

УДК 621.039.51

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ НА ОДНОПЕТЛЕВОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ**Сатаев А.А., Дунцев А.В., Воробьев Д.А., Красавин Н.А.***ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижний Новгород, e-mail: sancho_3685@mail.ru*

Анализ механизмов смешения жидкостей различных по химическому составу, вязкости, температурам имеет важное значение в понимании процессов теплообмена. Эти процессы оказывают существенное влияние на условия работы реакторной установки, ее нейтронную физику, гидравлику, безопасность, прочность. Настоящая статья посвящена исследованию процессов смешения неизотермических потоков на уменьшенной модели, имитирующей одну реакторную петлю водо-водяного реактора. При проведении экспериментов было исследовано распределение температур вдоль области смешения, образованной имитацией выемного блока (дырчатого листа). Основным методом исследования – это изучение полей распределения температуры в области смешения путем построения послойной (поуровневой) картины распределения температуры (осуществляется за счет установки датчиков на разной высоте), считанной в автоматическом режиме быстродействующей программой с термодатчиков (Т1-Т8), расположенных на пути смешения потоков. Полученные экспериментальные данные дают возможность проанализировать характер смешения, наличие больших температурных градиентов, застойных зон. Накоплен большой объем экспериментальных данных, впоследствии планируется их использование для сравнения с результатами, полученными в программных комплексах вычислительной гидродинамики (CFD). Это дает большую экспериментальную базу для их верификации, а также поиска путей возможной интенсификации этих процессов.

Ключевые слова: неизотермический поток, смешение, интенсификация, визуализация, теплообмен, комплексы вычислительной гидродинамики (CFD)

INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF MIXING NON-ISOTHERMAL FLOWS AT ONE-LOOP MODEL OF THE REACTOR PLANT**Sataev A.A., Duntsev A.V., Vorobev D.A., Krasavin N.A.***Federal State Educational Institution of Higher Education «Nizhny Novgorod State Technical University
R.E. Alekseev», Nizhny Novgorod, e-mail: sancho_3685@mail.ru*

Analysis of mechanisms of mixing of fluids of different chemical composition, viscosity, temperature is important in understanding the processes of heat and mass transfer. These processes have a significant impact on the working conditions of the reactor, its neutron physics, hydraulics, safety, strength. This article is devoted to study of processes of mixing of non-isothermal flow on the smaller models, one simulating the reactor loop in the pressurized-water reactor. In the experiments, it was investigated the temperature distribution along the mixing region formed by imitation removable core basket (perforated sheet). The main method of research is the study of the fields of temperature distribution in the mixing area by constructing a stratified (layered) model of temperature distribution. This is done by installing sensors at different heights. Sensors (T1-T8), located on the way of mixing flows, are read in the automatic mode, fast program. The obtained experimental data provide an opportunity to examine the nature of mixing, the presence of large temperature gradients and stagnant zones. We have accumulated a large amount of experimental data, it is also planned to use them for comparison with the results obtained by software of computational fluid dynamics (CFD). This gives you a large experimental database for the verification and search of ways of an intensification of these processes.

Keywords: non-isothermal flow, mixing, intensification, visualization, heat and mass transfer, programs of computational fluid dynamics (CFD)

Особенностью современного этапа развития науки и техники является стремление к повсеместной оптимизации конструкций путем снижения их массогабаритных характеристик, а также переходу от консервативного подхода (с большими коэффициентами запаса) к более лояльным, но в то же время без потерь, связанным с безопасностью. Эта тенденция не могла не затронуть и одну из самых перспективных и наукоемких отраслей – ядерную энергетику.

Моделирование процессов смешения жидкостей различных по температурам, вязкости, химическому составу имеет важное значение в понимании процессов тепло-

обмена. Эти процессы оказывают существенное влияние на условия работы реакторной установки, ее нейтронную физику, гидравлику, безопасность, прочность. Например, одной из таких важных проблем, оказывающих существенное влияние на материал корпуса, является определение термомеханических пульсаций. Их определение необходимо для оценки прочности и надежности элементов реакторной установки. Особенно важны места сварки главных патрубков и сварные швы обечаек конструкции реактора, парогенератора, компенсатора давления и других важных единиц оборудования. Пульсации температур при-

водят к неравномерной тепловой нагрузке на металлические изделия, приводя к усталостным разрушениям, трещинам и выходу элементов оборудования из строя [1]. В настоящее время в нашей стране, а особенно за рубежом разрабатываются программные средства, позволяющие описывать процессы смешения неизотермических потоков. Актуальность применения CFD программ подтверждается большим числом научных публикаций по данной тематике и рядом специализированных научных конференций, посвященных этому вопросу. К наиболее значимым в этой области можно отнести работы, координируемые в рамках OECD/NEA (OECD/ Nuclear Energy Agency) – в Европе, и в рамках программы CASL (Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors) – в США. Так, начиная с 2002 года OECD/NEA проводит ежегодные конференции CFD4NRS (CFD for Nuclear Reactor Safety), посвященные задачам и проблемам использования CFD программ в атомной энергетике [2]. Наиболее значительных успехов в этой сфере достигли ученые из Германии (на модели Rossendorf Coolant Mixing Model (ROCOM) [3]). Не менее значимые результаты были также получены на установках Vattenfall (США), установке Fortum PTS (Финляндия), стенде ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Россия).

Экспериментальные исследования потоковых процессов, пригодные для верификации CFD, стали возможными только в последнее время вследствие появления новых систем измерений, основанных на методе тепловизионной съёмки, использовании лазерной съёмки (PIV, PLIF), высокоскоростной видеокамеры, кондуктометрических методов и др. Все перечисленные методы не являются универсальными и требуют проведения большого объема работ по освоению и адаптации к условиям конкретных экспериментов.

Одним из экспериментальных методов, доступный относительно недавно, позволяющим измерять локальные характеристики в турбулентных потоках теплоносителя, является метод кондуктометрии с использованием датчиков различной пространственной конфигурации. Наиболее актуальные посвященные этому методу результаты описаны в работах [4, 5].

Методы компьютерного моделирования (вычислительная гидродинамика) базируются на определенных моделях. В общем виде эти модели описываются уравнением движения в форме Навье – Стокса и уравнением неразрывности, нерешаемыми в аналитическом виде. Один из подходов к моделированию процессов турбулент-

ного обмена основан на прямом численном решении системы дифференциальных уравнений движения и неразрывности, записанных для мгновенных (актуальных) значений параметров турбулентного потока [6]. Основные направления использования CFD программ для ядерной энергетики заключаются в анализе условий работы элементов оборудования, функционирующих в условиях термоциклических нагрузок, возникающих в результате воздействий течения неизотермических потоков (смешение, стратификация, естественная конвекция, борное регулирование) [7], анализе поля температур на входе в активную зону в несимметричных режимах работы РУ, оптимизации алгоритмов работы реакторной установки. Также определенные проблемы возникают при переходных режимах реакторной установки. В работе [8] анализируется поведение активной зоны при поступлении в нее пробки из чистой воды во время стоянки остановленного реактора в условиях давления приблизительно 25 бар и естественной циркуляции.

Целью настоящей работы является исследование процессов смешения неизотермических потоков на однопетлевой модели реакторной установки, имитирующей основное течение теплоносителя в современных водо-водяных реакторных установках. Кроме того, важной задачей является поиск средств для возможной интенсификации этого смешения, накопление экспериментальной базы для визуализации данных моделей в комплексах вычислительной гидродинамики (CFD). Научная новизна представленной работы заключается в том, что нами было рассмотрено распределение температур при смешении неизотермических потоков, выявлены застойные зоны, неоднородности в смешении потоков. Полученные данные необходимы для создания верификационной базы современных комплексов CFD-моделирования, а также исследования закономерностей для создания математических моделей смешения неизотермических потоков. Полученные данные возможно использовать для обоснования безопасности существующих проектов водо-водяных реакторных установок, а также в разработке новых. Но самое главное, что в дальнейшем нами будут опробованы различные способы интенсификации этого смешения (в рамках данной статьи не описываются).

Для исследования смешения неизотермических потоков была предложена уменьшенная модель реакторной установки, представленная одной циркуляционной петлей (рис. 1). Активная зона реактора

моделируется дырчатым листом, являющимся частью выемного блока. Экспериментальный стенд состоит из следующих частей: 1 – исследуемая модель с 7 – крышкой с уплотнением, 2 – центробежный насос с частотным регулированием производительности (для создания циркуляции по замкнутой петле: насос – опускной участок – дырчатый лист-активная зона – насос), 3 – расходомеры (используются тахометрические расходомеры крыльчатого типа, предварительно градуированные на расход 0,5–15 л/мин), 4 – бак подготовки горячей воды, оснащенный 5 – сигнализатором уровня, нагрев осуществляется 6 – ТЭНом нагревательным.

Кроме того, стенд оснащен запорной ручной арматурой (вентили K1, K2, K3, K4, K5, K6), предназначенной для заполнения самой модели и бака подготовки горячей воды. Основной метод исследования – это изучение полей распределения температуры в области смешения путем построения послойной (поуровневой) картины распределения температуры (осуществляется за

счет установки датчиков на разной высоте), считанной с термодатчиков (T1–T8), расположенных на пути смешения потоков. Была создана специальная быстродействующая программа по опросу сразу нескольких датчиков (первая модификация 8 датчиков). На рис. 1 показана имитация основного тракта циркуляции, но возможно оснащение модели крышкой с возможностью подвода потока сверху, что имитирует аварийную проливку, а также парогенераторный режим. Заполнение модели осуществляется после открытия вентилей K3, K5, K6. Слив и расколаживание модели между экспериментами производится открытием вентиля K2. Заполнение бака подготовки горячей воды осуществляется после открытия вентилей K4, K5, K6, при закрытом вентиле K3. О заполнении бака сигнализирует звуковой сигнал сигнализатора уровня. Нагрев воды осуществляется с помощью ТЭНов, до определенной температуры установленной на терморегуляторе (по температуре T9), дополнительно дублируется показанием температуры T10.

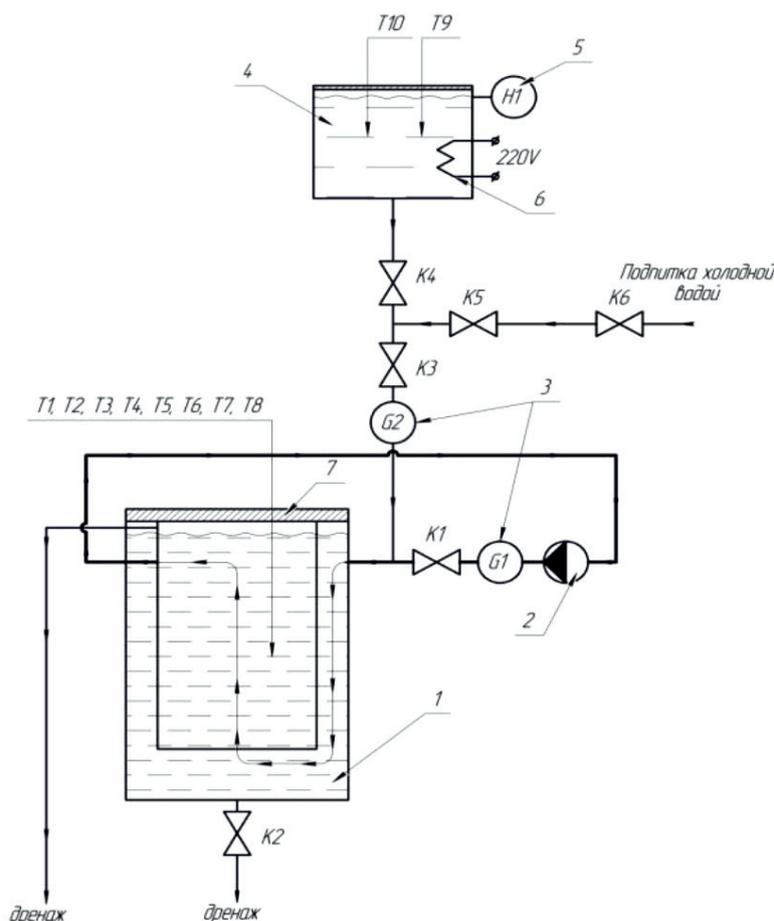


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

В данной работе описываются процессы, происходящие при смешении неизотермических потоков без использования принудительной циркуляции (центробежный насос отключен, вентиль К1 закрыт). При достижении заданной температуры (в данной работе $T_9 = T_{10} = 60 \pm 0,5^\circ\text{C}$), последовательно открываются вентили К4 и К3. Горячий поток с расходом G1 (определяется по показаниям расходомера) самотеком подается в модель, заполненную предварительно водой с меньшей температурой.

Для изучения поведения неизотермических потоков нами был использован метод температурного зондирования. В качестве зондов использовались датчики температуры Dallas Instruments. Располагаются они определенным образом (согласно рис. 3). Эти зонды имеют возможность изменять свое положение относительно вертикали (тем самым мы изменяем уровень измерения). Данные температурных показаний

считываются в автоматическом режиме, передаются в блок коммутации датчиков (контактные группы датчиков + подтягивающие резисторы, питание схемы), а затем обрабатываются микроконтроллером и отправляются на ПЭВМ для дальнейшей обработки. Микроконтроллер опрашивает за 1 секунду 8 датчиков. Схема работы представлена на рис. 2.

При проведении экспериментов было исследовано распределение температур вдоль области смешения, образованной имитацией выемного блока (дырчатого листа). Горячая среда была подготовлена в баке подготовки горячей воды, ее температура $60 \pm 0,5^\circ\text{C}$. В модель она подается с расходом $G_2 = 3,7$ л/мин (полностью открытые вентили К3, К4). Датчики были расположены по определенной геометрии, показанной на рис. 3 (Т1-Т4 – периферийная зона, Т5-Т8 – центральная зона, причем повернуто относительно оси на угол 45° , для большего охвата исследуемой области).



Рис. 2. Принципиальная схема автоматической обработки и передачи экспериментальных данных

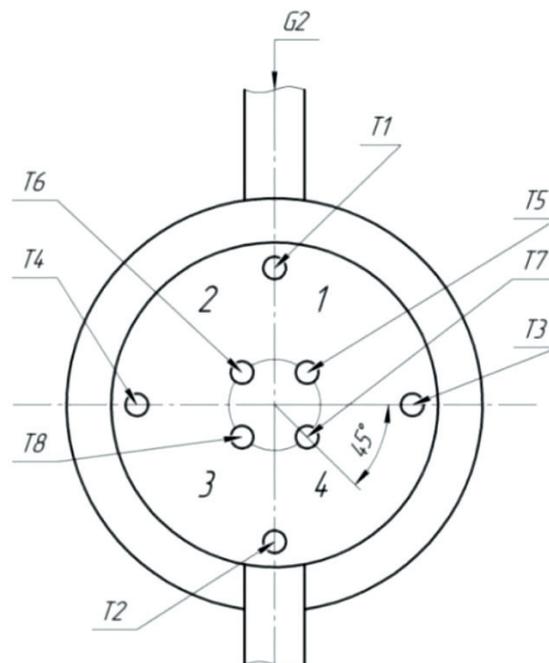


Рис. 3. Схема расположения датчиков (Т1-Т8) в экспериментальной модели

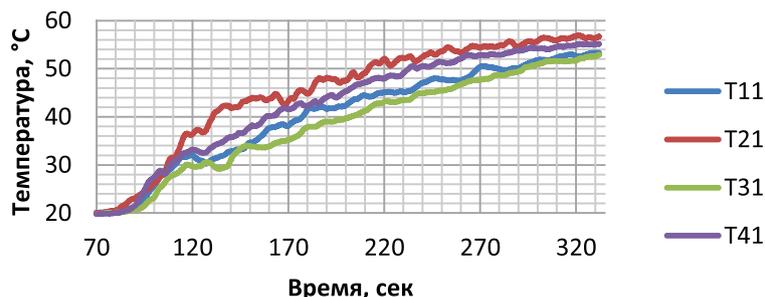


Рис. 4. График изменения температуры во времени на первом уровне измерений (расстояние 10 мм от дырчатого листа модели)

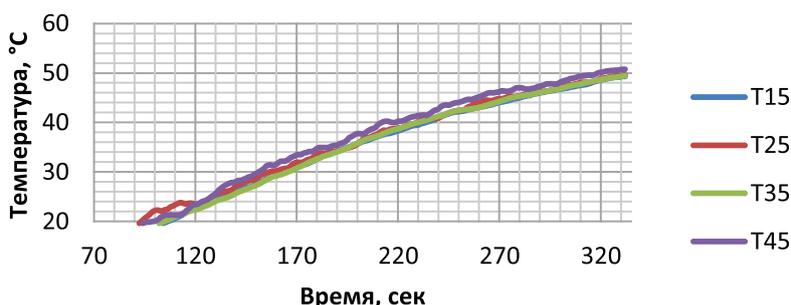


Рис. 5. График изменения температуры во времени на пятом уровне измерений (расстояние 170 мм от дырчатого листа модели)

На рис. 4 можно видеть изменение температуры во времени на первом уровне измерений (расстояние 10 мм от дырчатого листа модели), а на рис. 5 можно видеть изменение температуры во времени на пятом уровне измерений (максимальная высота – расстояние 170 мм от дырчатого листа модели). Уровней исследования может быть и больше, но в данной конфигурации их было выбрано 5. (Пояснение к рис. 4, 5: датчикам присваиваются индексы – T_{ij} , где i – порядковый номер датчика, j – номер соответствующего уровня измерения). Измерение температур происходит до полного опорожнения бака запаса горячей воды, что составляет (при расходе $G_2 = 3,7$ л/мин) около 300 с, а затем еще продолжается до наступления установившейся температуры, по показаниям датчиков T1–T8.

На рис. 5 показано изменение температур датчиков T1–T4, расположенных согласно рис. 3 на периферийной области. Из анализа графиков можно сделать вывод о неравномерности смешения при прохождении потоком выемного блока.

Так же можно судить о неравномерности смешения и образования застойной зоны в области 1 четверти, согласно рис. 3 (датчики T1 и T3). Градиент по температуре составляет в среднем от 4–10 °C. Если дополнительно сравнивать отдельно центральную область (датчики T5–T8), то в целом можно судить о равномерности

смешения (градиенты не более 1–2 °C на 1–5 уровнях). Центральная область не претерпевает серьезных изменений.

В результате проделанной работы было построено послойное распределение температуры в области смешения неизотермических потоков в модели, имитирующей одну реакторную петлю. Стенд прошел испытания, показал стабильную работу на разных режимах. Была найдена застойная зона (зона с неравномерным смешением и большими градиентами по температуре) в области 1 четверти. В дальнейшем планируется изменение конфигурации датчиков и более детальное исследование полученной области. Следующим этапом будет являться исследование воздействия на смешение принудительной циркуляции (с использованием центробежного насоса), а также проведение экспериментов с меньшими тепловыми перепадами. Затем полученные данные будут верифицироваться и сравниваться с результатами, полученными в программных комплексах вычислительной гидродинамики (CFD). Впоследствии, этими данными можно оперировать для нахождения путей модернизации существующих ядерных энергетических установок (конструкции корпуса, организации подвода теплоносителя), обоснования их безопасности, а также создания новых установок с лучшими характеристиками.

Список литературы

1. Сатаев А.А., Дунцев А.В. Визуализация процессов смешения неизотермических потоков // Международный студенческий научный вестник. – 2017. – № 5. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17687> (дата обращения: 11.01.2018).
2. Актуальные вопросы развития экспериментальной базы данных для верификации CFD программ при их использовании в атомной энергетике / М.А. Большухин [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 2(99). – С. 117–125.
3. Hohne T., Kliem S. Coolant mixing studies of natural circulation flows at the ROCOM test facility using ANSYS ANSYS-CFX // CFD4NRS, Garching, Germany, Proceedings. – 2006. – P. 23.
4. Особенности применения пространственных кондуктометрических датчиков при моделировании смешения потоков теплоносителя в элементах оборудования ядерных энергетических установок / А.А. Баринев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 247–255.
5. Разработка и адаптация вихреразрешающей измерительной системы для проведения верификационных экспериментов на крупномасштабной модели ядерного реактора / С.М. Дмитриев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 203–213.
6. Ковальников Н.Н. Прикладная механика жидкости и газа / Н.Н. Ковальников. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2010. – 219 с.
7. Исследование перемешивания теплоносителя в опускной камере реактора / Е.А. Лисенков [и др.] // Вопросы атомной науки и техники Серия: «Обеспечение безопасности АЭС». – 2008. – № 23. – С. 3–17.
8. Kuoranta J. Поведение активной зоны реактора ВВЭР-440 на АЭС Ловииза при неполном перемешивании раствора бора во время останова в условиях естественной циркуляции // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 9-ой междунар. науч. конф. (Подольск, 19–22 мая 2015 г.). – Подольск, 2015. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/index-ru.htm> (дата обращения: 11.01.2018).