались три – четыре термопары.

Исследуемый канал с помощью конусов и уплотнений зажимался в токоподводящих шинах (рис. 3). В верхней и нижней частях канала устанавливались камеры с отборами для измерения и записи давления и температуры. Для компенсации температурных расширений нижний токоподвод сделан подвижным, он установлен в стальном стакане на пружинах.

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Перед началом эксперимента проводилось длительное кипячение дистиллированной воды для её дегазации. В напорном баке с помощью теплового компрессора или баллонов высокого давления создавалось давление до 30-ти бар. С помощью системы вентилях устанавливался постоянный расход, включались приборы измерения, затем подавалась мощность на рабочий участок. Мощность подводилась ступенчато, с остановками, чтобы убедиться, что процесс вскипания еще не наступил. Перед вскипанием увеличивали мощность на несколько ватт, после чего вначале температура стенки незначительно уменьшалась, а затем начинала резко увеличиваться. При небольших скоростях (примерно менее 5 – 6 м/с) приборы фиксировали пульсации температур стенки, температуры воды на выходе из канала и расхода. Тензометрическая система фиксировала пульсации давления в виде примерно синусоидальных колебаний. В это же время канал начинал принимать форму синусоиды, и были слышны характерные шумы, похожие на «вдохи» и «выдохи», которые, вероятно, были связаны с тем, что жидкость

то подводилась к стенке, то полностью испарялась. П.Л. Капица полагал, что волновое движение пленки имеет установившийся периодический характер, описываемый для любого сечения  $x$  синусоидальным распределением толщины пленки во времени. Он получил, что при волновом режиме эффективная толщина слоя пленки  $\delta_{эф}$  меньше, чем  $\delta$ , вычисляемая по уравнению Нуссельта [23].

Резкое повышение температуры стенки начиналось в верхней части канала; там же появлялось резкое покраснение, которое затем распространялось по всему каналу. В обеих камерах наблюдалось при этом повышение давления жидкости. Если подводимую мощность не уменьшали, то экспериментальные участки разрушались в выходной части. Пульсации возникали при небольших скоростях и незначительных перегревах стенки выше температуры насыщения. Результаты опытов по исследованию критических тепловых нагрузок при протекании в каналах воды представлены на рис. 4, из которого видно возрастание тепловой нагрузки при увеличении диаметра канала и скорости теплоносителя.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведен анализ экспериментов, выполненных с 1963 по 2018 гг. в России и за рубежом, по исследованию распределения теплогидравлических параметров в каналах малого поперечного сечения во всем диапазоне изменения параметров потока в канале вплоть до кризисных режимов теплоотдачи. Данных, полученных для потоков в каналах малого диаметра, недостаточно, чтобы установить явный эффект влияния размеров канала на критический тепловой поток.

Условия кипения в теплообменнике с множеством каналов могут значительно отличаться от кипения в одном канале. К тому же каналы могут иметь различную геометрическую форму. Поэтому необходимы как теоретические, так и экспериментальные исследования, направленные на выяснение механизма возникновения критического теплового потока и создание методов его предсказания для каналов малых размеров.

Необходимо понять физический смысл воздействия колебательных процессов на возникновение критических тепловых потоков в каналах малого диаметра.

Очевидно, что имеющихся экспериментальных данных по исследованию кризиса теплоотдачи в каналах малого диаметра явно недостаточно для построения надёжного теоретического обоснования изучаемых процессов. Такая теория является весьма актуальной для разработки современных надёжных малогабаритных теплообменных устройств.

Авторы признательны доценту В.Л. Мироновичу за плодотворные дискуссии и ряд полезных замечаний.

### **Литература**

1. *Васильев А.Н.* Кризис теплообмена, связанный с резким вскипанием жидкости в каналах малого диаметра. / Автореферат дисс. канд. техн. наук. – Киев: Институт технической теплофизики АН УССР, 1971. – 21 с.
2. *Беляев А.В.* Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в каналах малого диаметра при высоких приведенных давлениях. / Автореферат дисс. канд. техн. наук. – М.: МЭИ, 2018. – 20 с.
3. *Кириллов П.Л.* Кризис теплообмена в каналах. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 80. – Вып. 5. – С. 370-379.
4. *Васильев А.Н., Кириллов П.Л.* Кризис теплообмена при вскипании жидкости. // Атомная энергия. – 1972. – Т. 32. – Вып. 2. – С.154-155.
5. *Скрипов В.П.* Метастабильные и закритические состояния в системе «жидкость - пар». / Автореферат дисс. докт. физ.-мат. наук. – Свердловск, УПИ им. С.М. Кирова,

1967. – 32 с.

6. *Скрипов В.П.* Метастабильная жидкость. – М.: Наука, 1972. – 312 с.
7. *Дорошук В.Е., Ланцман Ф.П.* Влияние диаметра трубы на критический тепловой поток. // Теплоэнергетика. – 1963. – № 8. – С. 73-76.
8. *Левитан Л.Л., Ланцман Ф.П., Деднева Е.И.* Влияние диаметра трубы на кризис теплообмена второго рода. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 7. – С. 40-44.
9. *Edelstein S., Perez A.J., Chen J.C.* Analytic Representation of Convective Boiling Functions. // AIChE J. – 1984. – Vol. 30. – PP. 840-841.
10. *Steiner D., Taborek J.* Flow Boiling Heat Transfer in Vertical Tubes Correlated by an Asymptotic Model. // Heat Transfer Engineering. – 1992. – Vol. 13(2). – PP. 43-68.
11. *Орнадский А.П., Кичигин А.М.* Исследование зависимости критической тепловой нагрузки от весовой скорости, недогрева и давления. // Теплоэнергетика. – 1961. – № 2. – С. 75-79.
12. *Орнадский А.П.* Критические тепловые нагрузки и теплоотдача при вынужденном движении воды в трубах в области сверхвысоких давлений (175 – 220 атм.). // Теплоэнергетика. – 1963. – № 3. – С. 66-69.
13. *Kew P.A., Cornwell K.* Correlations for Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-Diameter Channels. // Applied Thermal Engineering. – 1997. – Vol. 17A. – PP. 705-715.
14. *Hamdar M., Zoughaib A., Clodic D.* Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of Pure HFC-152a in a Horizontal Mini-Channel. // Int. J. Refrigeration. – 2010. – Vol. 33. – PP. 566-577.
15. *Ягов В.В.* Теплообмен при развитом пузырьковом кипении. // Теплоэнергетика. – 1988. – № 2. – С. 4-9.
16. *Sung-Min Kim, Issam Mudawar.* Review of databases and predictive methods for pressure drop in adiabatic, condensing and boiling mini/micro-channel flows. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 77. – PP. 74-97.
17. *Serizawa A., Xu J., Feng Z.* Two-phase flow and heat transfer in micro-channels Kyoto. / Proc. of the IV-th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting. – Kyoto University, 2006. – PP. 247-252.
18. *Болтенко Э.А., Пометько Р.С., Катан И.Б. и др.* Влияние диаметра трубы на критический тепловой поток. / Труды Международного симпозиума «Теплофизика-90». – Т. 2. – С. 400-403. – Обнинск: ФЭИ, 1991.
19. *Kawahara A., Chung P.M.Y., Kawaji M.* Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. // Int. J. Multiphase Flow. – 2002. – Vol. 28. – PP. 1411 - 1435.
20. *Tran T.N., Wambsganss M.W., France D.M.* Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants. // Int. J. Multiphase Flow. – 1996. – Vol. 22 (3). – PP. 485-498.
21. *Xu B., Ooi K.T., Wong N.T., Choi W.K.* Experimental Investigation of Flow Friction for Liquid Flow in Microchannels. // Int. Comm. Heat Mass Transfer. – 2000. – Vol. 27. – No. 8. – PP. 1165-1176.
22. *Кириллов П.Л., Богословская Г.П.* Теплообмен в ядерных энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.
23. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.
24. *Тонг Л.* Кризис кипения и критический тепловой поток. – М.: Атомиздат, 1976. – 100 с.

Поступила в редакцию 03.08.2020 г.

#### Авторы

Белозеров Владимир Иванович, доцент, канд. техн. наук  
E-mail: v.i.belozеров@iate.obninsr.ru

Горбач Александр Сергеевич, студент  
E-mail: agorbach95@gmail.com

## STUDY OF THE CRITICAL HEAT FLUX IN SMALL DIAMETER CHANNELS

Belozеров V.I., Gorbach A.S.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU «MEPhI»  
1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

### ABSTRACT

The article describes experimental studies of hydrodynamics and heat transfer in a forced water flow in small-diameter channels at low pressures. The relevance of the studies is associated with a steady trend of interest in small heat exchangers. Small-diameter channels are actively used in components of compact heat exchangers for modern engineering and technical developments.

The main difficulty in studying heat transfer processes in small-diameter channels is the creation of methods for calculating the coefficients of hydraulic resistance and heat transfer in a two-phase flow. The influence of the channel size on the heat transfer and hydrodynamics of a two-phase flow is one of the defining parameters, since the existing internal scales (vapor bubble size, liquid droplet diameter, film thickness) can become comparable to the channel diameter, which can lead to different flow regimes. Obviously, in single-phase flows, there is no reason to expect a change in the laws of momentum and energy transfer with a decrease in the channel size, as long as the continuum approximation remains valid.

The authors analyzed the experiments of domestic scientists on the study of the distribution of thermal-hydraulic parameters in small cross-section tubes in the entire range of variation of flow parameters in the channel up to critical heat flux conditions, when the wall temperature rises sharply with a slowly increasing heat load. In addition, a comparison was made of the experimental data obtained by domestic and foreign authors on the critical heat flux.

**Key words:** experimental facility, working area, heat supply and removal, critical heat flux, boiling point, results of experimental studies.

### REFERENCES

1. Vasiliev A.N. *Heat Transfer Crisis Associated with Sharp Boiling of Liquid in Small Diameter Channels*. Abstract of Cand. Tech. Sci. Diss. Kiev. Institute of Technical Thermophysics of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR Publ., 1971. 21 p. (in Russian).
2. Belyaev A.V. *Experimental Study of Hydrodynamics and Heat Transfer in Small-Diameter Channels at High Reduced Pressures*. Abstract of Cand. Tech. Sci. Diss. Moscow. MEI Publ., 2018. 20 p. (in Russian).
3. Kirillov P.L. Heat transfer crisis in channels. *Atomnaya Energiya*. 1996, v. 80, iss. 5, pp. 370-379 (in Russian).
4. Vasiliev A.N., Kirillov P.L. Heat Transfer Crisis During Liquid Boiling. *Atomnaya Energiya*. 1972, v. 32, iss. 2, pp. 154-155 (in Russian).
5. Skripov V.P. *Metastable and Supercritical Conditions in the «Liquid-Steam» System*. Abstract of Dr. Phys. and Math. Sci. Diss. Sverdlovsk. UPI n.a. S.M. Kirov Publ., 1967. 32 p. (in Russian).
6. Skripov V.P. *Metastable Liquid*. Moscow. Nauka Publ., 1972. 312 p. (in Russian).
7. Doroshchuk V.E., Lantsman F.P. Influence of the Pipe Diameter on the Critical Heat Flux. *Teploenergetika*. 1963, no. 8, pp. 73-76 (in Russian).
8. Levitan L.L., Lantsman F.P., Dedneva E.I. Influence of the Pipe Diameter on the Heat

- Transfer Crisis of the Second Kind. *Teploenergetika*. 1981, no. 7, pp. 40-44 (in Russian).
9. Edelstein S., Perez A.J., Chen J.C. Analytic Representation of Convective Boiling Functions. *AIChE J.* 1984, v. 30, pp. 840-841.
10. Steiner D., Taborek J. Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model. *Heat Transfer Engineering*. 1992, v. 13(2), pp. 43-68.
11. Ornadsky A.P., Kichigin A.M. Study of the Dependence of the Critical Heat Load on the Weight Velocity, Subcooling and Pressure. *Teploenergetika*. 1961, no. 2, pp. 75-79 (in Russian).
12. Ornadsky A.P. Critical Heat Loads and Heat Transfer during Forced Movement of Water in Pipes in the Region of Ultra-High Pressures (175 – 220 atm.). *Teploenergetika*. 1963, no. 3, pp. 66-69 (in Russian).
13. Kew P.A., Cornwell K. Correlations for Prediction of Boiling Heat Transfer in Small-Diameter Channels. *Applied Thermal Engineering*. 1997, v. 17A, pp. 705-715.
14. Hamdar M., Zoughaib A., Clodic D. Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of Pure HFC-152a in a Horizontal Mini-Channel. *Int. J. Refrigeration*. 2010, v. 33, pp. 566-577.
15. Yagov V.V. Heat Transfer at Developed Nucleate Boiling. *Teploenergetika*. 1988, no. 2, pp. 4-9 (in Russian).
16. Sung-Min Kim, Issam Mudawar. Review of Databases and Predictive Methods for Pressure Drop in Adiabatic, Condensing and Boiling Mini/Micro-Channel Flows. *Int. J. of Heat and Mass Transfer*. 2014, v. 77, pp. 74-97.
17. Serizawa A., Xu J., Feng Z. Two-Phase Flow and Heat Transfer in Micro-Channels. *Proc. of the IV-th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting*. Kyoto University, 2006, pp. 247-252.
18. Boltenko E.A., Pometko R.S., Katan I.B. et al. Effect of Pipe Diameter on Critical Heat Flux. *Proc. of the International Symposium «Thermophysics-90»*. Obninsk. FEI Publ., 1991, v. 2, pp. 400-403 (in Russian).
19. Kawahara A., Chung P.M.Y., Kawaji M. Investigation of Two-Phase Flow Pattern, Void Fraction and Pressure Drop in a Microchannel. *Int. J. Multiphase Flow*. 2002, v. 28, pp. 1411-1435.
20. Tran T.N., Wambsganss M.W., France D.M. Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants. *Int. J. Multiphase Flow*. 1996, v. 22 (3), pp. 485-498.
21. Xu B., Ooi K.T., Wong N.T., Choi W.K. Experimental Investigation of Flow Friction for Liquid Flow in Microchannels. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. 2000, v. 27, no. 8, pp. 1165-1176.
22. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. *Heat Transfer in Nuclear Power Plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 2000. 456 p. (in Russian).
23. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Heat Transfer*. Moscow. Energoizdat Publ., 1981. 415 p. (in Russian).
24. Tong L. *Boiling Crisis and Critical Heat Flux*. Moscow. Atomizdat Publ., 1976. 100 p.

#### Authors

Belozyorov Vladimir Ivanovich, Assistant Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: v.i.belozorov@iate.obninsr.ru

Gorbach Aleksandr Sergeevich, Student

E-mail: agorbach95@gmail.com