

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев А. Н. Экспериментальное определение удельного электрического сопротивления жидких лития, натрия и калия. ПМТФ, 1963, № 1.
2. Жидкометаллические теплоносители. ИЛ, 1958.
3. Дорфман Я. Г., Кикоин И. К. Физика металлов. Гостехтеоретиздат, 1934.
4. Зырянов П. С. О релаксационных флуктуациях в конденсированных системах. Ж. эксперим. и теор. физ., 1955, т. 29, вып. 3.
5. G u b a r S., K i k o i n J. The Temperature Dependence of the Resistance of Liquid Metals at Constant Volume. J. Phys., 1945, vol. 9, No. 1.
6. Жданов Г. С. Физика твердого тела. Изд. МГУ, 1962.
7. H u m a n J. Measurement of Resistivity of Cesium at Elevated Temperatures. J. Chem. Phys., 1961, vol. 35, No. 3.
8. F r e e d m a n I. F., R o b e r t s o n N. D. Electrical Resistivity of Liquid Sodium, Lithium and Dilute Liquid Sodium Solutions. J. Chem. Phys., 1961, vol. 34, 769.
9. Славинский М. П. Физико-химические свойства элементов. Металлургиздат, 1952.
10. Теплофизические свойства веществ. Справочник под ред. Н. Б. Варгафтика. Госэнергоиздат, 1956.

**ОБ ОТЛОЖЕНИЯХ ЛЕГКОРАСТВОРИМЫХ СОЛЕЙ НА СТЕНКАХ  
ПАРОГЕНЕРИРУЮЩИХ ТРУБ**

*И. Г. Друкер (Новосибирск)*

Механизм отложения труднорастворимых солей (солей жесткости) изучен хорошо. При повышении температуры воды до кипения из-за ухудшения растворимости концентрация солей жесткости в растворе достигает насыщения и на стенках появляются отложения солей в виде накипи.

С легкорастворимыми солями дело обстоит иначе. При обычных соледержаниях котловой воды даже при сильном ее выпаривании (до 80—90% по весу) средняя концентрация солей в оставшейся воде очень далека от насыщения.

Однако при эксплуатации котельных установок было обнаружено, что на некоторых режимах работы количество солей на выходе из труб оказывалось меньшим, чем на входе. Это означает, что в каких-то местах труб происходит накопление солей. «Прятанию солей» посвящено небольшое число работ [1—4]. Из их анализа видно, что имеются два подхода к объяснению механизма данного явления.

1. При интенсивном подводе тепла к стенке трубы концентрация солей в пристеночном слое из-за выпаривания растет и достигает насыщения, при этом соль начинает непрерывно отлагаться на стенке. Такого объяснения придерживаются Хемиг [1], Холл [4], Н. Г. Падуков и Ю. И. Нови [2].

2. Из-за «плохой гидродинамики» в трубах имеются места, не омываемые водой, например верхняя часть горизонтальной трубы при расслоенном режиме течения пароводяной смеси; различного рода «паровые мешки» на гйбах; режимы при тепловых потоках выше критического, когда у стенки имеется пленка пара, даже если при этом увеличение температуры стенки при течении чистой воды невелико, и т. д. В этом случае брызги воды, попадая на оголенную стенку, могут испаряться досуха, выделяя содержащуюся в них соль на стенку в виде слоя. Такой точки зрения придерживаются М. А. Стырикович [3], М. И. Резников [4] и др.

Важно отметить, что как первая, так и вторая гипотеза в основном качественны и не подкреплены ни прямыми экспериментами, ни расчетами. Отметим, что работа [3] — экспериментальная, но ее результаты позволяют сделать выводы в пользу обеих гипотез.

Ниже делается попытка оценить возрастание концентрации солей у стенки парогенерирующей трубы теоретически, на основе гидродинамической теории переноса.

*Обозначения*

$x$ — продольная координата,	$k$ — коэффициент перемешивания, $кг/м \cdot сек$
$y$ — поперечная координата,	$\gamma$ — удельный вес, $кг/м^3$ ,
$h$ — полуширина щели ( $м$ ),	$t$ — время, $сек$ ,
$q$ — тепловой поток, $ккал/м^2 \cdot сек$ ( $час$ ).	$\alpha$ — коэффициент теплоотдачи, $ккал/м^2 \cdot сек \cdot град$ ,
$r$ — теплота парообразования, $ккал/кг$ ,	$P$ — число Рейнольдса,
$w$ — скорость, $м/сек$ ,	$T$ — число Прандтля,
$c$ — весовая концентрация соли в воде, $кг/кг$ ,	$N$ — число Нуссельта.
$d$ — коэффициент диффузии, $кг/м \cdot сек$ ,	

1. Рассматривается (для простоты) плоская щель (фиг. 1) высотой  $2h$ . В щели по направлению оси  $x$  течет слабый раствор соли в воде с известным распределением скоростей  $w(y)$ . Ось  $x$  совпадает с нижней стенкой щели. К этой стенке подводится тепловой поток  $q$  ккал/м<sup>2</sup> сек. Приводимый ниже метод применим, вообще говоря, для любых паросодержаний смеси (отрицательных и положительных), необходимо лишь наличие такого режима течения, при котором у стенки имеется всегда пленка воды; в случае отрицательных паросодержаний надо знать, какая часть теплового потока идет на испарение, в случае положительных вместо  $h$  везде нужно подставлять толщину водяной пленки. Здесь для простоты рассматривается случай, когда паросодержание равно нулю, тогда весь тепловой поток идет на парообразование, а толщина водяной пленки совпадает с полувысотой щели. Предполагается также, и в этом состоит еще одно упрощение, что пар, генерируемый на стенке, переносится к середине щели и там конденсируется.

2. На единице площади поверхности стенки в секунду образуется  $q/r$  кг/м<sup>2</sup> сек пара ( $r$  — теплота парообразования ккал/кг) и столько же «исчезает» воды, поэтому от центра щели к стенке существует приток воды, равный  $q/r$  кг/м<sup>2</sup> сек. В точке  $(x, y)$  он несет с собой  $qc/r$  кг/м<sup>2</sup> сек соли, где  $c = c(x, y)$  есть местная весовая концентрация соли в воде. Имеет место и обратный процесс выравнивания концентрации из-за диффузии, турбулентного перемешивания при кипении. Этот поток можно считать пропорциональным градиенту концентрации вдоль оси  $y$ ,  $\partial c/\partial y$ , с коэффициентом пропорциональности  $k(x, y)$ , учитывающим все способы перемешивания. Кроме того, соль переносится вдоль оси  $x$  со скоростью  $w(y)$ .

Составим уравнение баланса соли для произвольного бесконечно малого объема:

$$\frac{\partial c}{\partial x} \gamma w + \frac{\partial c}{\partial y} \frac{q}{r} - \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial c}{\partial y} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \gamma \quad (1)$$

Здесь  $\gamma$  — удельный вес воды. К полученному уравнению следует добавить соответствующие начальные и граничные условия, важнейшим из которых является условие на обогреваемой стенке. Оно записывается в виде

$$\frac{q}{c} c(x, 0) - k \left[ \frac{\partial c}{\partial y} \right]_{y=0} = p(c), \quad p(c) \begin{cases} = 0 & \text{при } c \leq c_* \\ \neq 0 & \text{при } c > c_* \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $p(c)$  — некоторая функция, описывающая отложение соли на стенку в зависимости от концентрации,  $c_*$  — значение концентрации насыщения, после достижения которого происходит непрерывное выделение солей на стенке трубы.

Предполагая процесс длительным (установившимся) и рассматривая большие значения  $x$  (далеко от входа в щель), а также считая, что раствор всюду далек от насыщения, получим более простое уравнение

$$\frac{dc}{dy} \frac{q}{r} = \frac{d}{dy} \left( k \frac{dc}{dy} \right) \quad (3)$$

с одним граничным и одним интегральным условием

$$\frac{q}{r} c(0) = k \left[ \frac{dc}{dy} \right]_{y=0}, \quad \int_0^h c(y) dy = c_0 h \quad (4)$$

где  $c_0$  — есть средняя концентрация соли в воде, последнее условие есть условие «сохранения количества соли».

3. Решение уравнения (3), удовлетворяющее условиям (4), имеет вид

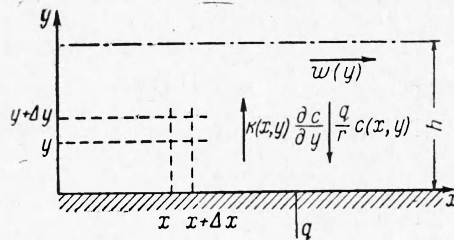
$$c(y) = c_0 h \exp \left( - \int_0^y \frac{q dy}{rk(y)} \right) \left[ \int_0^h \exp \left( - \int_0^y \frac{q dy}{rk(y)} \right) dy \right]^{-1} \quad (5)$$

Значение концентрации соли на стенке  $c_w$  определяется выражением

$$\frac{c_w}{c_0} = h \left[ \int_0^h \exp \left( - \int_0^y \frac{q}{r} \frac{dy}{k(y)} \right) dy \right]^{-1} \quad (6)$$

Подобное рассмотрение провел Хёмиг [1], однако он рассматривал не непрерывный обмен, а обмен непосредственно между двумя слоями — пристеночным и центральным, причем указал на непреодолимые технические трудности в определении коэффициента переноса  $k(y)$ , что, несомненно, является главным в данной задаче.

4. Определение коэффициента переноса проведем в два этапа.



1°. Рассмотрим искусственную модель, когда выделение пара на стенке происходит, но пузырьки не возмущают воду, а каким-либо (несущественно каким) способом переносятся непосредственно к середине щели. В этом случае перемешивание осуществляется только за счет обычной турбулентности и диффузии, и для определения  $k(y)$  можно воспользоваться любой из полуэмпирических теорий турбулентности. Например, принимая гипотезу Прандтля о длине перемешивания и закон «одной седьмой» для профиля скорости, получим [5]

$$k(y) = d + \frac{w_{\max}^3}{7} \frac{\gamma_{\text{соль}}}{h^{3/7}} y^{6/7} \quad (\kappa = 0.4) \quad (7)$$

Здесь  $d$  — коэффициент молекулярной диффузии;  $w_{\max}$  — скорость в центре щели.

Подставляя (7) в (6), можно для заданных значений высоты щели, скорости воды, теплового потока и давления (необходимого для определения  $r$ ) получить величину прироста концентрации соли в пристеночном слое.

2°. Рассмотрим реальный случай. При этом  $k(y)$  определяется так. Известно, что при прочих одинаковых условиях теплопередача при кипении обычно происходит значительно интенсивнее, чем при течении без кипения. Пользуясь различными экспериментальными данными [6], можно количественно оценить увеличение коэффициента теплопередачи.

Например, для течения без кипения можно воспользоваться известной формулой [6]

$$N = 0.023 (R)^{0.8} (P)^{0.4} \quad (8)$$

Для процесса с кипением — соотношением [6]

$$\alpha = 4q^{0.7} \quad (9)$$

Хорошо известно, что такое улучшение теплопередачи происходит в значительной мере из-за более интенсивного перемешивания жидкости вблизи стенки трубы. Грубо говоря, можно считать, что перемешивание возрастает пропорционально теплопередаче, хотя в общем случае теплопередача должна расти быстрее.

Таким образом, полученное в первом случае значение  $k(y)$  следует увеличить в число раз, равное увеличению коэффициента теплопередачи, и вновь рассчитать  $c_w/c_0$ .

Из двух полученных значений  $c_w/c_0$  первое следует считать верхней, а второе нижней границей для истинной величины данного параметра.

Для вычисления были приняты следующие значения:

$$d = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м сек}, \quad w_{\max} = 2 \text{ м/сек}, \quad h = 0.01 \text{ м} \\ r = 540 \text{ ккал/кг (давление} = 1 \text{ ат)} [7]$$

Приводим вычисленные значения  $c_w/c_0$  для различных тепловых нагрузок при двух значениях  $k(y)$ , полученных описанным выше методом.

$q = 10^5$	$2.5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$10 \cdot 10^5$	$20 \cdot 10^5$	ккал·м <sup>2</sup> ·час
$(c_w/c_0)_1 = 1.025$	1.062	1.13	1.28	1.64	
$(c_w/c_0)_2 = 1.020$	1.025	1.032	1.042	1.054	

Необходимо отметить почти полное отсутствие данных по коэффициентам молекулярной диффузии, особенно при высоких давлениях и температурах. Однако, как следует из расчетов, даже значительная ошибка в коэффициенте диффузии (порядка 10 раз) довольно слабо сказывается на конечном результате.

*Замечание.* Величина  $c_0$  есть средняя концентрация соли на больших расстояниях от входа в трубу. Если в рассмотрение ввести среднюю концентрацию соли в воде на входе в трубу  $c_0^*$ , то условие (4) следует переписать в виде

$$\int_0^h c(y) w(y) dy = c_0^* \int_0^h w(d) dy$$

Однако расчеты показывают, что  $c_0$  мало отличается от  $c_0^*$ , превышая ее на несколько процентов, из-за того, что соль, скапливающаяся у стенки, попадает в более медленные слои потока.

При вычислении были приняты значения параметров, близкие к практике. Результаты показывают, что во всех случаях возрастание содержания соли в пристеночном слое невелико и явно недостаточно для образования насыщенного раствора. Это говорит о том, что солеотложения на стенках парогенерирующих труб не могут быть объяснены, если предположить, что стенки омываются водой.

Поступила 19 VI 1963

## ЛИТЕРАТУРА

1. Х ё м и г. Физико-химические процессы в пограничном слое парообразующих труб. Водоподготовка и водный режим котлов на тепловых электростанциях. Госэнергоиздат, 1958, вып. 7.
2. П а ц у к о в Н. Г. и Н о в и Ю. И. Исследование условий, определяющих возможность отложения легкорастворимых солей на парообразующих участках горизонтальной трубы. Сб. ЭНИИ «Внутрикотловые и физико-химические процессы и водный режим котлов высокого давления». Госэнергоиздат, 1951.
3. С т ы р и к о в и ч М. А. Внутрикотловые процессы. Госэнергоиздат, 1954.
4. Р е з н и к о в М. И. Отложения легкорастворимых солей при интенсивном парообразовании. Труды МЭИ, вып. 31 (теплотехнический), Госэнергоиздат, 1953.
5. Л о й ц я н с к и й Л. Г. Механика жидкости и газа. Физматгиз, 1960.
6. К у т а т е л а д з е С. С. и Б о р и ш а н с к и й В. М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
7. Физический энциклопедический словарь. Гос. науч. изд. «Сов. энциклопедия», 1962.

ОБ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ НЕКОТОРЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ  
ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Ю. Л. Сорокин (Новосибирск)

В единой системе безразмерных параметров обобщаются экспериментальные данные по критическим скоростям течения, определяющим возникновение ряда кризисных явлений. Показывается, что условия возникновения этих явлений определяют также смену режимов движения газо-жидкостной смеси.

При совместном движении жидкости и газа в трубах возможны различные режимы течения смеси: пузырьковый, снарядный, пенообразный, пленочный и др. Режимы течения смеси при некоторых условиях существенно влияют на гидравлическое сопротивление, относительную скорость легкой фазы, на теплоотдачу, отложения солей в обогреваемых поверхностях нагрева и т. д.

Переход от одного режима к другому происходит обычно в результате потери устойчивости предыдущей структуры двухфазного потока. Исходя из такого представления о физической природе кризисов течения газо-жидкостных смесей [1], ниже сделана попытка рассмотреть совместно, в единой системе безразмерных координат, данные по исследованиям различных процессов. Это позволяет более обоснованно подойти к основным закономерностям течения газо-жидкостных смесей, так как объем экспериментальных данных и диапазон сопоставляемых параметров значительно увеличиваются.

Ранее было показано [2], что критическая скорость легкой фазы, соответствующая возникновению кризисных явлений, в общем случае может быть описана совокупностью следующих безразмерных параметров:

$$k = f \left( F, W, G, \frac{\gamma' + \gamma''}{\gamma'}; \frac{v'}{v''}; \frac{l_1}{l_2} \dots \right) \quad (1)$$

$$k = \frac{w_* \gamma''^{1/2}}{[g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}}, \quad F = \frac{Q_m (\gamma' - \gamma'')^{3/4}}{g^{1/2} \sigma^{3/4}}, \quad G = \frac{g \sigma^{3/4}}{v'^2 (\gamma' - \gamma'')^{3/2}}$$

$$W = \frac{\sigma}{(\gamma' - \gamma'') D^2}$$

Здесь  $F$ ,  $G$ ,  $W$  — критерии Фруда, Галлилея и Вебера,  $w_*$  — критическая скорость легкой фазы, рассчитанная по полному сечению трубы,  $м/сек$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  — удельные веса тяжелой и легкой фаз,  $кг/м^3$ ,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $кг/м$ ,  $g$  — ускорение силы тяжести,  $м/сек^2$ ,  $Q_m$  — расход жидкости на погонный метр смоченного периметра,  $м^3/м сек$ ,  $D$  — диаметр трубы, или эквивалентный диаметр,  $м$ ,  $v'$ ,  $v''$  — коэффициенты, кинематической вязкости жидкости и газа,  $м^2/сек$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  — характерные линейные размеры аппаратов,  $м$ .

Из анализа имеющихся в литературе и приведенных ниже экспериментальных данных установлено, что для рассматриваемых процессов возможно использовать несколько более специализированную эмпирическую связь

$$k = f(N), \quad N = FW^{1.25} \left( 1 + \frac{31}{G^{0.55}} \right) \quad (2)$$

Некоторые обоснования зависимости (2) будут ясны из дальнейшего изложения

При стекании жидкости по стенке трубки и встречном движении газа (или пара при некоторой скорости газа наступает типичное кризисное явление, называемое «захлебыванием». Признаки начала захлебывания — резкое повышение коэффициента