

УДК 621.039.58

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТЕНДОВ БЕЗОПАСНОСТИ

*Смолин В.Н., Шишов В.П., Грачев В.И., Ионов А.И., Емельянов А.И.,
Седова Т.К., Балашов С.М. (ФГУП НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала)*

В мировой практике решения, принимаемые при проектировании АЭС, проверяются на крупномасштабных стендах. Комплексные испытания на них призваны обеспечить высокий уровень безопасности АЭС. Для воспроизведения процессов реакторной установки на стендах, как правило, соблюдается полновысотность оборудования, объемы, проходные сечения и число имитаторов твэлов уменьшается в соответствии с коэффициентом масштабирования. Исследуемые процессы при этом протекают в реальном времени, связующим звеном между моделью и прототипом становятся программные средства для расчета аварийных режимов. В 70—90-х гг. в мире было построено около 20 интегральных электрообогреваемых стендов легководных реакторов. За рубежом проведен большой комплекс исследований переходных и аварийных режимов, в том числе и на специально созданном в США ядерном реакторе LOFT с активной зоной диаметром 0,6 м, высотой 1,7 м, включающей 1300 твэлов. В 44 экспериментах была, в частности, показана эффективность системы аварийного охлаждения зоны (залив только снизу) и получено много новых данных, позволивших усовершенствовать коды улучшенной оценки [1].

В связи с недостатком информации о многомерности теплогидравлических процессов в реакторах на протяжении 15 лет реализовывалась международная программа 2Д/3Д. Ее результаты дали ответы на вопросы по основным проектным авариям. Отмечено, что первоначальные проекты системы аварийного охлаждения зоны оказались удачными и после исследований изменения в них были минимальными [2]. На полномасштабном стенде UPTF (М 1:1) было показано, что при заливе сверху вода системы аварийного охлаждения зоны проходит через верхние решетки всех ТВС без наступления захлебывания во всей возможной области встречных потоков воды и пара из активной зоны [3]. После сравнения результатов экспериментов на разных стендах был сделан вывод о масштабе моделирования верхней соединительной решетки активной зоны. Линейный масштаб модели реактора, при котором трехмерные эффекты идентичны для активной зоны при противотоке фаз на стадии залива, составляет М 1:3 [4]. На стендах меньшего масштаба теплогидравлические процессы искажаются, что означает частичное или полное несоответствие теплогидравлических процессов в модели и натурном объекте.

Недостаточное соблюдение принципов моделирования в экспериментальных установках может привести к неожиданным результатам. Так, на стенде SEMISCALE (М 1:1600) в 1972 г. температура оболочек имитаторов твэлов оказалась одинаковой как при работе, так и при отказе системы аварийного охлаждения зоны. Для таких малых стендов относительная масса металла на единицу объема теплоносителя значительно выше, чем в реальном аппарате, что приводит к ошибочным результатам в процессах, где большое значение имеет аккумулированное тепло и теплообмен между стенками и теплоносителем [5].

Крупномасштабные стенды ВВЭР. В нашей стране сооружение крупномасштабных стендов оказалось связанным с большими трудностями и по разным причинам потребовало много времени. Сооруженный в 80-е гг. во ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского стенд — крупномасштабная модель ВВЭР после распада СССР остался на Украине и не был пущен в эксплуатацию. Его проектная электрическая мощность 25 МВт и уникальные системы локализации аварии (четыре сосуда высотой до 40 м) до сих пор остаются самыми крупными. Для модели активной зоны было изготовлено 1000 имитаторов твэлов. Первый вариант сменной модели активной зоны состоял из 19 ТВС по 19 имитаторов твэлов ВВЭР-440 в каждой. Последующие варианты должны были моделировать активную зону ВВЭР-1000 [6]. После 1991 г. центром крупномасштабных стендов в России стал ЭНИЦ (г. Электрогорск Московской области). В середине 90-х гг. в НИТИ (г. Сосновый Бор Ленинградской области) началось сооружение крупномасштабного стенда (число имитаторов 2000) применительно к ВВЭР нового поколения.

Наиболее важным для безопасности АЭС является правильное воспроизведение процессов, происходящих в реакторе. Поэтому придается особое значение конструкциям и характеристикам элементов модели реактора. Определяющую роль при этом играют разработка и применение полномасштабных имитаторов твэлов и ТВС. Так, в ходе сооружения полномасштабного стенда безопасности в ЭНИЦ (М 1:300, число имитаторов 169, проектная мощность 10 МВт) была исправлена первоначальная компоновка: верхняя камера смещения установлена непосредственно над моделью активной зоны и осуществлен переход на имитаторы твэлов косвенного нагрева [7].

При сооружении таких сложных объектов большую помощь оказывает опыт создания зарубежных моделей. С учетом этого опыта на сооруженном в ЭНИЦ полномасштабном стенде безопасности ВВЭР было принято решение первоначально проводить исследование на уровне мощности остаточного энерговыделения. Переход к работе стенда на мощности, соответствующей номинальной для ВВЭР-1000 (что соответствует мощности имитатора твэла 60 кВт), — качественно новый уровень, поскольку таких интегральных стендов в мире мало. Получение экспериментальных данных применительно к твэлам максимальной мощностью (105 кВт), вероятно, может стать задачей следующего этапа исследований.

Конструкция имитатора твэла, включающая оболочку из нержавеющей стали, изолятор в виде уплотненного порошка оксида магния, нагревательного элемента в виде стержня (трубки) из нихрома или нержавеющей стали и медного токоподвода, была разработана около 20 лет назад во ВТИ им. Ф.Э. Дзержинского на основе технологии изготовления трубчатых электронагревателей. В 90-е гг. такие имитаторы получили распространение на стендах ФЭИ, НИКИЭТа и других организаций. Конструкция имитатора показала себя надежной в экспериментах при работе в пучках при нагрузке до 7 кВт/м в воде, борной кислоте и фреоне с ресурсом в сотни часов. В испытаниях при линейном тепловом потоке 22 кВт/м имитатор выдерживает несколько десятков резких бросков нагрузки от максимума до нуля и наоборот, что является хорошим показателем [8].

Имитаторы твэлов относятся к высокотехнологичным и ответственным элементам стенда. Помимо близости геометрии и тепловых свойств твэла, воспроизведения значения и распределения по высоте теплового потока и температуры оболочки, к ним предъявляются высокие требования по надежности (ресурс и циклы). Как показал опыт, до сборки в пучок обязательным является не только проверка работоспособности, но и проведение испытаний, причем всех изделий в тех же условиях, что и в экспериментах. Например, для имитатора стенда PWR-FLECHT испытания показали, что три изделия отказали после 40 циклов нагрева до 1100 °С и четыре после 48 циклов [9].

Отечественные и зарубежные результаты убеждают, что удачное проектирование, технологичность, надежность всех элементов модели активной зоны позволяют избежать потери времени и средств при выполнении экспериментальных программ. На-

пример, исключить такие потери из-за частых отказов имитаторов твэлов при высоких нагрузках с изолятором в виде оксида магния удалось лишь после его замены на более теплопроводный нитрид бора [10]. На сегодняшний день полномасштабный стенд безопасности ВВЭР является базовым крупномасштабным действующим инженерным стендом, опытные данные которого позволяют тестировать теплогидравлические коды, в том числе и по эффективности системы аварийного охлаждения зоны. По своим параметрам, таким, как масштаб моделирования, проектная мощность, рабочее давление и др., он находится на уровне лучших интегральных установок.

Эффективность аварийного охлаждения. Эффективность системы аварийного охлаждения зоны обусловлена одним из сложнейших теплогидравлических процессов — повторным заливом активной зоны, который в проектах ВВЭР предусмотрен комбинированным (в верхнюю камеру смешения и опускной участок). Процесс залива снизу разогретой активной зоны ассоциируется с движением границы смоченной и несмоченной области (фронта охлаждения). Скорость (координата) фронта охлаждения рассчитывается по одно- и двумерным кодам. Известно, кроме того, несколько близко совпадающих эмпирических корреляций по скорости или продолжительности охлаждения, полученных на малостержневых сборках применительно к ТВС ВВЭР-410 [11] и ВВЭР-1000 [12]. Масштаб установки и системные эффекты при заливе снизу не изменяют принципиально механизм этого процесса.

Процесс залива сверху хорошо рассчитывается для простой геометрии и малостержневых пучков с пленкообразующими устройствами, формирующими искусственно кольцевое стекание в верхней части каждого имитатора. Однако для верхнего и комбинированного залива процесс в реальных ТВС носит настолько сложный характер, что одномерной моделью описать движение верхнего фронта охлаждения не представляется возможным. Причиной, осложняющей картину процесса, является противоток фаз вода—пар, приводящий к торможению потока воды и захлебыванию как на верхней соединительной (защитной), так и дистанционирующих решетках ТВС. Наличие более холодных стенок ТВС необогреваемых трубок в пучке, неравномерность распределения температуры твэлов по радиусу ТВС приводят к неустойчивости и неравномерности движения стекающих пленок, часто в виде ручьев по отдельным твэлам. При этом на одном и том же уровне по высоте различие времени охлаждения для разных твэлов может составлять сотни секунд. Перечисленных факторов достаточно, чтобы прийти к выводу, что пока расчетным путем невозможно найти закономерности смачивания имитаторов твэлов в многостержневых пучках при комбинированном охлаждении [13].

Экспериментальные исследования разных видов залива проводили на полномасштабной 127-стержневой сборке имитаторов твэлов ВВЭР-440 (125 имитаторов и 2 необогреваемые трубки) [14], применительно к ВВЭР-1000 — на 37-стержневой сборке [15]. В работе [14] получено, что при верхнем и комбинированном заливе расхолаживание пучка происходит быстрее, чем при нижнем заливе. В опытах [15], наоборот, эффективность использования охлаждающей воды при заливе сверху хуже, чем при заливе снизу. Более эффективное охлаждение при заливе снизу для 19-стержневой сборки имитаторов твэлов ВВЭР-440 отмечалось и в исследовании [16]. Объяснение этому парадоксу предложено в работе [7]. Процесс захлебывания в малостержневых пучках, полномасштабных ТВС и активной зоне происходит неодинаково. Явление захлебывания для «малой» геометрии хорошо описывается линейной зависимостью, например, Кутателадзе, связывающей безразмерную скорость пара и воды. Но эта линейность нарушается, и расход воды возрастает уже для промежуточного масштаба, соответствующего, например, 169-стержневой сборке, и еще сильнее для полномасштабной ТВС ВВЭР-1000 вследствие неустойчивости процесса с резкими прорывами воды через верхнюю решетку. Причем на захлебывание значительно влияют высота решетки, форма и расположение отверстий и даже форма кромок отверстий решетки [17]. Очевидно, что без эмпирических корреляций для каждой модели ТВС пока трудно совершенствовать расчетные модели этого процесса.

Стенды безопасности канального и корпусного кипящих реакторов. Принципы создания теплофизических стендов-моделей кипящих аппаратов разработаны на основе уравнений динамики парогенерирующего канала совместно с подводящими и отводящими трактами [18].

В 80-е гг. на Зуевской экспериментальной ТЭЦ ВТИ проектировался крупномасштабный стенд контура многократной принудительной циркуляции мощностью 25 МВт с восемью параллельными каналами. В настоящее время в Электрогорске сооружается полномасштабный теплофизический стенд безопасности РБМК мощностью 11 МВт, предназначенный для верификации компьютерных кодов и экспериментальных исследований процессов в контуре циркуляции, процессов, происходящих при пуске, останове, перегрузке ТВС, в переходных и аварийных режимах. На стенде можно будет отрабатывать и испытывать новые конструкции и узлы гидравлического тракта технологических каналов. Максимальная мощность экспериментального канала составляет 7 МВт. Модель ТВС состоит из 18 имитаторов твэлов диаметром 13,6 мм и центральной необогреваемой трубки. В проекте предусмотрено шесть экспериментальных каналов — большой, средней и малой мощности 3, 2 и 1 МВт соответственно. В НИКИЭТе в 80—90-х гг. накоплен опыт работы со сборками имитаторов твэлов РБМК косвенного нагрева с разными формами профиля энерговыделения в экспериментах по повторному заливу, закризисной теплоотдаче, исследованию устойчивости в параллельных каналах и кризису теплообмена [19]. Была создана конструкция имитатора длиной 8 м. Для экспериментального канала на 7 МВт мощность одного имитатора достигает почти 400 кВт при силе тока 1300 А, и эти параметры максимальны среди известных аналогов. Возможности конструкции имитатора для экспериментального канала мощностью 3 МВт подтверждены в экспериментах по кризису теплоотдачи, для канала 2 МВт есть 3-летний опыт безотказной работы 7-стержневой пучка. На коротких образцах имитаторов с изолятором высокой теплопроводности достигнут линейный тепловой поток 56 кВт/м.

Как показали эксперименты [20], при заливе сверху обязателен обогрев стенки самого экспериментального канала, моделирующий сток тепла от графитовой кладки, который сравним с мощностью остаточного энерговыделения в ТВС. В экспериментах также обнаружена необходимость сохранения геометрии не только самой ТВС, но и всех элементов подвески, поскольку от этого фактора зависит соблюдение условий захлебывания на верхней решетке (толщина 15 мм) и распределение теплоносителя по сечению экспериментального канала. К новым разработкам для моделирования режима загрузки свежих ТВС относится конструкция имитатора твэла с шестью источниками электропитания, позволяющая регулировать профиль энерговыделения в ходе эксперимента. Применение новых материалов позволило создать конструкции электронагревателей, длительно работающие при 1000—1200 °С, что намного превышает возможности промышленных тэнов. Эти изделия могут быть использованы, например, для исследований аварий с осушением ТВС и разрывом трубы технологического канала.

Одним из результатов поиска новых концепций безопасности АЭС с внутренне присущей безопасностью является корпусной кипящий реактор ВК-300 [21]. Создаваемый для него уже на этапе проектирования стенд безопасности отличается от аналогов, поскольку позволяет своевременно проверять эффективность различных конструктивных схем и проектных решений систем безопасности. Новая решетка ТВС ВК-300 (диаметр твэла 9,1 мм, шаг 14 мм, длина 2,42 м), увеличенное расстояние между дистанционирующими решетками означают необходимость проведения экспериментов для определения условий возможного возникновения кризиса теплообмена. Для исследования кризиса теплообмена в ТВС ВК-300 выбрана 19-стержневая сборка (18 имитаторов твэлов косвенного нагрева и одна необогреваемая трубка диаметром 15 мм).

Актуальность экспериментальных исследований на интегральном стенде связана с недостаточной изученностью поведения двухфазного потока, в том числе в условиях

движения в элементах внутрикорпусного контура естественной циркуляции. Интегральный стенд должен воспроизводить явления и процессы, определяющие расход естественной циркуляции и распределение плотности теплоносителя по контуру реактора.

Следует отметить, что при глубокой разработке технических проектов реакторных установок с соответствующим экспериментально-стендовым подтверждением выбор на практике в настоящее время делается именно в пользу комплексных стендов, моделирующих все связанные механизмы и процессы в реакторе.

Ввиду явно выраженного быстрого изменения параметров ВК-300 и тесной связи теплогидравлических и нейтронно-физических процессов в кипящей зоне такого типа управление мощностью ТВС на стенде осуществляется дополнительной управляющей частью модели. Ее главными функциями являются:

изменение энерговыделения в моделях ТВС в соответствии с требуемыми законами;

формирование управления мощностью энерговыделения в ТВС в соответствии с учетом реактивных обратных связей в активной зоне, обусловленных изменениями плотности и температуры теплоносителя.

Экспериментальный участок стенда представляет собой прочный корпус, моделирующий корпус реакторной установки ВК-300, активная зона моделируется тремя 19-стержневыми сборками (мощность каждого имитатора 30 кВт). Предусматривается возможность высотного моделирования тепловыделения и гибкого регулирования мощности трех ТВС. Динамические свойства имитаторов твэлов с косвенным нагревом должны быть максимально приближены к свойствам твэлов. Такой имитатор твэла имеет тонкостенную оболочку и изолированный от нее трубчатый нагревательный элемент с плавным профилем энерговыделения по высоте любой формы без изменения внешнего диаметра нагревательного элемента. Для исследования некоторых режимов предусматривается использование имитаторов с изменяющимся в ходе эксперимента профилем энерговыделения по высоте.

На стенде предполагается воспроизвести структуру систем регулирования параметров, характеристики арматуры и алгоритмы рабочих режимов проектируемой реакторной установки. Стенд запланировано соорудить примерно за год. Как показывает опыт, на наладку такого стенда требуется еще около года. Если под эффективностью понимается получение на стенде необходимого количества экспериментальной информации в течение разумного времени, то по критерию эффективность—стоимость принятое решение представляется близким к оптимальному.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams J., Batt D., Berta V. Influence of LOFT PWR transient simulations on thermal — hydraulic aspects of commercial PWR safety. — Nucl. Safety, 1986, v. 27, № 2, p. 179—192.
2. Levy S. The important role of thermal hydraulics in 50 years of nuclear power applications. — Nucl. Engng Design, 1994, v. 149, № 1—3, p. 1—10.
3. Weiss P., Emmerling R., Hertlein R., Leibert J. UPTF experiment refined PWR LOCA thermal-hydraulic scenarios: Conclusions from a full-scale experiment program. — Ibid., 1999, v. 149, № 1—3, p. 333—347.
4. Classer H., Karwart H. The contribution of UPTF experiments to resolve some scale — up uncertainties in countercurrent two-phase flow. — Ibid., 1993, v. 145, № 1—3, p. 63—84.
5. Нигматулин Б.И., Виденев Е.Н., Землянухин В.В. Экспериментальные установки для моделирования аварий с малой течью теплоносителя в реакторах типа ВВЭР. — Теплоэнергетика, 1988, № 12, с. 24—28.
6. Гордон Б.Г. Крупномасштабная модель атомной электростанции с реактором типа ВВЭР. — В сб.: Эксплуатация и ремонт оборудования АЭС. Сер. Энергетика и электрификация. Экспресс-информация. М., 1986, вып. 2, с. 11—15.
7. Нигматулин Б.И., Балашов С.М. Вопросы сооружения модели реактора полномасштабного стенда безопасности ВВЭР. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизика-95». Обнинск, ноябрь 21—24, 1995.

8. Балашов С.М., Зоричев В.В., Коньков А.С. Опыт применения мощных электронагревателей в теплофизических экспериментах. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизика-98». Обнинск, 26—29 мая, 1998, т. 1, с. 372—380.
9. Blaisdell J. PWR FLECHT Final Report. WCAP-7665, 1971.
10. Majed M., Norback G., Wiman P. e.a. Experience using individually supplied heater rods in critical power testing of advanced BWR fuel. NURETH-7, 1998, p. 2608—2920.
11. Балашов С.М., Коньков А.С., Землянухин В.В. Экспериментальное исследование повторного затопления в сборках тепловыделяющих стержней ВВЭР. — Теплоэнергетика, 1999, № 6, с. 26—32.
12. Ложкин В.В., Судницын О.А., Куликов Б.И. Результаты экспериментального исследования по повторному охлаждению на моделях ТВС реактора ВВЭР при заливе снизу. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизика-98». Обнинск, 26—29 мая, 1998, т. 1, с. 389—399.
13. Status Report to the Advisory Committee on Reactor Safeguards in the Matter of Westinghouse Electric Company ECCS upper Head Injection Evaluation Model Conformance to 10 CFR50. Appendix K., 1976.
14. Безруков Ю.А., Логвинов С.А., Левчук С.В. и др. Создание полномасштабного макета кассеты реактора ВВЭР-440 для исследования температурного режима активной зоны на стадии повторного залива. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизика-82». Карловы-Вары, 4—8 мая, 1982, т. 1, с. 124—128.
15. Ложкин В.В., Судницын О.А., Куликов Б.И. Результаты экспериментального исследования по повторному охлаждению на моделях ТВС реактора ВВЭР при заливе сверху и комбинированном заливе. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизика-98». Обнинск, 26—29 мая, 1998, т. 1, с. 381—388.
16. Балашов С.М., Гордон Б.Г. Экспериментальное исследование повторного затопления модели кассеты ВВЭР-440. — В сб.: Теплогидравлические процессы в оборудовании АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1986, с. 21—27.
17. Tuomisto H. Large-scale air/water flow tests for separate effects during LOCAs in PWR. — In: Proc. Specialist Meeting on Small Break LOCA Analyses on LWR. Pisa, Italy, 23—27 June, 1985, v. 1, p. 149—162.
18. Габараев Б.А., Смолин В.Н., Соловьев С.Л. Принципы создания стендов-моделей для верификации теплогидравлических кодов для расчета энергетических реакторов. — В сб.: Теплофизические аспекты безопасности АЭС. Межд. конф. «Теплофизика-2001». Обнинск, 29—31 мая, 2001, с. 48—50.
19. Смолин В.Н., Шишов В.П., Емельянов А.И. и др. Электронагреватели для теплофизических моделей твэлов. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 6, с. 497—500.
20. Смолин В.Н., Балашов С.М. Опыт разработки и применения имитаторов твэлов для проведения теплофизических исследований. — В сб.: Межд. конф. «Теплофизика-95». Обнинск, ноябрь 21—24, 1995.
21. Митяев Ю.И., Токарев Ю.И., Соколов И.Н. и др. АС нового поколения с корпусным кипящим реактором повышенной безопасности. — Атомная энергия, 1992, т. 73, вып. 1, с. 13—19.

Поступила в Редакцию 6.02.02

УДК 621.039.7

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХРЕАКТОРНЫХ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ

*Бзнуни С.А., Жамкоян В.М., Худавердян А.Г. (Ереванский гос. ун-т, Армения),
Барашенков В.С., Соснин А.Н. (ОИЯИ), Полянский А.
(Институт ядерных проблем, Польша)*

На дальнейшее развитие ядерной энергетики влияет решение следующих основных задач: повышение безопасности и разработка эффективных методов трансмутации долгоживущих компонентов радиоактивных отходов, нераспространение технологии и материалов, пригодных для создания ядерного оружия, формирование положительного общественного климата доверия по отношению к ядерной технологии. Это неизбежно как в плане целесообразности, так и в связи с возрастающими энергетическими потребностями развивающейся экономики. С одной стороны, налицо угрожающее накопление CO_2 в атмосфере в результате сжигания нарастающего количества углеводородного топлива, которое приведет к глобальным экологическим катаклизмам. С другой, привлекают явные экономические преимущества (самые низкие тарифы), получаемые странами с развитой ядерной энергетикой, и энергетическая независимость, с которой напрямую связана обороноспособность страны.