

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации **Лобанова Павла Дмитриевича** «Экспериментальное моделирование локальной гидродинамики и теплообмена в элементах ядерных энергетических установок», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

1. Тема диссертации является **актуальной** для Российской программы дальнейшего развития двухкомпонентной ядерной энергетики с замыканием топливного цикла, которая предусматривает дальнейшее совершенствование реакторов ВВЭР, а также ускоренное строительство реакторов БН и реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ). Следует сказать, что количество отечественных исследований локальной гидродинамической структуры пароводяного потока (напряжения трения на стенке, скорости жидкости и пузырей, распределение пузырей газа) и теплообмена одно- и двухфазных потоков невелико. Тщательное исследование этих явлений с помощью современных средств измерения и визуализации действительно представлено впервые. Особенно большой интерес представляют экспериментальные данные, полученные применительно к ТЖМТ. Полученные экспериментальные данные и выводы из них представляют большой интерес для разработчиков расчетных кодов и, особенно CFD – методов.

2. **Научная новизна** полученных результатов заключается в экспериментальном исследовании закономерностей локальных распределений осредненных и пульсационных значений скорости, напряжения трения, температуры и газосодержания. Исследованы одно- и двухфазные течения в моделях ТВС при широкой вариации конструкции дистанционирующих решеток (ДР), диаметра стержней-имитаторов твэлов, относительного расстояния между их осями, режима течения теплоносителя, установлены области возмущения потока за дистанционирующими решетками. Впервые проведены детальные исследования смешения потоков жидкометаллического теплоносителя с разной температурой в тройниковом соединении. Для понимания закономерностей процессов, происходящих при малой течи теплоносителя второго контура в ПГ РУ с ТЖМТ выполнено экспериментальное исследование формирования пузырей и скорости их движения в расплавах свинца и сплава Розе. В экспериментах использовались современные методы измерений, такие как, электродиффузионный метод для определения напряжений на стенке канала, измерение распределения температуры стенки производилось методом скоростной инфракрасной термографии с помощью тепловизора Flir Titanium 570M.

3. **Достоверность результатов** исследований подтверждается использованием современных апробированных средств измерений, многократным повторением экспериментов с сохранением начальных и граничных условий, анализом неопределенности экспериментов и сравнение их с известными зависимостями.

4. **Практическое значение работы.** Полученные данные могут быть использованы при проектировании элементов оборудования новых поколений реакторных установок и для обоснования конструкторских решений. Еще большее значение дает возможность использовать полученные результаты для настройки расчетных моделей и валидации CFD-кодов.

5. В первой главе приведен обзор ранее выполненных работ по исследованию структуры одно- и двухфазных потоков в оборудовании и ТВС ЯЭУ. Отмечается, что исследования начались с 60-х годов прошлого столетия, но в них, в основном, уделялось внимание измерению интегральных параметров, таких как, осредненная скорость теплоносителя (u), напряжение трения на стенке (τ), температуры теплоносителя, определение коэффициентов трения (λ), гидравлического сопротивления (КГС, ξ) и теплообмена. Применялись отборы давления, трубки Пито и Престона, термопарные измерения. Однако, эти методы не позволяли определять локальные возмущения потоков в элементах оборудования и ТВС РУ. Требуется применение современных методов измерения с высоким временным разрешением: тонкопленочной анемометрии, лазерно-доплеровских измерителей скорости (ЛДИС), а в последние годы и цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry, PIV). Работ с применением таких методов очень мало и они, в основном, зарубежные. Практически отсутствуют работы по исследованию локальных структур потоков применительно к ТЖМТ. Имеются лишь некоторые работы применительно к натриевому теплоносителю.

6. Вторая глава посвящена обзору современных методов исследования гидродинамической структуры одно- и двухфазных потоков. Были подробно описаны методы, применяемые автором диссертации. Выполнен анализ неопределенности измерений δ .

7. Третья глава посвящена описанию экспериментов по локальной гидродинамике и теплообмену в модельных сборках ТВС с различными типами дистанционирующих решеток (ДР). Получены данные об изменении напряжения трения на стенке стержня – имитатора твэла, скорости теплоносителя в ячейках, влиянии ДР на теплообмен и распределение локального газосодержания по высоте и поперечному сечению модели ТВС, перепаде давления в пучках стержней и на решетках различной конструкции. Приведены различные графики, показывающие влияние относительного

шага расположения стержней, наличия различных типов ДР, расстояния между ДР на распределение относительных пульсаций скорости в межствольном пространстве и на распределение касательных напряжений на стенках канала. Исследования были проведены как для одно-, так и для двухфазных потоков. Двухфазный поток моделировался газожидкостным потоком. Измерения проводились с помощью скоростной съемки, цифровой лазерной визуализации, лазерной доплеровской анемометрии, электродиффузионного метода измерения напряжения трения на стенке, микротермопар.

8. В **четвертой главе** описаны результаты экспериментальных исследований локальных гидродинамических характеристик и теплообмена двухфазных течений применительно к реакторам с ТЖМТ. Исследовались процессы вероятного взаимодействия свинцового теплоносителя с водяным при разрыве трубки ПГ. Эксперименты проводились путем моделирования двухфазного потока газожидкостным потоком. Широко использовались современные методы визуализации как PIV, планарная лазерная флуоресценция (PLIF), электродиффузионный метод. Расплавленный свинец моделировался сплавом Розе. Исследование смешения двух разных потоков ТМЖТ с разной температурой проводилось на примере Т-образного соединения труб. Профили температур в зоне смешения фиксировались с помощью микротермопар и методом скоростной инфракрасной термографии с использованием тепловизора. Эксперименты были проведены также на модели семистержневого пучка с одним (центральным) обогреваемым имитатором ТВЭЛ.

9. В **заключении** подведены итоги исследований. Несмотря на интересные и впечатляющие результаты исследований, к работе имеется ряд вопросов и замечаний:

- 1) В автореферате ничего не сказано про правомерность моделирования двухфазного пароводяного потока газожидкостным. Ведь в газожидкостном потоке нет генерации пара на обогреваемых поверхностях, нет конденсации на холодных участках. Поэтому локальные характеристики потока будут различаться.
- 2) В автореферате ничего не сказано, как можно использовать полученные результаты по интенсификации теплообмена из-за установки в пучок стержней различных типов ДР. То, что ДР интенсифицируют теплообмен в пучках стержней известно давно. Но как далеко по течению распространяется фактор интенсификации, пока не ясно. Ни каких четких рекомендаций, как часто устанавливать ДР в пучке, автор не дал.

- 3) При описании явлений, происходящих при малой течи теплоносителя из пароводяного контура ПГ РУ в контур с ТЖМТ, не приведено никаких конкретных рекомендаций, как рассчитывать повышение давления в контуре с расплавленным металлом и как увеличивается его объем. А то, что в этой аварии происходит повышение давления и растет уровень в буферной емкости мы заметили еще в 80-е годы при работах со свинцово-висмутовым теплоносителем.
- 4) Полученные автором результаты исследований очень важны для научного понимания поставленных вопросов, для построения расчетных моделей математиками. Однако, пока четких рекомендаций для конструкторских организаций, как использовать эти данные при проектировании, не дано.

Несмотря на приведенные замечания, судя по автореферату, можно уверенно сказать, что диссертация соискателя является самостоятельным и законченным научным исследованием, обладающим достаточной степенью научной новизны, теоретической и практической значимостью. Получен ряд новых приоритетных данных по локальному теплообмену и гидродинамике теплоносителей в элементах реакторных установок с водяным и тяжелым жидкометаллическим теплоносителями.

Считаю, что представленная диссертация соответствует критериям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор **Лобанов Павел Дмитриевич** заслуживает присуждения искомой учёной степени доктора технических наук по специальности 1.3.14. «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Главный специалист –
Доктор технических наук
(05.14.03 – Ядерные энергетические установки,
включая проектирование, эксплуатацию и вывод
из эксплуатации, отдел 001.4
28.02.2022 г.
Телефон +7 (903) 710-47-95
e-mail: yabezrukov@yandex.ru



Безруков Юрий Алексеевич

Подпись Безрукова Ю.А. заверяю
Заместитель генерального директора по персоналу –
начальник отделения 9.00
Захаров Антон Борисович
28.02.2022



ул.Орджоникидзе д.21, г.Подольск,
Московская обл, 142103 Российская Федерация
АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» телефон (4967)54-25-16; (495)502-79-10
e-mail: grpress@grpress.podolsk.ru