

УДК 621.311.22

## **Эмпирическое обеспечение ячеечных моделей тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции растворенного кислорода в элементах атмосферных деаэраторов**

Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: lgv83@yandex.ru

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса:** Известны ячеечные модели тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции растворенного кислорода в деаэрационных элементах различных конструкций: струйных отсеках, непроваляных барботажных листах, затопленных барботажных устройствах. Для практического применения этих моделей необходимо разработать эмпирическое обеспечение, включающее методы расчета площади поверхности контакта фаз, коэффициентов тепло- и массопередачи.

**Методы и материалы:** Площадь поверхности контакта фаз в деаэрационных элементах рассчитывается известными методами. Разработка эмпирического обеспечения моделей в части коэффициентов тепло- и массопередачи выполнена на основе результатов проведенных экспериментальных исследований методами теории подобия процессов тепломассообмена и математической статистики.

**Результаты:** С использованием данных, полученных в ходе экспериментальных исследований на деаэраторах различных конструкций, разработано эмпирическое обеспечение ячеечных моделей процессов тепломассообмена при деаэрации воды отдельно для струйных отсеков, непроваляных барботажных листов и затопленных барботажных устройств деаэрационных баков, включающее методы расчета площади поверхности контакта фаз и критериальные уравнения для определения коэффициентов тепло- и массопередачи.

**Выводы:** Разработанное эмпирическое обеспечение ячеечных моделей характеризуется приемлемой для решения практических задач точностью и обеспечивает возможность проведения расчетных исследований при режимной наладке и проектировании деаэрационных установок.

**Ключевые слова:** деаэрация, струйный отсек, барботажная ступень, тепломассообмен, ячеечная модель, десорбция, теория подобия, регрессия, математическая статистика, математическое моделирование.

## **Empirical support for cell models of heat and mass transfer in the system «water – water vapour» and desorption of dissolved oxygen in atmospheric deaeration units**

G.V. Ledukhovsky, V.P. Zhukov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: lgv83@yandex.ru

### **Abstract**

**Background:** There are several models of heat and mass transfer in the system «water – water vapour» and desorption of dissolved oxygen in deaeration units of different types: jet-type units, non-perforated bubbling plates, flooded bubble devices. For these models to be practically applied, they need empirical support including methods of calculating phase contact area and heat and mass transfer coefficients.

**Materials and methods:** The area of phase contact in deaeration units was calculated by the known methods. The empirical support for the models including heat and mass transfer coefficients was developed based on the results of the conducted experimental studies by the methods of heat and mass transfer similarity theory and mathematical statistics.

**Results:** By using the data obtained by experimental studies of deaerators of different types, the authors have developed empirical support of cell models of heat and mass transfer processes for water deaeration separately for jet-type units, non-perforated bubbling plates and flooded bubble devices of deaerating tanks including methods of calculating phase contact area and criteria equations for determining heat and mass transfer coefficients.

**Conclusions:** The developed empirical support of cell models is accurate enough to be used to solve practical problems and makes it possible to conduct computational studies at the stage of deaeration unit performance adjustment and design.

**Key words:** deaeration, jet-type unit, bubble stage, heat and mass transfer, cell model, desorption, similarity theory, regression, mathematical statistics, mathematical modelling.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.3.005-013

**Введение.** Ранее в рамках подхода матричной формализации расчета процессов тепло- массообмена [1] разработаны ячеечные модели элементов, работающих при непосредственном

контакте воды и водяного пара. Применительно к деаэрационному элементу расчет включает четыре этапа. На первом этапе выполняется декомпозиция модели с определением числа расчетных ячеек. При этом используются методические рекомендации, изложенные в [1]. Каждая ячейка представляется условно в виде теплообменника с одним входом и выходом горячего и холодного теплоносителей. На втором этапе на основании схемы коммутации ячеек предварительно определяются расходы теплоносителей по расчетным ячейкам без учета фазовых переходов. На третьем этапе рассматривается теплообмен между паром и водой и на основании этого теплового расчета с учетом перехода при конденсации пара в воду корректируются расходы теплоносителей по ячейкам. На четвертом этапе выполняется собственно расчет процесса деаэрации. В качестве движущей силы на втором этапе рассматривается разница температур между водой и паром, на четвертом этапе – разница текущей и равновесной концентраций газа в одной из фаз. Считается, что в ступени одновременно протекают следующие процессы: теплообмен между паром и водой; массообмен между паром и водой; массообмен между газом, растворенным в воде, и газом, содержащимся в паровой фазе. В качестве определяющей координаты выбирается поверхность контакта фаз  $F$ . Из баланса энергии и массы через элементарную поверхность  $dF$  получена система дифференциальных уравнений, описывающих изменение температурного напора  $\tau$ , массового расхода теплоносителей  $G$  и концентрации газа в воде ( $c_{g2}$ ) и паре ( $c_{g1}$ ) вдоль определяющей координаты  $F$  [1].

Математические модели в рамках рассматриваемого подхода унифицированы по входным и выходным параметрам, методам синтеза модели объекта (системы) из моделей элементов (подсистем), а также методам нахождения решения [1]. Для эффективного применения данного подхода при решении практических задач необходимо разработать эмпирического обеспечения ячейчных моделей и методов расчета параметров идентификации для различных практически значимых случаев.

Задачей настоящего этапа работы является разработка эмпирического обеспечения ячейчных моделей процессов тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции растворенного кислорода в деаэрационных элементах различных конструкций: струйных отсеках, непривальных барботажных листах, затопленных барботажных устройствах деаэрационных баков.

**Методы исследования.** Разработка эмпирического обеспечения моделей проводится с использованием полученных ранее экспериментальных данных по деаэраторам ДСА-300 и ДА-300м, характеризующих работу рассматри-

ваемых деаэрационных элементов [2]. Порядок разработки эмпирического обеспечения заключается в выборе существующего или разработке нового метода расчета площади поверхности контакта фаз в деаэрационном элементе с последующим подбором таких значений коэффициентов теплопередачи и массопередачи по растворенному кислороду, которые обеспечивали бы совпадение расчетных и экспериментальных значений температуры воды и массовой концентрации растворенного в воде кислорода на выходе элемента при известных параметрах режима его работы в условиях каждого опыта.

Полученные при идентификации данные используются при разработке эмпирического обеспечения математических моделей, состоящей в выборе типа критериальных уравнений, их спецификации и нахождении значений соответствующих коэффициентов регрессии. При этом используются методы теории подобия процессов тепломассообмена, а также методы статистической обработки данных.

**Результаты исследования.** Рассмотрим результаты идентификации ячейчных моделей деаэрационных элементов и разработки соответствующего эмпирического обеспечения.

**А. Струйные отсеки.** Для случая чисто струйного режима течения воды в отсеке известно уравнение С.С. Кутателадзе [3], позволяющее рассчитать площадь межфазной поверхности  $F_{\text{стр}}$ , м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{стр}} = \frac{2\pi n d W_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2} g} \left[ \left( 1 + \frac{2\mu^2 g L}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right]; \quad (1)$$

$$L = 3W_{\text{ж}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}^{\text{вх}} d^3}{\sigma_{\text{ж}}}}, \quad (2)$$

где  $n$  – число отверстий струеобразующей тарелки;  $d$  – диаметр отверстий, м;  $W_{\text{ж}}$  – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки, м/с;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – высота зоны чисто струйного режима течения воды, м;  $\rho_{\text{ж}}^{\text{вх}}$  – плотность воды на входе в отсек, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_{\text{ж}}$  – коэффициент поверхностного натяжения воды при средней температуре воды, Н/м.

Ранее [2] нами было показано, что струйные отсеки современных деаэраторов работают в условиях струйно-капельного гидродинамического режима. После распада струи в зоне капельного режима площадь поверхности контакта фаз увеличивается. Для учета этого эффекта нами предложено вводить в уравнение (1) поправочный коэффициент  $k_{\text{кап}}$ , значение которого оценено по результатам анализа фотографических изображений картины течения воды в отсеке на уровне от 1,4 до 1,6 (в среднем 1,5) [4]. При этом уравнение (1) следует применять к высоте зоны капельного режима, т.е.  $(H - L)$ , где  $H$  – полная высота струйного отсека, м. В этом случае площадь поверхности контакта фаз в зоне капельного режима  $F_{\text{кап}}$ , м<sup>2</sup>, вычисляется как

$$F_{\text{кап}} = k_{\text{кап}} \frac{2\pi n d W_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2} g} \left[ \left( 1 + \frac{2\mu^2 g (H-L)}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right], \quad (3)$$

а суммарная площадь поверхности контакта фаз в струйном отсеке  $F, \text{м}^2$ , составит

$$F = F_{\text{стр}} + F_{\text{кап}}. \quad (4)$$

Исходные функциональные зависимости для критериальных уравнений, описывающих связь безразмерных коэффициентов теплопередачи (критерия Нуссельта  $Nu$ ) и массопередачи по растворенному кислороду (критерия Шервуда  $Sh$ ) с определяющими критериями приняты по результатам анализа опубликованных данных о показателях работы струйных отсеков [2] в следующем виде:

$$Nu = f(K_L; Lap; Fr; Pr; K); \quad (5)$$

$$Sh = f(K_L; Lap; Fr; Sc; K); \quad (6)$$

$$Nu = \frac{kd}{\lambda_{\text{ж}}}; \quad Lap = \frac{\rho_{\text{ж}} W_n^2 d}{\sigma_{\text{ж}}}; \quad Fr = \frac{W_{\text{ж}}^2}{gd};$$

$$Pr = \frac{v_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}}; \quad K = \frac{r}{c_{\text{ж}}(t_2 - t_1)}; \quad Sh = \frac{k_m d}{D_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}; \quad Sc = \frac{v_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}},$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – средняя плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $K_L, Lap, Fr, Pr, K$  и  $Sc$  – критерии геометрического подобия, Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе и Шмидта соответственно;  $k$  – средний по поверхности контакта фаз коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;  $\lambda_{\text{ж}}$  – средний коэффициент теплопроводности воды,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $W_n$  – средняя скорость пара в отсеке,  $\text{м/с}$ ;  $v_{\text{ж}}$  и  $a_{\text{ж}}$  – средние коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности воды соответственно,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $r$  – скрытая теплота парообразования при среднем давлении в отсеке,  $\text{кДж/кг}$ ;  $c_{\text{ж}}$  – средняя массовая изобарная теплоемкость воды,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $t_1$  и  $t_2$  – температура воды на входе и выходе отсека соответственно,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_m$  – средний по поверхности контакта фаз коэффициент массопередачи по растворенному кислороду,  $\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$ ;  $D_{\text{ж}}$  – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде при средней температуре воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Для идентификации моделей теплообмена использованы экспериментальные данные по четырем различным струйным отсекам деаэраторов в 55 опытах, для идентификации моделей десорбции растворенного кислорода – в 39 опытах [2]. При этом ранее [4] в качестве критерия геометрического подобия  $K_L$  рассматривалось отношение  $H$  к  $d$ . В данном же случае будем вычислять этот критерий как  $K_L = H/L$ , что, как будет показано далее, дает лучшие результаты в сравнении с примененным ранее подходом.

Исходные критериальные уравнения (5) и (6) записаны в мультипликативной форме. После их логарифмирования использованы методы множественной линейной регрессии. При этом спецификация уравнений статистическими методами (с определением матрицы коэффициентов парной корреляции) не проводится, поскольку состав влияющих факторов в уравнениях (5), (6)

определен на основе теоретических соображений о механизме процесса [2]. Значимость каждого из критериев, включенных в уравнения (5), (6), докажем после определения коэффициентов регрессии.

Итоговые критериальные уравнения для рассматриваемого случая получены в следующем виде:

$$Nu = 94,51 \cdot 10^3 \cdot K_L^{-1,40} Lap^{0,06} Fr^{-0,45} Pr^{-2,16} K^{-0,84}, \quad (7)$$

$$Sh = 9,50 \cdot 10^{-5} K_L^{-0,19} Lap^{0,26} Fr^{0,37} Sc^{-0,65} K^{-1,07}. \quad (8)$$

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений критериев Нуссельта и Шервуда по всем рассмотренным струйным отсекам выполнено на рис. 1. Результаты статистической проверки точности и адекватности уравнений (7), (8), а также существенности включенных в уравнения факторов сведены в табл. 1.

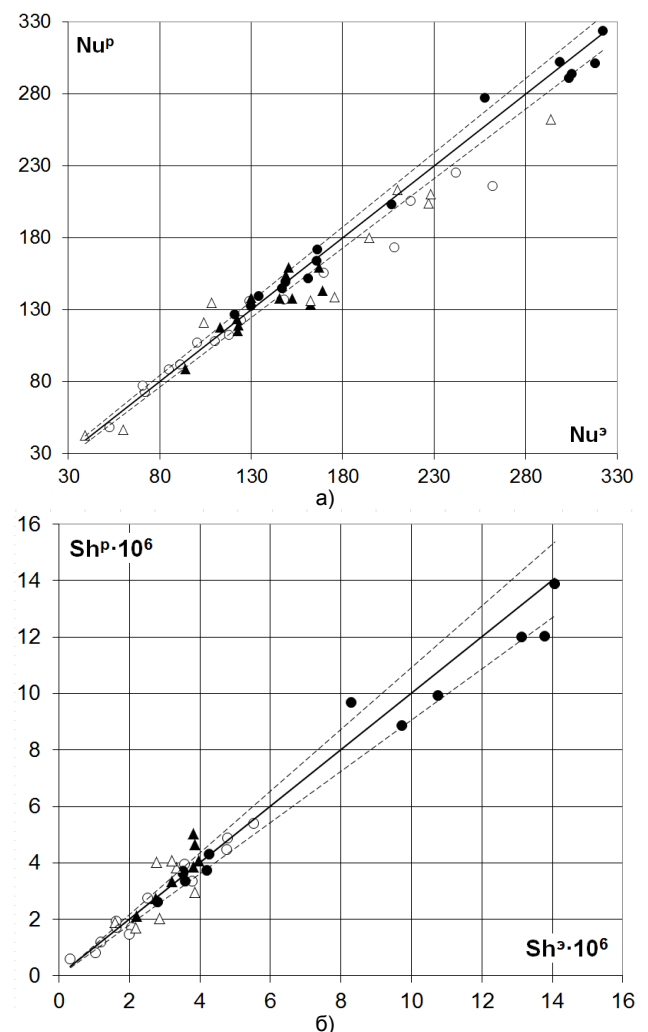


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения критерия Нуссельта (а) и критерия Шервуда (б) для струйных отсеков: индексы «э» и «р» указывают на экспериментальные и расчетные значения критериев соответственно; сплошная линия – совпадение экспериментальных и расчетных значений; пунктирные линии – границы 95 %-ного доверительного интервала, обусловленного погрешностью измерения параметров в условиях опытов; точки – результаты расчета по уравнениям (7), (8):  $\circ$  и  $\bullet$  – соответственно первая и вторая по ходу воды зоны верхнего струйного отсека деаэратора ДА-300м;  $\blacktriangle$  и  $\triangle$  – соответственно верхний и нижний струйные отсеки деаэратора ДСА-300

Полученные уравнения охватывают следующие диапазоны изменения параметров, характеризующих условия работы струйных отсеков:  $d$  – от 0,006 до 0,01 м;  $H$  – от 0,3 до 0,95 м; среднее абсолютное давление пара в отсеке от 109 до 137 кПа;  $W_{ж}$  – от 0,2 до 3,0 м/с;  $W_{п}$  – от 0,8 до 48,2 м/с.

Таблица 1. Показатели качества критериальных уравнений (7), (8)

Наименование показателя	Значение показателя для уравнений	
	(7)	(8)
Множественное корреляционное отношение $R$	0,970	0,959
Множественное корреляционное отношение $\bar{R}$ (с учетом поправки на число степеней свободы)	0,967	0,953
Критерий Фишера	15,2	10,9
Критическое значение критерия Фишера	1,59	1,76
Адекватно ли уравнение?	Да	Да
Среднеквадратическое отклонение расчетных значений от экспериментальных, %	9,5	19,1
Частные критерии корреляции при исключении факторов:		
– $K_L$	0,780	0,403
– $Lap$	0,370	0,833
– $Fr$	0,539	0,403
– $Pr (Sc)$	0,778	0,424
– $K$	0,954	0,812
Критерий Стьюдента для частных критериев корреляции при исключении факторов:		
– $K_L$	8,7	2,5
– $Lap$	2,8	8,7
– $Fr$	4,5	2,5
– $Pr (Sc)$	8,7	2,7
– $K$	22,3	8,0
Критическое значение критерия Стьюдента	2,3	2,4
Значимо ли значение частного критерия корреляции при исключении факторов:		
– $K_L$	Да	Да
– $Lap$	Да	Да
– $Fr$	Да	Да
– $Pr (Sc)$	Да	Да
– $K$	Да	Да
Частные критерии Фишера для факторов:		
– $K_L$	76,1	6,4
– $Lap$	7,8	74,9
– $Fr$	20,1	6,4
– $Pr (Sc)$	75,2	7,2
– $K$	496,5	63,7
Критическое значение частных критериев Фишера	4,0	4,1
Значим ли фактор в модели:		
– $K_L$	Да	Да
– $Lap$	Да	Да
– $Fr$	Да	Да
– $Pr (Sc)$	Да	Да
– $K$	Да	Да

## Б. Непровальные барботажные листы.

Идентификация моделей тепломассообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции из воды растворенного кислорода выполнена на основе экспериментальных данных, полученных нами ранее применительно к непровальному барботажному листу деаэрационной колонки КДА-300м [2]. При этом площадь межфазной поверхности на барботажном листе  $F$  вычисляется через удельную площадь межфазной поверхно-

сти  $f$ ,  $m^2/m^3$ , которая определяется в соответствии с опубликованными данными [5–9]:

$$f = 6\varphi/d_n; \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{\sqrt{Fr_{6п}}}{1 + \sqrt{Fr_{6п}}}; \quad Fr_{6п} = \frac{W_{пp}^2}{gh_d};$$

$$h_d = (0,8 - 0,117\rho_n W_{пp}^2) \cdot h_0;$$

$$d_n = 7,3 \cdot 10^{-3} Re_{0,n}^{-0,05}; \quad Re_{0,n} = \frac{W_0 d_0 \rho_n}{\mu_n},$$

где  $\varphi$  – газосодержание (в данном случае – паросодержание) двухфазного слоя на листе;  $d_n$  – средний диаметр паровых пузырьков в двухфазном слое, м;  $Fr_{6п}$  – критерий Фруда для барботажного листа;  $W_{пp}$  – приведенная (к площади листа) скорость пара, м/с;  $h_d$  – высота динамического слоя жидкости на листе, м;  $h_0$  – высота слоя жидкости на листе с заданной высотой переливного порога без барботажа, м;  $Re_{0,n}$  – критерий Рейнольдса в отверстиях листа;  $W_0$  – скорость пара в отверстиях листа, м/с;  $d_0$  – диаметр отверстий листа, м;  $\mu_n$  – динамическая вязкость пара, Па·с.

Исходный вид функциональных зависимостей для расчета безразмерных критериев теплопередачи (критерия Нуссельта) и массопередачи (критерия Шервуда) при непровальном режиме работы барботажного листа принят по результатам теоретических исследований С.С. Кутателадзе [10]:

$$Nu = f \left( Fr_6; \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right); \quad (10)$$

$$Sh = f \left( Fr_6; \frac{\rho_n}{\rho_{ж}}; \frac{G_{ж}}{G_n}; \frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2}; \frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}} \right); \quad (11)$$

$$Fr_6 = \frac{G_n}{\rho_n F_6 \sqrt{gh_{66}}}; \quad h_{66} = \frac{1}{2g} \left( \frac{4G_B}{\pi d_0^2 n \mu \rho_{ж}} \right)^2,$$

где  $Fr_6$  – критерий Фруда для условий выхода пара из отверстий барботажного листа;  $\rho_n$  – плотность пара,  $kg/m^3$ ;  $G_{ж}$  и  $G_n$  – массовые расходы жидкости и пара соответственно,  $kg/c$ ;  $F_6$  – площадь поверхности барботажного листа,  $m^2$ ;  $h_{66}$  – уровень воды на листе, который установился бы при отсутствии пропуска пара через отверстия листа, м;  $\rho_n$  – абсолютное давление пара под листом, Па;  $n$  – количество отверстий листа;  $\mu$  – коэффициент расхода; при расчете критериев Нуссельта и Шервуда в качестве определяющего размера используется  $d_0$ .

Критериальные уравнения, соответствующие (10), (11), представлены в мультипликативной форме:

$$Nu = m_0 \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{m_1} Fr_6^{m_2}; \quad (12)$$

$$\text{Sh} = s_0 \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{s_1} \text{Fr}_6^{s_2} \left( \frac{G_{ж}}{G_n} \right)^{s_3} \times \left( \frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2} \right)^{s_4} \left( \frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}} \right)^{s_5}, \quad (13)$$

где  $m_i$  и  $s_i$  – коэффициенты регрессии; в соответствии с выводами С.С. Кутателадзе [10],  $m_1 < 0$ ,  $s_1 < 0$ ,  $s_2 < 0$ , а  $m_2 = -1$ .

Спецификация уравнения (12) статистическими методами не проводится, поскольку в [10] показано, что оба определяющих критерия для условий работы непробальных барботажных листов являются значимыми.

В отношении уравнения (13) спецификация необходима, так как в [10] указано, что последние два определяющих критерия оказываются значимыми только при существенных изменениях давления в аппарате (например, при переходе от деаэраторов атмосферного давления к деаэраторам повышенного давления). В табл. 2 приведена матрица коэффициентов парной корреляции для уравнения (13) после его логарифмирования. Проверка значимости коэффициентов парной корреляции по критерию Стьюдента не проводится ввиду малости размера выборки (в распоряжении имеются данные лишь по девяти опытам).

Анализ полученных данных позволяет заключить, что факторы  $\ln\left(\frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2}\right)$  и  $\ln\left(\frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}}\right)$  не связаны с функцией отклика, что согласуется с выводами С.С. Кутателадзе [10], поскольку в данном случае рассматривается деаэратор атмосферного давления, работающий при изменении давления под барботажным листом в узком диапазоне. Среди оставшихся критериев  $\ln(\text{Fr}_6)$  и  $\ln\left(\frac{G_{ж}}{G_n}\right)$  имеют тесную связь между собой (коэффициент парной корреляции  $-0,92$ ), что обусловлено объективной причиной: расход пара

через отверстия листа имеет определяющее влияние на оба критерия, а  $h_{66}$  в данном случае меняется незначительно. Учитывая практически одинаковую тесноту связи рассматриваемых критериев с функцией отклика (коэффициенты парной корреляции по модулю 0,65 и 0,63), а также вид критериального уравнения (12), для дальнейших расчетов сохраним в уравнении (13) критерий Фруда, исключив из него  $\ln\left(\frac{G_{ж}}{G_n}\right)$ .

С учетом сделанных замечаний и результатов проведенного статистического анализа искомые критериальные уравнения получены в следующем виде:

$$\text{Nu} = 85,38 \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{-0,45} \frac{1}{\text{Fr}_6}; \quad (14)$$

$$\text{Sh} = 7,14 \cdot 10^{-14} \cdot \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{-2,44} \text{Fr}_6^{-0,71}. \quad (15)$$

Результаты статистической проверки точности и адекватности уравнений (14), (15), а также существенности включенных в уравнения факторов приведены в табл. 3. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений критериев Нуссельта и Шервуда выполнено на рис. 2.

Уравнения (14), (15) имеют следующие границы применимости:  $d_0 = 0,007$  м;  $\rho_n$  – от 114 до 150 кПа;  $\text{Re}_{0,n} > 7000$ .

**В. Затопленное барботажное устройство деаэраторного бака.** Рассматривается барботажное устройство в виде затопленного перфорированного коллектора, расположенного вдоль нижней образующей деаэраторного бака. Ранее [11] нами разработано эмпирическое обеспечение модели десорбции растворенного кислорода для этого случая с использованием экспериментальных данных по деаэратору ДСА-300. В рамках настоящего этапа работы привлечен дополнительный экспериментальный материал по деаэратору ДА-300м.

Таблица 2. Матрица коэффициентов парной корреляции для уравнения (13) после его логарифмирования

Факторы / функция отклика	$\ln(\text{Sh})$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$	$\ln(\text{Fr}_6)$	$\ln\left(\frac{G_{ж}}{G_n}\right)$	$\ln\left(\frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2}\right)$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}}\right)$
$\ln(\text{Sh})$	1	-0,69	-0,65	0,63	-0,14	-0,11
$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$	-0,69	1	-0,22	0,04	-0,27	-0,27
$\ln(\text{Fr}_6)$	-0,65	-0,22	1	-0,92	0,43	0,40
$\ln\left(\frac{G_{ж}}{G_n}\right)$	0,63	0,04	-0,92	1	-0,36	-0,32
$\ln\left(\frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2}\right)$	-0,14	-0,27	0,43	-0,36	1	1,00
$\ln\left(\frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}}\right)$	-0,11	-0,27	0,40	-0,32	1,00	1

Для расчета удельной площади поверхности контакта фаз  $f$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ , используется предложенная нами ранее [11] модель движения воды в деаэрационном баке с барботажным устройством. Модель реализуется средствами программного комплекса для моделирования течений жидкости FlowVision. С использованием этой модели определяются параметры движения теплоносителей (воды, пара) при заданных геометрических характеристиках деаэрационного бака, барботажного коллектора, расходах и условиях подачи теплоносителя в деаэрационное устройство. По полученным данным вычисляется параметр циркуляции воды в баке, представляющий собой отношение расходной и циркуляционной составляющих скорости потока воды. Этот параметр позволяет определить эволюцию площади межфазной поверхности с учетом характеристик циркуляции воды в баке.

Таблица 3. Показатели качества критериальных уравнений (14), (15), (17)

Наименование показателя	Значение показателя для уравнений		
	(14)	(15)	(17)
Множественное корреляционное отношение R	0,986	0,991	0,991
Множественное корреляционное отношение R (с учетом поправки на число степеней свободы)	0,975	0,990	0,990
Критерий Фишера	20,34	50,56	51,51
Критическое значение критерия Фишера	2,8	4,2	2,2
Адекватно ли уравнение?	Да	Да	Да
Среднеквадратическое отклонение расчетных значений от экспериментальных, %	3,3	2,0	5,7
Частные критерии корреляции при исключении факторов:			
– отношение плотностей	0,632	0,806	–
– $Fr_6$	0,960	0,965	0,822
– $d_6$	–	–	0,985
Критерий Стьюдента для частных критериев корреляции при исключении факторов:			
– отношение плотностей	2,7	3,3	–
– $Fr_6$	11,4	9,1	6,1
– $d_6$	–	–	24,2
Критическое значение критерия Стьюдента	2,6	3,0	2,4
Значимо ли значение частного критерия корреляции при исключении факторов:			
– отношение плотностей	Да	Да	–
– $Fr_6$	Да	Да	Да
– $d_6$	–	–	Да
Частные критерии Фишера для факторов:			
– отношение плотностей	7,3	11,2	–
– $Fr_6$	129,3	82,2	37,6
– $d_6$	–	–	584,7
Критическое значение частных критериев Фишера	4,8	6,0	4,4
Значим ли фактор в модели:			
– отношение плотностей	Да	Да	–
– $Fr_6$	Да	Да	Да
– $d_6$	–	–	Да

Предложенная модель движения позволила рассчитать обобщенную зависимость  $f$  от удель-

ного расхода пара на барботаж  $d_6$ , кг/т (килограмм пара на тонну деаэрированной воды) (рис. 3).

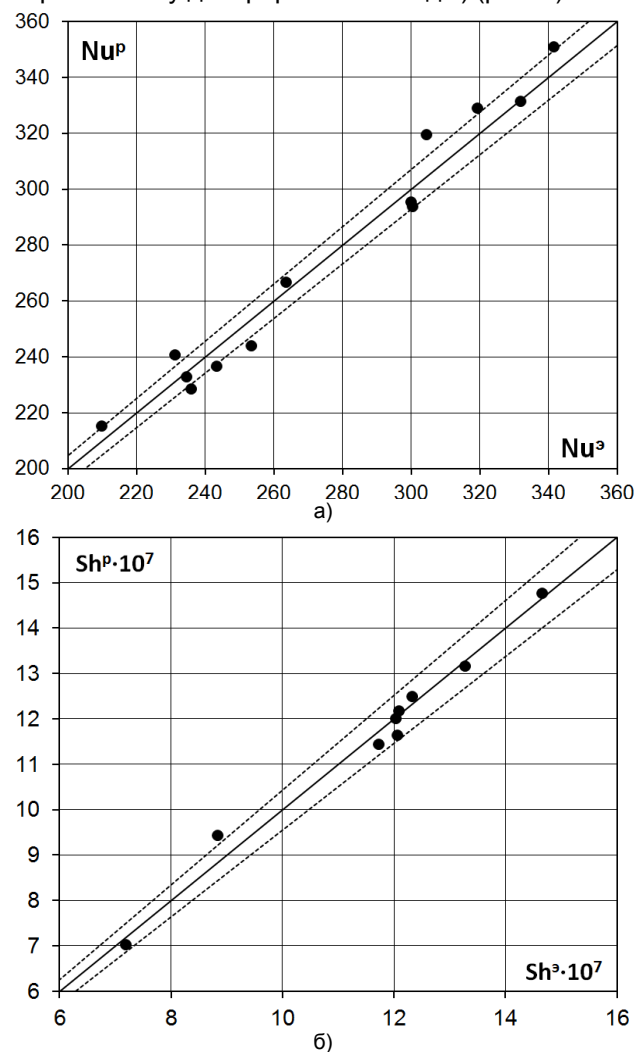


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения критерия Нуссельта (а) и критерия Шервуда (б) для непровального барботажного листа: точки – результаты расчета по уравнениям (12), (13) для условий работы деаэратора ДА-300м; прочие обозначения соответствуют рис. 1

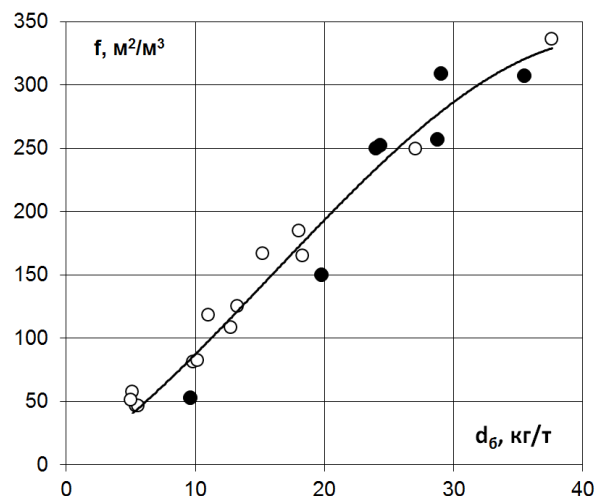


Рис. 3. Зависимость удельной площади межфазной поверхности в деаэрационном баке с барботажным устройством в виде перфорированного коллектора от удельного расхода пара на барботаж: точки – результаты расчета согласно [11] при условиях опытов: ● – деаэратор ДСА-300; ○ – деаэратор ДА-300м; линия – аппроксимация результатов расчета

Процессы нагрева воды в баке не рассматриваются, поскольку в режимах нормальной эксплуатации вода поступает в бак при температуре, практически соответствующей температуре насыщения. В качестве исходной функциональной зависимости для расчета безразмерного коэффициента массопередачи по растворенному кислороду принята зависимость (11) с той разницей, что вместо критерия отношения массовых расходов воды и пара используется соответствующий технологический параметр – удельный расход пара на барботаж  $d_6$ .

Таким образом, будем искать критериальное уравнение в виде

$$Sh = s_0 \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{s_1} Fr_6^{s_2} d_6^{s_3} \left( \frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_t^2} \right)^{s_4} \left( \frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_t} \right)^{s_5}, \quad (16)$$

$$Fr_6 = \frac{G_n}{\rho_n F_{бак} \sqrt{gh_t}},$$

где  $F_{бак}$  – площадь горизонтального сечения бака на уровне, соответствующем половине текущего уровня воды в деаэраторе,  $m^2$ ;  $h_t$  – гидростатический уровень воды в баке, м; определяющим размером при расчете критерия Шервуда принят диаметр отверстий барботажного коллектора  $d_0$ .

Матрица коэффициентов парной корреляции, определенных при использовании экспериментальных данных по деаэраторам ДСА-300 и ДА-300м, с указанием количественных характеристик их значимости по критерию Стьюдента, приведена в табл. 4.

Анализ представленных в табл. 4 данных показывает, что статистически значимую связь с функцией отклика имеют факторы  $\ln(Fr_6)$  и  $\ln(d_6)$  (коэффициенты парной корреляции  $-0,61$  и  $-0,98$  соответственно). При этом указанные факторы значимо связаны также и между собой (коэффициент парной корреляции  $0,51$ ). Однако на этапе спецификации модели сохраним в ней оба фактора, поскольку есть основания полагать, что наблюдаемая корреляция между факторами  $\ln(Fr_6)$  и  $\ln(d_6)$  является мнимой: по деаэратору ДСА-300 большие значения расхода воды в деаэраторный

бак  $G_{ж}$  определяли преимущественно малые значения уровня воды в нем  $h_t$  и одновременно большие значения удельного расхода пара на барботаж  $d_6$ ; по деаэратору ДА-300м такой зависимости не выявлено. Отметим также, что ранее [11] при использовании только экспериментальных данных по деаэратору ДСА-300 фактор

$$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$$
 был признан значимым, а фактор  $\ln(Fr_6)$ ,

напротив, исключен из рассмотрения ввиду описанной выше корреляции с фактором  $\ln(d_6)$ . Расширение объема выборки экспериментальных данных (табл. 4) приводит к другим выводам.

Итоговое критериальное уравнение получено в виде

$$Sh = 6,36 \cdot 10^{-4} \cdot Fr_6^{-0,11} d_6^{-0,56}. \quad (17)$$

Результаты статистической проверки точности и адекватности уравнения (17), оценки существенности включенных в него факторов представлены в табл. 3; сопоставление расчетных и экспериментальных значений критерия Шервуда представлено на рис. 4.

Уравнение (17) охватывает следующие условия работы устройства:  $d_0 = 0,012$  м;  $d_6$  – от 5,0 до 37,6 кг/т;  $h_0$  – от 1,4 до 2,2 м.

**Выводы.** Таким образом, в рамках настоящего этапа исследований разработано эмпирическое обеспечение ячеечных моделей процессов теплообмена в системе «вода – водяной пар» и десорбции из воды растворенного кислорода в элементах атмосферных деаэраторов: струйных отсеках, непрывальных барботажных листах, затопленных барботажных устройствах деаэраторного бака. Критериальные уравнения, описывающие связь безразмерных коэффициентов теплопередачи и массопередачи по растворенному кислороду, в комбинации с принятыми методами расчета площади межфазной поверхности характеризуются показателями точности, приемлемыми для решения практических задач режимной наладки и проектирования деаэрационных установок [12, 13].

Таблица 4. Матрица коэффициентов парной корреляции для уравнения (16) после его логарифмирования\*

Факторы / функция отклика	$\ln(Sh)$	$\ln(Fr_6)$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$	$\ln(d_6)$	$\ln\left(\frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2}\right)$	$\ln\left(\frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}}\right)$
$\ln(Sh)$	1	-0,61 (3,34)	0,10 (0,43)	-0,98 (23,05)	0,08 (0,37)	0,18 (0,81)
$\ln(Fr_6)$	-0,61 (3,34)	1	0,25 (1,11)	0,51(2,6; 2,43)	-0,06 (0,28)	-0,10 (0,44)
$\ln\left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}}\right)$	0,10 (0,43)	0,25 (1,11)	1	-0,22 (0,98)	0,50 (2,53)	0,71 (4,38)
$\ln(d_6)$	-0,98 (23,05)	0,51 (2,6)	-0,22 (0,98)	1	-0,14 (0,61)	-0,24 (1,07)
$\ln\left(\frac{\sigma_{ж}}{g\rho_{ж}h_{66}^2}\right)$	0,08 (0,37)	-0,06 (0,28)	0,50 (2,53)	-0,14 (0,61)	1	0,86 (7,19)
$\ln\left(\frac{\rho_n}{g\rho_{ж}h_{66}}\right)$	0,18 (0,81)	-0,10 (0,44)	0,71 (4,38)	-0,24 (1,07)	0,86 (7,19)	1

\* В скобках приведены значения критерия Стьюдента (по модулю); критическое значение критерия Стьюдента 2,43.



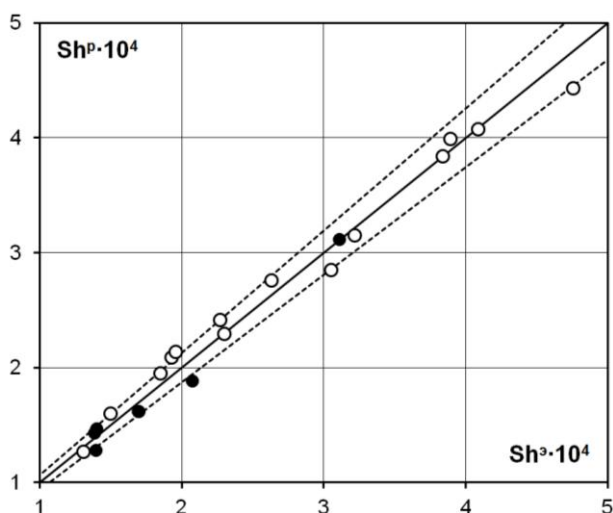


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные значения критерия Шервуда для затопленного барботажного устройства деаэрационного бака: точки – результаты расчета по уравнению (17): ● – деаэратор ДСА-300; ○ – деаэратор ДА-300м; прочие обозначения соответствуют рис. 1

Полученное замкнутое математическое описание технологических процессов атмосферной деаэрации воды в рассматриваемых деаэрационных элементах позволяет использовать его при синтезе математических моделей деаэраторов в целом, разрабатываемых в рамках подхода матричной формализации расчета тепломассообменных установок.

#### Список литературы

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.
2. Исследование технологических процессов атмосферной деаэрации воды / Г.В. Ледуховский, В.Н. Виноградов, С.Д. Горшенин, А.А. Коротков. – Иваново, 2016. – 420 с.
3. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с.
4. Разработка эмпирического обеспечения матричной модели нагрева и деаэрации воды в струйных отсеках атмосферных деаэраторов / А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 8–11.
5. Оликер И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
6. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск, 2003. – 560 с.
7. Laptev A.G., Misbakhov R.S., Lapteva E.A. Numerical simulation of mass transfer in the liquid phase of the bubble layer of a thermal deaerator // Thermal Engineering. – 2015. – Т. 62, № 12. – Р. 911–915.
8. Interphase heat-and-mass transfer in a flowing bubbling layer / Bezrodny, M.K., Goliyad, N.N., Barabash, P.A.,

Kostyuk, A.P. // Thermal Engineering. – 2012. – Т. 59, № 6. – Р. 479–484.

9. Кутателадзе, С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газо-жидкостных систем. – М.: Энергоиздат, 1958. – 232 с.

10. Кутателадзе С.С., Зысин В.А. Нагрев и деаэрация воды при непосредственном смешении ее с паром // За новое советское энергооборудование. – Л., 1939. – С. 86–124.

11. Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэрационных баках с затопленным барботажным устройством / С.Д. Горшенин, А.Ю. Ненаездников, Г.В. Ледуховский и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 5. – С. 9–13.

12. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

13. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1952. – 231 с.

#### References

1. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplomassoobmennyykh ustanovok* [System analysis of power heat and mass transfer systems]. Ivanovo, 2009. 176 p.
2. Ledukhovskiy, G.V., Vinogradov, V.N., Gorshenin, S.D., Korotkov, A.A. *Issledovanie tekhnologicheskikh protsessov atmosfery deaeratsii vody* [Investigation into technological processes of atmospheric water deaeration]. Ivanovo, 2016. 420 p.
3. Oliker, I.I., Permyakov, V.A. *Termicheskaya deaeratsiya vody na teplovykh elektrostantsiyakh* [Thermal deaeration of water at heat power stations]. Leningrad, Energiya, 1971. 185 p.
4. Moshkarin, A.V., Barochkin, E.V., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Korotkov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 8–11.
5. Oliker I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh setyakh* [Thermal deaeration of water in heating and industrial boilers and heat networks]. Leningrad, Stroyizdat, 1972. 137 p.
6. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'yanovsk, 2003. 560 p.
7. Laptev, A.G., Misbakhov, R.S., Lapteva, E.A. Numerical simulation of mass transfer in the liquid phase of the bubble layer of a thermal. *Thermal Engineering*, 2015, vol. 62, no. 12, pp. 911–915.
8. Bezrodny, M.K., Goliyad, N.N., Barabash, P.A., Kostyuk, A.P. Interphase heat-and-mass transfer in a flowing bubbling layer. *Thermal Engineering*, 2012, vol. 59, no. 6, pp. 479–484.
9. Kutateladze, S.S., Styrikovich, M.A. *Gidrodinamika gazo-zhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energoizdat, 1958. 232 p.
10. Kutateladze, S.S., Zysin, V.A. *Nagrev i deaeratsiya vody pri neposredstvennom smeshenii ee s parom* [Heating and degassing of water by its direct mixing with steam]. *Za novoe sovetskoe energooborudovanie* [For the new Soviet power equipment]. Leningrad, 1939, pp. 86–124.
11. Gorshenin, S.D., Nenaezdnikov, A.Yu., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 5, pp. 9–13.
12. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Khimiya, 1971. 784 p.
13. Kutateladze, S.S. *Teploperedacha pri kondensatsii i kipenii* [Heat transfer in Condensation and Boiling Conditions]. Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noy literatury, 1952. 231 p.

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,

адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,

телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,

e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovskiy Grigory Vasilyevich,

Ivanovo State Power Engineering University,

Candidate of Engineering, Associate Professor of Heat Power Plants Department,



address: Ivanovo, No. 34, Rabfakovskaya St., Building V, Room 408,  
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31,  
e-mail: lgv83@yandex.ru

*Жуков Владимир Павлович,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,  
телефон (4932) 26-97-45,  
e-mail: zhukov-home@yandex.ru  
Zhukov Vladimir Pavlovich,  
Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering, Professor, Head of Applied Mathematics Department,  
address: Ivanovo, No. 34 Rabfakovskaya St., Building A, Room 202,  
tel. (4932) 26-97-45,  
e-mail: zhukov-home@yandex.ru