

УДК 621.5:519.6

А. А. Андрижиевский¹, А. Г. Трифонов², Л. С. Карпович²¹Белорусский государственный технологический университет²Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –
Сосны НАН Беларуси**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПАРОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В КОНТУРЕ
С ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА
ОСТАТОЧНОГО ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЯ АЭС**

В рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics выполнена адаптация применительно к описанию структуры парожидкостных потоков разработанного ранее модельного аналога системы пассивного отвода тепла (СПОТ) от защитной оболочки АЭС.

Представленная в [1] замкнутая система уравнений сохранения дополнена уравнением количества движения для двухфазной смеси в каналах трубчатого теплообменника СПОТ в допущениях модели гомогенного двухфазного потока (модель смешения). В рамках выполненных вычислительных экспериментов решалась нестационарная задача на установление.

В результате проведения данного исследования получены характеристики структуры двухфазных потоков в контуре охлаждения СПОТ АЭС и, в частности, динамики формирования и течения пленки конденсата при спутном и противоточном движении пара. Определены временные интервалы возникновения волнового характера течения конденсата в вертикальных каналах теплообменных устройств вследствие межфазных взаимодействий.

Представленный в работе модельный аналог процессов тепломассопереноса в системах пассивного отвода тепла от защитной оболочки АЭС и результаты данного исследования могут быть использованы для проведения анализа безопасности работы белорусской АЭС.

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

A. A. Andrizhievsky¹, A. G. Trifonov², L. S. Kulik²¹Belarusian State Technological University²Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of NAS of Belarus**IMITATING MODELLING OF STRUCTURE AND DYNAMIC PARAMETERS
OF THE STEAM LIQUID STREAM IN THE CONTOUR WITH NATURAL
CIRCULATION OF PASSIVE TAP OF THE RESIDUAL THERMAL EMISSION NPP**

In the framework of formal templates software package COMSOL Multiphysics performed adaptation in relation to the description of the steam liquid streams structure previously developed model analog passive heat removal system from containment NPP.

Presented in [1] a closed system of equations equation is complemented by conservation of momentum for a two-phase mixture in the canals of the lower tubular heat exchanger of the passive heat removal system NPP in assumptions model homogeneous two-phase flow. Within the framework of computational experiments performed solved problem on non-stationary setting.

As a result of carrying out of the given research structure characteristics a two-phase streams in a contour of cooling the SPOT of the atomic power station and, in particular, dynamics of formation and a current of a film of a condensate are received at passing and counter flow movement of steam. Time intervals of occurrence of wave character of a current of a condensate in vertical channels of heat-exchange devices as result of interphase interactions are defined

Submitted work model of heat and mass transfer processes in analog systems, passive heat removal from the containment of nuclear power plants and the results of this study can be used to perform a security analysis of the work of the Belarusian nuclear power plant.

Key words: Emergency emissions of NPP, transfer processes; modeling, computing template.

Введение. Исследование пассивных систем с естественным охлаждением требует совместного моделирования следующих нестационарных процессов: конденсации пара из парогазовой смеси на внешней теплообменной поверх-

ности; режимов кипения на внутренних поверхностях трубных пучков теплообменников с возможным возникновением режима пленочного кипения; перемешивания охлаждающей воды и испарения в баке-охладителе (БАОТ) при

отводе тепла от парогазовой смеси теплообменника-конденсатора; устойчивости работы контура охлаждения системы пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) АЭС. Кроме того, при построении замкнутых физических и математических моделей описания процессов переноса в элементах СПОТ АЭС возникает необходимость задания условий сопряжения отдельных фаз, т. е. необходимость описания механизмов переноса массы и теплоты через межфазную границу. При этом следует рассматривать два вида условий сопряжения: на свободной границе и при относительном (спутном или протivotочном) движении фаз.

Основная часть.

Модель описания межфазного процессов переноса в контуре охлаждения СПОТ АЭС. В данном исследовании в качестве базовой имитационной модели использовалась система уравнений сохранения для парокапельной смеси в допущениях модели гомогенного двухфазного потока (модель смешения).

В связи с этим представленная в [1] базовая замкнутая система уравнений сохранения дополнена уравнением количества движения для двухфазной смеси в каналах нижнего трубчатого теплообменника СПОТ в допущениях модели гомогенного двухфазного потока (модель смешения):

$$\rho u_t + \rho(u \nabla)u = -\nabla p - \nabla(\rho c_d(1 - c_d)u_{slip}u_{slip}) + \nabla \tau_{Gm} + \rho g + F,$$

где u – скорость; ρ – плотность; p – давление; c_d – массовая доля дисперсной фазы; u_{slip} – скорость скольжения между фазами; τ_{Gm} – суммарные вязкостные и турбулентные напряжения; g – гравитационное ускорение; F – внешняя объемная сила. Параметры смеси определяются через объемные доли непрерывной и дисперсной фаз.

Соотношение между скоростями жидкой и паровой фаз будет определяться как

$$u_d - u_c = u_{cd} = u_{slip} - \frac{D_{md}}{(1 - c_d)\varphi_d} \nabla \varphi_d,$$

где u_{slip} определяется как скорость скольжения фаз; D_{md} – коэффициент турбулентной диффузии, учитывающий внешнюю диффузию вследствие турбулентных вихрей.

В данном приближении плотности отдельных фаз, ρ_c и ρ_d принимаются постоянными и, следовательно, уравнение неразрывности для смеси будет иметь вид

$$(\rho_c - \rho_d)[\nabla \varphi_d((1 - c_d)u_{slip} - D_m \nabla \varphi_d) + \frac{m_{dc}}{\rho_d} + \rho_c \nabla u] = 0.$$

Суммарный тепловой поток вследствие испарения с поверхности БАОТ в приближении метода приведенной пленки вблизи поверхности определялся, как и прежде, согласно представлений работы [2] по соотношению

$$q_{sum} = \frac{Nu}{L} \left[\lambda_{mix} (T_{sf} - T_\infty) + D'' \rho_{mix} \kappa \ln \left(\frac{(m_{mix}(1 - c''))_\infty}{(m_{mix}(1 - c''))_{sf}} \right) \right],$$

где Nu – число Нуссельта; L – характерный линейный масштаб процессов у поверхности; λ_{mix} – коэффициент теплопроводности паровоздушной смеси; T_{sf} – температура насыщения (у поверхности); T_∞ – температура на удалении от поверхности; D'' – коэффициент турбулентной диффузии пара в воздухе; ρ_{mix} – плотность паровоздушной смеси; κ – скрытая теплота парообразования; m_{mix} – масса паровоздушной смеси; c'' – концентрация пара над зеркалом испарения в баке аварийного отвода тепла (БАОТ).

Результаты исследования. Объектом имитационного моделирования являлся охлаждающий контур с естественной циркуляцией, включающий гладкий трубный пучок парогенератора, и размещенный в БАОТ многосекционный теплообменник-конденсатор [3].

На рис. 1 представлена геометрия расчетной области контура охлаждения СПОТ АЭС с естественной циркуляцией.

При проведении тестовых вычислительных экспериментов посредством разработанных на основе программного пакета COMSOL Multiphysics формализованных вычислительных шаблонов решалась нестационарная задача на установление.

Полученные в данном исследовании результаты иллюстрируются рис. 2–4.

На рис. 2 показано «установление» профиля концентраций дисперсной фазы (конденсата) по высоте подъемной линии охладителя во временном диапазоне от 0 до 80 с (задача на установление).

Как следует из рис. 2, при установлении квазистационарного профиля концентрации конденсата с течением времени появляются локальные максимумы концентраций.

Объясняется это тем, что капельки конденсата, стекающие вниз, со временем образуют единый фронт – волну.

На рис. 3, 4 представлены профили скоростей двухфазной смеси в элементах контура охлаждения СПОТ АЭС.

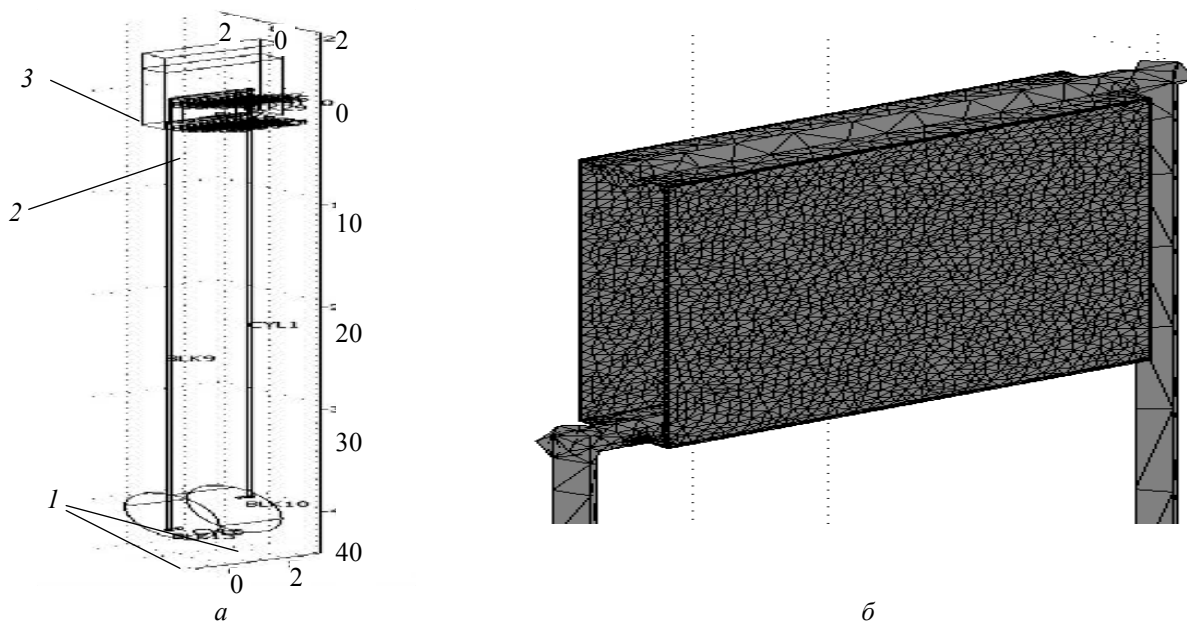


Рис. 1. Геометрия обобщенной имитационной модели контура охлаждения СПОТ АЭС с естественной циркуляцией:

a – контур охлаждения (40×4 м):

1 – парогенератор; 2 – теплообменник-конденсатор; 3 – БАОТ;

б – теплообменник-конденсатор с разбиением на расчетные ячейки по методу конечных элементов

Вихревой характер представленных на рис. 3, *a* изолиний тока двухфазной смеси в парогенераторе связан с конструктивным исполнением подводящих и отводящих трубопроводов. Данное решение, приводящее к закрутке потока, способствует увеличению времени пребывания и скорости рабочего тела в парогенераторе и, соответственно, интенсификации теплообменного процесса между защитной оболочкой АЭС и парогенератором.

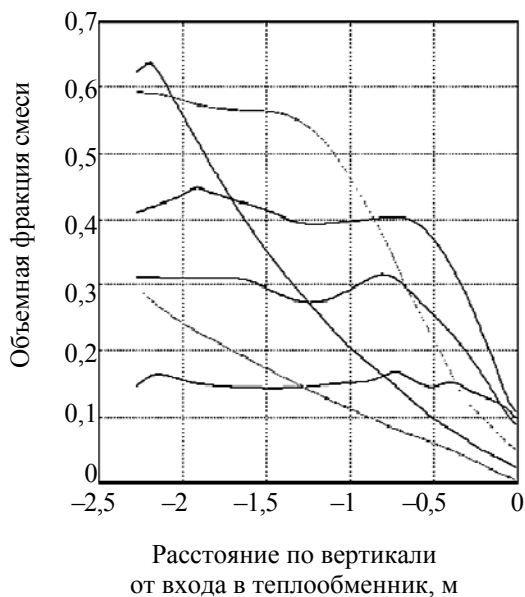


Рис. 2. Изменение содержания конденсата по высоте подъемной линии охладителя в моменты времени от 0 до 80 с

На рис. 3, *б* представлен профиль скорости конденсата в теплообменнике-конденсаторе в момент времени 80 с.

Как видно из графика, данный профиль имеет вид затухающих колебаний, что связано с формированием вертикальной, стекающей в нижнюю часть теплообменника-конденсатора пленки конденсата. По мере противоточного пару продвижения конденсата вниз формируется устойчивый волновой фронт, что и приводит к сглаживанию амплитуды колебаний пристеночной пленки конденсата. Данный характер процессов переноса в теплообменнике-конденсаторе свидетельствует об устойчивости его режимных параметров.

На рис. 4 представлено изменение скорости двухфазной смеси в соединительных трубопроводах – трубопроводе конденсата (опускная линия) и трубопроводе пара (подъемная линия).

Характер течения двухфазной смеси в данных элементах контура охлаждения СПОТ АЭС определяется характером описанных выше процессов переноса в теплообменных элементах данного контура с естественной циркуляцией.

Как следует из результатов исследования, в условиях проведения вычислительных экспериментов, а также при принятых условиях сопряжения как элементов контура охлаждения СПОТ АЭС, так и межфазных взаимодействий динамическая нестабильность работы данного контура охлаждения не возникала.

Вместе с тем данный вывод требует подтверждения в более широком диапазоне изменения параметров СПОТ АЭС.

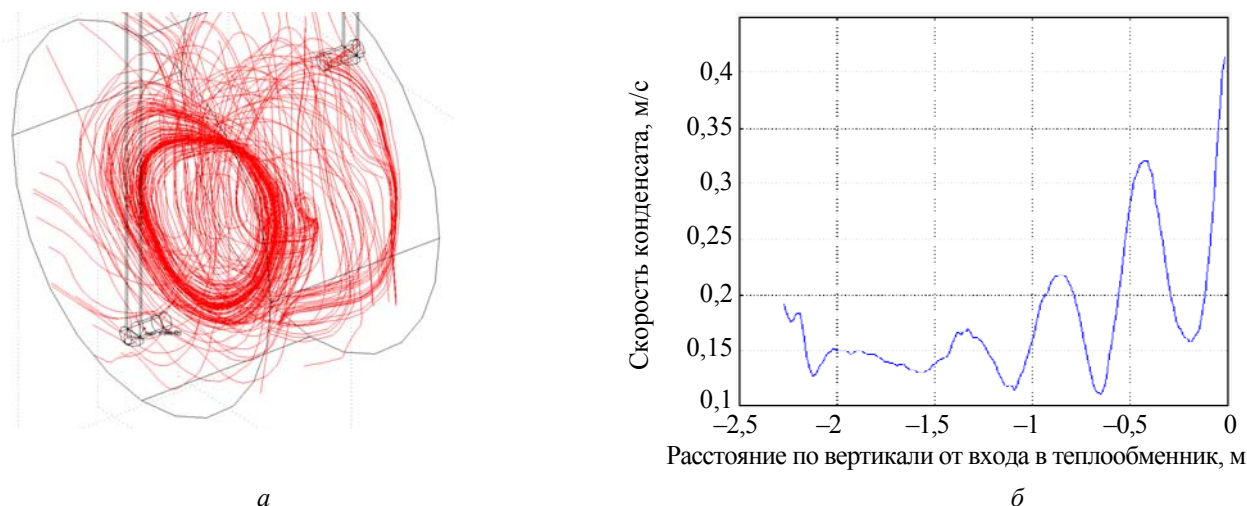


Рис. 3. Скорости двухфазной смеси в теплообменных элементах охладительного контура СПОТ АЭС
 а – изолинии тока двухфазной смеси в парогенераторе;
 б – профиль скорости конденсата в теплообменнике-конденсаторе в момент времени 80 с

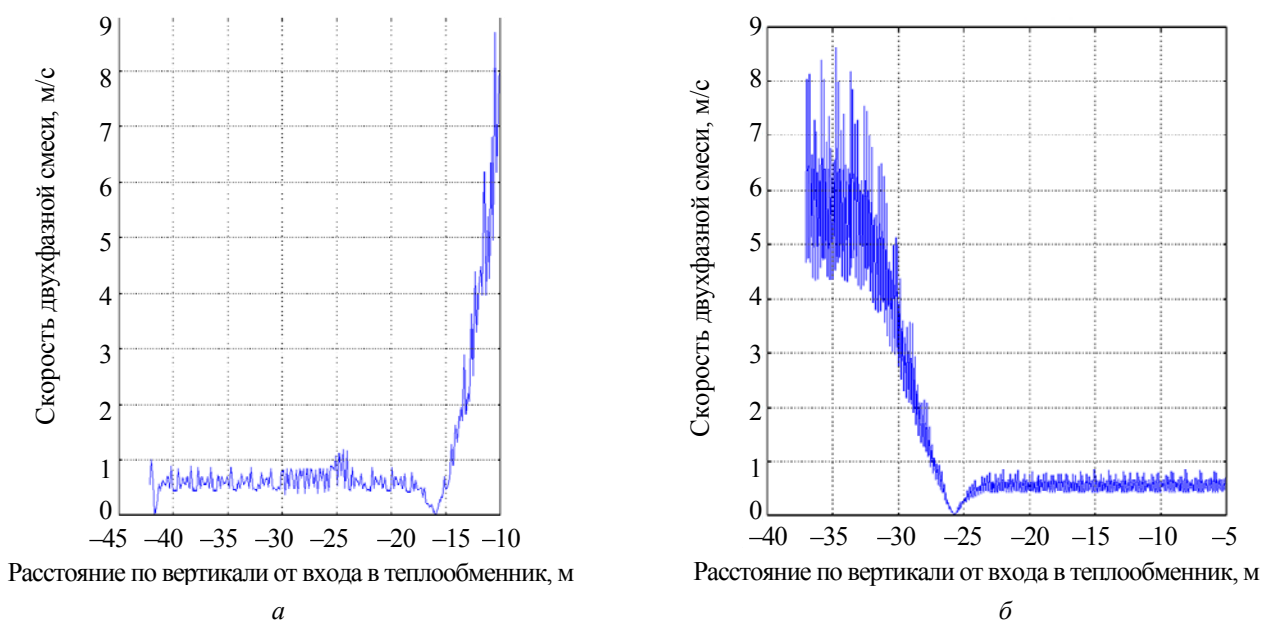


Рис. 4. Скорости двухфазной смеси в соединительных трубопроводах:
 а – изменение скорости двухфазной смеси в трубопроводе конденсата (опускная линия);
 б – изменение скорости двухфазной смеси в трубопроводе пара (подъемная линия)

Заключение. В результате проведения данного исследования получены характеристики структуры паракапельных потоков в контуре охлаждения СПОТ АЭС и, в частности, динамики образования и течения пленки конденсата при спутном и противоточном движении пара.

Определены временные интервалы возникновения волнового характера течения конденсата вследствие межфазного взаимодействия дисперсной и непрерывной (паровой) фаз.

Выполнен анализ возможного снижения эффективности отвода остаточного тепловыделения посредством СПОТ АЭС в аварийных ситуациях вследствие возникновения динами-

ческой неустойчивости работы теплообменных элементов рассматриваемого охладительного контура. Данное динамическое явление вызывает особый интерес, так как может являться причиной динамической неустойчивости охладительного контура в целом. В представленном исследовании подобная динамическая неустойчивость не возникла.

Вместе с тем, как отмечалось выше, данный вывод требует дополнительного подтверждения в широком диапазоне параметров с учетом всех сопряженных элементов СПОТ АЭС.

По результатам исследования можно сделать общий вывод о принципиальной возможности осуществления естественной конвекции в

охладителе́нном контуре СПОТ АЭС при заданных параметрах отвода остаточного тепловыделения в аварийных режимах.

В заключение следует отметить, что разрабатываемый пространственный модельный ана-

лог процессов тепломассопереноса в системах пассивного отвода тепла СПОТ АЭС и результаты данного исследования могут быть использованы для проведения анализа безопасности работы Белорусской АЭС.

Литература

1. Андрижиевский А. А., Трифонов А. Г., Кулик Л. С. Моделирование пассивной системы отвода тепла от защитной оболочки АЭС в режиме термоконвекции // Труды БГТУ. 2015. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 140–144.
2. Андрижиевский А. А., Михалеви́ч А. А., Трифонов А. Г. Моделирование термоконвективных течений в динамических газожидкостных слоях водных охладителей // Доклады Академии наук Беларуси. 1995. Т. 39, № 3: Технические науки. С. 109–113.
3. ЛАЭС II: обоснование пассивных систем безопасности / В. В. Безлепки́н [и др.] // РОСЭНЕРГОАТОМ, 2008. № 2. С. 18–23.

References

1. Andrizhievsky A. A., Trifonov A. G., Kulik L. S. Simulation of passive heat removing from containment by thermoconvection. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 3: *Chemistry and Technology of Inorganic Substances*, pp. 140–144 (In Russian).
2. Andrizhievsky A. A., Mikhalevich A. A., Trifonov A. G. Modelling of thermal convective currents in gas-fluid dynamic layers of water cooler. *Doclady Akademii nauk Belarusi* [Reports of Academy of Sciences of Belarus], 1995, vol. 39, no. 3: Technical Science, pp. 109–113 (In Russian).
3. Bezlepkin V. V., Semashko S. E., Sidorov V. G., Ivkov I. M. LNPP II: support of passive safety systems. *ROSENERGOATOM* [ROSENERGOATOM], 2008, no. 2, pp. 18–23 (In Russian).

Информация об авторах

Андрижиевский Анатолий Альгертович – доктор технических наук, 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, зам. генерального директора. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (220109, г. Минск, ул. Академика А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: tral@list.ru

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

Information about the authors

Andrizhievsky Anatoly Algertovich – DSc (Engineering), Professor, the Department of Energy Savings, Hydraulics and Heat Engineers. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aaandri@mail.ru

Trifonov Alexander Georgiyevich – DSc (Engineering), Deputy Director-General. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of NAS of Belarus (99, Akademika A. K. Krasina str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tral@list.ru

Karpovich Liliya Sergeyevna – Junior Researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of NAS of Belarus (99, Akademika A. K. Krasina str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: knopka.lija@mail.ru

Поступила 02.04.2019