

## ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

### ТЕПЛОМАССООБМЕН И ГАЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПАРОВОДОЯНОМ ОБЪЕМЕ С НЕКОНДЕНСИРУЮЩИМСЯ ГАЗОМ

© 2023 г. А. А. Фальков<sup>а</sup> \*, И. Н. Кулаков<sup>а</sup>, Е. А. Слепнева<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова (ОКБМ),  
Бурнаковский проезд, д. 15, г. Нижний Новгород, 603074 Россия

\*e-mail: okbm@okbm.nnov.ru

Поступила в редакцию 12.01.2023 г.

После доработки 17.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Рассмотрены тепломассообмен и газораспределение в неравновесном пароводяном объеме с уровнем раздела фаз, содержащем неконденсирующийся газ. Эти процессы относятся в первую очередь к парогазовому компенсатору давления (ПГКД) интегрального реактора и определяют поведение ПГКД в нормальных и аварийных режимах. Подобные процессы происходят в водо-водяном реакторе и локализуемом объеме на заключительной стадии аварийных режимов с потерей теплоносителя. Для реакторов малой мощности типа РИТМ-200 с газовым компенсатором давления необходимо учитывать явления, связанные с поведением неконденсирующихся газов. Дано краткое описание программы для ЭВМ GARRIC 2.2 для расчета распределения неконденсирующихся газов в I контуре и характеристик ПГКД водо-водяного реактора интегральной компоновки. Описание процессов тепломассообмена и газораспределения основывается на результатах экспериментов, проведенных на моделях ПГКД, в широком диапазоне параметров и газосодержаний. Расчет массообмена, в том числе испарения и конденсации пара, газопереноса на зеркале проводится с использованием модели аналогии тепло- и массообмена в условиях естественной конвекции среды. Представлены результаты верификации программы GARRIC 2.2 на экспериментальных данных, полученных при исследовании конденсации пара на стенках, испарения на свободной поверхности воды и распределения газа в парогазовом объеме при натуральных параметрах. Программа GARRIC 2.2 аттестована Ростехнадзором в 2014 г.

*Ключевые слова:* водо-водяной реактор, компенсатор давления, неконденсирующийся газ, парогазовая смесь, газораспределение, тепломассообмен, испарение, конденсация, растворение газа, уровень раздела фаз

DOI: 10.56304/S0040363623110061

Процессы тепломассообмена и газораспределения в пароводяном объеме с уровнем раздела фаз, содержащем неконденсирующийся газ, относятся в первую очередь к парогазовому компенсатору давления интегрального реактора, представляющему собой парогазовый объем в верхней части реактора над уровнем теплоносителя, и определяют поведение ПГКД в нормальных и аварийных режимах. Процессы, связанные с поведением неконденсирующихся газов и влиянием газов на тепломассообмен, необходимо учитывать при разработке, расчетном обосновании и эксплуатации реакторных установок с газовым компенсатором давления типа РИТМ-200. Применение интегральных реакторов малой мощности типа РИТМ-200 – перспективное направление для региональной энергетики.

При высоких концентрациях растворенного газа в воде I контура в реакторных установках с

парогазовым и газовым компенсаторами давления возможно выделение газа в переходных и аварийных режимах.

В водо-водяных энергетических реакторах также возможны ситуации, когда неконденсирующийся газ попадает в контур циркуляции при авариях с потерей теплоносителя, например, после исчерпания запасов воды в гидроаккумуляторах в случае неотключения их от I контура. Неконденсирующийся газ также образуется в результате радиолитического распада воды в активной зоне с образованием газовой смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Этот процесс может привести к заметному выходу газа при аварии, протекающей в течение длительного времени.

Состав газовой смеси в реакторе определяется типом используемого водно-химического режима I контура – при аммиачном водно-химическом режиме это азотно-водородная смесь.

Процессы тепломассообмена и газораспределения, характерные для неравновесного парогазоводяного объема с уровнем раздела фаз, происходят в водо-водяном реакторе и локализуящем объеме на заключительной стадии аварийных режимов с потерей теплоносителя.

## ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРИСУТСТВИИ НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ

### Конденсация пара на стенке

При конденсации пара из парогазовой смеси на поверхности массообмена образуется диффузионный слой с повышенной концентрацией неконденсирующегося газа, затрудняющий доступ пара к поверхности конденсации и снижающий ее интенсивность. Картина тепломассообменных процессов и распределения газа вблизи поверхности конденсации показана на рис. 1.

Для расчета интенсивности массообмена на поверхности раздела фаз широкое распространение получила полуэмпирическая модель, основанная на аналогии процессов тепло- и массообмена [1–3]. Она позволяет рассчитывать интенсивность массопереноса в системах со сложными геометрическими характеристиками путем использования эмпирических зависимостей для теплообмена, полученных для подобных геометрических и физических условий. При определении числа Шервуда  $Sh$  (массообменное число Нуссельта  $Nu_D$ ), характеризующего влияние естественной или вынужденной конвекции на массообмен, применяются зависи-

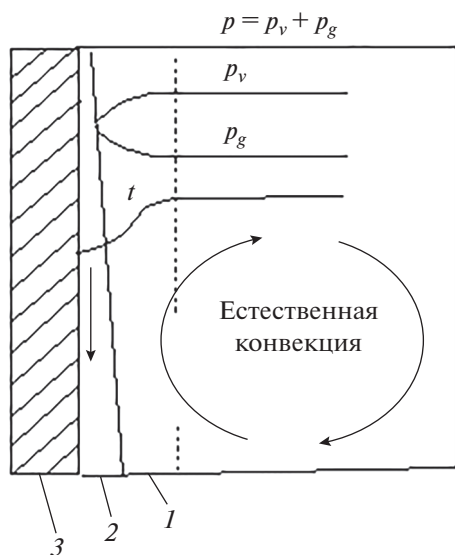


Рис. 1. Процессы на поверхности конденсации. 1 – диффузионный слой; 2 – пленка конденсата; 3 – стенка

мости для числа Нуссельта, в которых число Прандтля  $Pr$  заменяется на диффузионное число Прандтля  $Pr_D$  (число Шмидта  $Sc$ ).

Диффузионный поток пара вычисляется с учетом дополнительного конвективного потока (потока Стефана), возникающего в условиях непроницаемости межфазной границы для газа [1, 2]:

$$j_v = \pm Nu_D D_p / L \ln(p_{g1} / p_g); \quad (1)$$

$$Nu_D = \beta L / D_v = f(Re, Gr, Pr_D),$$

где  $D_p = D_v p M_v / [R(t + 273)]$  – приведенный коэффициент диффузии пара, кг/(м · с);  $D_v$  – коэффициент диффузии пара, м<sup>2</sup>/с;  $p$ ,  $t$  – давление, Па, и температура, °С, парогазовой смеси;  $M_v$  – молярная масса водяного пара, кг/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);  $L$  – характерный линейный размер, м;  $p_g$ ,  $p_{g1}$  – парциальное давление газа в объеме и на поверхностях конденсации (знак “плюс” в выражении) или испарения (знак “минус”), Па;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $Re$ ,  $Gr$  – число Рейнольдса и Грасгофа.

Результирующий коэффициент теплоотдачи при конденсации пара  $\alpha_c$  учитывает термическое сопротивление диффузионного слоя и пленки конденсата:

$$\alpha_c = 1 / (1 / \alpha_D + 1 / \alpha_m), \quad (2)$$

где  $\alpha_D$ ,  $\alpha_m$  – коэффициент теплоотдачи в диффузионном слое и пленке конденсата соответственно, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Для определения  $\alpha_m$  необходим расчет температуры межфазной поверхности  $t_1$  с использованием итерационной процедуры:

$$t_1 = (\alpha_D t_v^s + \alpha_{ef} t + \alpha_m t_w) / (\alpha_D + \alpha_{ef} + \alpha_m); \quad (3)$$

$$\alpha_D = j_v (h_v - h_{f1}) / (t_v^s - t_1),$$

где  $t_v^s = t_s = f(p - p_g)$  – температура насыщения пара как функция парциального давления пара, °С;  $\alpha_{ef}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи при конвективном и радиационном теплообмене, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t$ ,  $t_w$  – температура парогазовой смеси и стенки, °С;  $h_v$  – энтальпия пара, Дж/кг;  $h_{f1}$  – энтальпия воды на поверхности конденсации, Дж/кг. Индекс  $s$  относится к линии насыщения.

К коэффициенту теплоотдачи в пленке  $\alpha_m$ , вычисляемому по соотношениям для конденсации чистого пара, может быть применено соотношение Нуссельта для коэффициента теплоотдачи при ламинарном движении пленки конденсата [3, 4]. Стоит отметить, что при наличии неконденсирующегося газа основное сопротивление

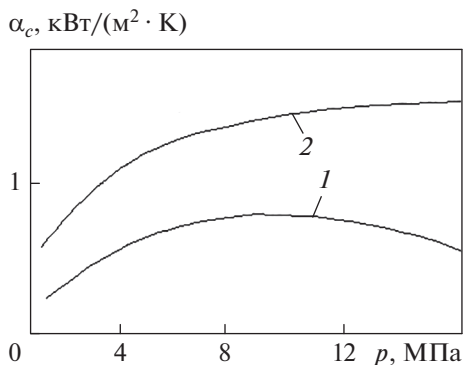


Рис. 2. Коэффициент теплоотдачи при конденсации пара на вертикальных поверхностях для парозотной  $\text{H}_2\text{O} + \text{N}_2$  (1) и парогелиевой  $\text{H}_2\text{O} + \text{He}$  (2) смеси ( $p_g = 0.5p$ ,  $t_v^s - t_w = 5^\circ\text{C}$ )

массопереносу приходится на диффузионный слой и точность расчета коэффициента теплоотдачи в пленке не является определяющей.

Коэффициенты теплоотдачи при конденсации пара в зависимости от давления, рассчитанные для характерных условий парогазового объема с турбулентной естественной конвекцией парогазовой смеси по модели аналогии тепло- и массообмена с учетом термического сопротивления диффузионного слоя и пленки конденсата [см. (1)–(3)], представлены на рис. 2.

Результаты расчета коэффициента теплоотдачи по модели аналогии тепло- и массообмена в коде GARRIC 2.2 для условий естественной конвекции и экспериментальные данные, полученные на стенде КМР-2 при конденсации пара из паровоздушной смеси на стенках страховочного корпуса (объем и диаметр экспериментальной емкости соответственно равны  $V = 1.2 \text{ м}^3$  и  $d = 0.4 \text{ м}$ ) [5–7], приведены на рис. 3. На рисунке видно, что коэффициент теплоотдачи при конденсации существенно возрастает при повышении давления парогазовой смеси вследствие интенсификации естественной конвекции. На рис. 3 приводятся также данные [8] для иллюстрации влияния давления на интенсивность конденсации пара.

С данными, приведенными на рис. 3, согласуются результаты исследования конденсации пара из парозотной смеси на вертикальной трубе диаметром 41 мм в условиях естественной конвекции в диапазоне давлений 0.1–2.0 МПа [9, 10], которые свидетельствуют о значительном увеличении коэффициентов теплоотдачи при повышении давления. По данным [9, 10], коэффициенты теплоотдачи при конденсации на вертикальной трубе на 20–50% выше значений, полученных на стенках емкости на стенде КМР-2 при близких давлениях и

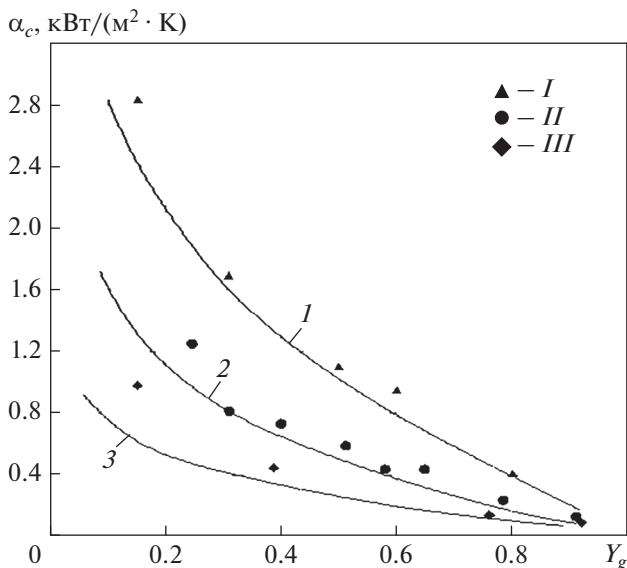


Рис. 3. Результаты расчета коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара на стенке по модели аналогии тепло- и массообмена, экспериментальные данные, полученные на стенде КМР-2, и данные [8] ( $Y_g = p_g/p$ ).

Экспериментальные данные: I –  $p = 2.2\text{--}3.0 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 15^\circ\text{C}$ ; II –  $p = 0.4\text{--}0.8 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 15^\circ\text{C}$ ; III – данные [8]:  $p = 0.10\text{--}0.28 \text{ МПа}$ ;  $t_w = 50^\circ\text{C}$ .

Расчет по коду GARRIC при  $p$ , МПа: 1 – 2.6; 2 – 0.6; 3 – 0.2

одинаковых газосодержаниях, что может быть связано с интенсификацией естественной конвекции при большом перепаде температур  $\Delta t = t_v^s - t_w = 20\text{--}80^\circ\text{C}$ , а также с погрешностью определения коэффициентов теплоотдачи в рассматриваемых экспериментах, составляющей  $\pm 25\%$ .

#### Эмпирическая зависимость для коэффициента теплоотдачи

Для практических расчетов может быть использовано упрощенное полуэмпирическое соотношение (см. [5–7]), основанное на данных по конденсации пара из паровоздушной смеси на стенках вертикального сосуда, представленных на рис. 3. Формула для коэффициента теплоотдачи в диффузионном слое  $\alpha_D$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ), учитывает зависимость от параметров на основе аналогии процессов тепло- и массообмена для условий турбулентной естественной конвекции  $\text{Nu}_D \approx \text{Gr}^{0.333}$ :

$$\alpha_D = 0.007 \left( \frac{1 - Y_g}{Y_g} \right)^{0.5} \frac{r_c}{p^{0.33}} \left( \frac{dp}{dt} \right)_s A, \quad (4)$$

где  $Y_g = p_g/p$  – относительное газосодержание;  $r_c$  – удельная теплота, отдаваемая при конденса-

ции пара, кДж/кг;  $p$  – давление,  $\times 10^5$  Па (бар);

$A = \left( \frac{t_v^s - t_c}{20} \right)^{0.33}$  – коэффициент, учитывающий влияние изменения перепада температур в диффузионном слое на интенсивность естественной конвекции смеси.

Среднее значение производной давления насыщенного пара по температуре в диффузионном слое,  $10^5$  Па/К, в зависимости от средней температуры в диффузионном слое  $\bar{t}$  определяется по аппроксимации

$$\left( \frac{dp}{dt} \right) = 0.035 \left( \frac{\bar{t}}{100} \right)^{3.2}.$$

Выражение (4) экспериментально подтверждено для давлений до 3 МПа и относительных газосодержаний  $Y_g = 0.1-0.9$  и дает результаты, близкие к данным, полученным расчетным путем по методу аналогии тепло- и массообмена (различие составляет менее 10%).

#### Испарение на поверхности раздела фаз

Поступление пара в парогазовый объем определяется испарением с поверхности раздела фаз (поверхности зеркала испарения) и выходом парогазовых пузырей из-под фазового уровня, вызванного кипением и выделением газа в паровые пузыри. Интенсивность испарения рассчитывают с учетом диффузионного и термического сопротивления, аналогично расчету конденсации пара, по соотношениям (1) и (2). Вместо коэффициента теплоотдачи в пленке  $\alpha_m$  в соотношении (2) используют коэффициент теплоотдачи в поверхностном слое воды.

Испарение приводит к охлаждению поверхностного слоя воды (рис. 4) и возникновению естественной конвекции жидкости вблизи поверхностного слоя. При определении парциального давления пара на зеркале испарения необходимо учитывать охлаждение поверхностного слоя жидкости  $\Delta t_1$ :  $p_{g1} = p_s(t_f - \Delta t_1)$  ( $p_s$  – давление насыщения как функция температуры;  $t_f$  – температура жидкости). Температуру на поверхности испарения  $t_1$  можно найти с помощью итерационной процедуры, аналогично соотношениям (3), с учетом коэффициента теплоотдачи в водяном слое, вычисляемого по зависимостям для естественной или смешанной конвекции.

На рис. 5 показаны результаты расчета потока испарения со свободной поверхности воды в воздушную атмосферу и значения  $\Delta t_1$  для условий

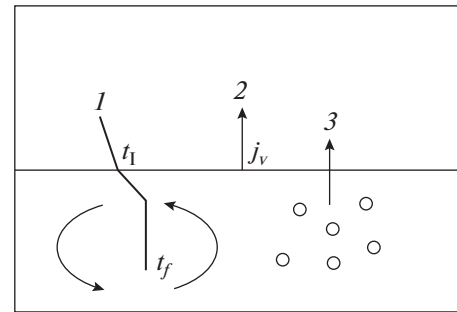


Рис. 4. Процессы на поверхности испарения: 1 – охлаждение поверхностного слоя; 2 – испарение; 3 – выход пузырей

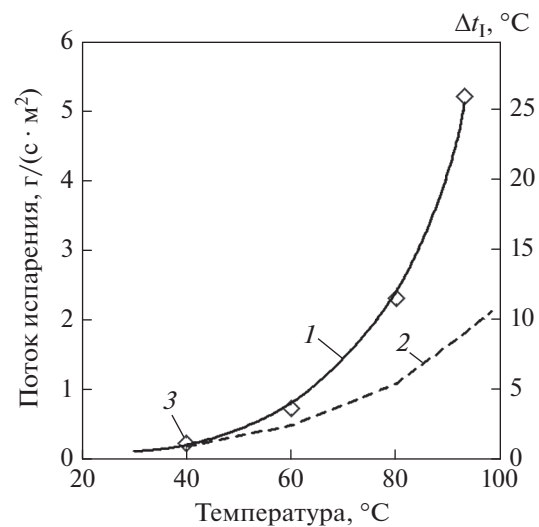


Рис. 5. Поток испарения и охлаждение поверхности водяного объема ( $p = 0.1$  МПа). Поток испарения: 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты расчета; 3 – охлаждение поверхности

естественной конвекции в воде и воздухе в зависимости от температуры воды. Для сравнения на рисунке представлены экспериментальные данные из работы [11] по испарению воды из различных емкостей в воздушную атмосферу при температуре воздуха  $24^\circ\text{C}$  и влажности 40–60%. Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными во всем диапазоне температур, а их расхождение не превышает погрешности экспериментальных данных ( $\pm 20\%$ ).

#### Радиационно-конвективный теплообмен

При отсутствии вынужденного потока теплоперенос в парогазовом пространстве стратифицированного объема определяется механизмом естественной конвекции смеси. Система соотно-

шений естественно-конвективного теплопереноса [3, 4] имеет вид

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0.54(\text{GrPr})^{0.25}, \quad \text{GrPr} < 2 \times 10^7; \\ \text{Nu} &= 0.135(\text{GrPr})^{0.333}, \quad 2 \times 10^7 < \text{GrPr} < 10^{11}; \\ \text{Nu} &= 0.025(\text{GrPr})^{0.4}, \quad \text{GrPr} > 10^{11}. \end{aligned} \quad (5)$$

По сравнению с обычно используемыми формулами, система (5) дополнена соотношением для повышенной интенсивности естественной конвекции ( $\text{GrPr} > 10^{11}$ ).

При определении числа Грасгофа  $\text{Gr} = \frac{gL^3 \Delta\rho}{\nu^2 \rho}$  ( $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – определяющий размер, м;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta\rho$ ,  $\rho$  – перепад плотности и плотность среды, кг/м<sup>3</sup>) у поверхностей, на которых происходит совместный тепло- и массообмен (испарение или конденсация пара), необходимо учитывать изменение плотности парогазовой среды, обусловленное изменением как ее температуры, так и состава, что приводит к повышению перепада плотности  $\Delta\rho$ , увеличению числа  $\text{Gr}$  и коэффициента теплоотдачи.

При радиационном теплопереносе основной вклад в тепловое излучение парогазовой среды вносят трехатомные молекулы водяного пара. Излучательная способность газов характеризуется произведением парциального давления на размер газового слоя [3]. При больших линейных размерах парогазового пространства и высоких парциальных давлениях интегральная излучательная способность водяного пара оказывается близкой к значению этого показателя для непрозрачных материалов. Так, при парциальном давлении пара  $p_v \approx 0.5$  МПа и  $L \approx 1$  м излучательная способность водяного пара равна приблизительно 0.6.

Расчет по рекомендациям [3] дает значение коэффициента теплоотдачи излучением в условиях, характерных для парогазового объема в элементах типа компенсатора давления,  $\alpha_{rad} = 10-20$  Вт/(м<sup>2</sup> · К) при  $p = 2-16$  МПа.

### НЕРАВНОВЕСНЫЙ СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ ПАРОВОДЯНОЙ ОБЪЕМ С НЕКОНДЕНСИРУЮЩИМСЯ ГАЗОМ

#### Распределение газа в парогазовом объеме

В адиабатных условиях повышение давления в объеме при увеличении газосодержания  $\Delta p_s = p - p_s(t_f)$  равно среднеобъемному парциальному давлению газа  $p - p_s(t_f) = p_g$ . При наличии стоков тепла значение среднеобъемного дав-

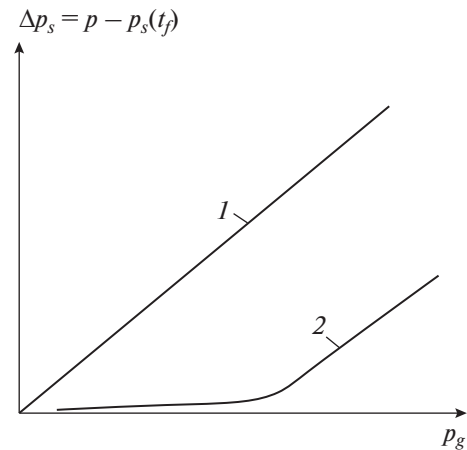


Рис. 6. Изменение давления при увеличении среднего парциального давления газа в стационарных условиях. Объем: 1 – адиабатный стратифицированный; 2 – неадиабатный

ления газа в стационарных условиях превышает  $\Delta p_s$  (рис. 6), причем чем мощнее стоки тепла, тем выше  $p_g$ , необходимое для поддержания заданного давления  $p$ .

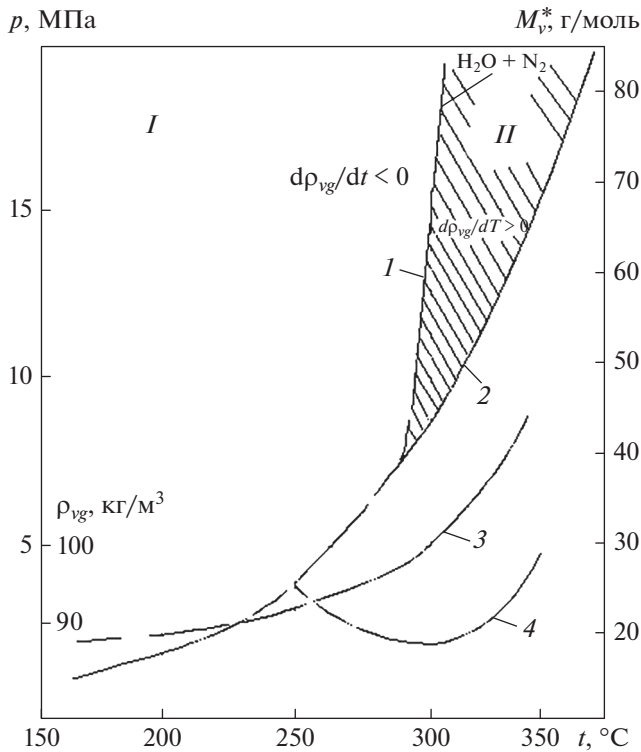
Важным фактором, определяющим распределение газа и интенсивность массообменных процессов, является естественная конвекция парогазовой среды, обусловленная неоднородностями состава и температуры смеси. При использовании тяжелого газа, для которого плотность парогазовой среды повышается с увеличением газосодержания, в стратифицированном объеме со стоками тепла происходит естественная конвекция среды, выравнивающая газосодержание в парогазовом объеме. В этом случае изменение концентраций наблюдается только в небольшом диффузионном слое вблизи зеркала испарения и у поверхностей конденсации.

Условие возникновения объемной естественной конвекции парогазовой среды для состояния пара на линии насыщения имеет вид

$$\left( \frac{dp_{vg}}{dt} \right)_s < 0; \quad \rho_{vg} = \rho_{vs}(t) + \frac{[p - p_s(t)] M_g}{R(t + 273)}, \quad (6)$$

где  $\rho_{vg}$ ,  $\rho_{vs}(t)$  – плотность парогазовой смеси и насыщенного пара соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $M_g$  – молярная масса газа, кг/моль.

Критерий возникновения объемной естественной конвекции зависит от давления и состава смеси. При малых газосодержаниях он может быть записан в виде  $M_g > M_v^*$ , где

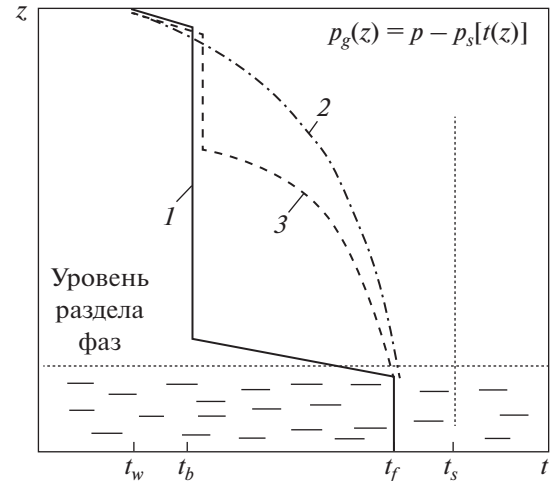


**Рис. 7.** Условия возникновения объемной естественной конвекции парогазовой смеси ( $H_2O + N_2$ ) в парогазоводяном объеме со стоками тепла.  $I$  – область существования объемной естественной конвекции парогазовой смеси;  $II$  – область отсутствия конвекции.  $I - t_b$ ;  $2 - p_s(t)$ ;  $3 - M_v^*$ ;  $4 - \rho_{vg}(t)$  при  $p = 16$  МПа

$$M_v^* = R(t + 273) / \left( \frac{d\rho_v}{d\rho_v} \right)_s - \text{условная молярная масса насыщенного пара, кг/моль (рис. 7).}$$

Следует отметить, что соотношение (6) определяет условия возникновения объемной естественной конвекции в стационарных условиях в парогазовой смеси, содержащей тяжелый газ, например азот или кислород, с молярной массой  $M_g > 0.018$  кг/моль. Для легких газов ( $H_2, He$ ) объемная естественная конвекция парогазовой смеси отсутствует.

На рис. 7 показаны области объемной естественной конвекции смеси  $H_2O + N_2$  в парогазоводяном объеме с уровнем раздела фаз. Из рисунка следует, что при высоких давлениях  $p > 8$  МПа для любого давления парозотной смеси существует граничная температура  $t_b$  (или граничное газосодержание), соответствующая изменению знака производной  $\left( \frac{d\rho_{vg}}{dt} \right)_s$ . При температурах ниже граничной температуры азот тяжелее пара и



**Рис. 8.** Распределение газа и температуры смеси по высоте парогазового объема ( $z$  – текущая высота ПГКД).  $I$  – тяжелый газ;  $2$  – легкий газ;  $3 - M_g \approx M_v^*$

характеризуется равномерным по высоте распределением, а при  $t > t_b$  азот ведет себя как легкий газ. Если парциальное давление газа достигает граничного значения, соответствующего началу объемной конвекции, профиль высотного газораспределения будет иметь две зоны – зону неравномерного распределения газа в нижней части и зону объемной конвекции в верхней части парогазового объема (рис. 8).

Для области, где объемная конвекция среды отсутствует, распределение газа по высоте определяют, решая дифференциальные уравнения массопереноса для газа и пара, записанные с учетом конденсации пара на боковой поверхности парогазового объема и наложения конвективного потока, связанного с выходом парогазовых пузырей из-под уровня раздела фаз.

### Неравновесность пара

Для теплогидравлических условий в атмосфере ПГКД со стоками тепла в стационарных режимах характерны пересыщение паровой фазы и объемная конденсация пара, которые зависят от соотношения интенсивности массообмена и теплообмена на стенках с учетом вклада излучения. В реальных условиях технических систем в парогазовой среде находится достаточное число центров конденсации, поэтому при возникновении условий пересыщения пара  $t < t_s(p_v)$  происходит объемная конденсация пара при температуре, близкой к температуре насыщения при парциальном давлении пара  $p_v$ .

Наличие условий пересыщения пара в парогазовой смеси позволяет использовать термозонды для измерения температуры и распределения газа в парогазовом объеме  $p_g = p - p_s(t)$ . Данный метод широко применялся в экспериментальных исследованиях на моделях ПГКД. Отсутствие перегрева парогазовой смеси в квазистационарных режимах было подтверждено в исследованиях, проведенных на крупномасштабной модели ПГКД: температура парогазовой смеси практически совпадала с температурой насыщения, которую определяли по парциальному давлению пара по результатам пробоотборов.

### ГАЗОПЕРЕНОС НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ФАЗ

Перенос газа между водой и парогазовым объемом может происходить в результате диффузионно-конвективного массообмена на поверхности раздела фаз, выноса газа с паровыми пузырями и возврата растворенного газа в воду с конденсатом.

Газы  $H_2$ ,  $He$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ , представляющие интерес в рамках данной статьи, являются слаборастворимыми в водном теплоносителе и характеризуются малыми мольными концентрациями растворенного вещества в жидкости  $Y_i < 10^{-3}$ . При этом для многокомпонентной газовой смеси допустимо использовать приближение независимой диффузии компонентов [1, 2].

Диффузионно-конвективный массоперенос газов на зеркале испарения из парогазового объема в основной поток жидкости происходит через охлажденный поверхностный слой жидкости, имеющий избыточную концентрацию растворенных газов. Расход газа, обусловленный массообменом на поверхности раздела фаз, рассчитывается по формуле

$$Q_{G1}^i = \rho_f \beta_i S (C_1^i - C_i), \quad (7)$$

где  $\rho_f$  – плотность воды,  $кг/м^3$ ;  $\beta_i$  – коэффициент массоотдачи при растворении  $i$ -го газа на поверхности раздела фаз (определяется по методу аналогии процессов тепло- и массообмена),  $м/с$ ;  $S$  – площадь поверхности,  $м^2$ ;  $C_1^i = H_i p_{g1} Y_i$  – концентрация газов в поверхностном слое жидкости, равная равновесной концентрации в соответствии с законом Генри,  $моль/кг$ ;  $H_i$  – коэффициент растворимости  $i$ -го газа в воде,  $моль/(кг \cdot МПа)$ ;  $p_{g1} = p_s(t_f - \Delta t_1)$  – парциальное давление газа на поверхности испарения,  $МПа$ ;  $Y_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента в газовой смеси на поверхности

испарения;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го компонента газа в потоке воды,  $моль/кг$ .

Поступление газов из парогазового объема в водный теплоноситель с конденсатом, образующимся на холодных поверхностях выше уровня раздела фаз, может быть определено в предположении насыщения конденсата до равновесной концентрации ( $C_c^i$ ):

$$C_c^i = H_i(t_c)[p - p_s(t_c)]Y_{ci}, \quad (8)$$

где  $Y_{ci}$  – мольная доля  $i$ -го компонента в газовой смеси на поверхности конденсации;  $t_c$  – температура конденсата,  $^{\circ}C$ .

Процесс дегазации воды вследствие выделения газа в паровые пузыри может быть инициирован не только наличием кипения в каналах активной зоны, но и достижением условий, при которых раствор оказывается перенасыщенным. Для многокомпонентной смеси условие газыделения и образования двухфазной смеси может быть записано в виде

$$\sum_i [C_i/H_i(t_f)] > p - p_s(t_f). \quad (9)$$

Выделение растворенного газа сопровождается испарением воды с образованием равновесных парогазовых пузырьков и приводит к увеличению массового паросодержания. Равновесные характеристики парогазоводяного потока определяются из условия равновесия воды и пара и достижения равновесной концентрации газа в воде. Балансные соотношения для массового паросодержания теплоносителя  $x$  и концентрации растворенного в воде  $i$ -го компонента газа  $C_i$  имеют следующий вид:

$$x = \frac{h - h'}{r} + \left( \frac{\partial h_f}{\partial p_g} \right)_p \frac{1}{r} \sum (C_i/H_i); \quad (10)$$

$$\left( \frac{\partial h_f}{\partial p_g} \right)_p = \frac{h' - h(t_f, p)}{p - p_s(t_f)}; \quad C_i = \frac{C_i^0}{1 + x(B_i - 1)},$$

где  $h$  – энтальпия теплоносителя в верхней камере,  $Дж/кг$ ;  $h'$  – энтальпия воды на линии насыщения при давлении  $p$ ,  $Дж/кг$ ;  $r$  – удельная теплота парообразования при температуре  $t_f$ ,  $Дж/кг$ ;  $C_i^0$  – концентрация растворенного газа на входе в активную зону,  $моль/кг$ ;  $B_i = \frac{10^6}{H_i \rho_{vs}(t_f) R (t_f + 273)}$  – безразмерный коэффициент равновесного распределения  $i$ -го компонента газа между паром и водой;  $\rho_{vs}(t_f)$  – плотность насыщенного пара при температуре  $t_f$ ,  $кг/м^3$ .

## ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ GARRIC

*Краткое описание программы*

Программа для ЭВМ GARRIC 2.2 [12] разработана для расчета характеристик ПГКД и распределения неконденсирующихся газов в I контуре водо-водяного реактора интегральной компоновки в стационарных режимах.

Программа рассчитывает распределение газов в парогазовом объеме и концентрации газов в теплоносителе, изменение паросодержания в подъемном участке в результате процессов газовой выделености, расход испарения и конденсации пара в ПГКД, определяет давление и общую загрузку газов в I контуре. В качестве рабочего газа рассматривается одно- или двухкомпонентная газовая смесь, содержащая любые из следующих газов:  $H_2$ , He,  $N_2$ ,  $O_2$ .

Основные допущения расчетной модели:

парогазовая смесь находится в тепловом и механическом равновесии;

растворенный газ не оказывает влияния на теплофизические свойства воды, массу и энергию жидкой фазы;

описание процессов массопереноса, включая испарение и конденсацию пара, растворение газа и дегазацию, основывается на использовании модели аналогии процессов тепло- и массообмена;

при определении температуры межфазной поверхности считаются справедливыми квазиравновесные условия для соприкасающихся фаз на поверхностях массообмена.

Расчет состава и плотности двух- и трехкомпонентных парогазовых смесей проводится в приближении идеального газа для газовых компонентов и закона Дальтона для смеси, а также может выполняться с использованием вириального уравнения состояния со вторым вириальным коэффициентом [5], позволяющего учесть отличия реальных свойств парогазовой смеси от модели идеального газа и закона Дальтона. Свойства водяного пара определяются по табличным данным.

Для расчета теплофизических свойств газовых компонентов и коэффициентов растворимости газов в воде применяются аппроксимационные зависимости, основанные на экспериментальных данных.

Для аммиачного водно-химического и газового режимов I контура используется эмпирическая формула, связывающая равновесные концентрации аммиака, водорода и азота в воде. Под действием радиационно-химических процессов в I контуре устанавливается равновесное состояние между компонентами водно-химического и газового ре-

жимов. Учитывается образование водорода и азота при разложении аммиака.

Распределение газов в объеме компенсатора давления находится при решении уравнений диффузионно-конвективного массопереноса в предположении отсутствия неравномерности газосодержания по сечению объема с учетом естественной и вынужденной конвекции парогазовой среды. Учитывается влияние выходящего из-под уровня раздела фаз парогазового потока на распределение газа и на интенсивность испарения воды с поверхности раздела фаз.

Расчет процессов дегазации может выполняться в модели как равновесной, так и неравновесной дегазации с учетом кинетики выделения газа в парогазовые пузыри или растворения выходящего из них газа в воде.

При описании процессов растворения и выделения газа из жидкой фазы в двухфазном потоке предполагается, что интенсивность массопереноса ограничена процессом диффузии растворенного газа в жидкой фазе.

При расчете процессов газопереноса между парогазовым объемом и водным теплоносителем описываются дегазация теплоносителя (10), возврат газов в воду с конденсатом (9) и в результате массообмена на границе раздела фаз (8) и захват парогазовых пузырей в опускной участок. Учитывается неравномерность состава двухкомпонентной газовой смеси в компенсаторе давления между парогазовым объемом (в среднем) и межфазной поверхностью, обусловленная различием коэффициентов диффузии газовых компонентов в паре.

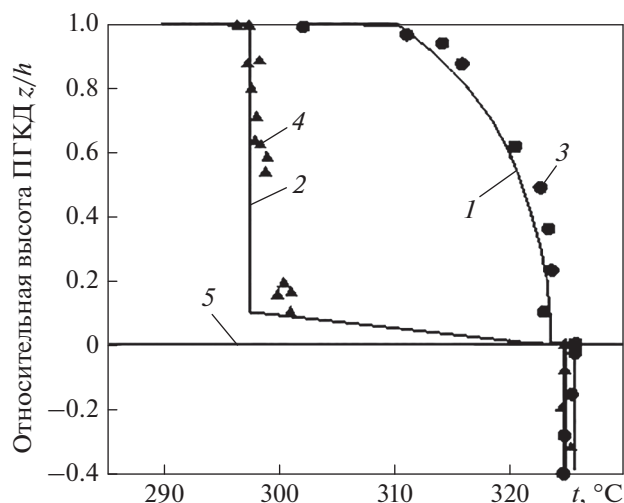
В качестве исходных данных используются геометрические характеристики ПГКД и конфигурация циркуляции теплоносителя, а также результаты теплогидравлического расчета контура циркуляции – расход и выходная энтальпия теплоносителя.

*Верификация программы GARRIC 2.2*

Верификация/валидация программы GARRIC 2.2 выполнена как по отдельным локальным физическим явлениям, так и по результатам интегральных экспериментов на теплофизических стендах ОКБМ и реакторных установках отрасли, включая модели интегрального реактора разного масштаба [стенды 1385 (ОКБМ) и КМР-2 (НПО ЦКТИ)] и крупномасштабную модель ПГКД – стенд Л-800 КОМПЕНСАТОР (ОКБМ) [5–7].

Верификация программы по отдельным физическим явлениям включала проверку расчета теплофизических свойств газов и парогазовых смесей на данных [13, 14], описания массообмена





**Рис. 9.** Распределение температуры парогазовой среды по относительной высоте ПГКД в экспериментах с азотом при температуре теплоносителя 325°C ( $h$  – высота ПГКД).  $p_g$ , МПа, расчет: 1 – 0.88; 2 – 9.03; эксперимент: 3 – 0.88; 4 – 9.03; 5 – уровень раздела фаз

при растворении газа в воде, тепломассообмена при испарении/конденсации пара (см. рис. 3 и 5), а также равновесия между компонентами аммиачного водно-химического режима I контура.

При анализе интегральных экспериментов на моделях ПГКД проверялся расчет распределения газа в парогазовом объеме, общей загрузки газов, стационарных концентраций газов в воде I контура. На рис. 9 представлены результаты верификации кода GARRIC 2.2 в опытах, проведенных на стенде Л-800 – крупномасштабной модели ПГКД ( $V = 5 \text{ м}^3$ ,  $d = 1.5 \text{ м}$ ).

Результаты верификации/валидации на локальных и интегральных экспериментах свидетельствуют об адекватном воспроизведении кодом GARRIC 2.2 процессов тепломассообмена и газораспределения в неравновесном пароводяном объеме с уровнем раздела фаз, содержащем неконденсирующийся газ.

## ВЫВОДЫ

1. Методика расчета характеристик неравновесного пароводяного объема с уровнем раздела фаз, содержащего неконденсирующийся газ, включает в себя определение теплофизических свойств многокомпонентной парогазовой смеси, описание распределения неконденсирующихся газов в парогазовом объеме, растворенных газов в жидкой фазе, расчет процессов тепломассообмена через поверхность раздела фаз и конденсации пара на холодных поверхностях.

2. Методика расчета реализована в программе для ЭВМ GARRIC 2.2, которая прошла обширную верификацию/валидацию на экспериментальных данных и позволяет рассчитывать тепломассообмен и газораспределение в неравновесном пароводяном объеме с неконденсирующимся газом (в парогазовом компенсаторе давления).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шервуд Т., Пикфорд Р., Уилки Ч. Массопередача: пер. с англ. М.: Химия, 1982.
2. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. М.: Химия, 1974.
3. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справ. / под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982.
4. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Фальков А.А., Балунов Б.Ф. Исследование конденсации пара из паровоздушной смеси на стенках локализирующего объема // Тезисы докл. Междунар. конф. “Теплофизика-92”. Обнинск, Россия, 20–22 окт. 1992 г.
6. Верификация программы анализа аварий с потерей теплоносителя интегральных реакторов УРОВЕНЬ/МБ-3 / А.А. Фальков, А.Н. Лепехин, В.С. Кууль, О.Б. Самойлов // Труды междунар. конф. “Теплофизика-95”. Обнинск, Россия, 21–24 нояб. 1995 г. Т. 2. С. 232–239.
7. Experimental assessment of computer codes used for safety analysis of integral reactors / A.A. Falkov, V.S. Kuul, O.B. Samoilov, A.N. Lepekhin, G.N. Polyansky // Proc. of the NURETH-7. Saratoga Springs, USA, 10–15 Sept. 1995. V. 3. P. 2384–2393.
8. Uchida H., Oyama A., Togo Y. Evaluation of post-incident cooling systems of light-water power reactors // Proc. of the Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy. 1965. V. 13. P. 93–104.
9. Lee Y.-G., Kim J.-W., Park G.-C. Experimental study on wall condensation with noncondensables in steam-gas pressurizer // Proc. of the NURETH-13. Kanazawa, Japan, 27 Sept.–2 Oct. 2009. P. 1315.
10. Condensation heat transfer characteristic in the presence of noncondensable gas on natural convection at high pressure / J.-W. Kim, Y.-G. Lee, H.-K. Ahn, G.-C. Park // Nucl. Eng. Des. 2009. V. 239. Is. 4. P. 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.12.011>
11. Martin J., Migot B. Experimental study of the surface evaporation rate of a heated water pool at high temperature using infrared thermography // Proc. of the NURETH-18. Portland, USA, 18–22 Aug. 2019. P. 2302–2313.
12. Фальков А.А., Кулаков И.Н., Слепнева Е.А. Программа GARRIC 2.2. Расчет характеристик парогазового компенсатора давления и распределения неконденсирующегося газа в первом контуре интегрального реактора. Аттестационный паспорт № 352 от 17.04.2014.
13. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: справ. пособие. Л.: Химия, 1982.
14. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.

## Heat and Mass Transfer and Gas Distribution in a Steam-Water Volume with Noncondensable Gas

A. A. Falkov<sup>a, \*</sup>, I. N. Kulakov<sup>a</sup>, and E. A. Slepneva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Afrikantov Experimental Design Bureau of Mechanical Engineering (OKBM), Nizhny Novgorod, 603074 Russia*

*\*e-mail: okbm@okbm.nnov.ru*

**Abstract**—Heat and mass transfer and gas distribution in a nonequilibrium steam-water volume with a phase separation level containing a noncondensable gas are considered. These processes relate primarily to the steam–gas pressure compensator (SGPC) of the integrated reactor and determine the behavior of the SGPC in normal and emergency modes. Similar processes occur in a pressurized water reactor and in a containment volume at the final stage of emergency regimes with loss of coolant. For low-power reactors of the RITM-200 type with a gas pressure compensator, it is necessary to take into account the phenomena associated with the behavior of noncondensable gases. A brief description is given of the GARRIC 2.2 computer program for calculating the distribution of noncondensable gases in the primary circuit and the characteristics of the SGPC of a pressurized water reactor of an integrated layout. The description of the processes of heat and mass transfer and gas distribution is based on the results of experiments carried out on SGPC models in a wide range of parameters and gas contents. Calculation of mass transfer, including vapor evaporation and condensation, and gas transfer on the mirror is carried out using the analogy model of heat and mass transfer under conditions of natural convection of the medium. The results of the verification of the GARRIC 2.2 program on the basis of experimental data obtained in the study of vapor condensation on the walls, evaporation on the free surface of water, and gas distribution in the vapor–gas volume at full-scale parameters are presented. The GARRIC 2.2 program was certified by Rostekhnadzor in 2014.

**Keywords:** pressurized water power reactor, pressure compensator, noncondensable gas, gas–vapor mixture, gas distribution, heat and mass transfer, evaporation, condensation, gas dissolution, phase separation level