

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Н. В. Бакулин, М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин,
В. И. Субботин, Интенсивность теплообмена при пленочной конденсации чистого натриевого пара, *ТВТ*,
1967, том 5, выпуск 5, 930–933

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: 44.210.149.218

9 ноября 2024 г., 19:20:02



3. Стекло цветное оптическое, ГОСТ 9411-60. М., 1960.
4. Г. В. Розенберг. Оптика тонкослойных покрытий. Физматгиз, 1958.
5. А. С. Дубовик. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. Изд-во «Наука», 1964.

УДК 536.248.2

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ЧИСТОГО НАТРИЕВОГО ПАРА

Н. В. Бакулин, М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин, В. И. Субботин

В ряде работ по конденсации щелочных металлов [1—5] приводятся значения коэффициента теплоотдачи в десятки раз ниже тех, которые могут быть объяснены термическим сопротивлением конденсата и сопротивлением фазового перехода, рассчитанным при коэффициенте конденсации, равном единице. В настоящей работе при пленочной конденсации паров натрия получены значения коэффициента теплоотдачи, согласующиеся с результатами теоретического расчета термического сопротивления пленки конденсата и сопротивления фазового перехода. Как и в работах [6—7], при конденсации чистого металлического пара коэффициент конденсации

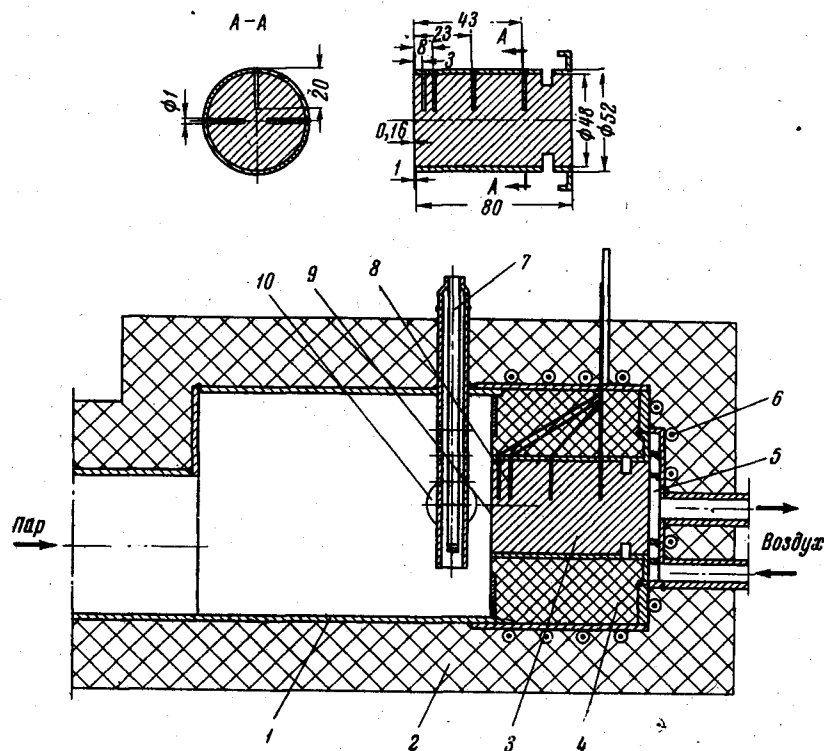


Рис. 1. Экспериментальный конденсатор

1 — цилиндрическая камера; 2 — теплоизоляция — асбест; 3 — конденсатор; 4 — теплоизоляция — пеношамотный кирпич; 5 — камера охладителя; 6 — охранный нагреватель; 7 — чехол для термопар; 8 — термопары, заделанные в медь; 9 — поверхность конденсации; 10 — линия к вспомогательному конденсатору

оказался равным единице и не обнаружено термического контактного сопротивления между конденсатом и поверхностью конденсатора.

В [6—7] опыты проводились при невысоких температурах пара с использованием подвижной микротермопары, погружаемой в конденсат. Опыты при повышенных температурах натриевого пара, описанные ниже, выполнены на экспериментальном конденсаторе, представленном на рис. 1.

В целях повышения точности эксперимента конденсатор был изготовлен из меди, защищенной тонким слоем нержавеющей стали. Он выполнялся в виде цилиндра диаметром 52 мм и длиной 80 мм, приваренного к цилиндрической камере, в которую поступал пар из парогенератора. Защищенный торец цилиндра служил поверхностью конденсации, другой торец охлаждался воздухом, протекающим по спиральным каналам. Конденсатор был изготовлен путем вакуумной заливки меди марки МО в толстостенный стакан из стали 1Х13Н9Т с последующей механической обработкой. Для замера температуры стенки конденсатора и теплового потока в четырех сечениях,

Опытные данные по конденсации чистого пара натрия

Температура пара °С	Температурный напор при конденсации, ΔT , °С	Тепловой поток q , кет/м ²	α_v кет/м ² °С	α_{II} кет/м ² °С	α_o кет/м ² °С	α_d кет/м ² °С
560	5,3	651	121	879	140	160
558	5,9	647	110	883	126	157
558	5,3	648	120	882	139	158
549	6,4	633	98	908	110	145
538	3,3	404	122	1042	138	127
538	3,0	404	134	1042	154	127
569	2,8	310	108	1123	120	199
571	2,7	311	114	1120	127	205
571	2,8	312	109	1115	121	207
577	3,5	646	184	877	233	222
576	3,3	635	190	882	242	221
578	3,2	637	199	885	257	225
579	3,2	637	199	880	257	228
579	3,3	623	187	887	237	229
678	2,1	718	335	801	576	700
669	1,9	725	366	805	622	642
669	2,0	728	362	810	654	642
669	2,0	728	362	810	654	642
700	1,6	724	441	792	995	885
701	1,5	729	482	790	1236	885
701	1,6	733	433	789	960	885
840	2,6	978	367	655	833	2870
842	2,9	980	338	653	695	2910
847	2,9	985	335	646	694	3000
856	3,2	998	312	641	608	3230
858	3,1	1001	314	640	617	3290
861	3,2	1007	306	637	589	3390
862	3,2	1010	310	636	605	3460

находящихся на расстоянии 3, 8, 23 и 43 мм от поверхности конденсации, в радиальные сверления диаметром 1 мм и глубиной 20 мм были помещены хромель-алюмелевые термопары в чехлах диаметром 0,8 мм. В каждом сечении закладывалось по три термопары; при заделке для улучшения термического контакта использовалась алундовая замазка. Три такие же термопары, помещенные в чехол, входящий на 80 мм в паровое пространство, предназначались для замера температуры пара. Снаружи чехла размещался тепловой экран. Боковая поверхность конденсатора была тщательно теплоизолирована пеношамотным кирпичом и снабжена компенсационным нагревателем. К паровой камере экспериментального участка через вентиль подсоединялся мощный вспомогательный конденсатор. Все опыты проводились при постоянной конденсации части пара в этом конденсаторе. Вакуумирование линии после него осуществлялось форвакуумным насосом марки ВН-1М.

В опытах использовался натрий с содержанием калия $6 \cdot 10^{-3}$ вес.%. Измерения проводились после получасовой выдержки в стационарном температурном режиме. Э.д.с. термопар измерялись полуавтоматическим потенциометром Р2/1. Длительность измерений составляла 2—4 мин. После проведения опытов экспериментальный участок был препарирован, уточнено положение спаев термопар относительно поверхности конденсации. На микрошлифах с высокой точностью измерена толщина слоя стали, защищающего медь от действия щелочного металла. На поверхности конденсации она была равна $0,16 \pm 0,01$ мм. Сцепление между сталью и медью носило диффузионный характер.

При обработке результатов измерений использовались средние значения из показаний трех термопар в каждом из рядов. Учитывался разброс показаний термопар по градуировке. Тепловые потоки при конденсации, рассчитанные по перепадам температур в меди между рядами термопар, согласуются в пределах 2%. Данные по теплопроводности меди и нержавеющей стали взяты из [8].

В таблице приведены полученные опытные данные и расчетные величины: α_d —

величина, обратная сопротивлению фазового перехода, α_n — величина, обратная сопротивлению пленки конденсата, α_0 — коэффициенты теплоотдачи, полученные из экспериментальных путем исключения сопротивления конденсатной пленки.

Расчет α_ϕ проводится по формуле*

$$\alpha_\phi = \frac{2f}{2-f} \left(\frac{r^2 M}{2\pi RT} \right)^{1/2} \left(\frac{dP}{dT} - \frac{P}{2T} \right), \quad (1)$$

где R — газовая постоянная. Коэффициент конденсации f принимался равным единице. Молекулярный вес M , скрытая теплота парообразования r и данные по давлению пара взяты из [9]. При расчете α_n использовалась формула Нуссельта для локальных коэффициентов теплоотдачи при ламинарном течении пленки и постоянной плотности теплового потока:

$$\alpha_n = \left(\frac{\lambda^3 \nu^2 r}{2\mu x q} \right)^{1/4} \quad (2)$$

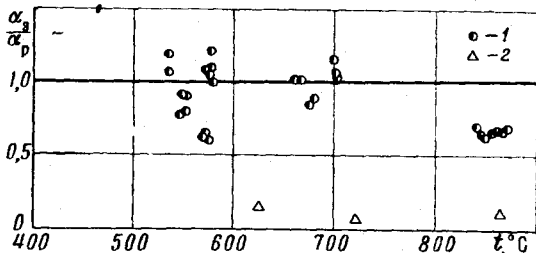


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных по конденсации натрия с расчетными

1 — наши данные; 2 — данные [1]

что в опытах измерялись очень высокие коэффициенты теплоотдачи, согласие эксперимента с расчетом достаточно хорошее.

На рис. 3 представлены коэффициенты теплоотдачи α_0 , полученные из экспериментальных путем исключения сопротивления пленки. α_0 по определению характеризует суммарное влияние граничных сопротивлений на теплообмен при конденсации — фазового, диффузионного и контактного сопротивлений. На рис. 3 представлены также наши данные из работы [7]. Для сравнения приведены также данные [1].

Из рис. 3 видно, что в диапазоне температур пара, где коэффициенты теплоотдачи, полученные в наших опытах, определены с достаточной точностью, α_0 согласуются с теоретическими значениями α_ϕ при коэффициенте конденсации, равном единице. Таким образом, наши данные показывают, что для чистого натриевого пара (в условиях, когда влияние неконденсирующихся газов и примесей других металлов мало) коэффициенты теплоотдачи имеют высокие значения. Влияние диффузионного сопротивления за счет наличия в паре димеризованных молекул [11] при высоких давлениях пара не обнаруживается, так же как и при низких давлениях в наших более ранних исследованиях [6, 7].

Одной из возможных причин получения пониженных коэффициентов теплоотдачи в опытах [1—5] является влияние на теплообмен газов, возникающих за счет диссоциации растворенных в щелочном металле примесей — в первую очередь гидридов щелочных металлов. Как показали специальные опыты, в натрия может содержаться такое количество гидридов, которое при разложении дает объемы свободного водорода, в десятки раз превышающие объем жидкого натрия.

Физико-энергетический институт

Поступило в редакцию 12 VII 1966

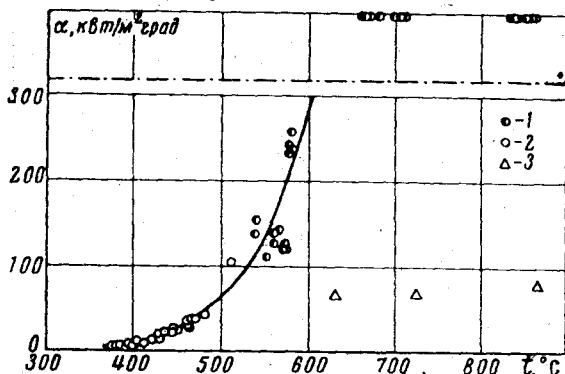


Рис. 3. Коэффициенты теплоотдачи, полученные из экспериментальных путем исключения термического сопротивления пленки

1 — наши данные; 2 — данные [7]; 3 — данные [1]; кривая — по газокинетической теории при $f = 1$. Точки с $\alpha_0 = 300 \text{ кВт/м}^2\text{град}$ нанесены условно

* Формула справедлива для случая, когда скорость движения пара к поверхности конденсации намного меньше скорости звука. Расчеты показывают, что в наших опытах это условие выполнялось.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. Misra, C. Bonilla. Chemical Engineering Progress, Symp. Series, 52, № 18, 7, 1956.
2. Lt. Roth. Preceedings of 1962 Hight Temperature Liquid — Metal Heat Transfer Technology Meeting, p. 276.
3. R. Brooks. Preceedings of 1962 Hight Temperature Liquid — Metal Heat Transfer Technology Meeting, p. 131.
4. R. Brooks, S. Sawochka. Power Systems for Space Flight. New York — London, Acad. Press, 1963.
5. R. Brooks, C. Bonilla. Nucleonics, 2, № 3, 43, 1964.
6. В. И. Субботин, М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин, Б. А. Чулков. Теплофизика высоких температур, 2, № 4, 616, 1964.
7. Жидкие металлы. Сборник (под ред. П. Л. Кириллова, В. И. Субботина, П. А. Ушакова). Атомиздат, 1967.
8. Теплофизические свойства веществ. Справочник (под ред. Н. Б. Варгафтика). Госэнергоиздат, 1956.
9. Н. Ситтиг. Натрий, его производство и применение, Госатомиздат, 1961.
10. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Физматгиз, 1963.
11. В. И. Субботин, М. Н. Ивановский, Ю. В. Милованов. Атомная энергия, 21, вып. 1, 17, 1966.

УДК 536.2:532.517.4

РАСЧЕТ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В ПЛАСТИНЕ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

В. В. Болотин, М. Х. Ибрагимов, В. И. Меркулов, В. Н. Москаленко

Эксперименты показали, что при установившемся турбулентном теплообмене в теплопередающей стенке возникают пульсации температуры [1, 2], связанные с внутренней структурой неизотермического турбулентного потока, поэтому их интенсивность и спектральный состав определяются соответствующими характеристиками пульсаций температуры в жидкости. Пульсации температуры являются причиной появления пульсаций термоупругих напряжений, которые могут привести к усталостному разрушению стенки [3]. Поэтому для расчета на прочность нужно знать статистические характеристики поля температур в стенке [4].

1. Рассмотрим бесконечную пластину толщиной h , омываемую с обеих сторон турбулентными потоками жидкости. Температуры потоков T_1 и T_2 представляют собой стационарные эргодические случайные функции координат и времени. Распределение температур T в пластине описывается уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} - a \Delta T = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_1 (T_1 - T) = 0 \quad (z = h/2), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha_2 (T - T_2) = 0 \quad (z = -h/2). \quad (2)$$

Здесь a — коэффициент температуропроводности; λ — коэффициент теплопроводности стенки; α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи, постоянные во времени [5]. Температуру T в пластине представим приближенно в виде линейной функции координаты z .

$$T(x, y, z, \tau) = T_0(x, y, \tau) + z\theta(x, y, \tau). \quad (3)$$

Функции T_0 и θ имеют здесь смысл средней температуры и среднего градиента температуры по толщине пластины. Они, очевидно, являются стационарными эргодическими случайными функциями переменных x, y и τ .

Используя выводы дифференциальных уравнений, связывающих величины T_0 и θ , вариационный принцип решения задач теплопроводности [6], получаем

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T_0}{\partial \tau} - \Delta T_0 + \frac{2 \cdot \varepsilon}{h^2} T_0 + \frac{\eta}{h} \theta = \frac{2\varepsilon}{h^2} T_{00}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \Delta \theta + \frac{6(2 + \varepsilon)}{h^2} \theta + \frac{12\eta}{h^3} T_0 = \frac{6\varepsilon}{h^2} \theta_0,$$