

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. Е. Шицман, Ухудшенные режимы теплоотдачи при закритических давлениях, *ТВТ*, 1963, том 1, выпуск 2, 267–275

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: 44.200.94.150

13 октября 2024 г., 17:46:09



УХУДШЕННЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ЗАКРИТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЯХ

М. Е. Шицман

Приводятся результаты экспериментального исследования режимов с резко ухудшенной теплоотдачей при вынужденном движении воды при закритических давлениях.

В настоящее время нет единой точки зрения относительно структуры среды и механизма фазовых переходов в области критического состояния. Согласно классической теории фазовых переходов и критического состояния вплоть до критической точки существуют две полностью гомогенные фазы — жидкая и паровая, отделенные друг от друга поверхностью раздела; в критической точке различия между этими фазами исчезают, а при закритических параметрах существует лишь перегретый пар или газ [1].

При таких допущениях исследуются геометрические свойства поверхности $p = f(v, T)$, изображающей уравнение состояния однокомпонентной жидкости, например в [2]. Между тем, принятые допущения не подтверждаются вблизи точек перехода и в области критического состояния, о чем свидетельствуют оптические и рентгенографические исследования микроструктуры среды [3]. В связи с этим в многочисленных работах, в частности [3—5], теория фазовых переходов и критического состояния дополняется положением о том, что диаграмма состояния вещества и при закритических параметрах состоит из двух областей, отвечающих жидкой и газообразной фазам. Спорным в указанных работах является вопрос относительно кривой, разделяющей эти области, и характеристики фазового перехода. В ряде работ (см. обзор [4]) в качестве такой кривой принимается линия максимумов теплоемкостей C_p на изобарах. Экспериментальное определение границы перехода представляет значительные трудности, так как в рассматриваемых условиях не наблюдается четкого раздела фаз. Здесь фазовый переход от пара к жидкости согласно представлениям, изложенным в [3], происходит в мелкодисперсной форме путем образования ассоциированных комплексов молекул, в отличие от докритических давлений, когда новое агрегатное состояние выделяется скачкообразно в форме макроскопической фазы.

В [5] показано, что и при докритических давлениях новая фаза в некотором количестве может выделяться в мелкодисперсной форме; причем по мере повышения давления доля полученной таким образом фазы в общем количестве возрастает, так что при критическом и закритическом давлении остается лишь постепенный фазовый переход в мелкодисперсной форме. Эти процессы проявляются в повышении теплоемкости воды и пара вблизи температуры насыщения и в снижении теплоты парообразования. В [6] постепенный переход отождествляется с фазовым переходом второго рода, а скачкообразный — с фазовым переходом первого рода. Различие между этими переходами усматривается в том, что переход второго рода протекает непрерывно в некотором интервале температур. Когда этот интервал тем-

ператур становится равным нулю, достигается предельный случай, при котором различия между переходами исчезают. В [7] среда за критической точкой рассматривается как двухфазная, при этом делается допущение, что в некотором интервале параметров между фазами образуется междуфазовое состояние, при котором изменение свойств происходит быстро, но непрерывно.

В связи с изложенным рассмотрение процесса теплоотдачи, в частности при вынужденном движении, может базироваться либо на классической теории, либо на представлениях о наличии в закритической области двух фаз. В последнем случае при соответствующих параметрах и разностях температур стенки ($t_{ст}$) и потока (t_n) надо ожидать появления эффектов, свойственных двухфазным системам: при нагревании среды — эффектов, характерных для процесса теплоотдачи при пузырьковом и пленочном кипении, а при ее охлаждении — эффектов, характерных для теплоотдачи, при конденсации пара. Такие эффекты имели место в работах [8—18]. Было установлено, что обычные критериальные уравнения не пригодны для расчета теплоотдачи в рассматриваемых условиях. Однако почти во всех работах авторы объясняли это лишь тем, что по сечению потока сильно изменялись теплофизические свойства среды, т. е. последняя рассматривалась как однофазная среда с переменными свойствами.

Далее, в ряде опытов, полученных при нагревании среды [8], когда $t_n < t_m$, а $t_{ст} > t_m$ (t_m — температура, при которой теплоемкость на изобаре становится максимальной), теплоотдача заметно ухудшалась и измеренные в опытах значения α , отвечающие этим условиям, были ниже других опытных данных при тех же числах Re и Pr примерно на 20%. Заметное ухудшение теплоотдачи при нагревании воды, кислорода и водорода отмечено в [16—18]. В работе [19] при исследовании переходных процессов на экспериментальном прямоточном котле 60-ОП ($p = 300 \text{ атм}$, $t_{пе} = 600^\circ \text{С}$) наибольшее ухудшение теплоотдачи наблюдалось в зоне фазового перехода. В [20] теплоотдача при сверхкритических параметрах и высоких тепловых нагрузках рассматривается как аналог поверхностного кипения. При охлаждении среды, когда $t_{ст} \leq t_m$, а $t_n \geq t_m$, наблюдалась обратная картина — теплоотдача заметно увеличивалась по сравнению с другими опытными данными [21].

Для получения данных по температурному режиму и определения эффектов, характеризующих двухфазность при закритических параметрах, нами были проведены на прямоточном стенде [8] специальные исследования теплоотдачи при нагревании воды при $p = 230, 240$ и 250 атм , весовой скорости $w_g = 300, 430, 700$ и $1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ и тепловых потоках до $10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$. В качестве экспериментального участка использовалась трубка из нержавеющей стали 1Х18Н9Т диаметром 10/1 мм, длиной 1500 мм, обогреваемая электрическим током. По длине трубки было приварено 11 термомпар.

Погрешности в определении основных величин при проведении опытов оцениваются следующими значениями: $t_n, t_{ст} \pm 2 \text{ град}$, $q \pm 5\%$, $i \pm 2\%$, $w_g \pm 3\%$.

На рис. 1 показано распределение температур стенки по длине трубы при $p = 230 \text{ атм}$, $w_g = 430 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $i_{вх} = 350 \text{ ккал/кг}$ и различных средних значениях удельного теплового потока. Кривые на рис. 1 свидетельствуют о практически скачкообразном ухудшении температурного режима. При $q = 190$ и $242 \text{ тыс. ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ по длине трубы наблюдается плавное повышение температуры стенки, хорошо согласующейся с расчетными значениями, полученными по формуле (см. [8]):

$$Nu_n = 0,023 Re_n^{0,8} Pr_n^{0,8}; \quad (1)$$

затем при незначительном повышении нагрузки от 242 до 258 тыс. $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ в седьмом сечении появляется резкий скачок температуры стенки (\sim на 100 град). Во время опыта в этом сечении на трубе наблюдался тускло све-

тящийся красный венчик шириной около 10 мм. При повышении нагрузки до 290 тыс. ккал/м²·час произошло смещение светящегося венчика в шестое сечение. Яркость его увеличилась, температура стенки в этом месте достигла 555°С. При $q = 332$ тыс. ккал/м²·час пиковое значение температуры стенки сместилось в пятое сечение и достигло почти 600°С. При этом заметно повысились температуры в соседних сечениях трубы. Расчеты показывают, что коэффициенты теплоотдачи в указанных сечениях 5, 6 и 7 соответственно составляют 1430, 1500 и 1800 ккал/м²·час·град, а локальные значения теплосодержания среды 420, 426 и 432 ккал/кг.

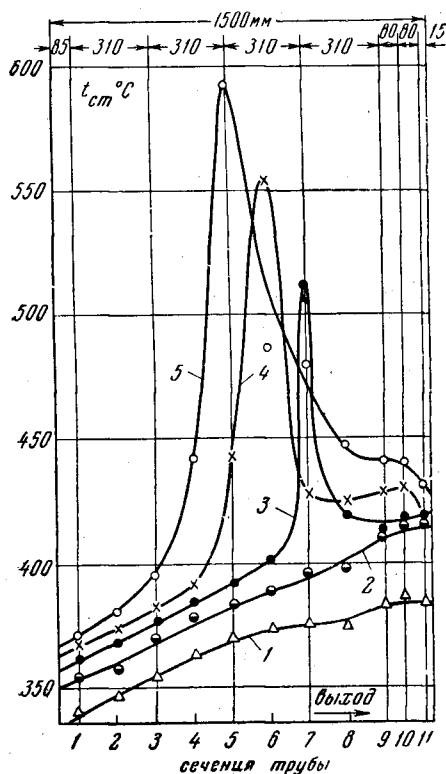


Рис. 1

Рис. 1. Распределение температур стенки по длине трубы:

$p = 230$ ата, $\omega_g = 430$ кг/м²·сек, $i_{вх} = 350$ ккал/кг. 1 — $q = 190 \cdot 10^3$; 2 — $q = 242 \cdot 10^3$; 3 — $q = 258 \cdot 10^3$; 4 — $q = 290 \cdot 10^3$; 5 — $q = 332 \cdot 10^3$ ккал/м²·час

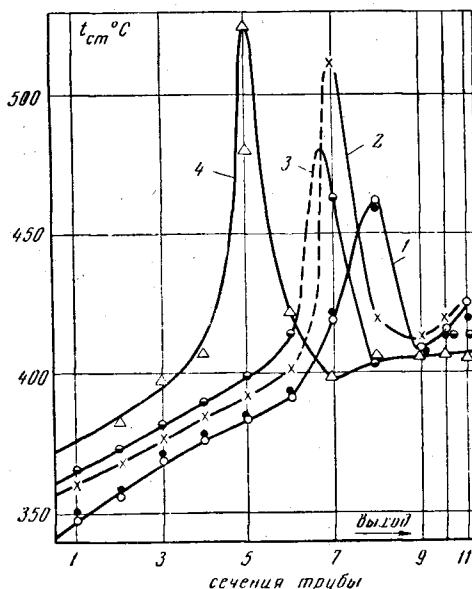


Рис. 2

Рис. 2. Распределение температур стенки по длине трубы

$p = 230$ ата, $q \sim 250 \cdot 10^3$ ккал/м²·час, $\omega_g = 430$ кг/м²·сек. 1 — $i_{вх} \sim 330-335$; 2 — $i_{вх} \sim 350$; 3 — $i_{вх} = 360$; 4 — $i_{вх} = 376$ ккал/кг

Для выяснения вопроса о влиянии начального теплосодержания на характер распределения температур стенки были проведены опыты при различных теплосодержаниях среды на входе $i_{вх}$ и постоянных значениях $\omega_g = 430$ кг/м²·сек, $q \sim 250$ тыс. ккал/м²·час и $p = 230$ ата. Было установлено, что по мере снижения $i_{вх}$ характер температурного режима обогреваемой стенки трубы существенно меняется. При $i_{вх} > 470$ ккал/кг изменение температуры стенки происходит практически монотонно. При $i_{вх} = 430-390$ ккал/кг монотонность нарушается, кривые распределения температур приобретают S-образную форму. При теплосодержаниях среды $i_{вх} \leq 365$ ккал/кг наблюдаются резкие всплески температуры в двух или в одном сечении, причем они оказываются тем ближе к выходу трубы, чем ниже теплосодержание среды на входе. Локальные значения теплосодержания, отвечающие пику температуры, колеблются в пределах 407—434 ккал/кг.

Однако в начальных сечениях обогреваемой трубы при этих значениях теплосодержания ухудшения теплоотдачи не возникало (рис. 2).

Локальные значения теплосодержаний i_{II} в сечениях, в которых производилось измерение температуры стенки, рассчитывались по теплосодер-

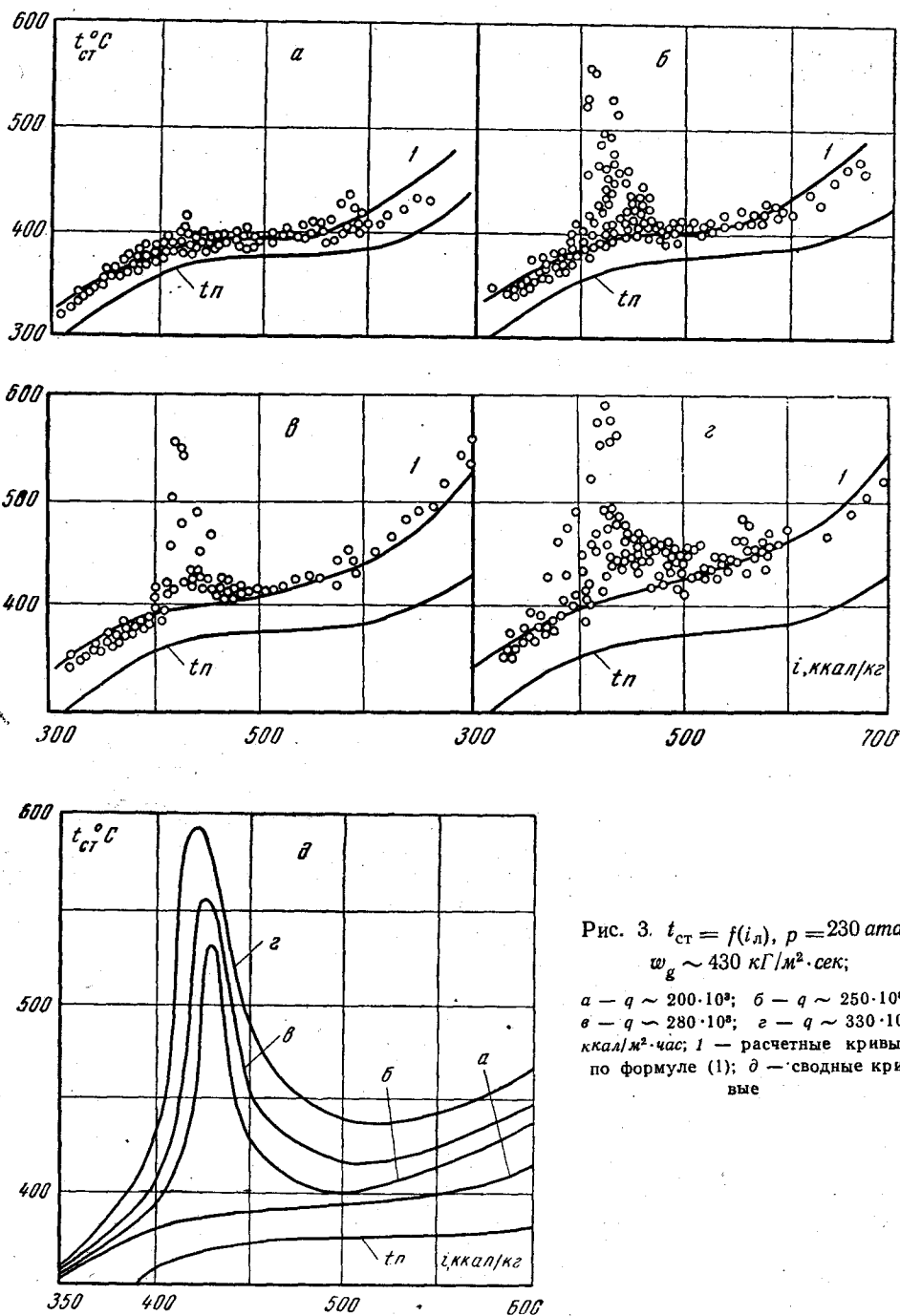


Рис. 3. $t_{ст} = f(i_{II})$, $p = 230$ $атм$,
 $\omega_g \sim 430$ $кг/м^2 \cdot сек$;
 а - $q \sim 200 \cdot 10^3$; б - $q \sim 250 \cdot 10^3$;
 в - $q \sim 280 \cdot 10^3$; г - $q \sim 330 \cdot 10^3$
 $kcal/m^2 \cdot час$; 1 - расчетные кривые
 по формуле (1); δ - сводные кривые

жениям на входе и приращению теплосодержания по длине трубы при заданных ω_g и q . Всего было проведено 373 опыта и получено около 4000 опытных точек, характеризующих температурный режим при различных p , ω_g и q . Некоторые характерные режимы приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Характерные экспериментальные данные ($\alpha - q_{\text{лок}} \cdot 10^{-6}$, ккал/м²·час; $\beta - t_{\text{ст пок}}$, °С;
 $\gamma - i_{\text{лок}}$, ккал/кг)

№ опыта	$t_{\text{вых}}$, °С (188)	№ сечений и значения $l_{\text{об/d}}$ (в скобках)											$t_{\text{вх}}$, °С (0)	р, ата	$w_{\text{гкг/м}^2\text{сек}}$
		11 (186)	10 (176)	9 (166)	8 (147)	7 (127)	6 (108)	5 (90)	4 (69)	3 (50)	2 (30)	1 (10)			
17 а	—	0,333	0,332	0,330	0,329	0,329	0,330	0,330	0,330	0,331	0,333	0,335			
17 б	377,1 576,0	488,2 574,0	483,8 554,0	468,8 534,0	459,1 514,3	460,1 494,4	463,8 474,7	462,4 454,6	469,7 434,8	478,9 415,0	490,6 395,0	510,7 375,1	333,7 363,0	230	323
32 а	—	0,288	0,290	0,289	0,288	0,287	0,284	0,304	0,288	0,284	0,283	0,282			
32 б	379,2 574,0	422,4 511,4	431,8 504,1	427,6 496,8	421,7 482,6	411,3 468,6	433,5 454,4	561,3 430,2	424,9 416,0	393,1 401,8	383,9 387,6	381,7 373,4	340,3 372,1	230	436
52 а	—	0,242	0,243	0,243	0,241	0,241	0,239	0,239	0,238	0,237	0,235	0,230			
52 б	371,9 448,0	414,0 447,4	415,2 441,3	411,6 435,2	397,4 423,4	395,5 411,6	388,2 399,8	383,2 388,0	377,3 376,2	370,2 364,4	357,2 352,6	355,0 340,8	312,9 334,3	230	430
53 а	—	0,292	0,292	0,292	0,291	0,291	0,303	0,286	0,283	0,282	0,280	0,278			
53 б	376,6 473,0	451,8 470,2	451,8 462,8	456,5 455,4	437,6 441,4	438,5 428,0	549,0 413,7	409,2 399,4	390,3 385,1	380,8 370,8	369,0 356,5	357,0 342,2	312,9 334,3	230	430
54 а	—	0,248	0,248	0,248	0,249	0,258	0,246	0,244	0,244	0,243	0,243	0,240			
54 б	374,5 474,0	419,9 472,6	418,8 466,0	412,8 459,4	418,8 446,7	512,2 434,0	401,3 421,3	391,5 408,6	384,4 395,9	377,3 383,2	367,9 370,5	361,0 357,8	325,1 350,8	230	430
55 а	—	0,276	0,277	0,278	0,277	0,277	0,290	0,274	0,271	0,271	0,268	0,267			
55 б	376,8 483,0	415,2 481,7	429,9 474,6	429,9 467,5	425,2 453,8	426,6 440,1	553,7 426,4	443,3 412,7	390,8 399,2	382,6 385,5	374,3 371,8	366,3 358,1	324,9 350,6	230	430
77 а	—	0,314	0,315	0,316	0,317	0,321	0,321	0,332	0,315	0,308	0,303	0,300			
77 б	376,8 500,0	431,0 499,0	440,1 491,0	440,9 483,0	447,6 467,4	482,2 451,8	487,4 436,2	593,2 420,6	441,8 404,6	395,8 389,0	380,4 373,4	370,0 357,8	324,0 349,3	230	430
170 а	—	0,950	0,950	0,942	0,938	0,939	0,932	0,927	0,926	0,926	0,916	0,902			
170 б	365,0 422,4	412,2 421,0	412,7 408,9	399,2 396,4	386,2 384,4	388,1 372,1	377,9 359,9	371,5 347,8	366,8 335,5	366,6 323,4	345,3 311,0	326,3 298,9	277,2 291,4	230	1500
228 а	—	0,279	0,279	0,280	0,279	0,279	0,290	0,274	0,272	0,271	0,270	0,268			
228 б	378,0 478,0	435,4 475,0	437,8 467,8	444,4 461,8	435,9 448,2	433,3 434,6	549,1 421,0	407,1 407,4	391,7 393,8	383,0 380,2	373,5 366,6	363,6 353,0	322,6 346,0	240	430
242 а	—	0,370	0,370	0,370	0,370	0,371	0,372	0,370	0,372	0,378	0,361	0,355			
242 б	379,2 524,0	455,5 522,0	456,7 505,5	453,9 488,8	455,8 472,4	462,9 455,6	475,4 439,3	459,3 422,5	466,4 405,9	535,0 369,4	414,5 372,7	390,4 347,0	322,1 346,0	240	434
320 а	—	0,331	0,332	0,333	0,341	0,332	0,333	0,344	0,322	0,322	0,321				
320 б	381,4 476,5	435,6 475,0	442,5 460,7	459,8 446,5	499,5 432,5	441,8 418,1	459,3 404,0	551,9 389,9	394,7 375,7	389,5 361,6	372,0 347,3	305,8 324,5	250	449	

Локальные значения $q_{\text{л}}$, $t_{\text{ст.л}}$ и $i_{\text{л}}$ в сечениях трубы с наибольшим ухудшением теплоотдачи. $p=230 \text{ ата}$, $w_g = 430 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$

№ опыта	69	76	83	37	38	78	35	32	71	79	73	77	74
$l_{\text{об}}/d$	50			69			90						
$q_{\text{л}} \cdot 10^{-3}$, ккал/м ² ·час	331	354	430	270	302	333	266	304	320	326	327	332	341
$t_{\text{ст.л}}$, °C	551	492	555	556	609	531	525	561	527	550	570	593	571
$i_{\text{л}}$, ккал/кг	422	442	411	407	424	405	428	430	409	419	410	421	420

№ опыта	46	64	60	59	55	53	70	57	48	58	54	50	44	47	49	43	45	
$l_{\text{об}}/d$	108						127						147					
$q_{\text{л}} \cdot 10^{-3}$, ккал/м ² ·час	242	267	279	280	290	303	314	221	251	253	258	263	277	277	250	256	275	
$t_{\text{ст.л}}$, °C	459	525	550	547	554	549	472	456	462	462	512	485	501	485	460	462	458	
$i_{\text{л}}$, ккал/кг	430	410	430	431	426	414	429	425	416	440	434	419	414	426	427	424	412	

На рис. 3 в координатах $t_{\text{ст}} = f(i_{\text{лок}})$ приводятся опытные точки, относящиеся к $P = 230 \text{ ата}$, $w_g = 430 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ и $q \sim 200, 250, 280$ и $330 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$. Сплошными линиями нанесены расчетные значения

$t_{\text{ст}}$ по формуле (1), описывающей нормальные температурные режимы. При $q \sim 200$ тыс. ккал/м²·час опытные точки хорошо совмещаются с расчетной кривой.

При более высоких нагрузках с расчетной кривой совмещаются лишь данные, полученные на начальных и конечных участках трубы ($30 > l/d > 150$) либо на всей трубе при $i_{\text{вх}} > 470$ ккал/кг. В диапазоне теплосодержаний 400—470 ккал/кг наблюдается поле точек, фиксирующих различный характер изменения температурного режима от нормального до резко ухудшенного. Иными словами, в рассматриваемой области теплосодержаний при $q > q_{\text{ухудш.}}$ температурный режим не однозначен относительно $i_{\text{л}}$ (табл. 2). Если принять во внимание лишь опыты с измеренными предельными значениями температур в сечениях

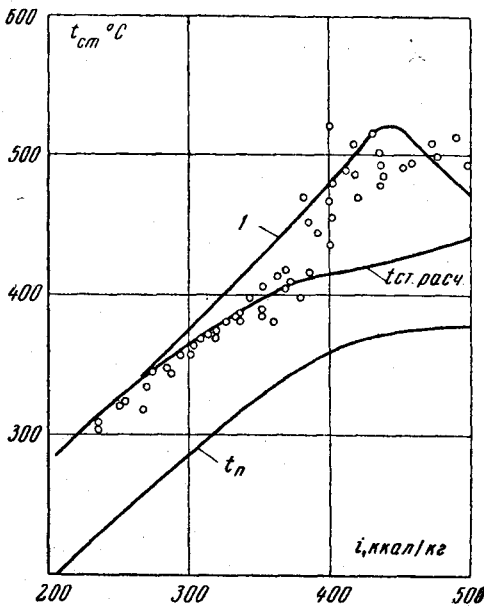


Рис. 4. $t_{\text{ст}} = f(i_{\text{л}})$, $p=250 \text{ ата}$, $w_g = 700 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $q \sim 750 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$. 1 — кривая по опытным данным [16]

средней части трубы ($50 < l/d < 127$) и исключить ряд опытов, в которых предельные значения не попадали в зону чувствительности термопар, то характер изменения $t_{\text{ст}}$ в зависимости от $i_{\text{л}}$ при $p = 230 \text{ ата}$

$\omega_g = 430 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ и различных тепловых нагрузках можно представить кривыми, изображенными на рис. 3, д.

Аналогичные кривые были построены и для других режимов ($\omega_g = 300, 430, 700$ и $1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $p = 230, 240$ и 250 атм и различных q). Сопоставление опытных и расчетных значений $t_{ст} = f(i_{л})$ для $q = 700 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $p = 250 \text{ атм}$ приводится на рис. 4. Здесь заметное отклонение опытных точек от расчетной кривой наблюдается при $q \sim (700-790) \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$.

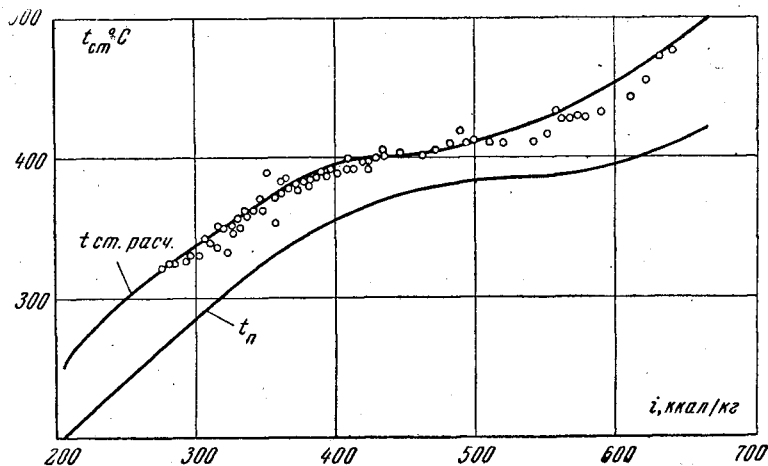


Рис. 5. $t_{ст} = f(i_{л})$, $p = 250 \text{ атм}$, $\omega_g = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $q \sim 760 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$

Зона ухудшенных температурных режимов располагается в пределах изменения $i_{л}$ от 380 до 550 ккал/кг. При $i_{л} \sim 430 \text{ ккал/кг}$ температура стенки становится выше расчетной (по формуле (1)) приблизительно на 100 град, при этом коэффициент теплоотдачи снижается в три раза. Примерно такие же величины получаются при сопоставлении с опытными данными из [16].

При $\omega_g = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $p = 250 \text{ атм}$ и $q \sim 760 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ ухудшения теплоотдачи не наблюдалось. Опытные данные хорошо согласуются с расчетной кривой (рис. 5). При $q \sim 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ в отдельных опытах при $i_{лок} = 400-420 \text{ ккал/кг}$ температура стенки становилась выше расчетной на 20-30 градусов.

Из рассмотрения всех полученных данных по температурным режимам в сверхкритической области параметров состояния можно отметить следующие особенности:

1. Ухудшение температурного режима при $\omega_g = 300-700 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ имеет место в области теплосодержаний 400-500 ккал/кг.
2. При $\omega_g = 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ и q до $950 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ во всем исследованном диапазоне теплосодержаний ухудшения температурного режима не наблюдалось.
3. Результаты опытов, отвечающие нормальным температурным режимам, хорошо согласуются с расчетными значениями, полученными по формуле (1).
4. При ухудшении температурного режима наиболее резкие скачки температуры наблюдаются при весовой скорости $430 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{сек}$. При $\omega_g = 300 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$ пиковые значения температур при равных величинах других параметров оказываются меньшими, влияние же начального участка не столь заметно, и ухудшенные режимы возникали даже в I сечении у входа трубы.
5. С ростом давления значения пиков температур снижаются.

При рассмотрении вопроса о механизме ухудшения теплоотдачи в области параметров закритического состояния обращает на себя внимание

то обстоятельство, что начало этого ухудшения имеет место при теплосодержаниях среды порядка 400—430 ккал/кг, отвечающих жидкой фазе.

При наличии обогрева трубы по сечению потока среды возникает поле температур и соответствующее заданному закритическому давлению распределение теплофизических свойств. При увеличении теплового потока (температурного напора) среда у стенки трубы постепенно переходит из жидкой в паровую фазу. Так, при $p = 230 \text{ атм}$, $w_g = 430 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $q \sim 250 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ к началу ухудшения теплоотдачи ($i_{\text{лок}} = 400 \text{ ккал/кг}$) температура среды, соприкасающейся со стенкой, достигает 390 градусов (рис. 3). При этой температуре плотность и теплопроводность среды становятся примерно в четыре раза, а вязкость в 2,5 раза меньше, чем в ядре потока. При этих условиях еще обеспечивается интенсивность теплоотдачи порядка $7000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}$, свидетельствующая о наличии развитого турбулентного перемешивания по сечению потока ($Re \sim 50 \cdot 10^3$). При повышении теплосодержания потока на 10—20 ккал/кг температура стенки резко возрастает.

Кризисный характер ухудшения теплоотдачи приводит к аналогии с процессом возникновения пленочного кипения при докритических давлениях. Согласно гидродинамической теории кризисов последний определяется характером движения пара и жидкости в двухфазном пограничном слое; при некоторых условиях происходит вытеснение жидкой фазы из пограничного слоя и ее отделение от поверхности нагрева сплошным слоем пара [22]. При закритических параметрах такое вытеснение жидкой фазы из пограничного слоя может представляться как резко выраженное отделение тяжелой фазы от более легкой, остающейся в пограничном слое.

В некоторых опытах при достижении определенных значений тепловых нагрузок возбуждались сильные пульсации давления и температуры среды на входе в экспериментальную трубу и соответствующие пульсации температуры на ее стенке. Так, при $w_g \sim 1500 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $p = 250 \text{ атм}$, $i_{\text{вх}} \sim 320 \text{ ккал/кг}$, $q \sim 0,750 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ и $i_{\text{вых}} \sim 400 \text{ ккал/кг}$ пульсации давления и температур отсутствовали. При увеличении тепловой нагрузки до $0,950 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ ($i_{\text{вых}}$ стало равным 420 ккал/кг) возникали пульсации давления и температуры среды на входе с периодом $T \sim 80 \text{ сек}$. При $w_g = 300 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, $p = 250 \text{ атм}$, $i_{\text{вх}} \sim 490 \text{ ккал/кг}$, $q = 0,1 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ и $i_{\text{вых}} \sim 560 \text{ ккал/кг}$ пульсации давления отсутствовали. При $q = 0,21 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ ($i_{\text{вых}} \sim 640 \text{ ккал/кг}$) возбуждались пульсации давления с периодом $T \sim 15 \text{ сек}$ и амплитудой $A \sim 25 \text{ атм}$. Температура стенки во входных сечениях также пульсировала в пределах 430—510° С. При $q \sim 0,27 \cdot 10^6 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ пульсации прекратились.

Приведенные опыты показывают, что при закритических давлениях пульсационные режимы возникают в тех случаях, когда вдоль обогреваемой трубы наблюдается заметное изменение теплофизических свойств среды.

В первом опыте в пределах почти всей обогреваемой трубы двигалась жидкость со слабо изменяющимися свойствами и только в выходных сечениях обнаруживалось заметное изменение ее свойств. Во втором опыте, наоборот: резкое изменение теплофизических свойств наблюдается в начальных, по ходу движения среды сечениях потока.

В результате проведения исследования температурных режимов при закритических параметрах установлено:

Опытные данные, относящиеся к однофазным участкам $t_{\text{ст}} < t_m$ или $t_{\text{п}} > t_m$, хорошо описываются формулой (1).

При $w_g < 1000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, теплосодержаниях среды 400—500 ккал/кг и тепловых потоках более $250 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}$ обнаружены резко выраженные ухудшенные температурные режимы, по характеру своему напоминающие кризис теплоотдачи к двухфазным средам при докритических давлениях.

Обнаружена область пульсационных режимов при движении среды с заметно изменяющимися свойствами вдоль обогреваемой трубы.

Московский энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского

Поступила в редакцию
8 V 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд, Молекулярная теория газов и жидкостей, ИЛ, 1961.
2. А. М. Розен, Докл. АН СССР, 99, № 1, 133, 1954.
3. В. Ю. Урбах, Ж. физ. хим., 33, № 3, 515, 1959.
4. М. Г. Каганер, Ж. физ. хим., 32, № 2, 332, 1958.
5. А. М. Сирота, Б. К. Мальцев, П. Е. Белякова, Теплоэнергетика, № 7, 1960.
6. Я. М. Френкель, Статистическая физика, Изд. АН СССР, 1947.
7. В. К. Семенченко, Докл. АН СССР, 99, № 6, 1045, 1954.
8. З. Л. Миропольский, М. Е. Шицман, Ж. техн. физ., 27, № 10, 2359, 1957.
9. З. Л. Миропольский, М. Е. Шицман, Энергомашиностроение, № 1, 1958.
10. М. Е. Шицман, Теплоэнергетика, № 1, 1959.
11. А. А. Арманд, Н. В. Тарасова, А. С. Коньков, Сб. Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях, Госэнергоиздат, 1959.
12. Е. А. Краснощекоев, В. С. Протопопов, Теплоэнергетика, № 12, 1959; то же, № 10, 1960.
13. R. G. Diessler, Trans. ASME, 76, № 1, 1954.
14. N. L. Dickinson, C. P. Welch, Trans. ASME, 80, № 3, 1958.
15. R. P. Bringer, J. M. Smith, A. I. Ch. E. J., 3, № 1, 1957.
16. R. R. Schmidt, V. G. B., № 63, Dezember, 1959.
17. E. J. Szetela, A. R. S. J., 32, № 8, 1962.
18. W. Powell, Jet Propuls., 27, № 7, 1957.
19. А. Л. Шварц, Э. П. Дик, И. П. Дудников, И. Надыров, Теплоэнергетика, № 4, 1963.
20. K. Coldmann, International Developments in heat Transfere, pt. III, report 66, p. 561, 1961.
21. М. Е. Шицман, Теплоэнергетика, № 1, 1962.
22. С. С. Кутателадзе, Основы теории теплообмена, Машгиз, 1962.