

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. А. Стырикович, А. И. Леонтьев, И. Л. Мостинский, В. С. Полонский, И. М. Черника, Исследование кризисов теплоотдачи в горизонтальных каналах с сеткой на внутренней поверхности, *ТВТ*, 1980, том 18, выпуск 4, 794–800

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.169

18 февраля 2025 г., 18:34:44



УДК 536.423.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСОВ ТЕПЛОТДАЧИ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КАНАЛАХ С СЕТКОЙ НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Стырикович М. А., Леонтьев А. И., Мостинский И. Л.,  
Голонский В. С., Черника И. М.*

Приведены результаты экспериментального исследования критических тепловых потоков в горизонтальных каналах с технически гладкой стенкой и с сеточным покрытием внутренней поверхности. Для этой цели использовалась фильтровальная сетка № 120, выполненная из нержавеющей проволоки по ГОСТ 3187-65. Опыты проводились на трубке из нержавеющей стали диаметром 10×2 мм при давлениях 6,86; 9,81; 13,72 МПа, массовых скоростях потока 1000 и 2000 кг/(м<sup>2</sup>·с), критических тепловых нагрузках 1,15–4,50 МВт/м<sup>2</sup> и массовых паросодержаниях от –0,4 до 0,85. В качестве теплоносителя использовалась химобессоленная вода. Сопоставление данных показало, что в канале с сеточным покрытием критическое паросодержание существенно выше, чем в канале с технически гладкой поверхностью.

Процессы кипения и, в частности, кризисы теплоотдачи при кипении до сих пор привлекают внимание многих ученых. Однако, несмотря на наличие обширного экспериментального материала, его систематизация крайне затруднена из-за отсутствия феноменологической теории явления и невозможности описания всех закономерностей кризиса. Наибольшее число исследований по критическим тепловым потокам проведено в вертикальных парогенерирующих каналах, в которых структура потока симметрична. Между тем в практике проектирования аппаратов кипящего типа атомных электростанций, а также другого энергетического оборудования известны случаи выполнения теплонапряженных поверхностей в виде горизонтальных трубных панелей.

В горизонтальных трубах при движении пароводяной смеси часто имеет место явно выраженная асимметрия структуры потока, которая усиливается с уменьшением скорости течения и увеличением диаметра трубы [1–5]. Повышенное паросодержание в верхней части трубы приводит к преждевременному возникновению кризиса, хотя среднее влагосодержание потока может быть достаточно высоким [4]. Известно, правда, что при больших скоростях течения ориентация экспериментального участка в пространстве не сказывается на величине  $q_{кр}$  [5, 6]. При больших тепловых потоках величина критического паросодержания невелика и для повышения значений  $x_{кр}$  предлагается использовать различные интенсификаторы.

Достаточно подробно способы воздействия на кризис теплоотдачи описаны в [7–11]. Использовались, по крайней мере, два метода повышения критической мощности: 1) закрутка потока, т. е. создание радиального поля массовых сил, обуславливающего поток капель жидкости к стенке; 2) турбулизация потока, т. е. увеличение пульсационной составляющей скорости потока и, следовательно, потока капель к стенке. Наибольшее распространение пока получил первый метод. Здесь можно отметить закрутку в витых трубах некруглого сечения, в спирально-винтовых трубах,

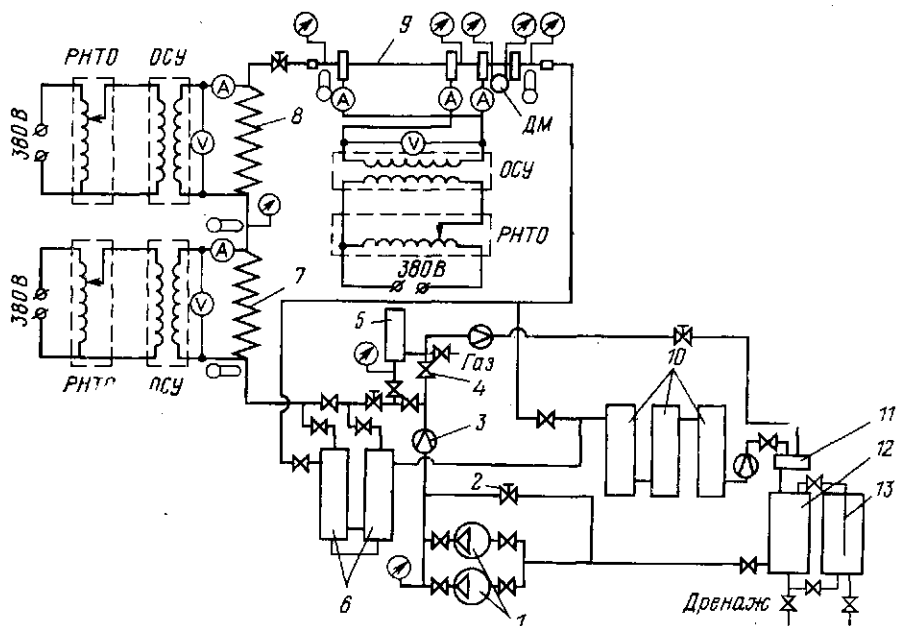


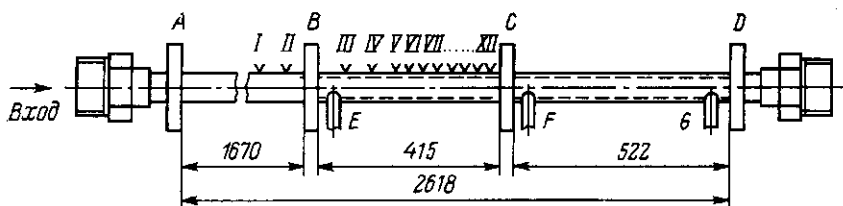
Рис. 1. Принципиальная схема установки. 1 — циркуляционные насосы; 2 — регулируемый вентиль; 3 — расходомерная шайба; 4 — запорный вентиль; 5 — ресивер; 6 — регенеративные теплообменники; 7, 8 — электронагреватели; 9 — экспериментальный участок; 10 — холодильники; 11 — емкость для отбора проб; 12 — сливная емкость; 13 — заправочная емкость

с помощью витых лент (шнеков), локальными завихрителями, проволочными спиралями, винтовыми ребрами, тангенциальным впуском жидкости. Искусственная турбулизация потока достигалась с помощью различного типа выступов, ребер и т. д.

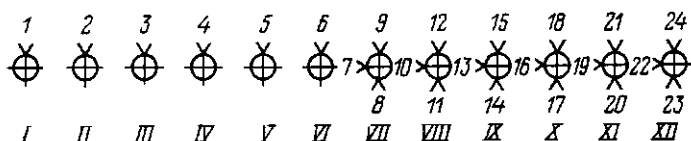
Цель данного исследования — изучение критических тепловых потоков в горизонтальных трубах с капиллярно-пористым покрытием стенок, наличие которого существенно меняет физическую картину процесса у поверхности нагрева и должно влиять на величину критических тепловых потоков.

**Методика эксперимента.** Опыты по исследованию критических тепловых потоков в горизонтальном канале с капиллярно-пористым покрытием поверхности проводились на установке [12], представляющей собой замкнутый циркуляционный контур (рис. 1). Циркуляция теплоносителя осуществляется плунжерными насосами типа НД-100/250 и НД-25/250. Теплоноситель из заправочной емкости подается в контур, последовательно проходя подогреватели, экспериментальный участок и холодильники. После холодильников поток поступает в сливную емкость. Для уменьшения пульсаций потока в контуре перед подогревателями предусмотрен ресивер, частично заполненный аргоном, а перед экспериментальным участком — дросселирующий вентиль. Теплоноситель — химобессоленая вода.

Обогрев рабочих элементов подогревателей, а также опытного участка выполняется непосредственным пропусканием переменного тока низкого напряжения. Изменение мощности осуществляется с помощью однофазных регуляторов напряжения типа РНТО-330/600, включенных последовательно с постоянными однофазными трансформаторами типа ОСУ-100/0,5. Экспериментальный участок (рис. 2) выполнен из стальной нержавеющей трубы диаметром  $10 \times 2$  мм, состоящей из рабочей и вспомогательной частей. Положение участка в пространстве горизонтальное.



Расположение термомпар в сечениях



Номер сечения	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Расстояние от токоподвода В, мм	150	40	65	125	185	215	245	275	305	335	365	390

Рис. 2. Экспериментальный участок. А, В, С, D — токоподводы; E, F, G — отборники давления; 1—24 — термомпары

В качестве капиллярно-пористой структуры использовалась фильтровальная сетка № 120, изготовленная из нержавеющей проволоки по ГОСТ 3187-65 ( $d_{эф} = 200$  мкм,  $\delta = 2$ ,  $d_{осп} = 220$  мкм и  $d_{вн} = 160$  мкм), которая плотно приваривалась к внутренней поверхности трубы по всей длине рабочего участка. К участку приваривались четыре медных токоподвода, электрический ток к которым подводился через медные гибкие шины.

Температура теплоносителя перед и после электронагревателя 7 на входе и выходе из экспериментального участка измерялась хромель-копелевыми термомпарами диаметром 0,5 мм. Температура внешней поверхности экспериментального участка контролировалась 24 хромель-копелевыми термомпарами такого же диаметра. Учитывая особенности возникновения кризиса теплоотдачи при кипении в горизонтальных каналах, температура стенки трубы измерялась на верхней, боковой и нижней образующей трубы. Термомпары размещались с шагом 30–60 мм.

Три термомпары, контролирующие температуру верхней образующей на выходе из экспериментального участка, подключались к потенциометрам типа КСП-4 (класс точности 0,25), автоматически отключающим нагрузку при достижении  $600^\circ\text{C}$ . Измерение э.д.с. всех остальных термомпар осуществлялось с помощью потенциометров такого же типа.

Давление в различных точках контура и на экспериментальном участке измерялось образцовыми манометрами типа МО (класс точности 0,4). Перепад давления на рабочем участке измерялся с помощью дифманометров ДМ-6 и образцовых манометров. Расход теплоносителя измерялся после холодильников 10 расходомерной шайбой с записью на регистрирующем приборе типа ДСМ 2-01 (класс точности 1,6). Электрическая мощность, подводимая к рабочему и вспомогательному участкам, измерялась на вторичной стороне трансформатора типа ОСУ-100/0,5 с помощью амперметров и вольтметра типа Э59 (класс точности 0,5).

**Анализ результатов эксперимента.** Основным опытом по исследованию критических тепловых потоков в канале с сеточным покрытием предшест-

Рис. 3. Температурный режим гладкой горизонтальной трубы в момент возникновения кризиса;  $p=13,72$  МПа,  $\rho W=2000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q_{кр}=4,07$  МВт/м<sup>2</sup>,  $x_{кр}=-0,13$ : 1 — верхняя, 2 — боковая, 3 — нижняя образующие

Рис. 4. Зависимость критического теплового потока от паросодержания в горизонтальном канале с технически гладкой поверхностью. 1 —  $p=6,86$  МПа, 2 — 9,81, 3 — 13,72 — данные авторов; I —  $p=6,86$  МПа, II — 9,81, III — 13,72 — данные для вертикального канала [13]; а —  $\rho W=1000$  кг/(м<sup>2</sup>·с), б — 2000

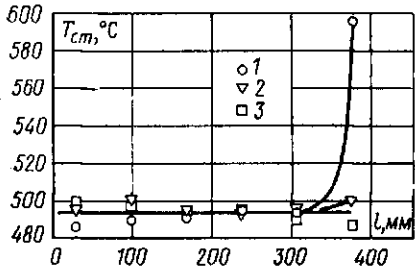


Рис. 3

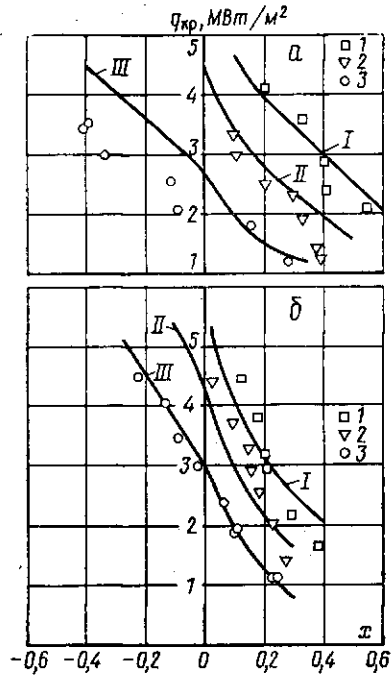


Рис. 4

новали эксперименты на горизонтальной трубе того же диаметра с технической гладкой поверхностью. Конструкция экспериментального участка аналогична участку с капиллярно-пористым покрытием. Длина рабочего участка составляла 450 и 910 мм ( $l/d$  соответственно 75 и 151,7). Режимные параметры для гладкого канала: давление на выходе 6,86; 9,81 и 13,72 МПа; массовая скорость потока 1000 и 2000 кг/(м<sup>2</sup>·с); тепловая нагрузка 1,15—4,50 МВт/м<sup>2</sup>.

Возникновение кризиса достигалось при постоянных значениях давления, массовой скорости и тепловой нагрузки на рабочем участке путем плавного повышения энтальпии потока на входе в экспериментальный участок. Обработка данных проведена в координатах  $q_{кр}-x$ . Экспериментальные результаты сопоставлялись с данными для вертикальных каналов [13].

Кризис всегда возникал на верхней образующей конца трубы. В то же время температура стенки на боковой и нижней образующих в пределах времени срабатывания защиты участка оставалась постоянной и лишь в некоторых режимах боковая термopара фиксировала небольшой рост температуры (рис. 3). Постоянство температур стенки на боковой и нижней образующих канала в момент возникновения кризиса на верхней части трубы можно объяснить тем, что пристенный двухфазный пузырьковый слой в горизонтальном канале неравномерен по периметру трубы.

Известно, что величина критического теплового потока в каналах заданной геометрии зависит в основном от трех параметров: давления, массовой скорости и паросодержания потока. Из рис. 4 следует, что критический тепловой поток с ростом балансового паросодержания монотонно убывает по закону, близкому к линейному. В окрестности  $x_{кр}=0$  и  $\rho W=2000$  кг/(м<sup>2</sup>·с) значения  $q_{кр}$  при давлениях 6,86 и 9,81 МПа практически совпадают, а при  $p=13,72$  МПа лежат значительно ниже. При  $x_{кр} \geq 0$  величина критического теплового потока монотонно убывает с ростом давления во всем исследованном диапазоне изменения  $p$ .

Анализ рис. 4 показывает, что при массовых скоростях  $\rho W=1000$  и  $2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  получено достаточно хорошее совпадение значений критических тепловых потоков для горизонтального и вертикального каналов при всех трех значениях давления. Менее удовлетворительное совпадение обнаружено при скорости  $\rho W=1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  в области отрицательных относительных энтальпий потока. По-видимому, при этой скорости течения асимметрия пристенного пузырькового слоя больше влияет на величину  $q_{кр}$ .

Влияние массовой скорости на зависимость  $q_{кр}=q(x)$  неоднозначно. Из рис. 5 видно, что для давления  $13,72 \text{ МПа}$  при  $x_{кр} \leq 0,17$  существует

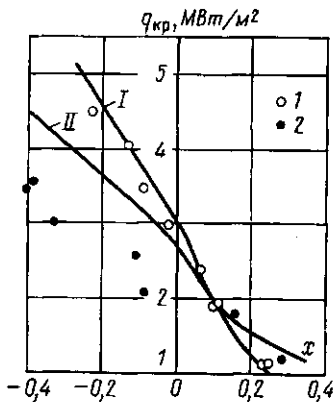


Рис. 5

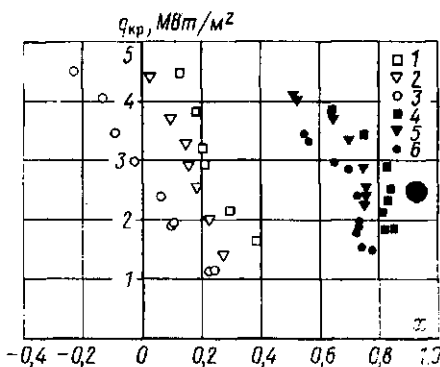


Рис. 6

Рис. 5. Сопоставление значений  $q_{кр}$  при давлении  $p=13,72 \text{ МПа}$ : 1 —  $\rho W=2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , 2 —  $1000$  — данные авторов; I —  $\rho W=2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , II —  $1000$  — рекомендации [13]

Рис. 6. Сопоставление данных по  $q_{кр}$  в парогенерирующих каналах с технически гладкой стенкой и сеточным покрытием на внутренней поверхности при  $\rho W=2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ : 1 —  $p=6,86 \text{ МПа}$ ; 2 —  $9,81$ ; 3 —  $13,72$  — гладкая стенка; 4 —  $6,86$ ; 5 —  $9,81$ ; 6 —  $13,72 \text{ МПа}$  — канал с металлической сеткой

тенденция к увеличению критического теплового потока с повышением массовой скорости. Однако при больших паросодержаниях ( $x_{кр} > 0,12$ ) влияние  $\rho W$  противоположно. В целом можно сказать, что кризис теплоотдачи при кипении воды в горизонтальном канале с обычной поверхностью при больших скоростях потока подчиняется тем же закономерностям, что и в вертикальном [13].

Для повышения критической мощности парогенерирующего канала его внутренняя поверхность покрывалась металлической сеткой. В этих опытах кризис достигался при постоянных значениях давления, массовой скорости и энтальпии потока на входе в экспериментальный участок путем плавного повышения тепловой нагрузки на рабочем участке. Во всех режимах на вход в экспериментальный участок подавалась пароводяная смесь.

Экспериментальные данные по критическим тепловым потокам представлены также в координатах  $q_{кр}-x$  (рис. 6). Сопоставление данных по  $q_{кр}$  для каналов с сеточным покрытием и гладкой стенкой показывает, что использование в качестве интенсификатора металлической сетки значительно увеличивает критическое паросодержание и расширяет область бескризисной работы парогенерирующих каналов.

Так, при  $p=13,72 \text{ МПа}$  и массовой скорости  $2000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  в гладкой трубе критический тепловой поток, равный  $\sim 3,5 \text{ МВт}/\text{м}^2$ , достигается лишь при большом подогреве ( $x_{кр} = -0,09$ ) теплоносителя. Покрытие внутренней поверхности трубы сеткой указанной геометрии приводит к тому,

что то же значение критического теплового потока отвечает паросодержанию  $x_{кр} = 0,55$ . Аналогичные результаты получены и для более низких давлений 9,81 и 6,86 МПа.

Отмеченный факт представляет немалый практический интерес. В том случае, когда речь идет лишь о защите теплонапряженной поверхности от пержога, покрытие поверхности сеткой со стороны охлаждающей воды дает возможность более экономично использовать теплоноситель. В случае необходимости утилизации отведенного тепла оно позволяет получать в большом количестве (50% и более от расхода воды) пар высокого давления, пригодный для выработки электроэнергии.

Механизм воздействия сеточного покрытия можно объяснить следующим образом. Из рис. 6 видно, что кризис происходит при  $x \geq 0,5$ , т. е. в области дисперсно-кольцевого режима течения. При этих условиях толщина пленки жидкости соизмерима с толщиной сеточного покрытия. В тех случаях, когда поверхность раздела пленки и парового ядра начинает проникать в пористую структуру, это препятствует срыву жидкости с поверхности пленки. Пленка жидкости становится более стабильной. Более того, сеточное покрытие является своеобразной «ловушкой». Капли жидкости, выпадающие из ядра потока, удерживаются структурой металлической сетки. Это приводит к повышению концентрации жидкости у поверхности стенки по сравнению с аналогичными условиями при течении парожидкостного потока в канале с гладкой поверхностью.

С другой стороны, наличие сеточного покрытия у поверхности стенки препятствует образованию на поверхности нагрева сплошной паровой пленки. Если в каком-то месте трубы возникло паровое пятно, то за счет сил капиллярного давления к этому месту подводится жидкость из соседних участков пристенного слоя. Таким образом, происходит «затягивание» кризиса теплоотдачи и увеличение значений критического паросодержания. Кроме того, сеточное покрытие является одновременно шероховатой поверхностью, что способствует повышению турбулентности потока и увеличению потока капель к стенке. Это обстоятельство особенно важно в таких режимах течения двухфазного потока, когда пленка жидкости находится внутри сеточного покрытия. Капли жидкости «захватываются» сеточным покрытием и снижают срыв капель. Вопрос о том, какой из рассмотренных выше механизмов оказывает основное влияние, требует дополнительного изучения, в частности, проведения экспериментов в области низких энтальпий потока.

В заключение отметим, что наличие сеточного покрытия у поверхности стенки парогенерирующего канала способствует значительному повышению критических паросодержаний потока. Этот способ весьма перспективен для целей повышения критической мощности парогенерирующих каналов. Вместе с тем ясно, что в таких каналах существенно возрастают потери давления на трение. По-видимому, можно сказать, что некоторые типы капиллярно-пористых структур могут оказаться эффективнее ряда известных интенсификаторов — шнеков, прерывистых завихрителей и пр. Однако необходимо проведение дополнительных исследований как тепловых, так и гидродинамических, которые позволят выбрать наиболее оптимальную структуру капиллярно-пористых тел.

Институт высоких температур  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
9 VII 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Стырикович, О. И. Мартынова, З. Л. Миропольский. Процессы генерации пара на электростанциях. «Энергия», 1969.
2. В. А. Локшин, И. Е. Семеновкер, Ю. В. Вихрев. Тр. ЦКТИ, вып. 58, Л., 1965.
3. Ю. В. Вихрев, В. А. Локшин. Энергомашиностроение, № 7, 1965.
4. Ю. В. Вихрев, А. С. Копьков, И. Т. Силицын. Энергомашиностроение, № 4, 1975.
5. В. Е. Дорощук. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. «Энергия», 1970.

6. *Л. Тонг*. Теплоотдача при кипении и двухфазное течение. «Мир», 1969.
7. *Н. И. Перепелица, А. П. Сапанкевич*. Способы повышения параметров при кризисе теплоотдачи (аналитический обзор). ФЭИ Е-11 ОБ-31. Обнинск, 1976.
8. *В. И. Субботин, С. П. Казновский, А. П. Сапанкевич*. Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, № 3, 1974.
9. *Т. И. Благовестова, С. П. Казновский, В. И. Михан, А. П. Сапанкевич, Н. П. Сердунь, В. Н. Филиппов*. Семинар ТФ-74 «Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней в стационарных и нестационарных режимах теплообмена». М., Сб. докладов ИАЭ им. Курчатова, 1974.
10. *В. Н. Смолин, В. К. Поляков*. Семинар ТФ-74 «Исследования критических тепловых потоков в пучке стержней в стационарных и нестационарных режимах теплообмена». М., Сб. докладов ИАЭ им. Курчатова, 1974.
11. *Ю. Д. Барулин, А. С. Коньков, А. И. Леонтьев, Н. В. Тарасова, Т. И. Благовестова, В. И. Михан, В. Н. Филиппов*. Семинар ТФ-74 «Исследования критических тепловых потоков в пучках стержней в стационарных и нестационарных режимах теплообмена». М., Сб. докладов ИАЭ им. Курчатова, 1974.
12. *М. А. Стырикович, А. И. Леонтьев, В. С. Полонский, А. С. Зуйков*. ТВТ, 16, № 3, 548, 1978.
13. Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в равномерно обогреваемых круглых трубах. Препринт-3-004, ОКБ ИВТАН, М., 1975.