

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. С. Протопопов, А. Т. Игамбердыев, Некоторые результаты экспериментального исследования местной теплоотдачи при сверхкритическом давлении в односторонне обогреваемом прямоугольном канале, *ТВТ*, 1972, том 10, выпуск 6, 1242–1247

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: 3.238.202.29

10 ноября 2024 г., 17:53:58



УДК 536.24

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МЕСТНОЙ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОМ ДАВЛЕНИИ В ОДНОСТОРОННЕ ОБОГРЕВАЕМОМ ПРЯМОУГОЛЬНОМ КАНАЛЕ

В. С. Протопопов, А. Т. Игамбердыев

Приводятся результаты экспериментального исследования местных по периметру коэффициентов теплоотдачи при турбулентном течении двуокиси углерода сверхкритического давления в горизонтальном односторонне обогреваемом с нижней стороны медном прямоугольном канале. Исследование проведено по специально разработанной методике. На основе анализа полученных данных предложен метод приближенного расчета распределения по периметру канала местных коэффициентов теплоотдачи.

В инженерной практике охлаждение теплонапряженных конструктивных элементов часто осуществляется с помощью жидкости сверхкритического давления, пропускаемой через каналы прямоугольного сечения. Тепловой расчет такой системы сводится к расчету теплообмена в одиночном канале, обогреваемом с одной внешней стороны. Для расчета температурного поля в стенках канала необходимо иметь данные о распределении местных коэффициентов теплоотдачи по внутреннему периметру канала. Некоторые сведения о распределении коэффициентов теплоотдачи в равномерно обогреваемом канале содержатся в [1]. В этой работе исследовалось турбулентное течение воды и ртути в канале с прямоугольным поперечным сечением. По данным [1] наблюдается некоторое повышение местных коэффициентов теплоотдачи ($\sim 20-30\%$) вблизи угловых зон, на остальной части периметра канала коэффициент теплоотдачи практически имеет постоянное значение. Экспериментальных исследований при течении жидкости с переменными физическими свойствами не имеется. Распределение местных коэффициентов теплоотдачи по периметру прямоугольного канала при одностороннем внешнем обогреве практически не изучено даже для жидкостей с постоянными физическими свойствами. Отсутствие экспериментальных данных связано в основном с затруднениями методического характера.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования местной теплоотдачи в односторонне обогреваемом прямоугольном канале. Исследование проведено при турбулентном течении двуокиси углерода сверхкритического давления.

Опытный участок и методика исследования. Исследование теплоотдачи проводилось на опытном участке, изображенном на рис. 1. Канал с размером проходного сечения $16 \times 3,9$ мм ($d_s = 6,26$ мм) выполнен из меди заодно с нагревательным устройством*. Толщина боковых стенок канала

* Наружная поверхность канала и блока нагревательного устройства была покрыта слоем хрома в несколько микрон.

$\delta = 1,9$ мм, длина канала $L = 256$ мм ($L/d_0 = 41$). В сверлениях блока нагревательного устройства были зацементированы нагревательные элементы (трубки из стали 1X18H9T), питаемые переменным током низкого напряжения. Тепловой поток к текущей в канале жидкости передавался от нагревательного устройства через основание канала шириной (в плоскости поперечного сечения) 7,7 мм и стенки канала. Внешние стороны канала были теплоизолированы. Путем электромоделирования было установлено, что за «обогреваемую поверхность» канала с равномерной температурой t_0 и тепловым потоком q_0 можно принять поверхность на расстоянии 6 мм от дна проходного сечения канала (на рис. 1

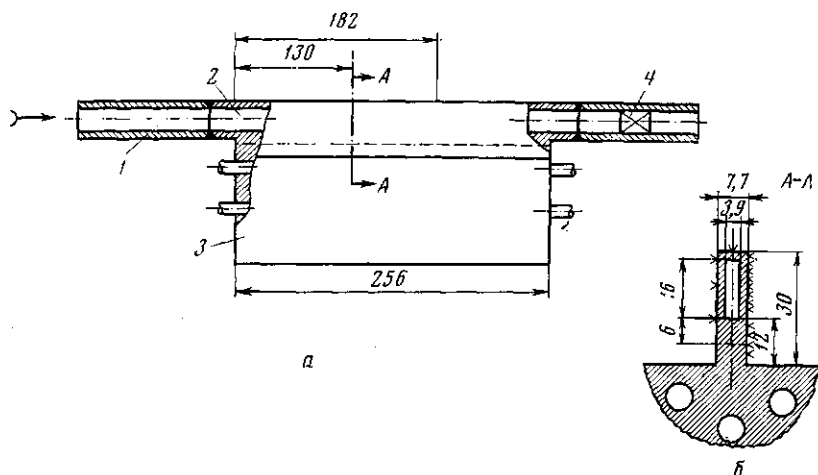


Рис. 1. Опытный участок:

а: 1 — начальный гидродинамический участок; 2 — обогреваемый канал; 3 — нагревательное устройство; 4 — смеситель.
б: поперечное сечение канала (стрелками указаны места заделки спаев термопар)

показана пунктиром). Перед опытным каналом имелся необогреваемый участок гидродинамической стабилизации $l/d_0 = 40$, выполненный из стали 1X18H9T; за опытным каналом — аналогичный выходной участок $l/d_0 = 5$, в конце которого был установлен смеситель. Перед участком стабилизации и за смесителем устанавливались термопары в гильзах для измерения температуры жидкости. Опытный участок устанавливался в замкнутом контуре, циркуляция жидкости в котором осуществлялась с помощью разгруженного от давления центробежного насоса.

Местные по периметру канала $S_{\text{вн}}$ коэффициенты теплоотдачи α определяются соотношением

$$q_c = \alpha(t_c - t_{\text{ж}}), \quad (1)$$

где q_c и t_c — соответственно местные значения плотности теплового потока и температуры стенки на внутреннем периметре канала; $t_{\text{ж}}$ — среднemasовая температура жидкости в поперечном сечении канала. Для определения местных коэффициентов теплоотдачи была разработана специальная методика исследования. Согласно этой методике для определения α необходимо произвести измерения плотности теплового потока и температуры только на наружной поверхности канала. Вычисление искомых коэффициентов теплоотдачи и значений температуры на внутренней поверхности канала сводится к приближенному решению уравнения Лапласа $\nabla^2 t = 0$ для области поперечного сечения стенок канала. Граничными условиями служат задаваемые по опытным данным распределение температуры по наружному контуру $t_c^{\text{н}}$ и значение q_0 на «обогреваемой поверхности» (на остальных участках контура $S_{\text{н}}$ значение $q_c = 0$). Решение задачи осуществлялось методом подбора решений с использованием сеточного электронного интегратора ЭИ-12. Задаваясь распределением местных коэффициентов

теплоотдачи α и температурой $t_{ж}$, находим распределение температуры на наружной поверхности. Тот вариант распределения α , при котором распределение t_c^n совпадает в пределах погрешности измерений с измеренным в опыте, принимается за искомое решение задачи. Подробное описание методики и обоснование возможности ее применения для рассматриваемой задачи приведено в [2].

Исследование местных коэффициентов теплоотдачи по припиту методу производилось в двух поперечных сечениях канала ($x/d_0 = 19$ и 29). В этих сечениях на наружной боковой поверхности (с одной стороны) было заложено по 13 термопар (ХА 0,2 мм) с шагом 2 мм, начиная от «обогреваемой поверхности» (на противоположной стороне закладывались по три термопары для контроля за симметрией температурного поля). Спаи термопар зачеканивались в сверлениях глубиной 0,4 мм. Кроме того, в сечениях $x/d_0 = 2,2; 8,4$ и 39 было заложено по три термопары с шагом 2 мм в области «обогреваемой поверхности». По показаниям этих термопар во всех пяти сечениях рассчитывалось распределение теплового потока q_0 вдоль канала. По этим данным и измеряемым в опытах значениям температуры на входе в канал и величине расхода жидкости рассчитывались значения среднемаховой энтальпии в расчетных сечениях i_m . Значение $t_{ж}$ определялось по величине i_m и давлению p , используя табличные данные из работы [3].

Результаты палачочных опытов. С целью отработки принятой методики исследования были проведены опыты с водой при небольшом избыточном давлении и с двуокисью углерода при $p = 80, 90, 100$ бар и небольших температурных напорах (5–10° С). По этим данным средние коэффициенты теплоотдачи, отнесенные к разности между среднеинтегральной по внутреннему периметру канала температурой стенки и температурой $t_{ж}$ в пределах 10% согласуются с расчетом по формуле из работы [4] при введении в нее d_0^* .

При определении местных коэффициентов теплоотдачи в опытах с водой по принятому методу были обнаружены ошибки в измерении температуры стенки в трех точках вблизи нижней угловой зоны проходного сечения канала. Анализ этих данных показал, что ошибки связаны с неточностью в определении координат закладки спаев этих термопар, приходящихся на область больших градиентов температуры t_c^n по наружному контуру S_n . Ввиду невозможности введения непосредственной коррекции пришлось принять относительный метод. Учитывая, что по данным [1] для условий проведения опытов с водой коэффициенты теплоотдачи изменяются на 20–30% лишь в небольшой по протяженности угловой зоне, а на остальной части периметра имеют постоянное значение, было принято допущение о постоянстве коэффициентов теплоотдачи по всему периметру. Опираясь на это допущение, было рассчитано распределение t_c^n применительно к условиям опытов с водой и из сопоставления расчетных значений t_c^n с измеренными в опытах внесена коррекция в координаты закладки спаев термопар. После введения этой коррекции метод определения местных коэффициентов теплоотдачи становится относительным. Относительность его заключается в том, что получаемое вследствие влияния изменения физических свойств распределение α в опытах с двуокисью углерода при сверхкритическом давлении должно рассматриваться в сопоставлении с $\alpha = \text{const}$ при постоянных физических свойствах.

Анализ палачочных опытов с двуокисью углерода показал, что величины q_0 определяются с погрешностью не выше 10–15%.

Результаты основных опытов. Опытный канал располагался горизонтально с подводом тепла к нижней части канала. Опыты проводились при

* Экспериментальные значения коэффициентов сопротивления трению оказались на 25% выше расчетных величин по формуле Филоненко. Это завышение связано с недостаточно тщательным выполнением сочленением участка стабилизации с опытным каналом, вблизи которого был выполнен отбор статического давления.

давлении $p = 80$ и 100 бар ($p/p_k = 1,03$ и $1,33$), температуре на входе $t_{вк} = 18-55^\circ\text{C}$, массовой скорости $\rho w = 1500-4300$ кг/м²сек ($Re = \rho w d_0 / \mu_{ж} = 1,5 \cdot 10^5 \div 6 \cdot 10^5$) и плотностях теплового потока на обогреваемой поверхности q_0 до $2,8 \cdot 10^6$ вт/м². Запись показаний приборов производилась в стационарном тепловом режиме.

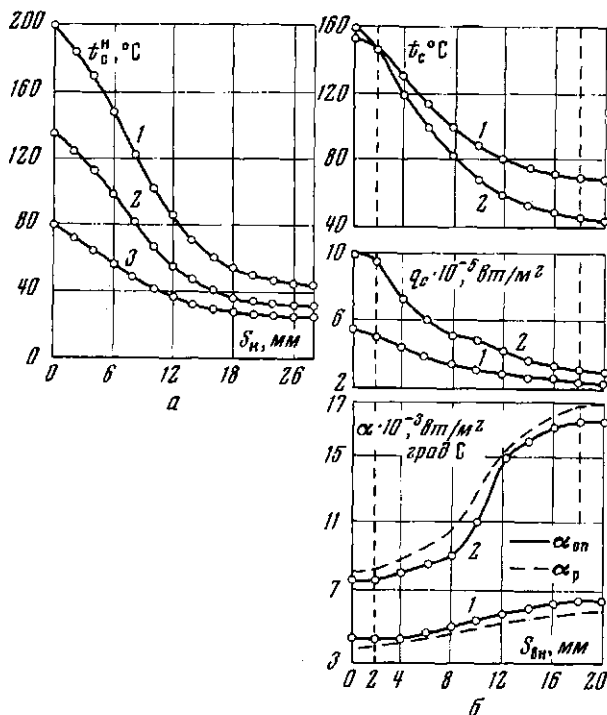


Рис. 2. Характерное распределение температуры по наружному и внутреннему контурам, плотности теплового потока, местных коэффициентов теплоотдачи по внутреннему контуру:

а: $p = 80$ бар; $\rho w = 4300$ кг/м²сек; $t_{ж} \approx 23^\circ\text{C}$; 1 — $q_0 = 2,82 \cdot 10^6$ вт/м²; 2 — $2,22 \cdot 10^6$ вт/м²; 3 — $1,16 \cdot 10^6$ вт/м²; б: $p = 80$ бар; 1 — $t_{ж} = 24,5^\circ\text{C}$; $\rho w = 1850$ кг/м²сек; $q_0 = 2,04 \cdot 10^6$ вт/м²; 2 — $t_{ж} = 25,2^\circ\text{C}$; $\rho w = 4130$ кг/м²сек; $q_0 = 2,82 \cdot 10^6$ вт/м²

Для всех опытов получено незначительное изменение температуры t_0 вдоль канала. По этим данным, осевыми потоками топлива можно пренебречь и поле температуры в поперечном сечении канала рассматривать как двумерное с заданной величиной q_0 на обогреваемой поверхности. Сопоставление показаний основных и контрольных термопар в расчетных сечениях свидетельствует о симметрии температурного поля относительно вертикальной оси поперечного сечения канала, что позволило далее рассматривать поле температуры в половине сечения стенок канала.

Типичное распределение температуры наружной поверхности t_c^H по развертке наружного периметра сечения стенок канала S_H^c показано на рис. 2, а (за начало отсчета S_H принята угловая точка на «обогреваемой поверхности»). Как видно, температура t_c^H убывает по мере удаления от «обогреваемой поверхности» по близкому к линейному закону в области основания канала и по близкому к экспоненциальному на боковой поверхности. На основе этих данных для двух расчетных сечений по принятому в работе методу было найдено распределение коэффициентов теплоотдачи α и температуры стенки t_c на внутреннем периметре канала. По этим данным и значениям $t_{ж}$ по формуле (1) рассчитывалось распределение местных значений тепловых потоков q_c . Таким образом, тип граничных условий — характер распределения t_c или q_c — определяется при анализе опыт-

ных данных, а не задается заранее. Это обстоятельство отражает специфику теплообмена при течении жидкости сверхкритического давления с переменными физическими свойствами в односторонне обогреваемом с внешней стороны прямоугольном канале. В этом случае поля температуры в потоке жидкости и в стенках канала оказываются взаимосвязанными (сопряженными).

На рис. 2, б показаны типичные картины распределения t_c , q_c и α на внутреннем периметре канала *. Как видно, характерной особенностью является увеличение местных коэффициентов теплоотдачи в направлении от дна канала. Так, в опыте с $q_0 = 2,8 \cdot 10^6$ вт/м², $\rho w = 4130$ кг/м²сек, $t_{ж} = 25,2^\circ$ С значение α изменяется в 2,5 раза, местная плотность теплового потока q_c — в 3,3 раза. Как видно, изменение α по периметру оказывается существенно выше возможного изменения в изотермических условиях (20–30%). Эти данные показывают, что применение относительного метода в определении α является оправданным.

Рассматривая совместно распределение по периметру α и t_c можно видеть, что характер изменения α связан с уровнем температуры t_c (при одинаковом значении $t_{ж}$). При $t_c \gg t_m^{**}$ и $t_{ж} < t_m$ росту t_c соответствует падение α , при $t_c \simeq t_m$ происходит небольшое увеличение теплоотдачи. Аналогичная взаимосвязь между α и t_c получена ранее при исследовании местной по длине трубы теплоотдачи при течении жидкости сверхкритического давления в равномерно обогреваемых круглых трубах (см., например, [5, 6]). Взаимосвязь между местными значениями α и t_c по периметру прямоугольного канала можно объяснить следующим образом. По данным [7, 8] между полями скорости при течении жидкости в каналах некруглого поперечного сечения и в круглых трубах существует связь, т. е. изменение скорости для круглой трубы по радиусу можно распространить на линии, подходящие к стенке канала некруглого сечения по нормали. Можно предположить, что на значения местных коэффициентов теплоотдачи по периметру некруглого поперечного сечения, по-видимому, также существенное влияние будет оказывать изменение физических свойств по нормали к поверхности теплообмена, а следовательно, и величина местной температуры на внутренней поверхности канала t_c в сочетании со среднemasовой температурой $t_{ж}^{***}$. С учетом этого была проверена возможность оценки влияния переменности физических свойств жидкости на местные коэффициенты теплоотдачи по способу, предложенному в [6]

$$Nu = Nu_0 (\bar{c}_p / c_{p,m})^n (\rho_c / \rho_m)^{0,3}. \quad (2)$$

Формула (2) использовалась для расчета местных по периметру коэффициентов теплоотдачи при введении в нее эквивалентного диаметра \bar{d}_c ; физические параметры выбирались при температуре $t_{ж}$ и местным значениям температуры стенки t_c на внутреннем периметре. Распределение расчетных значений местных коэффициентов теплоотдачи α_p по периметру канала, соответствующих местным опытным значениям температуры стенки t_c , показано на рис. 2, б пунктиром. Сопоставление значений α и α_p для всех опытных данных показывает, что при $t_{ж} < t_m$ и $t_{ж} > t_m$ опытные и расчетные значения местных коэффициентов теплоотдачи согласуются в пределах $\pm 20\%$ во всем исследованном интервале значения t_c . Результаты сопоставления в форме зависимости $\alpha / \alpha_p = f(T_c / T_m)$ показаны на

* За начало отсчета принята центральная точка на дне канала; пунктиром показаны координаты угловых точек.

** t_m — псевдокритическая температура.

*** Отнесение коэффициентов теплоотдачи к разности между текущим по периметру значением t_c и средней для сечения температурой $t_{ж}$ приемлема, очевидно, для тех случаев, когда $t_c > t_{ж}$ по всему периметру. Для узких проходных сечений и при больших значениях чисел $Vi = \alpha d_c / \lambda_{ст}$ в верхней части канала может быть $t_c < t_{ж}$, и данный способ определения α будет неприменим. В нашей работе числа Vi изменялись в пределах $0,066 \div 0,429$.

рис. 3 (T_c и T_m — температура стенки и псевдокритическая температура в °К). Для условий $t_{ж} \approx t_m$ отмечается занижение α по сравнению с α_p на 40–50%. Однако из-за небольшого количества опытов и меньшей их точности эти данные в дальнейшем не рассматривались*.

Как показывает анализ, определение значений местных коэффициентов теплоотдачи по использованному методу при больших температурных

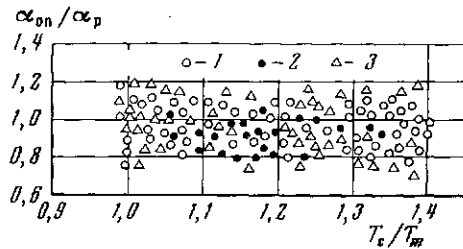


Рис. 3. Сравнение опытных значений местных по периметру коэффициентов теплоотдачи α с рассчитанными по формуле (2) значениями α_p :

1 — $p = 80$ бар, $t_w < t_m$; 2 — $p = 80$ бар, $t_w > t_m$; 3 — $p = 100$ бар, $t_w < t_m$

папорах $t_c - t_m \geq 30^\circ \text{C}$ (представляющих наибольший интерес с практической точки зрения) производится с ошибкой 15–20%. Совпадение значений α и α_p в пределах погрешности формулы (2) можно рассматривать как показатель того, что, по крайней мере, в пределах погрешности определения α и α_p основное влияние на местные коэффициенты теплоотдачи оказывает изменение физических свойств жидкости в поперечном сечении канала; влияние переменной плотности теплового потока q_c по внутреннему периметру, по-видимому, в этих условиях заметно не проявляется.

Основываясь на удовлетворительном совпадении опытных значений местных по периметру канала коэффициентов теплоотдачи α с расчетными значениями α_p по формуле (2) был проведен расчет значений t_0 для всех опытов. При расчете принимались заданными величины $t_{ж}$, ρw и q_0 по опытным данным для каждого режима. Местные коэффициенты теплоотдачи в зависимости от $t_{ж}$, ρw и t_c определялись по формуле (2). Расчет производился методом последовательных приближений с использованием сеточного электроинтегратора ЭИ-12. При таком расчете значения $(t_0 - t_{ж})_p$ совпадают в пределах 20% с опытными значениями $(t_0 - t_{ж})$, однако для большинства данных замечается систематическое занижение расчетных значений. Рассматривая этот результат, можно заметить, что величина ошибки в определении α порядка 15–20% является типичной в настоящее время даже для случая течения жидкости сверхкритического давления в равномерно обогреваемых круглых трубах. Поэтому полученные результаты можно рассматривать как показатель возможности использования в первом приближении формулы (2) для расчета местных коэффициентов теплоотдачи по периметру односторонне обогреваемого прямоугольного канала и соответственно расчета температуры стенок в поперечном сечении каналов со сходными геометрическими характеристиками.

Московский энергетический институт

Поступила в редакцию 24 XI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Субботин, С. П. Казновский, В. И. Сидоров. Теплоэнергетика, № 9, 1961.
2. Е. А. Краснощеков, В. С. Протопопов, А. Т. Игамбердыев, В. С. Григорьев. Теплофизика высоких температур, 6, № 6, 1969.
3. М. П. Вукалович, В. В. Алтуниш. Теплофизические свойства двуокиси углерода. Атомиздат, 1965.
4. Б. С. Петухов, В. В. Кириллов. Теплоэнергетика, № 4, 1958.
5. Б. С. Петухов. Теплофизика высоких температур, 5, № 4, 1968.
6. Е. А. Краснощеков, В. С. Протопопов. Теплофизика высоких температур, 3, № 3, 1966.
7. Ю. П. Шлыков, С. Н. Царевский-Дякин. Теплоэнергетика, № 12, 1960.
8. М. Х. Ибрагимов, И. А. Исупов, Л. Л. Кобзарь, В. И. Субботин. Атомная энергия, 21, вып. 2, 1966.

* Режимы с $t_{ж} \approx t_m$ оказались менее стабильными во времени, что затрудняло проведение опытов и вносило ошибки в измерение t_c .