

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В СОВРЕМЕННЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

*С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.В. Рязанов,
А.Н. Пронин, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов*

Нижегородский государственный технический университет

Процессы смешения неизотермических потоков существенно влияют на параметры теплоносителя на входе в активную зону, что определяет её теплотехническое состояние. На входе в реактор могут возникать неравномерные потоки теплоносителя по разным петлям, приводящие к локальным отклонениям параметров от номинальных. Процессы, протекающие при отклонении параметров теплоносителя от допустимых значений, необходимо оценивать при обосновании безопасной работы ядерных энергетических установок, поскольку они приводят к существенной неравномерности теплогидравлических характеристик в камере смешения реактора и на входе в каналы активной зоны. Такие явления нуждаются в детальном изучении при помощи CFD-кодов, которые должны проходить процедуру верификации основе представительных экспериментальных данных.

На базе кафедры «Атомные и тепловые станции» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева был создан экспериментальный стенд (рис. 1) для исследования смешения потоков в модели водо-водяного реактора с целью детального изучения процессов локального отклонения изучаемых параметров. Стенд спроектирован в виде двух контуров: исследовательского контура смешения потоков с установленной экспериментальной моделью и контура охлаждения, необходимого для отвода тепла и подготовки «холодного» теплоносителя.

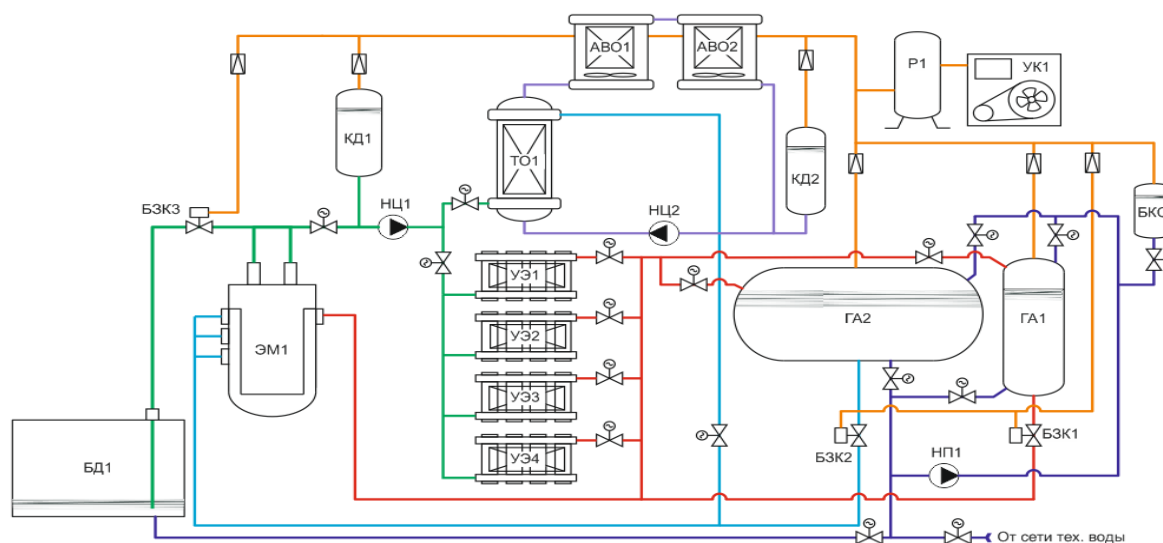


Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда

Оборудование стенда позволяет создать режимы как ламинарные, так и турбулентные течения при различной температуре, расходах и концентрации примесей в потоке теплоносителя. Параметры, при которых может осуществляться моделирование, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры экспериментального стенда

| Параметр | Значение |
|--|-----------------|
| Число имитирующих петель циркуляции теплоносителя | 6 |
| Мощность нагревательных установок (суммарная), кВт | 800 |
| Мощность контура охлаждения (максимальная), кВт | 960 |
| Расход через экспериментальную модель, м ³ /ч | До 200 |
| Температура смешиваемых потоков, °С | 15-200 |
| Диаметры исследуемых моделей по внешней обечайке, мм | 400-1500 |
| Давление в контуре смешения потоков, кгс/см ² | до 20 |
| Удельная электрическая проводимость теплоносителя | до 4000 мкСм/см |

Экспериментальная модель (ЭМ) представлена на рис. 2. Экспериментальная модель оснащена четырьмя патрубками ввода теплоносителя, по одному из которых подается соленый поток, по трем другим дистиллированная вода. Теплоноситель проходит от входных патрубков ЭМ вниз по опускной кольцевой камере, попадает в нижнюю напорную камеру, откуда распределяется по дросселированным каналам имитаторам активной зоны. По окончании подъема в каналах имитатора теплоноситель выходит в верхнюю сливную камеру и удаляется из модели через два выходных патрубка в крышке.



Рисунок 2 – Общий вид экспериментальной модели

Экспериментальные исследования основывались на методе пространственной кондуктометрии. Измерительная система стенда состоит из технологической части, необходимой для контроля режимных параметров работы установки, а также исследовательской части, при помощи которой выполняются замеры физических характеристик в области турбулентного смешения потоков в модели реактора. Исследовательская часть измерительной системы основана на применении кондуктометрических датчиков сетчатой и стержневой конструкции (рис. 3).



Рисунок 3 – Исследовательская часть измерительной системы:
а – сетчатый датчик (верхняя камера); *б* – стержневые датчики

Датчики установлены на всем протяжении опускной камеры экспериментальной модели (в трех плоскостях с азимутом 20° между соседними датчиками), а также на входе и выходе из области, имитирующей каналы активной зоны. Характеристики измерительной системы дают возможность работать с потоками в широком диапазоне проводимостей рабочих сред, а также получать частотно-энергетические характеристики флуктуаций значений локальной концентрации для последующего восстановления спектра турбулентных пульсаций в потоке.

Экспериментальные исследования проводились при различных параметрах. Изменяя два параметра – вязкость и скорость теплоносителя, удалось провести исследования в диапазоне чисел Рейнольдса от 10000 до 40000. Обработка показаний исследовательской измерительной системы позволила получить поле относительного солесодержания в экспериментальной модели на входе и выходе имитатора активной зоны экспериментальной модели (рис. 4). В ходе обработки данных эксперимента выявлено наличие закрутки потока при движении по кольцевому зазору экспериментальной модели по часовой стрелке на угол порядка 180° .

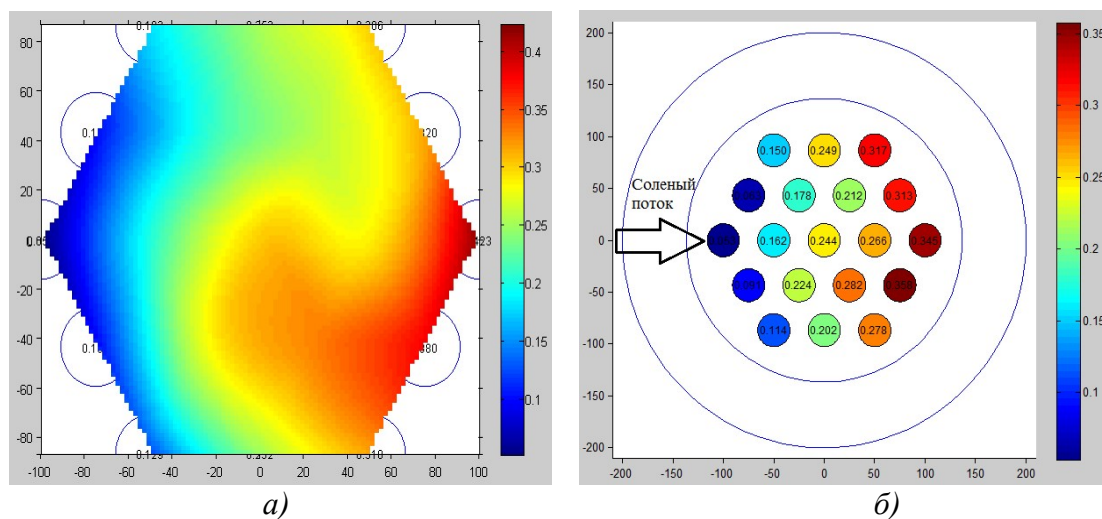


Рисунок 4 – Распределение относительной концентрации в нижней камере экспериментальной модели (а) и на выходе из каналов-имитаторов (б) ($Re = 10000$, $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Претестовые и посттестовые CFD-расчёты позволили оценить эффективность использования моделей, заложенных в расчётные программы, а также определить явления и эффекты, которые изначально не были учтены. Таким образом, уже на данном этапе возможности стенда позволяют получить представительные экспериментальные данные, которые могут быть использованы в качестве верификационной базы для расчётных программ.

В рамках проведения следующего этапа исследований на стенде планируется выполнить следующие экспериментальные работы:

- исследование процессов смешения теплоносителя в напорной камере реактора при варьировании критерия Рейнольдса за счет изменения скорости потока;

- исследование процессов смешения теплоносителя в напорной камере реактора при варьировании критерия Рейнольдса за счет изменения молекулярной вязкости (температуры среды);

- исследование процессов смешения теплоносителя в напорной камере реактора при варьировании критерия Рейнольдса за счет изменения гидравлического диаметра (для этого будет изготовлена экспериментальная модель диаметром 600 мм с сохранением подобия геометрических размеров с действующей моделью 400 мм).

УДК 621.313

КИНЕТИЧЕСКИЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ

Д.В. Русанов, К.Л. Ковалев, В.А. Подгузов

Московский авиационный институт

(национальный исследовательский университет)

Введение. Существует несколько видов накопителей энергии, основанных на разных физических принципах: аккумуляторные батареи, конденсаторные батареи, сверхпроводниковые индуктивные накопители, кинетиче-