

УДК 621.5:519.6

**А. А. Андрижиевский<sup>1</sup>, А. Г. Трифонов<sup>2</sup>, Л. С. Карпович<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны  
Национальной академии наук Беларуси**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПАРОВИДКОСТНОГО  
ПОТОКА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА В СИСТЕМЕ  
ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА АЭС**

В рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics разработан модельный аналог системы пассивного отвода тепла через парогенераторы СПОТ ПГ АЭС. В качестве базовой модели в данном исследовании использовалась система уравнений сохранения, включая уравнения сохранения количества движения и массы для паракапельной смеси в допущениях модели гомогенного двухфазного потока (модель смешения). Для численной реализации модельного аналога применялся метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics. Объектом имитационного моделирования являлся трубный пучок теплообменника в контуре СПОТ ПГ.

При проведении вычислительных экспериментов получены характеристики структуры паракапельных потоков в каналах теплообменника СПОТ ПГ и, в частности, динамики образования пленки конденсата на вертикальной теплообменной поверхности при спутном течении пара и конденсата. В случае пленочной конденсации насыщенного пара и ламинарном течении пленки местный коэффициент теплоотдачи может быть приближенно определен по формуле Нуссельта при допущении, что при данных ограничениях пленка конденсата и пограничный слой совпадают. Вместе с тем принятая формализация трубного пучка секции теплообменника СПОТ ПГ в виде плоской вертикальной поверхности позволяет использовать предложенную В. Г. Левичем формулу для расчета локальной толщины ламинарного пограничного слоя при обтекании полубесконечной тонкой пластины при относительно малых числах Рейнольдса. Выполнен сравнительный анализ расчетных профилей пограничных слоев и коэффициентов теплообмена с рекомендациями ряда экспериментальных исследований, который подтвердил правомерность принятого в работе модельного подхода.

**Ключевые слова:** аварийные выбросы АЭС, процессы переноса, моделирование, вычислительный шаблон.

**A. A. Andrizhievsky<sup>1</sup>, A. G. Trifonov<sup>2</sup>, L. S. Karpovich<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny  
of the National Academy of Sciences of Belarus**MODELING THE STRUCTURE OF LIQUID-VAPOR STRUCTURE FLOW  
WITH CONDENSATION IN PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM NPP**

In the framework of formal templates software package COMSOL Multiphysics the model analogue of passive heat removal system through steam generators (PHRS SG) of nuclear power plants is developed. As the basic model in this study used a system of equations, including conservation equation of conservation of momentum and mass for vapor-droplet mixtures in the assumptions model of homogeneous two-phase flow (mixing model) were used. For numerical realization of analog model the finite element method in the interpretation system of COMSOL Multiphysics were used. Simulation object was a tube bundle heat exchanger in the PHRS SG.

At carrying out computational experiments the characteristics of structures of vapor-droplet flow in the heat exchanger of the PHRS SG channels and, in particular, the dynamics of a formation of film condensation on a vertical heat transfer surfaces during concurrent flow and condensate were obtained. In the case of film condensation of saturated vapor and laminar flow of film the local heat transfer coefficient can be approximately defined by the Nusselt number assuming that film condensation and boundary layer are the same. However, adopted by the formalization of the heat exchanger section of bunch PHRS SG as a flat vertical surface, allows to use the proposed V. G. Levich formula to calculate the local thickness of laminar boundary layer in a semi-infinite thin plate with relatively small Reynolds numbers. Contrastive analysis of calculated profiles border layers and the coefficients of heat exchange with the recommendations of a number of experiments, which validated the modeling approach.

**Key words:** emergency emissions of NPP, transfer processes, modeling, computing template.

**Введение.** В обеспечении безопасности АЭС определяющей проблемой остается надежность отвода остаточных тепловыделений. Приоритетность пассивных средств и способов защиты станций определяется их принципиальными преимуществами по сравнению с активными системами: функционирование без потребления электроэнергии, отсутствие необходимости применения управляющих сигналов от контрольно-измерительной аппаратуры и вмешательства эксплуатационного персонала.

В настоящее время в мире ведется широкий поиск новых подходов к проблеме создания пассивных систем расхолаживания реакторной установки, а также пассивных систем для преодоления последствий запроектных аварий с разгерметизацией первого контура, таких, например, как системы отвода тепла от защитной оболочки. Обычно задача решается путем использования запаса воды в емкостях. Системы работают на естественной циркуляции теплоносителя, причем энергия остаточного тепловыделения отводится путем нагрева и испарения определенного запаса воды. При этом считается, что условия возникновения и развития аварии позволяют через определенный промежуток времени (примерно 72 ч) восстановить управление, электроснабжение, подачу охлаждающей воды и т. д. [1].

Для управления запроектными авариями предусмотрены пассивные системы отвода тепла через парогенераторы и от защитной оболочки.

Система пассивного отвода тепла через парогенераторы СПОТ ПГ предназначена для длительного отвода остаточного тепла активной зоны конечному поглотителю через второй контур при запроектных авариях. Система СПОТ ПГ дублирует соответствующую активную систему отвода тепла к конечному поглотителю в случае невозможности выполнения ее проектных функций.

Схематичное изображение конструкции СПОТ ПГ представлено на рис. 1 [2].

**Основная часть.** В качестве объекта имитационного моделирования рассматривался трубный пучок теплообменника аварийного расхолаживания в контуре СПОТ ПГ. Принцип работы данного элемента заключается в следующем: из парогенератора насыщенный пар по трубопроводу направляется в верхний подводящий коллектор теплообменника аварийного расхолаживания. Из верхнего подводящего коллектора пар поступает в трубный пучок, где конденсируется и отдает тепло охлаждающей воде в баке аварийного отвода тепла. Начинается прогрев воды в баке аварийного отвода тепла до кипения.

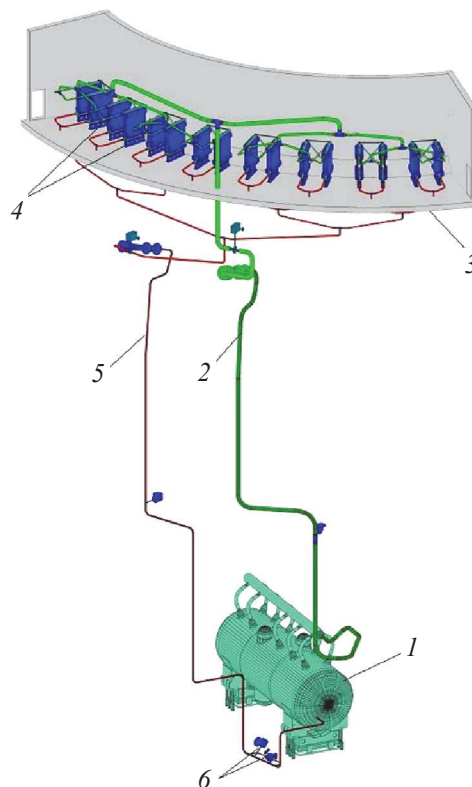


Рис. 1. Конструкция СПОТ ПГ:

1 – парогенератор; 2 – подъемный паропровод; 3 – бак запаса воды; 4 – теплообменники СПОТ; 5 – опускной трубопровод; 6 – пусковые клапаны

Конденсат из трубного пучка стекает в нижний отводящий коллектор и направляется в парогенератор.

При моделировании потоков в СПОТ ПГ в случае конденсации теплоносителя встает задача адекватного описания динамики движения двухфазного потока.

Для описания подобных парожидкостных систем используются различные модели, которые являются одной из разновидностей гетерогенных или гомогенных моделей. Гетерогенные модели требуют детального описания межфазной поверхности. При этом сама межфазная поверхность является или произвольной, или некой структурированной системой, например парокапельные и пузырьковые системы.

Такой подход требует значительных вычислительных затрат на описание межфазной поверхности и целесообразен для относительно небольших устройств или систем. Кроме того, данный подход весьма ограничен при описании парожидкостных систем в сложных каналах при постоянном изменении структуры потока. Поэтому в данной работе для описания газожидкостных потоков принята разновидность гомогенной модели, а именно, модель смешения.

Так же, как и для пузырьковых систем, модель смешения основана на двухжидкостной

Эйлер – Эйлеровой модели. Рассматривается двухфазная среда, состоящая из непрерывной и дисперсной фаз.

Модель смешения основывается на следующих предположениях:

- 1) плотность каждой фазы остается примерно постоянной;
- 2) обе фазы находятся в одном и том же поле давлений;
- 3) относительная скорость между фазами определяется из баланса между давлением, силой тяжести и вязким сопротивлением.

В модели смешения при предположении гомогенности потока, т. е. отсутствии проскальзывания фаз, уравнение движения смеси имеет вид

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \nabla)u = -\nabla p + \nabla \tau_{Gm} + \rho g, \quad (1)$$

где  $u$ ,  $\rho$  – скорость и плотность смеси соответственно;  $p$  – давление;  $\tau_{Gm}$  – сумма вязкостных и турбулентных напряжений;  $g$  – гравитационное ускорение.

Уравнение неразрывности среды можно записать следующим образом:

$$\rho_t + \nabla(\rho u) = 0. \quad (2)$$

Плотность смеси определяется как

$$\rho = \phi_c \rho_c + \phi_d \rho_d, \quad (3)$$

где  $\phi_c$  и  $\phi_d$  – объемная доля непрерывной и дисперсной фаз соответственно;  $\rho_c$  и  $\rho_d$  – плотности каждой из фаз.

Соотношение между скоростями жидкой и паровой фаз будет следующим:

$$u_d - u_c = u_{cd} = -\frac{D_{md}}{(1 - c_d)\phi_d} \nabla \phi_d, \quad (4)$$

где  $u_d$  – скорость дисперсной фазы;  $u_c$  – скорость непрерывной среды;  $D_{md}$  – коэффициент турбулентной диффузии, учитывающий внешнюю диффузию вследствие турбулентных вихрей. При не учете турбулентных эффектов  $D_{md}$  равен нулю.

Сумма вязкостных и турбулентных напряжений равна:

$$\tau_{Gm} = (\eta + \eta_T) [\nabla u + \nabla u^T] - \frac{2}{3} \rho k I, \quad (5)$$

где  $\eta_T$  – вязкость смеси;  $k$  – турбулентная кинетическая энергия. В моделях без учета турбулентности  $\eta_T$  и  $k$  равны нулю.

Уравнение переноса объемной доли дисперсной фазы имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_d \rho_d) + \nabla(\phi_d \rho_d u_d) = -m_{dc}, \quad (6)$$

где  $m_{dc}$  – массовый поток от дисперсной фазы к непрерывной фазе, являющийся функцией поверхностной скорости конденсации  $W_c$ . В данной модели  $W_c$  или задается как средняя величина с учетом приведенной теплонапряженности поверхности теплообмена, или определяется как функция от пространственной координаты вдоль оси канала теплообменника СПОТ ПГ с учетом изменения теплового потока к внутренней поверхности теплообмена:

$$W_c = \frac{q}{r \rho_d}, \quad (7)$$

где  $q$  – тепловой поток к теплообменной поверхности;  $r$  – скрытая теплота парообразования;  $\rho_d$  – плотность дисперсной фазы.

В полном объеме используемая модель смешения представлена в работе [2].

Для численной реализации модельного аналога СПОТ ПГ использовался метод конечных элементов в интерпретации системы COMSOL Multiphysics.

С целью уменьшения большого числа расчетных ячеек теплообменный пучок секции теплообменника аварийного расхолаживания представлен в виде плоских поверхностей (рис. 2).

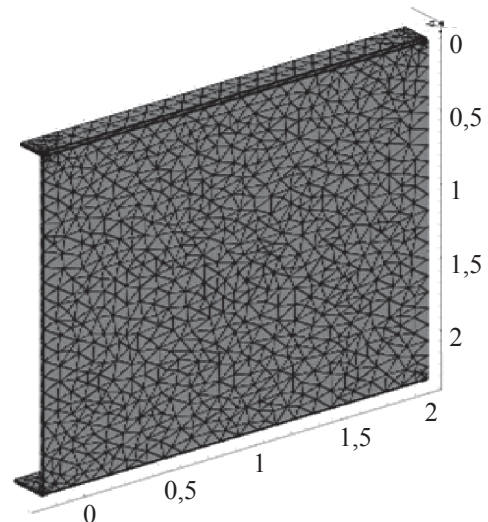


Рис. 2. Расчетная область трубного пучка теплообменника СПОТ ПГ с разбиением на расчетные ячейки по методу конечных элементов (размер расчетной области 1,95×2,24 м)

В рамках выполненных вычислительных экспериментов решалась нестационарная задача на установление.

Максимальная мощность теплообменника – 3,125 МВт. Скорость пара на входе в трубный пучок в данном режиме – ~1,79 м/с.

Средняя скорость образования дисперсной фазы – 0,0002 м/с. Давление в трубном пучке –

8,1 МПа. При  $p = 8,1$  МПа температура насыщения равна  $t_s = 295,9^\circ\text{C}$ . Высота трубного пучка – 1,95 м. Вход пара сверху. Непрерывная фаза – поступающий пар из парогенератора, дисперсная фаза – сконденсировавшийся пар (конденсат). В начальный момент объемная доля дисперсной фазы принимается равной 0.

На рис. 3 представлена динамика объемного влагосодержания в моменты времени 1, 2, 5 и 10 с при конденсации теплоносителя в трубных пучках теплообменников аварийного расхолаживания СПОТ ПГ.

При графическом представлении ограничено число изоповерхностей объемного влагосодержания. При этом конкретное значение изоповерхности определяется из учета нормирования по максимальному влагосодержанию в моделируемом объеме.

Через верхний конец трубного пучка поступает непрерывная фаза (пар). По мере прохождения по трубному пучку (сверху вниз) расход и скорость непрерывной фазы (пара) падают, при этом на внутренней стенке трубного пучка наблюдается образование дисперсной фазы (кон-

денсата). Поскольку в вертикальном трубном пучке при движении непрерывной фазы (пара) сверху вниз силы тяжести и динамического воздействия совпадают по направлению, то дисперсная фаза (конденсат) стекает вниз трубного пучка, при этом наблюдается увеличение объемного влагосодержания по высоте трубного пучка.

На рис. 4 показано изменение объемного влагосодержания в трубном пучке теплообменника СПОТ ПГ.

Нелинейность профиля объемного влагосодержания на выходе из теплообменных каналов может быть связана с натеканием конденсата на нижележащие слои и появлением волн на поверхности пленки. Данный эффект проявляется в большей или меньшей степени с изменением скорости конденсации.

В рамках принятой модели смешения толщина приповерхностной пленки конденсата определяется величиной объемного содержания дисперсной фазы (конденсата). Соответственно, это позволяет найти значения локального коэффициента теплоотдачи по высоте трубного пучка.

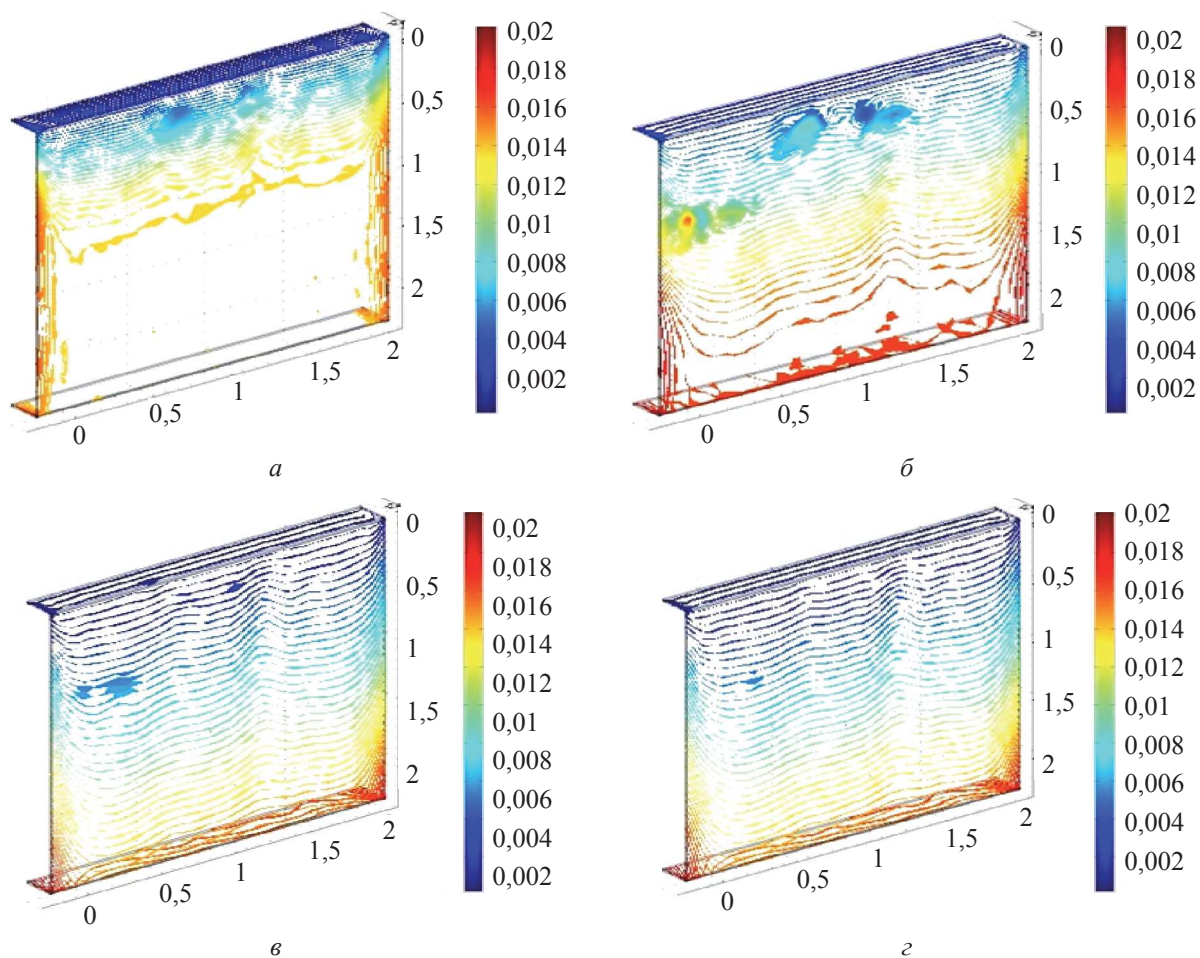


Рис. 3. Динамика объемного влагосодержания при конденсации теплоносителя в трубных пучках теплообменника СПОТ ПГ (задача на установление):  
а –  $t = 1$  с; б –  $t = 2$  с; в –  $t = 5$  с; г –  $t = 10$  с

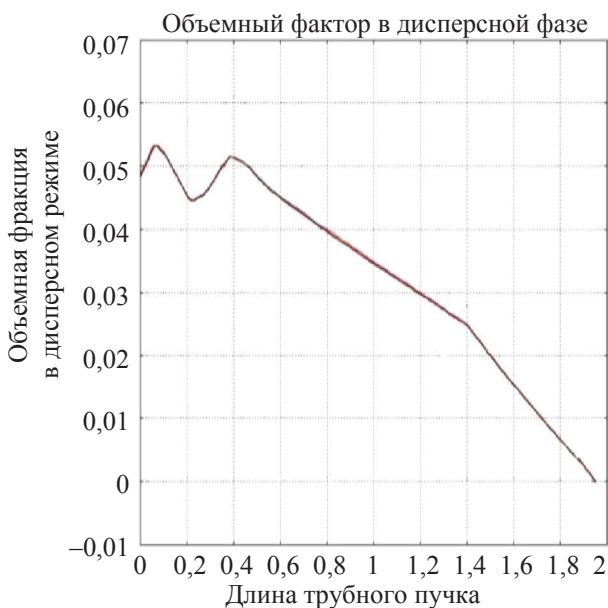


Рис. 4. Распределение объемного влагосодержания по длине трубного пучка теплообменника СПОТ ПГ («1,95» – вход пара, «0» – вход конденсата). Диапазон изменения параметров объемного влагосодержания на рисунке от 0,05 до 0 м при изменении высоты трубного пучка от 0 до 1,95 м

При пленочной конденсации насыщенного пара и ламинарном течении пленки местный коэффициент теплоотдачи может быть приближенно определен по формуле Нуссельта, т. е. если считать, что при данных ограничениях пленка конденсата и пограничный слой совпадают.

Вместе с тем в рамках принятой формализации трубного пучка секции теплообменника СПОТ ПГ (см. рис. 2 на с. 185) представляется возможным использовать предложенную В. Г. Левичем формулу для расчета локальной толщины ламинарного пограничного слоя, образующегося при обтекании полубесконечной тонкой пластины [3]:

$$\delta^* = \left( \frac{x\nu}{u_\infty} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

где  $x$  – расстояние от кромки пластины;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $u_\infty$  – скорость невозмущенного набегающего потока.

Результаты расчета локальных значений приповерхностного слоя конденсата  $\delta_x$  и  $(\delta_x)_л$ , определенные соответственно при заданной и локальных скоростях конденсации, а также толщины пограничного слоя  $\delta_x^*$  и местного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_x$  приведены в таблице.

Дополнительно в таблице представлены значения толщины пограничного слоя  $(\delta_x)_{см}^*$ , рассчитанные по формуле В. Г. Левича при локальных параметрах смеси, и соответствующие коэффициенты теплообмена  $(\alpha_x)_{см}^*$ .

**Результаты расчета локальных значений приповерхностного слоя конденсата и местного коэффициента теплоотдачи**

$x$	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5	1,95
$\delta_x$	0,04	0,08	0,16	0,30	0,38	0,40
$\delta_x^*$	0,08	0,12	0,18	0,26	0,32	0,36
$(\delta_x)_л$	0,14	0,15	0,22	0,37	0,56	0,88
$(\delta_x)_{см}^*$	0,14	0,20	0,32	0,47	0,60	0,68
$\alpha_x$	8,9	4,6	3,1	2,1	1,7	1,5
$(\alpha_x)_{см}^*$	4,0	2,8	1,8	1,5	1,0	0,7

Примечание. В таблице приняты следующие размерности:  $x$  – м;  $\delta_x, \delta_x^*, (\delta_x)_л, (\delta_x)_{см}^*$  – мм;  $\alpha_x$  – кВт/(м<sup>2</sup> · °С). Величина  $\alpha_x$  рассчитана с использованием толщины пленки конденсата  $\delta_x$ .

Как видно из таблицы, имеется достаточно хорошее совпадение как характера поведения, так и значений  $\delta_x, \delta_x^*$  вдоль оси теплообменника СПОТ ПГ. Имеющиеся разногласия в значениях  $\delta_x$  и  $\delta_x^*$  связаны с использованием конечной, осредненной по длине скорости конденсации, что приводит к ее занижению и завышению соответственно на начальных и конечных участках теплообменника. При значительном превышении  $\delta_x^*$  над  $\delta_x$  использование формулы В. Г. Левича для определения пограничного слоя в рамках «двухслойной» (приповерхностный слой конденсата + паровое ядро) модели двухфазного потока считаем неправомерным. Это ограничение не относится к гомогенной модели смешения, что подтверждается сравнением  $(\delta_x)_л$  и  $(\delta_x)_{см}^*$ .

В то же время авторы считают, что для рассматриваемого случая поверхностного отвода тепловой энергии с образованием поверхностной пленки конденсата на вертикальной поверхности более оправданно использование формулы В. Г. Левича при параметрах дисперсной фазы и скорости набегающего потока на входе в каналы.

На рис. 5 в рамках тестирования предлагаемого расчетного шаблона представлены результаты сравнительного анализа расчетных профилей пограничного слоя  $\delta_x^*, (\delta_x)_{см}^*$  и коэффициентов теплообмена  $\alpha_x, (\alpha_x)_{см}^*$  с результатами опытных исследований.

Используемые на рис. 5 осредненные величины  $\tilde{\delta}_{см}^*, \tilde{\delta}_{тр}^*$  и  $\tilde{\alpha}_{см}^*, \tilde{\alpha}_{тр}^*$  рассчитаны по рекомендациям ряда экспериментальных исследований (например, В. Нуссельта, В. П. Исаченко, Е. П. Ананьева, Л. Д. Бойко, Г. Н. Кружилина) при используемых в данной работе модельных параметрах.

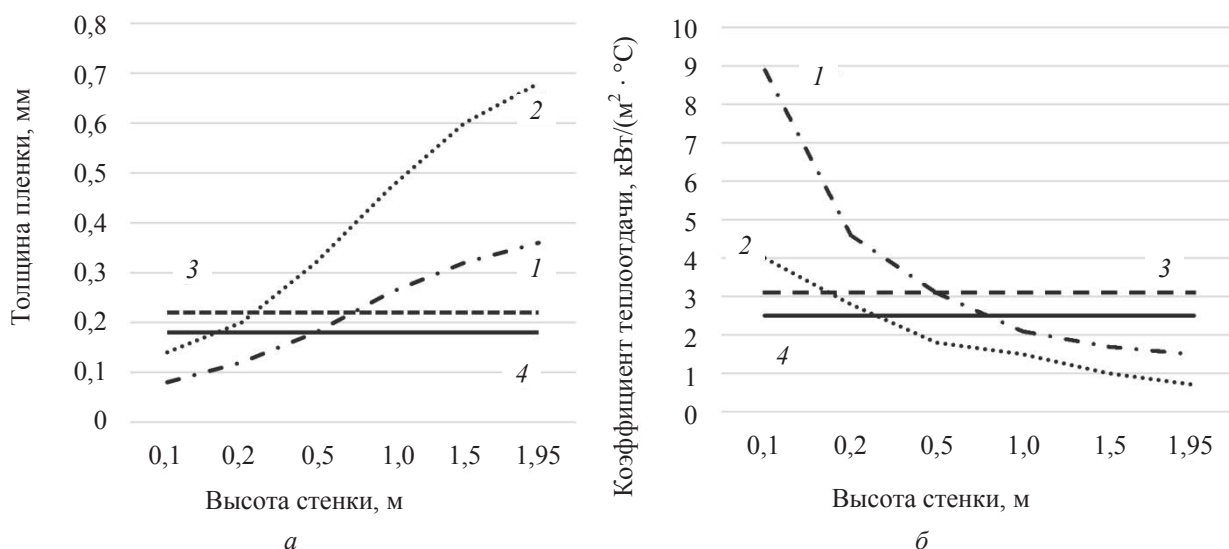


Рис. 5. Сравнительный анализ расчетных профилей пограничного слоя и коэффициентов теплообмена с результатами опытных исследований:

*а* – изменение толщины пленки: 1 –  $\delta_x^*$ ; 2 –  $(\delta_x^*)_{см}$ ; 3 –  $\tilde{\delta}_{см}^*$ ; 4 –  $\tilde{\delta}_{мп}^*$ ;

*б* – изменение коэффициента теплоотдачи по высоте стенки: 1 –  $\alpha_x$ ; 2 –  $(\alpha_x^*)_{см}$ ; 3 –  $\tilde{\alpha}_{см}^*$ ; 4 –  $\tilde{\alpha}_{мп}^*$ ;

$\delta_x^*$ ,  $(\delta_x^*)_{см}$  и  $\alpha_x$ ,  $(\alpha_x^*)_{см}$  – согласно таблице;  $\tilde{\delta}_{см}^*$ ,  $\tilde{\alpha}_{см}^*$  и  $\tilde{\delta}_{мп}^*$ ,  $\tilde{\alpha}_{мп}^*$  – опытные осредненные по длине экспериментальных участков значения пограничных слоев и коэффициентов теплообмена, определенные для случаев ламинарного течения пленки конденсата при конденсации неподвижного пара на вертикальной стенке и конденсации пара в вертикальном канале соответственно (спутное течение пара и конденсата сверху вниз)

Как видно из рис. 5, опытные значения этих величин достаточно хорошо согласуются с расчетными, что позволяет сделать вывод о правомерности представленного в работе описания процессов межфазного переноса в системе пассивного отвода тепла АЭС.

**Заключение.** Результаты данных тестовых вычислительных экспериментов свидетельствуют об их физической непротиворечивости и согласованности с общепринятыми рекомендациями. Это в свою очередь позволяет сделать вывод:

– во-первых, об обоснованности принятой формализации теплообменной поверхности теплообменника – конденсатора СПОТ ПГ в виде плоских поверхностей;

– во-вторых, о возможности задания в рамках гидродинамической модели локального поверхностного стока теплоты с использованием расчетной толщины ламинарного пограничного слоя, определяемой, в частности, по формуле В. Г. Левича.

Дальнейшее развитие представленной модели связано с сопряженным рассмотрением процессов переноса в контуре СПОТ ПГ АЭС.

### Литература

1. Свириденко И. И. Показатели надежности автономной системы пассивного отвода теплоты ВВЭР на основе двухфазных термосифонов // Сборник научных трудов СНИЯЭиП. 2005. № 14. С. 14–25.
2. Андрижиевский А. А., Трифонов А. Г., Кулик Л. С. Моделирование структуры термоконвективных потоков в системе пассивного отвода тепла АЭС // Труды БГТУ. 2016. № 3: Химия и технология неорган. в-в. С. 142–146.
3. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 700 с.

### References

1. Sviridenko I. I. Reliability of passive heat dissipation system of PWR based on two-phase thermosyphons. *Sbornik trudov SNIYAEiP* [The collection of proceedings of the SNIUNEP], 2005, no. 14, pp. 14–25 (In Russian).
2. Andrizhievsky A. A., Trifonov A. G., Kulik L. S. Modeling of structure of thermal convection streams in nuclear power plant containment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 3: Chemistry and technology of inorganic substances, pp. 142–146 (In Russian).
3. Levich V. G. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physicochemical hydrodynamics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 700 p.

### Информация об авторах

**Андрижиевский Анатолий Альгертович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: aaandri@mail.ru

**Трифонов Александр Георгиевич** – доктор технических наук, заместитель генерального директора. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. Академика Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: tral@list.ru

**Карпович Лилия Сергеевна** – младший научный сотрудник. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. Академика Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: knopka.lija@mail.ru

### Information about the authors

**Andrzhievsky Anatoliy Al'gertovich** – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Energysaving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aaandri@mail.ru

**Trifonov Aleksandr Georgievich** – DSc (Engineering), Deputy General Director. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Akademika Krasina str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tral@list.ru

**Karpovich Liliya Sergeevna** – Junior Researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Akademika Krasina str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: knopka.lija@mail.ru

*Поступила 25.04.2017*