

Расчеты, выполненные для оптимального случая, когда в макете около 10^3 лазерно-активных элементов и степень заполнения лазерного блока замедлителем равна единице ($K_{эф}$ лазерного блока $\sim 0,85$), показывают, что энерговыклад в лазерно-активную среду будет составлять около 2,5 МДж при длительности импульса ~ 10 мс. При таком энерговыделении достигаются удельные характеристики энерговыклада ~ 500 МДж/см³ и ~ 50 Вт/см³.

Согласно данным работ [7—9] эффективность преобразования энергии осколков деления, вложенной в аргон-ксеноновую смесь, в энергию лазерного излучения на переходе атома ксенона $5d[3/2]1-6p[5/2]3$ с длиной волны 1,73 мкм составляет около 3%, при этом максимальная энергия лазерного излучения в импульсе на выходе макета должна достигнуть 75 кДж. С учетом возможного снижения генерационных характеристик среды в результате ее перегрева при высоких удельных характеристиках энерговыклада, на которое указывается в работах [7—9], можно ожидать, что максимальная выходная энергия излучения макета составит около 50 кДж.

Заключение. Результаты расчета основных параметров энергетического макета лазерной системы с накачкой от импульсного реактора показывают возможность достижения достаточно высокой энергии лазерного пучка. Экспериментальная демонстрация такой возможности в настоящее время представляет один из наиболее важных этапов для дальнейшего развития исследований в области прямого преобразования энергии деления ядер в энергию лазерного излучения.

Запуск создаваемого в ГНЦ РФ — ФЭИ стенда с энергетическим макетом реакторно-лазерной системы, намеченный на конец 1996 г., позволит решить эту проблему.

Авторы выражают признательность А.П. Барзилову и О.Ф. Кухарчуку за помощь в проведении расчетов и оформлении настоящей работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dyachenko P.P., Zrodnikov A.V., Kononov V.N. et al. Conception of a combined ICF power plant and a fission reactor-laser driver. — *Fus. Techn.*, 1991, v. 20, p. 969—976.
2. Труды конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». ФЭИ, Обнинск, 1992, т. 1, 1993, т. 2, 3.
3. Труды конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». РФЯЦ—ВНИИЭФ, Арзамас-16, РФ, 1995, т. 1, 2.
4. Снопков А.А., Черашев В.И., Литвин В.И. и др. Протяженный нейтронный источник на базе двухзонного импульсного реактора БАРС-5. — Труды конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». ФЭИ, Обнинск, 1992, т. 1, с. 144—156.
5. Гулевич А.В., Зродников А.В., Качанов Б.В. и др. Математические модели и программы для расчета динамических характеристик лазерных установок с ядерной накачкой. — Там же, 1993, т. 2, с. 45—54.
6. Казакова Л.Б., Камаева О.Б., Коробейникова Л.Б. и др. Развитие функциональных возможностей комплекса программ ММКФК для моделирования переноса нейтронов и гамма-квантов. Тезисы VII сов. «Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике». Новосибирск, 1985.
7. Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривоносов В.Н. и др. Инфракрасные лазеры с ядерной накачкой на переходах Ar I, Kr I, Xe I. — Письма ЖТФ, 1979, т. 54, с. 171.
8. Alford W., Hays G. Measured laser parameters for reactor-pumped He/Ar/Xe and Ar/Xe. — *J. Appl. Phys.*, 1989, v. 65(10), p. 3760.
9. Magda E.P., Grebenkin K.F., Kryzhanovsky V.A. Nuclear pumped lasers at the Institute of Technical Physics. — In: *Proc. Intern. Conf. on LASERS'90*. STS PRESS, McLean, VA, 1991, p. 827.

УДК 621.039.517.5

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Ушаков П.А.

Теплогидродинамические исследования жидких металлов начали развиваться с 50-х годов в связи с работами по созданию реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем и быстрых, охлаждаемых натрием. Их организаторами и научными руководителями в ФЭИ были А.И. Лейпунский и В.И. Субботин.

В первом быстром реакторе БНТФ (БР-2) мощностью 150 кВт, созданном в ФЭИ в середине 50-х годов, теплоотвод осуществляется ртутью. Для теплофизического обоснования этого реактора была создана ртутная лаборатория. Первые опыты по теплообмену выполнялись на ртути. В дальнейшем ее широко использовали для моделирования теплообмена в реакторах со сплавом свинец—висмут, поскольку они имеют близкие числа Прандтля. Теплоотдачу исследовали и на сплаве свинец—висмут. Позднее были созданы стенды со щелочными металлами для измерения температурных режимов сборок твэлов быстрых реакторов в опытах с моделями.

Параллельно развивались общезначимые и прикладные гидродинамические и аэродинамические исследования. В настоящее время ГНЦ РФ — ФЭИ располагает уникальными стендами для исследования теплообменных и массообменных процессов применительно к реакторам с жидкометаллическим охлаждением, единственным в России аэродинамическим стендом низкого давления с расходом воздуха 66 тыс. м³/ч, многими гидродинамическими стендами. Для расширения возможностей гидродинамических исследований при больших числах Рейнольдса на крупных моделях и натурных образцах оборудования создаются стенды с расходом воды до 20 тыс. м³/ч.

Рассмотрим основные результаты теплогидродинамических исследований, проведенных в ФЭИ для жидкометаллических реакторов.

Прежде всего потребовались разработки методов измерения — микротермопар и способов их заделки в теплопередающих стенках, специальных датчиков динамического и полного напора, уточненных характеристик трубок Престона для определения касательных напряжений на стенках. Позднее были созданы методики и разработана техника измерений перемешивания теплоносителей в опытах на воздухе с добавкой малой доли газообразных трассеров в виде фреона или пропана, методика электромагнитного измерения векторов локального расхода (скорости) жидкого металла. Экспериментально доказана возможность моделирования гидродинамики несжимаемости сред (воды, жидких металлов) в опытах с воздухом. Эти методики позволили выполнить разнообразные эксперименты фундаментального и прикладного характера.

Проводились широкие исследования турбулентных характеристик в различных каналах, позволившие выработать обобщающие рекомендации. Эти данные не потеряли своей актуальности и используются по сей день.

Впервые удалось экспериментально доказать квазиуниверсальность профиля скорости теплоносителей и температуры жидких металлов на нормальных к стенкам сложных каналов. Универсальность показала, что обмен импульсом и теплом в азимутальном направлении мал по сравнению с обменом по нормальным, и это было положено в основу развития полуэмпирических методик расчетов. Для расчета гидравлических сопротивлений пучков гладких и оребренных твэлов, теплообмена и азимутальных неравномерностей температуры твэлов, охлаждаемых жидкими металлами, при ламинарном, плоском и турбулентном течениях предложены простые методики расчета и обобщающие формулы.

Теплообмен жидких металлов имеет особенности. Например, для них характерны большие подогревы по длине каналов относительно разности температуры между теплоотдающей стенкой и теплоносителем. Поэтому температурные поля сборок твэлов определяются в основном локальными подогревами жидкого металла, зависимыми, в частности, от распределения локальных расходов, а не коэффициентами теплоотдачи. Неучет неравномерной температуры по сечению модельных сборок твэлов привел на первых этапах исследований к существенным ошибкам в значениях коэффициентов теплоотдачи в бесконечных решетках твэлов. По той же причине исследования теплообмена в пучках методом теплообменника при небольшом числе трубок носят частный характер. При правильном определении локального расхода и температуры коэффициенты теплоотдачи в теплообменниках мало отличаются от значений, полученных для ТВС.

При теплосъеме жидкими металлами, как показали эксперименты, наблюдаются ощутимые пульсации температуры непосредственно в потоке теплоносителя и на стенках каналов. К сожалению, работа по оценке влияния этих пульсаций на прочность конструкций не получила развития.

Путем измерения профиля температуры непосредственно в потоках жидких металлов и температуры стенок установлено наличие контактных термических сопротивлений на стенках, зависящих от количества примесей в теплоносителях. Для оценок этих эффектов предложены соответствующие формулы. При нормальной очистке жидких металлов контактные термические сопротивления исчезают, а при насыщении теплоносителя примесями коэффициенты теплоотдачи могут снизиться в 1,5—2 раза, что соответствует опытам ЭНИН, ЦКТИ, ФЭИ 1950—1953 гг., когда на очистку теплоносителей еще не обращали должного внимания.

Для теплообмена жидких металлов в каналах и сборках твэлов характерны плавные переходы от турбулентного режима к ламинарному вследствие ощутимого влияния продольных перетечек при малых числах Прандтля.

В каналах с узкими застойными зонами (плотные упаковки твэлов, эксцентричные кольцевые зазоры и т.п.) имеются большие неравномерности скорости и температуры в азимутальном направлении. Для таких каналов эквивалентный гидравлический диаметр не является универсальным характерным размером даже при развитом турбулентном течении, сводящим данные о коэффициентах гидравлического сопротивления к единой с круглой трубой зависимости. Тем более этот эффект характерен для распределений температуры в пучках стержней, охлаждаемых жидкими металлами, поскольку профили температуры в жидких металлах имеют ярко выраженный «ламинизированный» характер.

В плотных упаковках твэлов на линии их соприкосновения теплового потока нет, и можно было ожидать огромного локального перегрева твэлов. До сих пор еще бытует заблуждение, что высокая теплопроводность жидких металлов должна выравнять неравномерности температуры. Это справедливо лишь для неподвижных жидких металлов, эквивалентных твердым телам. Экспериментальные и расчетные исследования показали необходимость рассматривать для сложных каналов сопряженные задачи теплоотвода от твэлов, т.е. учитывать их теплофизические свойства. Для этих целей была разработана теория приближенного теплового подобия твэлов, расположенных в правильных решетках. Она позволила, в частности, моделировать их много- или однослойными трубками с электрообогревом изнутри. На основе упомянутых исследований была показана возможность создания активных зон реакторов космического назначения с плотной упаковкой твэлов. Неравномерности температуры по периметру плотноупакованных твэлов при близких значениях чисел Рейнольдса для жидких металлов и воды не столь сильно различаются, поскольку числа Пекле для жидкого металла малы, а для воды — во много раз больше. Полученные на основе экспериментов и расчетов обобщения, рекомендации и формулы для определения коэффициентов теплоотдачи и неравномерностей температуры при теплосъеме жидкими металлами в правильных решетках твэлов учитывают их теплофизические свойства через критерий теплового подобия.

Установлено, что для жидкометаллических теплоносителей в ТВС реакторов, а тем более в активных зонах бескассетного типа тепловой стабилизации по длине нет. Можно говорить о квазистабиллизации для центральной части твэлов и рассматривать теплогидравлические процессы в них как в бесконечной решетке. Неравномерности температуры по периметру твэлов, окруженных нестандартными ячейками (угловые, периферийные твэлы), как правило, изменяются по всей высоте активной зоны. Поэтому методы двумерных расчетов в предположении установившегося по длине теплообмена для ТВС в целом оказываются не применимыми.

Большое внимание было уделено межканальному (межячеечному) массо- и теплообмену. Можно говорить о некотором дуализме в вопросах о влиянии межячеечного

обмена. Все зависит от постановки задачи. Если нас интересуют интегральные теплогидравлические характеристики активных зон, можно говорить о так называемом эффекте прострела. При исследованиях на моделях гидродинамики реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем, быстрых реакторов обнаружено, что потоки теплоносителя из каждой циркуляционной петли занимают в активной зоне свою определенную область, слабо перемешиваются. Аналогичные эффекты наблюдались и в ВВЭР. Надо сказать, что представления о процессах перемешивания иногда слишком идеализированы и оптимистичны. Достаточно вспомнить устойчивость потока Гольфстрим, трудности с перемешиванием в ванне при доливе холодной и горячей воды и т.п. Пока не представляется возможным выравнивать температуру на выходе из бескассетных активных зон и даже из отдельных ТВС кассетного типа влиянием перемешивания локальными устройствами.

Существенную роль в расчете локальных теплогидравлических характеристик, например, горячих пятен, неравномерностей температуры при наличии нестандартных ячеек начинают играть коэффициенты межканального обмена. Комплексные исследования межканального обмена массой и теплом в пучках гладких, оребренных твэлов, твэлов со спиральной дистанционирующей проволоочной навивкой дали возможность создать методики расчетов, рекомендовать соответствующие формулы. Коэффициенты межканального обмена при проволоочном оребрении твэлов (касание ребра по телу) оказались более высокими, чем для твэлов с ребрами, касающимися одно другого. Наиболее эффективными являются разнонаправленные проволоочные навивки, создающие направленные потоки теплоносителя в поперечных направлениях. Дистанционирование проволоочными спиралями вызывает сложное пространственное течение теплоносителя в ТВС. В каждом сечении поперечные токи имеют свое направление, зависящее от ориентации проволоочной спирали. В результате этого по периметру обечайки возникает некоторая циркуляция теплоносителя, а расход и температура в ячейках имеют по длине явно выраженный периодический характер, напоминающий синусоиду.

Накоплен большой экспериментальный материал о влиянии на теплогидравлические процессы блокировок части проходных сечений ТВС и бескассетных активных зон, являющийся хорошей базой для проверки расчетных методик, созданы соответствующие расчетные коды.

Проведенные совместно с ОКБМ расчетно-экспериментальные исследования теплогидравлики промежуточных теплообменников быстрых реакторов способствовали развитию представлений о сложных процессах, происходящих в теплообменниках, и принятию решения об использовании в проекте БН-800 таких же теплообменников, что и в БН-600 (с той же поверхностью теплопередачи). Для расчета теплообменников созданы коды «Протва», «Угра» и другие. На основе гидро- и аэродинамических исследований многочисленных вариантов конструкций нижних коллекторов промежуточных теплообменников сделаны обобщения и разработаны простые инженерные способы определения основных гидродинамических характеристик в них, позволяющие оптимизировать коллекторы. При этом выяснили, что имеющиеся в литературе рекомендации носят иногда частный характер.

При разработке конструкций напорных коллекторов не всегда следует полагаться только на расчеты и справочные рекомендации. В качестве примера можно привести коллектор испарителя парогенератора БН-350, включающий в себя закругленное днище с центральным подводящим трубопроводом и две выравнивающие решетки. Скорость на входе в центральную часть каналов Фильда оказалась в несколько раз больше средней скорости. Только в экспериментах удалось подобрать приемлемые выравнивающие решетки для будущих подобных конструкций.

Теплогидравлические исследования активных зон реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем, быстрых БОР-60, БН-350, -600, проекта БН-800, реакторов космического назначения проводили на разномасштабных моделях с учетом возможной

деформации их элементов. В результате были созданы коды для расчета температурных полей в активных зонах жидкометаллических реакторов, например, код МИФ, учитывающий разные виды дистанционирования твэлов, формоизменение ТВС, неравномерность энерговыделения, тепло- и массообмен между ячейками. Имеется версия подобного кода для ВВЭР. Код МИД, являющийся развитием кода МИФ, предназначен для расчета переходных процессов и др.

При аэродинамических исследованиях проточной части реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем на разномасштабных моделях (включая натурные размеры) обнаружено, что наряду с тороидальными вихрями на входе теплоносителя в нижнюю напорную камеру из опускных щелей на днище камеры могут возникать устойчивые горизонтальные плоские вихри. Эти вихри снижают локальный расход на входе в активную зону, устойчивость течения и способствуют повышению локальной концентрации взвешенных в теплоносителе примесей. Упомянутый эффект снижает возможности использования в экспериментах упрощенных секторных (клиновых) моделей.

Широко исследовалось влияние шероховатости стенок каналов на гидродинамические характеристики с обобщением результатов опытов и выдачей расчетных рекомендаций. Были созданы полуэмпирические методы расчета течения теплоносителя даже в таких сложных системах, как каналы с крупной шероховатостью в виде поперечных ребер. Началось исследование влияния один на другого последовательно расположенных локальных гидросопротивлений. Рассмотрены различные способы дистанционирования твэлов с точки зрения гидравлических потерь. Отмечены эффекты псевдостабильзации профиля скорости по длине каналов. Действительная стабилизация может происходить на длине в 2 раза большей. Подробно исследованы теплогидравлические характеристики вариантов каналов СУЗ реакторов со сплавом свинец—висмут для оптимизации их геометрических характеристик. Отработана проточная часть канала со стержнем пассивной защиты быстрых реакторов, гидродинамически удерживаемом в верхнем положении потоком теплоносителя, и др.

Несмотря на разнообразные работы, выполненные за многие годы, теплофизическое обоснование жидкометаллических реакторов нельзя считать исчерпывающим. Появились повышенные требования к безопасности реакторов, а также новые расчетно-экспериментальные возможности. Назрела необходимость создания современных методов расчета локальных теплогидродинамических турбулентных характеристик сложных потоков в каналах, больших объемах с учетом крупномасштабных вихревых течений, влияния стратификации теплоносителей. На этой базе можно было бы усовершенствовать имеющиеся и создать новые расчетные коды.

Серьезной проблемой является отвод остаточного тепловыделения реактора посредством естественной конвекции в верхней камере с использованием специальных погружных теплообменников. Такие устройства относятся к системам пассивного отвода тепла при аварийных остановках быстрых реакторов, используются в проектах Европейского быстрого реактора, китайского экспериментального реактора, японских реакторов. Российский опыт по исследованию таких систем пока еще невелик, но без них, вероятно, нельзя обойтись в реакторах следующего поколения. Поэтому целесообразно уже сейчас заниматься моделированием аварийного теплоотвода естественной конвекцией в верхних баках быстрых реакторов, выявлением влияния разных критериев подобия и других факторов на теплогидравлические процессы.

Пока еще мало уделялось внимания пульсациям температуры в сложных проточных частях быстрых реакторов с интегральной компоновкой. Эта проблема имеет большое прикладное значение, поскольку известны случаи выхода из строя отдельных узлов реакторов вследствие влияния циклических термонапряжений. Она не может быть решена без цикла поисково-фундаментальных исследований. К таким исследованиям относятся теоретические работы о процессах передачи пульсаций в потоках теплоносителей на твердые стенки, экспериментальные проверки расчетных моделей, необходимо создание кодов для расчета пульсаций температуры, развитие методов

измерений на поверхности стенок и т.п. Пока будут развиваться быстрые реакторы, теплофизикам всегда найдется работа по теплогидравлическому обоснованию новых конструкций активных зон, узлов реакторов и теплообменного оборудования.

Результаты исследований в ФЭИ теплогидравлических процессов в жидкометаллических реакторах можно найти в монографиях и сборниках, список которых приводится.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жидкие металлы. Сб. статей под ред. П.Л. Кириллова, В.И. Субботина, П.А. Ушакова. М.: Атомиздат, 1967.
2. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. М.: Атомиздат, 1970.
3. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.
4. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Бобков В.П. и др. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах. М.: Атомиздат, 1978.
5. Теплообмен и гидродинамика однофазного потока в пучках стержней. Л.: Наука, 1979.
6. Ушаков П.А., Юрьев Ю.С., Жуков А.В., Матюхин Н.М. Рекомендации по теплогидравлическому расчету кассет твэлов быстрых реакторов. М., СЭВ, 1981.
7. Невструева Е.И., Ушаков П.А. Тепло- и массообмен в атомных энергетических установках с реакторами, охлаждаемыми жидкими металлами. — Итоги науки и техники. Сер. Тепло- и массообмен. М., ГИИТ, АН СССР, т. 2, 1982.
8. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. М.: Энергоатомиздат, 1985.
9. Мантлик Ф., Шмид Й., Мильбауэр П. и др. Методы и программы теплогидравлического расчета сборок твэлов быстрых реакторов. ЧССР, 1987.
10. Митенков Ф.М., Головкин В.Ф., Ушаков П.А., Юрьев Ю.С. Проектирование теплообменных аппаратов АЭС. Под ред. Ф.М. Митенкова. М.: Энергоатомиздат, 1988.
11. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кириллов П.Л. и др. Методические указания и рекомендации по теплогидравлическому расчету активных зон быстрых реакторов. Под ред. А.В. Жукова, А.П. Сорокина. Обнинск, ФЭИ, 1988.
12. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
13. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). Под общей ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат, 1990.
14. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: Расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат, 1991.

УДК 621.039.517(075.8)

КРИЗИС ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ

Кириллов П.Л.

Увеличение плотности теплового потока поверхности, охлаждаемой кипящей жидкостью, при определенных условиях может привести к резкому возрастанию ее температуры. Это явление в теплофизике получило название кризиса теплообмена, а соответствующая плотность теплового потока — критической ($q_{кр}$).

К сожалению, несмотря на большое число работ по исследованию кризиса теплообмена в каналах, пока не ясны многие внутренние механизмы явления. На сегодня известно свыше 500 методов расчета критической плотности теплового потока, что может служить типичным примером слабого понимания явления и затрудняет выбор правильного соотношения для расчета.

В ФЭИ исследования кризиса теплообмена начались в начале 50-х годов в связи с сооружением первой АЭС, развитие работ применительно к другим ЯЭУ продолжа-