

УДК 536.24:661.97

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ДВУОКСИ УГЛЕРОДА В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ
ПРИ БОЛЬШИХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПОРАХ

Е. А. Краснощечков, В. С. Протопопов

Приведены результаты экспериментального исследования теплоотдачи двуокси углерода сверхкритических параметров при турбулентном течении в трубе в условиях нагрева. Опытные данные получены при давлениях 785 и 981 н/см², температурных напорах до 500°С и плотностях теплового потока до 2,6 вт/м². Получена расчетная зависимость, обобщающая результаты эксперимента.

Обозначения

l — расстояние от начала обогрева трубки, м; d — диаметр опытной трубки, м; T_c , t_c — температура внутренней поверхности трубки, °К и °С; $T_{ж}$ и $t_{ж}$ — средняя калориметрическая температура жидкости в данном сечении трубки; °К и °С; ρw — массовая скорость, кг/м² час; Nu_0 — число Нуссельта, определяемое по формуле (1) при температуре $t_{ж}$; $Nu_{ж}$ — число Нуссельта при температуре $t_{ж}$; ρ_c и $\rho_{ж}$ — плотность при температуре t_c и $t_{ж}$; $c_{pж}$ — теплоемкость при постоянном давлении и температуре $t_{ж}$, кдж/кг °С; i_c и $i_{ж}$ — энтальпия при температуре t_c и $t_{ж}$, кдж/кг.

В ряде областей современной техники применяются устройства, в которых используются теплоносители при параметрах состояния, близких к критическим. В частности, большой практический интерес представляют такие случаи, когда давление превышает критическое, а температура теплоносителя по сечению потока изменяется от значений ниже критических до значений выше критических. При этом все теплофизические свойства вещества претерпевают весьма существенные и своеобразные изменения по сечению потока. Теплообмен в таких устройствах во многих случаях осуществляется при больших плотностях теплового потока, достигающих нескольких миллионов вт/м², и при температурных напорах в несколько сотен градусов. Поэтому создание такой аппаратуры, работающей часто при предельно возможной температуре поверхности, требует надежных методов расчета теплообмена. Между тем для многих практических случаев такие методы расчета отсутствуют.

За последние годы проведено довольно большое количество экспериментальных работ и несколько теоретических исследований теплообмена при сверхкритических параметрах состояния вещества. В этих работах в основном изучался теплообмен при турбулентном течении жидкости в круглых трубах в условиях нагрева (теплообмен в условиях охлаждения и в настоящее время практически не исследован). Результаты исследований показали, что теплообмен в сверхкритической области обладает существенными особенностями по сравнению с теплообменом при параметрах, далеких от критических.

Опытные данные, полученные при малых температурных напорах [1, 2], т. е. в условиях, когда физические свойства жидкости мало изменяются по сечению потока, описываются зависимостями для конвективного теплообмена при турбулентном течении в трубах однофазной жидкости с постоянными физическими свойствами. Как показано в работе [1], наиболее удовлетворительное согласование опытных данных наблюдается с зависимостью [3]

$$\text{Nu}_0 = \frac{\xi/8 \text{ Re Pr}}{12,7 \sqrt{\xi/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1) + 1,07} \quad (1)$$

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

Формула (1) получена путем интерполяции результатов теоретического расчета теплообмена при постоянных физических свойствах теплоносителя и постоянной плотности теплового потока на стенке. Эти результаты показывают, что в условиях малых температурных напоров теплообмен в сверхкритической области не обладает какими-либо специфическими особенностями. Характер зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры потока определяется зависимостью от температуры физических свойств теплоносителя. При этом поскольку теплопроводность и вязкость в околокритической области имеют сходную зависимость от температуры, коэффициент теплоотдачи изменяется с температурой при постоянном значении массовой скорости аналогично изменению теплоемкости. Поэтому при температуре T_m , соответствующей максимуму теплоемкости при данном давлении, наблюдается максимум теплоотдачи.

В условиях, когда температурные напоры таковы, что физические свойства жидкости существенно изменяются по сечению потока, теплоотдача не описывается зависимостями типа (1). При этом с ростом температуры стенки (при увеличении тепловой нагрузки) и при сохранении постоянными всех прочих параметров теплоотдача достигает максимального значения при $T_c = T_m$, а затем монотонно уменьшается. Экспериментальные исследования теплоотдачи к воде и двуокиси углерода, выполненные при относительно небольших температурных напорах ($T_c \leq 1,1 T_m$ — область пика теплоемкости) и достаточно больших массовых скоростях потока (ориентировочно $\text{Re}_{\text{ж}} > 10^5$), обнаружили удовлетворительное соответствие результатов экспериментов с теоретическими расчетами для конвективного теплообмена в однофазной среде с переменными физическими свойствами [4—6]. Среди теоретических работ следует отметить выполненную недавно работу [4], в которой произведен расчет теплоотдачи к двуокиси углерода. Помимо более строгого обоснования принятых допущений, эта работа обладает еще и тем достоинством, что ее результаты представлены в удобном для использования виде. Для этих же условий получены эмпирические формулы [1, 7], удовлетворительно описывающие имеющиеся опытные данные. При относительно более высоких плотностях теплового потока, когда $T_{\text{ж}} \leq T_m$, а $T_c \gg T_m$, экспериментальных данных очень мало, закономерности теплообмена изучены недостаточно и расчетных рекомендаций в литературе нет.

В некоторых определенных условиях обнаружены явления, сходные с явлениями, характерными для процессов кипения жидкости в трубах. Сюда относятся режимы с резким уменьшением местных коэффициентов теплоотдачи [8] и режимы, при которых по некоторым данным [5, 9] появляются сильные пульсации давления, шум и происходит увеличение интенсивности теплообмена.

Из вышесказанного следует, что закономерности теплообмена в сверхкритической области изучены еще недостаточно полно. Цель настоящей работы — экспериментальное исследование теплообмена при турбулентном течении жидкости в трубах в условиях нагревания при больших температурных напорах.

Экспериментальная установка

Исследование проводилось с двуокисью углерода (критические параметры $p_k = 739 \text{ н/см}^2$, $t_k = 31,04^\circ \text{С}$).

Опытный участок, предназначенный для измерения местных коэффициентов теплоотдачи, был выполнен из стальной трубки 1Х18Н9Т с внутренним диаметром $d = 4,08$ и наружным диаметром $D = 5,00 \text{ мм}$. Обогрев рабочего участка трубки длиной $l = 51 d$ осуществлялся пропускаемым через него переменным током от низковольтного трансформатора. Перед обогреваемым участком имелся успокоительный участок длиной $l = 49 d$. Вблизи входа и выхода из обогреваемого участка были сделаны отборы статического давления. Обогреваемый участок трубки окружался экранами из металлической фольги и стеклянной тканью.

Для измерения температуры стенки трубки использовались нихром-константановые термомпары диаметром $0,1 \text{ мм}$. Спаи термомпар приваривались вдоль образующей к наружной поверхности трубки в двенадцати сечениях по ее длине. В трех сечениях ($l/d = 20, 30, 40$) были дополнительно заложены термомпары на верхней и нижней образующих. Температура двуокиси углерода на входе и выходе из опытного участка определялась по показаниям медь-константановых термомпар, заключенных в чехлы из нержавеющей стали. Спаи входной термомпары располагался по оси потока на входе в успокоительный участок, а выходной — на оси потока за смесителем, состоящим из набора специальных диафрагм. Э. д. с. термомпар измерялось с помощью потенциометра ПМС-48.

Исследование теплоотдачи производилось при горизонтальном положении опытного участка. Экспериментальная установка представляла собой замкнутый контур циркуляции. Двуокись углерода прокачивалась по контуру бессальниковым шестеренчатым насосом с электромагнитным приводом. Расход двуокиси углерода G определялся по перепаду давления на диафрагме, измеряемому с помощью тензометрического дифференциального манометра [10]. Погрешность определения расхода составляет $1-2\%$. Давление на входе в опытный участок и перед измерительной диафрагмой измерялось образцовыми манометрами класса $0,2$.

Местные значения плотности теплового потока на внутренней поверхности трубки q определялись по величине электрического тока в трубке I и местным значениям электрического сопротивления единицы длины трубки R_l . Зависимость электрического сопротивления трубки от температуры была определена предварительной тарировкой. Погрешность определения значений плотности теплового потока с учетом тепловых потерь не превышает $2,4\%$. Местные значения средней калориметрической температуры жидкости $t_{ж}$ определялись по уравнению теплового баланса. Погрешность определения $t_{ж}$ не превышает $0,7^\circ \text{С}$. Погрешность определения температурного напора $\Delta t = t_c - t_{ж}$ обуславливалась в основном пульсациями температуры стенки, которые при $t_c > 100^\circ \text{С}$ составляли примерно $2,5\%$ от измеряемой величины. Значения местных коэффициентов теплоотдачи определялись по формуле

$$\alpha = \frac{I^2 R_l(t)}{\pi d (t_c - t_{ж})}, \quad (2)$$

где t_c — температура внутренней поверхности трубки, определяемая пересчетом по измеренной температуре наружной поверхности.

Максимально возможная ошибка определения коэффициента теплоотдачи находится в пределах от 10 до 5% при изменении температурного напора от 5 до 500°С .

Результаты измерений

Тарировочные опыты с водой и двуокисью углерода при изотермическом течении показали, что трубка в диапазоне чисел Re $1 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^4$ является гидравлически гладкой. В интервале чисел Re $1 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^5$

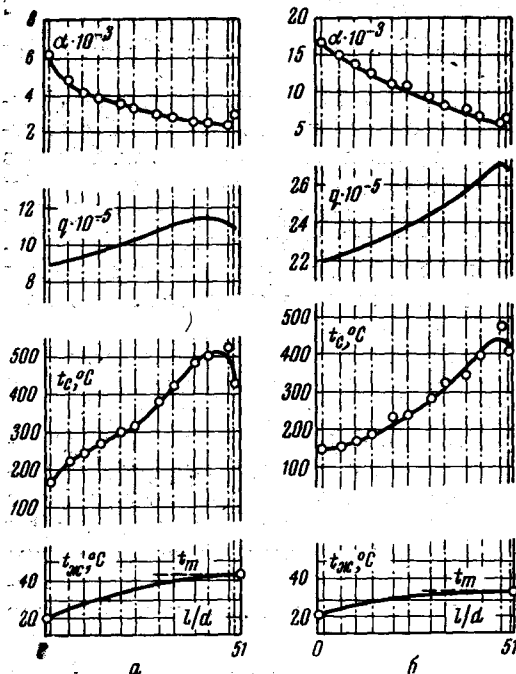


Рис. 1. Распределение t_w , t_c , q вт/м^2 и α $\text{вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ вдоль опытной трубки
 а — опыт № 11, $p = 981$ н/см², $G = 100$ кг/час, $t_{ж} < t_w$; б — опыт № 84, $p = 785$ н/см², $G = 534$ кг/час, $t_{ж} < t_w$

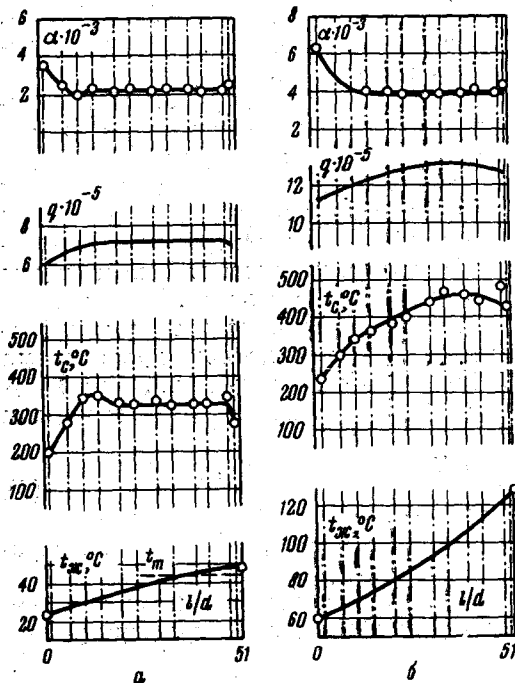


Рис. 2. Распределение t_w , t_c , q вт/м^2 и α $\text{вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ вдоль опытной трубки
 а — опыт № 26, $p = 981$ н/см², $G = 53,5$ кг/час; б — опыт № 25, $p = 981$ н/см², $G = 100$ кг/час, $t_{ж} > t_w$

значение коэффициента сопротивления трения примерно постоянно ($\xi = 0,020$). Теплоотдача к двуокиси углерода при малых температурных напорах ($\Delta t = 3,5 - 8,0^\circ\text{C}$) и значениях $Re_{ж} 1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$ хорошо согласуется с зависимостью (1). Результаты контрольных опытов при существенном изменении физических свойств жидкости по сечению потока, соответствующих по температурным условиям и массовым скоростям области применения расчетных формул [1, 7] ($T_c < 1,1 T_m$ и $Re_{ж} > 10^5$), находятся в удовлетворительном согласовании с этими зависимостями.

Основные опыты были проведены при давлениях 785 и 981 н/см² ($p/p_k = 1,06$ и 1,33), средней калориметрической температуре жидкости $20 - 110^\circ\text{C}$, температурных напорах до 500°C и плотности теплового потока q до $2,6 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$. Расхождение в тепловом балансе для большинства опытов не превышало 10%, однако в отдельных опытах при значении температуры на выходе, близком к t_w , расхождение достигало 30%. Характерные результаты опытов представлены в таблице (для каждого номера опыта первая, вторая и третья строчки относятся соответственно к сечениям опытной трубки с $l/d = 20, 30$ и 40).

Характерные графики изменения t_w , t_c , q и коэффициента теплоотдачи α по длине трубки, полученные при больших температурных напорах, приведены на рис. 1, 2.

На рис. 1а представлены результаты опыта № 11. Видно, что температура стенки растет по длине трубки значительно интенсивнее температуры жидкости, и коэффициент теплоотдачи соответственно резко уменьшается. В интервале значений относительных длин l/d от 10 до 50 α уменьшается примерно в два раза. Необходимо отметить, что численные значе-

№ опыта	$t_{\text{ж}}^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{с}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{ж}}/T_m^*$	$T_{\text{с}}/T_m$	$q \cdot 10^{-5}$ $\text{вт}/\text{м}^2$	α , $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$	G , $\text{кг}/\text{час}$
---------	--------------------------------	--------------------------------	----------------------	--------------------	---	---	---------------------------------

$$p = 981 \text{ н}/\text{см}^2$$

7	27,6	93,1	0,95	1,15	4,34	6630	100
	30,0	97,1	0,96	1,17	4,34	6470	
	32,2	99,9	0,96	1,18	4,34	6460	
8	30,1	160	0,96	1,37	7,25	5600	101
	33,6	173	0,97	1,41	7,31	5240	
	36,6	183	0,98	1,44	7,35	5020	
9	32,0	238	0,96	1,61	8,79	3570	100
	35,8	284	0,97	1,76	9,03	3640	
	39,0	323	0,98	1,88	9,31	3280	
10	32,1	319	0,96	1,86	10,2	3540	101
	36,4	405	0,98	2,14	10,7	2910	
	40,0	513	0,99	2,48	11,4	2420	
11	32,0	298	0,96	1,80	9,87	3710	100
	36,2	381	0,97	2,06	10,5	3040	
	39,7	483	0,98	2,38	11,1	2510	
18	43,6	271	1,00	1,71	8,61	3800	101
	45,6	320	1,01	1,87	8,90	3250	
	48,0	356	1,01	1,98	9,12	2960	
23	58,3	239	1,04	1,61	8,44	4670	101
	63,7	261	1,06	1,63	8,55	4350	
	70,7	277	1,08	1,73	8,66	4190	
25	78,9	389	1,11	2,08	12,3	3970	101
	91,8	426	1,15	2,20	12,6	3880	
	108	448	1,20	2,27	12,8	3760	
26	34,9	344	0,97	1,95	7,22	2330	53,5
	39,5	346	0,99	1,95	7,23	2350	
	42,8	344	1,00	1,95	7,22	2400	
27	33,1	302	0,97	1,81	7,65	2840	57,9
	37,6	354	0,98	1,98	7,90	2510	
	41,0	408	0,98	2,15	8,18	2240	
30	29,6	245	0,96	1,63	14,3	6640	135
	34,1	328	0,97	1,89	15,1	5160	
	38,0	424	0,98	2,20	16,1	4170	
31	27,5	154	0,95	1,35	18,7	14800	307
	30,8	162	0,96	1,37	18,9	14300	
	33,8	170	0,97	1,40	19,0	13900	

$$p = 785 \text{ н}/\text{см}^2$$

44	26,6	167	0,98	1,43	6,99	4980	100
	29,1	188	0,98	1,50	7,08	4460	
	30,9	211	0,99	1,58	7,20	4000	
45	25,3	227	0,97	1,63	7,65	3780	97,6
	28,5	286	0,98	1,82	7,95	3100	
	30,7	373	0,99	2,11	8,45	2470	
46	27,7	253	0,98	1,71	8,59	3820	100
	30,3	332	0,99	1,97	9,05	2990	
	32,0	436	0,99	2,31	9,65	2390	
49	30,2	277	0,99	1,79	8,40	3410	99,6
	31,9	358	0,99	2,05	8,89	2720	
	32,9	483	1,00	2,47	9,55	2120	
50	31,6	257	0,99	1,74	8,05	3580	99,7
	32,7	325	0,99	1,95	8,38	2880	
	33,4	430	1,00	2,29	9,05	2280	
52	33,0	271	1,00	1,77	8,20	3400	99,6
	33,6	337	1,00	1,99	8,56	2830	
	34,1	418	1,00	2,25	9,05	2350	

№ опыта	$t_{ж}^{\circ}\text{C}$	$t_c^{\circ}\text{C}$	$T_{ж}/T_m^*$	T_c/T_m	$q \cdot 10^{-5}$, вт/м ²	α , вт/м ² °C	G , кг/зас
53	34,0	285	1,00	1,82	9,09	3610	99,5
	35,0	331	1,00	1,97	9,35	3160	
	36,8	380	1,01	2,13	9,65	2820	
83	26,4	191	0,98	1,51	21,1	12800	331
	28,9	224	0,98	1,62	21,5	11000	
	30,7	255	0,99	1,72	21,9	9750	
84	26,4	230	0,99	1,64	23,7	11600	354
	28,9	281	0,98	1,80	24,4	9890	
	30,9	334	0,99	1,98	25,2	8350	

* $t_m = 33,4^{\circ}\text{C}$ при $p = 785 \text{ н/см}^2$; $t_m = 44,0^{\circ}\text{C}$ при $p = 981 \text{ н/см}^2$.

ния коэффициентов теплоотдачи в рассматриваемых условиях ($T_{ж} < T_m$ и $T_c \gg T_m$), значительно ниже, чем рассчитанные по формуле (1). Так, при $l/d = 40$, $t_{ж} = 39,7^{\circ}\text{C}$ и $t_c = 483^{\circ}\text{C}$ опытное значение коэффициента теплоотдачи меньше рассчитанного по (1) в 5,6 раза. Качественно такие же результаты получены и в опытах при $p = 785 \text{ н/см}^2$ (рис. 16, опыт № 84).

На рис. 2а показано распределение $t_{ж}$, t_c , q и α вдоль опытной трубки при существенно меньшем расходе, чем в рассмотренных выше опытах. Видно, что температура жидкости изменяется примерно в том же интервале, что и в опытах рис. 1, но температура стенки остается примерно постоянной по длине трубки, за исключением участка при $l/d < 10$, и коэффициент теплоотдачи имеет примерно постоянное значение на всем участке трубки при $l/d > 10$. Эти результаты свидетельствуют о том, что характер изменения коэффициента теплоотдачи по длине трубки в условиях, когда $T_{ж} \leq T_m$ и $T_c \gg T_m$, может быть различным в зависимости от величины тепловой нагрузки и значения расхода жидкости. Независимо от характера распределения $\alpha = f(l/d)$ численные значения коэффициентов теплоотдачи всегда ниже рассчитанных по (1), и интенсивность теплообмена тем меньше, чем больше температурный напор. Однако зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода (а также зависимость чисел $Nu_{ж}$ от чисел $Re_{ж}$) и в этих условиях сохраняется такой же, как и обычно для теплообмена при турбулентном течении однофазной жидкости в трубах (α примерно пропорционально $G^{0,8}$). Интересно, что неоднородность температуры по периметру трубки больше при меньшем расходе.

На рис. 2б приведены графики для условий, когда $T_{ж} > T_m$ и температурный напор равен примерно 400°C (опыт № 25, $t_{вх} = 59,4^{\circ}\text{C}$). Коэффициент теплоотдачи при $l/d > 10$ остается практически постоянным и его численное значение лишь несколько ниже рассчитанного по (1). Такой результат вполне закономерен, поскольку при $T_{ж} > T_m$ по мере повышения температуры жидкости закономерности теплообмена приближаются к закономерностям, характерным для газов.

Сопоставление опытных данных с имеющимися расчетными зависимостями

Для дальнейшего анализа были использованы опытные данные, полученные в тех сечениях опытной трубки, где было заложено по три термопары ($l/d = 20, 30, 40$). Температура стенки трубки в этих сечениях определялась как средняя из показания трех термопар. При проведении анализа предполагается, что на таких расстояниях от входа в обогреваемый участок условия входа не влияют на закономерности теплообмена. Влияние условий входа не анализируется, поскольку этот вопрос должен явиться предметом самостоятельного исследования.

В работе использовался сжатый осушенный углекислый газ, содержащий 99,5% CO_2 . Значения плотности, теплоемкости и энтальпии при температуре ниже 150°C брались по [41], а при более высоких температурах — по [42]. Теплопроводность определялась расчетным путем по формуле, приведенной в [43]. Динамическая вязкость определялась сопоставлением опытных данных различных авторов, при этом в качестве основных были взяты данные работы [14].

На рис. 3 приведена зависимость $Nu_{ж}/Nu_0$ от T_c/T_m . Видно, что для условий $T_{ж} < 1,1 T_m$ и $T_c \gg T_m$ (светлые точки) отклонение опытных значений от (1) тем больше, чем

больше температурный напор. Наибольшее отклонение наблюдается при $T_{ж} \approx T_m$ и высоких значениях T_c . Необходимо подчеркнуть, что в этих условиях влияние на теплоотдачу изменения физических свойств жидкости по сечению потока весьма существенно и в отдельных опытах значение коэффициента теплоотдачи примерно в 14 раз меньше, чем рассчитанное по формуле (1). При $T_{ж} > 1,1 T_m$ (зачерненные точки) физические свойства жидкости изме-

няются с температурой значительно слабее, и влияние относительных значений температуры стенки (T_c/T_m) на интенсивность теплообмена меньше.

Сравнение опытных данных, полученных в настоящей работе, с предложенной нами ранее зависимостью [1] обнаруживает большое расхождение при $T_c/T_m > 1,15$. Это естественно, так как в силу эмпирического характера расчетной зависимости использование ее за пределами определяющих параметров, имевших место в эксперименте, не правомерно. Однако при $T_c/T_m < 1,15$ расхождение не превышает 20%, что соответствует корреляционной ошибке формулы [1].

На рис. 4 приводится сравнение опытных данных с расчетными зависимостями, предложенными в работах [4, 7]. Эти зависимости имеют совершенно различную структуру, и поэтому наглядное сопоставление с ними результатов эксперимента в безразмерном виде не представляется возможным. Приведены опытные данные по теплоотдаче к двуокиси углерода при $p = 981 \text{ н/см}^2$, $G = 100 \text{ кг/час}$ и температуре жидкости 30 и 40°C , а также расчетные для этих условий значения коэффициентов теплоотдачи по формулам [4, 7] в зависимости от относительного значения температуры стенки T_c/T_m . Как видно, расчет по [7] дает сильно завышенный результат при $T_c/T_m > 1,5$, кривые 1 и 2. Расчет по формуле [4] удовлетворительнее согласуется с экспериментом. Однако при более внимательном анализе (рис. 5) обнаруживается некоторая система в отклонении расчетных значений от экспериментальных. Во-первых, расчетные значения при $T_c/T_m < 2$ располагаются ниже, а при $T_c/T_m > 2$ — выше экспериментальных. При этом расхождение доходит до 35%, что при $T_c/T_m = 2,5$ может привести к ошибке в определении температуры стенки более 200°C . Во-вторых, при $T_c/T_m > 2$ наблюдается расхождение по давлению. Такой результат не может быть неожиданным, поскольку формула [4] получена по результатам теоретического расчета, проведенного для давления 981 н/см² и максимального значения $T_c/T_m = 1,18$. Вместе с тем эти результаты показывают, что основные допущения, принятые при теоретическом расчете, по-видимому, правомерны, а наблюдаемые расхождения возникают, возможно, из-за различного характера изменения физических свойств жидкости по сечению потока при более высоких темпера-

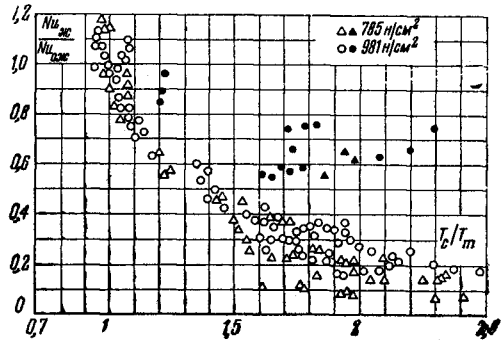


Рис. 3. Сравнение опытных значений чисел $Nu_{ж}$ с рассчитанными по формуле (1)

турных напорах по сравнению с рассмотренными в работе [4]. Отмеченные отклонения значительно превышают погрешность эксперимента, поэтому расчетную формулу [4] нельзя рекомендовать для практического исполь-

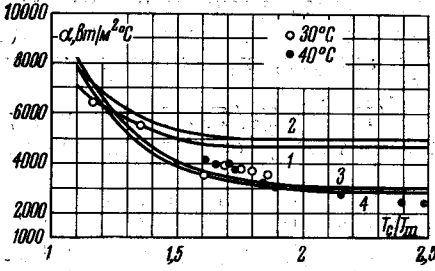


Рис. 4

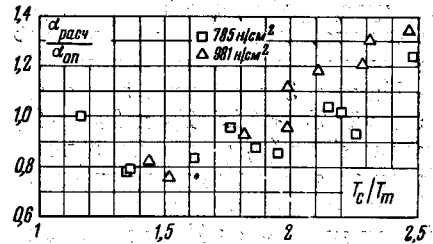


Рис. 5

Рис. 4. Сравнение опытных данных по теплоотдаче при $p = 981 \text{ н/см}^2$, $t_{ж} = 30$ и 40°C с результатами расчета по формулам [4, 7] (1, 3 — $t_{ж} = 30^\circ \text{C}$, 2, 4 — $t_{ж} = 40^\circ \text{C}$)
 Рис. 5. Отклонение значений коэффициентов теплоотдачи, рассчитанных по формуле [4], от опытных

зования при больших температурных напорах. В связи с этим нами была предпринята попытка получить эмпирическую зависимость, обобщающую результаты проведенного эксперимента с меньшими отклонениями.

Обобщение результатов эксперимента

Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче проводилось по методу [1]. Предполагается, что зависимость чисел $Nu_{ж}$ от чисел $Re_{ж}$ и $Pg_{ж}$ в сверхкритической области сохраняется такой же, как и в областях состояния, далеких от критической, а влияние переменных физических свойств можно учесть введением поправок, учитывающих изменение этих свойств по сечению потока.

Анализ показал, что опытные данные удовлетворительно обобщаются, если в формулу (1) ввести две поправки в виде отношений плотностей $(\rho_c / \rho_{ж})^{0,3}$ и теплоемкостей $(\bar{c}_p / c_{pж})^n$, где $\bar{c}_p = (i_c - i_{ж}) / (t_c - t_{ж})$ — средняя интегральная теплоемкость в интервале температур от $t_{ж}$ до t_c . Значение показателя степени n у отношения теплоемкостей оказалось переменным и зависящим как от значения температуры стенки, так и от значения температуры жидкости. В результате была получена следующая расчетная зависимость:

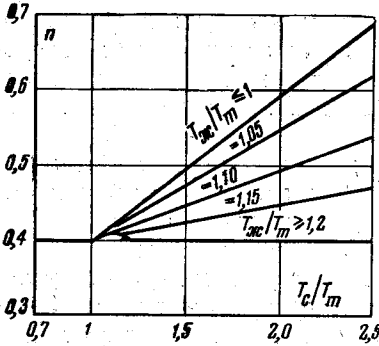


Рис. 6. Зависимость показателя степени n в формуле (3) от приведенных температур стенки и жидкости

$$Nu_{ж} = Nu_0 \left(\frac{\rho_c}{\rho_{ж}} \right)^{0,3} \left(\frac{\bar{c}_p}{c_{pж}} \right)^n \quad (3)$$

Если $T_{ж} < T_m$, то величина n зависит только от значения температуры стенки и возрастает от 0,4 при $T_c / T_m \leq 1$ до $n \approx 0,7$ при $T_c / T_m = 2,5$. Если же $T_{ж} / T_m > 1$, то с увеличением температуры жидкости от $T_{ж} = T_m$ до $T_{ж} = 1,2 T_m$ на величину n наряду с влиянием температуры стенки начинает оказывать влияние и значение температуры жидкости. При $T_{ж} / T_m > 1,2$ значение показателя степени n становится постоянным и равным 0,4 (рис. 6).

Формула (3) обобщает результаты проведенного нами экспериментального исследования теплоотдачи к двуокиси углерода, характеризуемого следующим диапазоном измерения определяющих величин: $p = 785$

($p/p_k = 1,06$) и 981 н/см^2 ($p/p_k = 1,33$); $0,9 < T_{ж}/T_m < 1,2$; $0,9 < T_c/T_m < 2,5$; $8 \cdot 10^4 < Re_{ж} < 5 \cdot 10^5$; $0,85 < Pr_{ж} < 65$; $0,09 < \rho_c/\rho_{ж} < 1,0$; $0,02 < \bar{c}_p/c_{pж} < 4,0$; $4,6 \cdot 10^4 \text{ вт/м}^2 < q < 2,6 \cdot 10^6 \text{ вт/м}^2$; $l/d \geq 15$.

В области значений температур $T_c \leq 1,1 T_m$ или $T_{ж} \geq 1,2 T_m$ наши опытные данные, а также данные, полученные в работах [1, 2, 6, 7], удовлетворительно описываются как зависимостью (3), так и формулами работ [1, 4, 7].

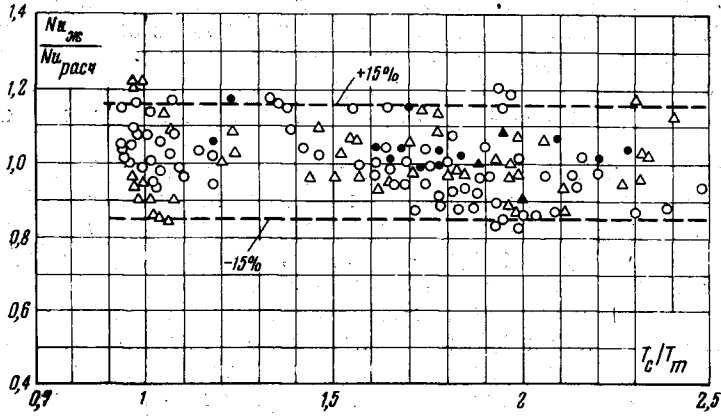


Рис. 7. Сопоставление опытных данных с расчетной зависимостью (3)

На рис. 7 сопоставлены все наши опытные данные с зависимостью (3). Видно, что опытные данные описываются этой зависимостью с максимальным отклонением $\pm 20\%$, а большая часть опытных данных (95%) — с отклонением $\pm 15\%$. Таким образом, при расчете по формуле (3), когда заданы T_c , $T_{ж}$ и $Re_{ж}$, максимально возможная ошибка $\epsilon = \delta q/q = \delta \alpha/\alpha = \pm (0,15-0,20)$. Однако при проведении расчетов, когда заданными являются температура жидкости, число $Re_{ж}$ и плотность теплового потока, а искомой величиной является температура стенки, ошибка при расчете температурного напора ($\Delta t = t_c - t_{ж}$) будет больше, чем при расчете α или q . Это обстоятельство не является специфической особенностью формулы (3), а связано с тем, что при $T_{ж} \leq T_m$ и $T_c \gg T_m$ коэффициент теплоотдачи связан с температурным напором соотношением $\alpha \sim \Delta t^{-n}$ (где $n < 1$), и температура стенки зависит от плотности теплового потока в степени больше единицы, т.е. $\Delta t \sim q^{1/(1-n)}$. Поэтому $\delta(\Delta t)/\Delta t = \epsilon/(1-n)$.

Для практических расчетов, когда задана плотность теплового потока и необходимо определить температуру стенки, удобно иметь зависимость T_c от q и $T_{ж}$ в явном виде. С этой целью по формуле (3) были рассчитаны и построены графики зависимости $qd^{0.2}/(\rho w)^{0.8} = f(t_c, t_{ж})$. Расчетные кривые были затем скорректированы с учетом опытных данных (рис. 8).

Кривые на графике обнаруживают качественно те же закономерности, что и в работе [5]. Однако в этой работе был исследован диапазон изме-

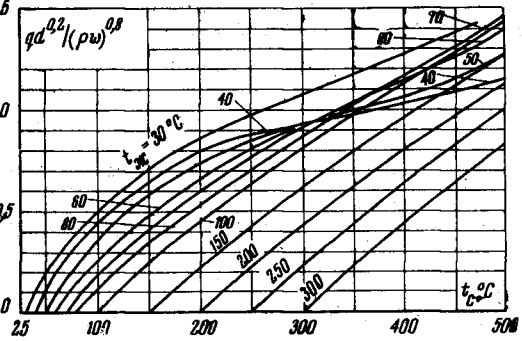


Рис. 8. Зависимость $qd^{0.2}/(\rho w)^{0.8} (\text{вт/м}^2) (\text{м})^{0.2}/(\text{кг/м}^3 \cdot \text{час})^{0.8}$ от температуры стенки и жидкости для двуокиси углерода при $p = 981 \text{ н/см}^2$

нения температуры стенки при $T_{ж} \approx T_m$ только до значения $T_c / T_m = 1,4$. Результаты, представленные на рис. 8, охватывают область значений T_c / T_m до 2,5. Это позволило выявить ряд интересных особенностей теплообмена в условиях больших температурных напоров при сильном изменении физических свойств жидкости по сечению потока.

Наклон кривых $t_{ж} = \text{const}$ при $t_c \rightarrow t_{ж}$ характеризует теплоотдачу в условиях постоянства физических свойств жидкости. Изменение наклона кривых с ростом t_c обусловлено влиянием переменных свойств жидкости. Физические свойства жидкости изменяются наиболее сильно при температурах, близких к t_m (при $p = 981 \text{ н/см}^2$ в области температур от 20 до 60° С), а при более высоких температурах их изменение значительно слабее. Поэтому кривые $t_{ж} = \text{const}$ при относительно высоких температурах пересекаются.

Рассматриваемый график позволяет проследить своеобразный характер изменения температуры стенки по длине трубы при заданной плотности теплового потока. При относительно малых значениях q и относительно больших значениях ρw (для $p = 981 \text{ н/см}^2$, например, при $q d^{0,2} / (\rho w)^{0,8} \leq \leq 0,9$) температура стенки монотонно возрастает с ростом $t_{ж}$, т. е. вдоль трубки. При относительно больших значениях q и относительно малых значениях ρw изменение t_c становится немонотонным. Температура стенки возрастает вдоль трубки и при $t_{ж} \approx t_m$ достигает максимального значения, затем снижается и при более высоких значениях $t_{ж}$ снова монотонно возрастает. Таким образом, в этих условиях возникает местное ухудшение теплоотдачи при $t_{ж} \approx t_m$. Если при рассматриваемом давлении $q d^{0,2} / (\rho w)^{0,8} \approx 0,93$, то при изменении $t_{ж}$ от 40 до 70° С температура стенки практически не изменяется (область пересечения кривых $t_{ж} = \text{const}$), что и имело место в опыте № 26 (рис. 2а). Таким образом, расчеты по формуле (3) и соответственно график на рис. 8 показывают, что явления местного ухудшения теплоотдачи могут иметь место не только при малых расходах ($Re_{ж} < 8 \cdot 10^4$), как это наблюдалось в [8] и в некоторых наших опытах, но и при больших расходах. Возникновение этих явлений, как показано выше, зависит от соотношения между плотностью теплового потока и массовой скоростью. Однако опытные данные с ухудшенной теплоотдачей, полученные при значениях $Re_{ж} < 8 \cdot 10^4$, не описываются зависимостью (3). Для выяснения закономерностей теплообмена в этих условиях необходимо провести дополнительные исследования.

Московский энергетический
институт

Поступила в редакцию
15 VI 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. С. Петухов, Е. А. Краснощеков, В. С. Протопопов. Proceedings of the 1961 International Heat Transfer Conference, p. 3, Paper 67.
2. А. А. Арманд, Н. В. Тарасова, А. С. Коньков. Сб. «Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях» (под ред. А. А. Арманда). Госэнергоиздат, 1959.
3. Б. С. Петухов, В. В. Кириллов. Теплоэнергетика, № 4, 1958.
4. В. Н. Пюпов. Диссертация. МЭИ, 1964.
5. K. Goldman. Proceedings of the 1961 International Heat Transfer Conference, p. 3, paper 66.
6. R. P. Bringer, I. M. Smith. AIChE J., 3, № 1, 1957.
7. З. Л. Миропольский, М. Е. Шицман. Ж. техн. физики, 27, вып. 10, 1957.
8. М. Е. Шицман. Теплофизика высоких температур, 1, № 2, 1963.
9. Хайнес, Вольф. Ракетная техника, № 3, 1962.
10. В. С. Протопопов. Теплоэнергетика, № 1, 1963.
11. A. Michels. Appl. Sci. Res., A1, № 2, 1948.
12. Теплофизические свойства веществ (под ред. Н. Б. Варгафтика). Госэнергоиздат, 1956.
13. Н. В. Цедерберг, Н. А. Морозова. Теплоэнергетика, № 1, 1960.
14. И. Ф. Голубев. Вязкость газов и газовых смесей. Физматгиз, 1959.