

УДК 536.24+621.039.553.34

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА
В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

*Сорокин А.П., Кузина Ю.А. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)
e-mail: sorokin@ippe.ru*

При подготовке и проведении теплофизических экспериментов важным является выполнение условий механического, теплового и термодинамического подобия, устанавливающего зависимость физических свойств движущейся теплопроводящей среды от параметров состояния и самые общие зависимости для описания теплопередачи в разных жидкостях при разнообразных условиях гидродинамики и теплообмена в исследуемых объектах. Жидкие (расплавленные) металлы литий (Li), натрий (Na), калий (K), цезий (Cs), свинец (Pb), висмут (Bi), ртуть (Hg), галлий (Ga), индий (In) и их сплавы Na—K (22% Na + 78% K), Pb—Bi (44,5% Pb + 55,5% Bi), Pb—Li (99,32% Pb + 0,68% Li) с точки зрения теплообмена образуют особый класс теплоносителей, имеющих значительную объемную теплоемкость и высокую теплопроводность. Их коэффициент кинематической вязкости намного меньше коэффициента температуропроводности, или, что то же самое, число Прандтля намного меньше единицы ($Pr \ll 1$) [1].

Следует отметить, что изучение теплофизических свойств жидких металлов позволяет обнаружить особенности, характерные для этого класса теплоносителей, что является следствием их термодинамического подобия [2]. Жидкие металлы имеют высокую температуру кипения и не требуют большого давления для предотвращения закипания. Вследствие хорошей теплопроводности, обусловленной электронной проводимостью, они характеризуются высоким коэффициентом теплообмена, что обеспечивает приемлемые температурные режимы поверхностей теплообмена при высокой плотности теплового потока. В таких средах тепловые возмущения, связанные с молекулярной теплопроводностью, распространяются в глубь потока на значительно большее расстояние по сравнению с возмущениями полей скоростей, обусловленных действием молекулярного трения.

Для большинства жидких металлов недостатком является высокая химическая активность при взаимодействии с кислородом воздуха, водой и конструкционными материалами.

При определенных условиях это ухудшает теплообмен. Таким образом, особенностью, которую следует учитывать при теплообмене в жидких металлах в области теплоотдающей поверхности, является состояние примесного состава жидкометаллического теплоносителя при его циркуляции вблизи поверхности теплообмена в номинальном режиме и при отклонениях от режима нормальной эксплуатации.

Целью работы является обоснование принципов моделирования гидродинамики и теплообмена в жидкометаллических теплоносителях и теории подобия теплофизических процессов при экспериментальных исследованиях на моделях с другими средами и переноса данных на реакторные условия.

Особенности физического моделирования гидродинамики и теплообмена в жидких металлах. При планировании экспериментального исследования, обобщении его результатов анализ подобия и следующие из него критерии и асимптотические решения должны применяться в полном объеме. Если возможно достаточно полное аналитическое решение или численное исследование математической модели, цели экспериментов — апробация основных предположений, а также уточнение расчетных коэффициентов.

Прямое физическое моделирование заключается в воспроизведении процесса той же физической природы, что в натурном образце, но одноименные характеристики процесса уменьшены или увеличены на некоторые постоянные множители. Отсюда следует фундаментальное правило моделирования: подобны системы одной физической природы, условия однозначности которых подобны, одноименные критерии, составленные из условий однозначности, численно одинаковы [3]. При выполнении этих условий моделирование является прямым и полным. Физическое моделирование с достаточно четко очерченными границами достоверности получаемых с его помощью результатов возможно только на базе некоторой заранее выбранной математической модели. Фактически

прямое моделирование может неограниченно применяться лишь для процессов, определяемые числа подобия которых являются функциями только геометрических симплексов системы и одного определяющего критерия. Наличие двух определяющих критериев, как, например, чисел Рейнольдса и Прандтля при теплообмене заметно усложняет моделирование. При трех определяющих критериях прямое моделирование обычно неосуществимо. В таких случаях необходима постановка систематических многовариантных экспериментов. Назначением таких моделирующих экспериментов является выявление эффектов, разрешенных общей математической моделью, но не воспроизводимых на современном уровне математических технологий ни аналитически, ни в численных исследованиях, например, выяснение сложных вихревых структур в потоках вязкой жидкости, корреляционные функции конкретных турбулентных течений и др.

Движение вязкой и теплопроводящей жидкости описывается уравнениями Навье—Стокса, неразрывности, переноса тепла и термодинамическими уравнениями. В большинстве случаев параметры движения (скорость w , давление p , плотность ρ , температура жидкости T) изменяются непрерывно на протяжении времени t . Уравнения движения и переноса тепла для вязкой и теплопроводящей жидкости приводятся к безразмерному виду с введением безразмерных переменных, определяемых следующими условиями [4]:

$$x^* = x/l; \quad z^* = z/l; \quad \tau^* = \tau w_0/l; \quad w_x^* = w_x/w_0; \\ T^* = (T - T_0)/(T_{ct} - T_0),$$

где l — характерный размер, м; w_0 — характерная скорость, м/с; $T_{ct} - T_0$ — характерная разность температуры, °С.

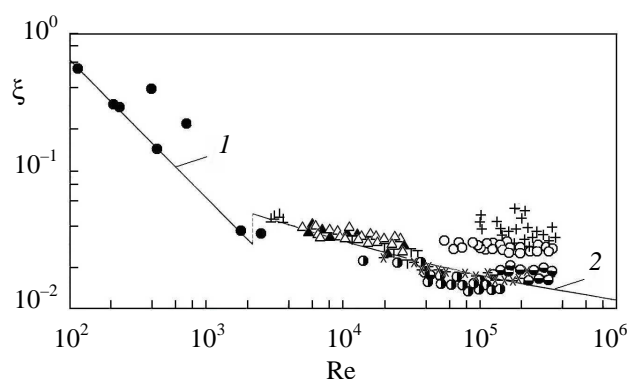
Комплексы параметров в уравнениях являются безразмерными и называются критериями подобия: $Re = w_0 l / \nu$ — число Рейнольдса, $Pe = w_0 l / a$ — число Пекле, $Ma = w_0 / c$ — число Маха, $Eu = p_0 / \rho w_0^2$ — число Эйлера, $Pr = \mu / \rho a$ — число Прандтля, $Nu = a l / \lambda$ — число Нуссельта, $Ar = g l^3 \Delta \rho / \rho w_0^2$ — число Архимеда, $Ga = g l^3 / \nu^2$ — число Галелея, $Fr = w_0^2 / g l$ — число Фруда, $Gr = g \beta \rho (T_{ct} - T_0) d^3 / \nu^2$ — число Грасгофа. Для нестационарных процессов в

число безразмерных параметров включается $Fo = at_0/l^2$ — число Фурье. Величины l , w_0 , $T_{ct} - T_0$, ν , a называются характеристическими, так как они определяют условия, в которых происходит движение жидкости. При этом l , w_0 , $T_{ct} - T_0$ задаются произвольно, ν , a характеризуют свойства жидкости.

Критерии подобия устанавливают динамическое или кинематическое подобие, суть которого состоит в том, что при одинаковых составляющих критериях отношение двух физических величин, например, сил при одинаковой геометрии потоков имеет одно и то же значение. Критерии подобия определяют относительное влияние как действующих в потоке сил, так и происходящих в потоке процессов переноса — перенос импульса вследствие вязкости или теплоты посредством теплопроводности. По численным критериям подобия можно оценить, насколько отличается поток вязкой и теплопроводящей жидкости от потока идеальной жидкости, и тем самым условно разделить поток на области, где действия вязкости или теплопроводности существенно различны.

Моделирование гидродинамики жидких металлов в каналах. Еще в 1930-х гг. проведены работы, показывающие принадлежность расплавленных металлов к ньютоновским жидкостям. Определяющим критерием моделирования гидродинамических процессов в каналах является число Рейнольдса. Была показана идентичность профилей скорости при течении в трубах ртути и обычных жидкостей [5]. Опыты показали, что порядок значений коэффициентов трения при движении ртути и ртутно-магниевого амальгамы в трубах такой же, как и при движении обычных жидкостей [6] (рис. 1). Опытные точки для воды и ртути согласуются между собой и с кривой, рассчитанной по формуле [5].

Вследствие большого разброса экспериментальных точек, вызванного недостаточной точностью опытов, в 1950-х гг. в ЭНИН было проведено специальное исследование гидравлического сопротивления при движении ртути и олова в стальных трубах [7]. Основным источником расхождений при $Re > 10^5$ является небольшая остаточная шероховатость трубы. Вследствие высокой теплопроводности, слабой зависимости теплофизических характеристик от температуры и профиля температуры тепловой поток слабо влияет на гидравлическое сопро-



Р и с. 1. Рассчитанная по формуле Пуазейля (1), [5] (2) и экспериментальная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ от режима движения воды (Δ [7]): вода в чистой (Δ), замасленной трубе (\blacktriangle), ртути (\circ , \bullet , \ominus [6], \bullet [7], \top [8], $+$), ртутно-магниевого амальгамы (\times [6])

тивление жидких металлов. Данные при течении жидких металлов в шероховатых трубах также не имели особенностей [9].

Теоретически и экспериментально было установлено, что при движении ртути наблюдается скольжение, но оно сказывается только при движении в трубах очень малого диаметра [10]. Так, для трубы диаметром $d = 7$ мкм объемный эффект скольжения составляет около 28%, при $d = 26,6$ мкм — 6%. Это позволяет моделировать динамику жидких металлов на воде и газах.

Моделирование теплообмена в жидких металлах в трубах. Интенсивные исследования теплообмена в жидких металлах начались в 1950-х гг. в связи с развитием ядерной энергетики и разработкой свинцово-висмутовых реакторов для подводных лодок. Систематические исследования выполнялись, начиная с 1953 г., под научным руководством В.И. Субботина. В 1956—1959 гг. в ФЭИ были созданы крупные экспериментальные стенды, на которых были получены обширные данные о теплообмене в ртути, свинце—висмуте, натрии, натрий—калии, литии, цезии и других теплоносителях. Непосредственными организаторами и участниками исследований были Б.Н. Габрианович, Г.И. Гуцин, А.В. Жуков, М.Х. Ибрагимов, М.Н. Ивановский, П.Л. Кириллов, Ю.И. Орлов, И.П. Свириденко, А.П. Сорокин, П.А. Ушаков и др. [11, 12].

При исследовании теплообмена в жидких металлах для установившегося течения принимается гипотеза, согласно которой в критериальном уравнении $Nu = f(Re, Pe)$ можно при-

ближенно исключить число Рейнольдса. Работы, указывающие на дополнительные погрешности при ее использовании, неизвестны.

С использованием интегрального метода расчета и условия равенства единице турбулентного числа Прандтля получено соотношение для теплообмена в трубах [13]

$$Nu = 7 + 0,025Pe^{0,8}. \quad (1)$$

В первых опытах чистоту металлов не контролировали и мер по их очистке от примесей не принимали. Было отмечено, что в чистых условиях наблюдаются более высокие коэффициенты теплообмена.

Для сплава свинец—висмут сотрудники ЭНИИ рекомендовали следующие формулы:

при наличии оксидных пленок на стенке

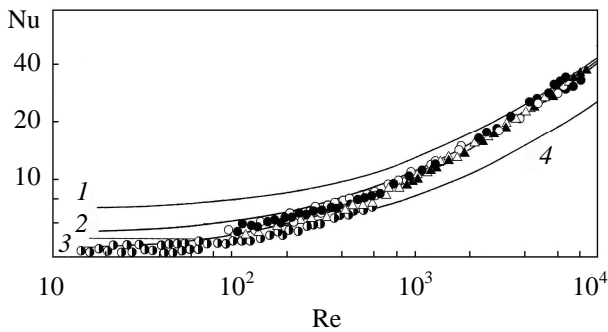
$$Nu = 3 + 0,014Pe^{0,8};$$

для чистых поверхностей

$$Nu = 5 + 0,014Pe^{0,8}.$$

Различие между теоретической формулой (1) и другими объясняется различием в краевых условиях на поверхности теплообмена. На границе теплоотдающей поверхности с жидкими металлами наблюдается термическое контактное сопротивление. Его происхождение длительное время оставалось неясным, результаты измерений были противоречивы.

Уже в 1960-х гг., когда методы очистки сплава свинец—висмут еще только развивались, измерения теплообмена в ртути и сплаве свинец—висмут дали близкие результаты. Результаты работ, в которых измерялось распределение температуры в потоках натрий—калий и свинец—висмут, расположились вблизи кривой, рассчитанной по формуле (1) [14, 15]. В последние годы были проведены многочисленные исследования теплообмена в трубах при разных условиях для разных жидких металлов. Две независимые группы исследователей ФЭИ провели контрольные измерения теплообмена в ртути в трубах из коррозионно-стойкой стали и никеля и в сплаве натрий—калий в трубах из коррозионно-стойкой стали и меди [16, 17]. Предварительно ртуть фильтровали через замшу, сплав натрий—калий очищали в холодной ловушке. Во всех опытах, проводившихся при температуре менее 100 °С, наблюдался устойчивый теплообмен при высокой повторяемости результатов



Р и с. 2. Рассчитанный по формуле $Nu = 7 + 0,025Re^{0,8}$ (1), $Nu = 5,2 + 0,025Re^{0,8}$ (2), $Nu = 4,3 + 0,025Re^{0,8}$ (3), $Nu = 5 + 0,014Re^{0,8}$ (4) и измеренный теплообмен в ртути в круглых трубах из никеля (Δ), коррозионно-стойкой стали (\blacktriangle), меди (\circ) и сплава натрия—калий в круглой трубе из меди (\bullet)

(рис. 2). Близкие результаты для сплава были получены французскими исследователями [18].

Данные, полученные в результате обработки измерений температуры стенки по длине всех рабочих участков из различных материалов и распределения температуры в потоке натрия ($Re = 40—1150$), оказались одинаковыми и описывались с погрешностью $\pm 10\%$ формулой

$$Nu = 5 + 0,025Re^{0,8}. \quad (2)$$

Комплекс расчетно-теоретических работ и обобщение экспериментального материала выявили механизм теплообмена на поверхности каналов в жидких металлах. Было показано, что на границе раздела теплоноситель—поверхность теплообмена контактное термическое сопротивление отсутствует, если концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температуре циркулирующего жидкого металла. В этих условиях теплоотдача к жидким металлам Pb, Pb—Bi, Hg, Na, Na—K, Li и др. описывается единой критериальной зависимостью, близкой к полученной по формуле (1). Наиболее надежные данные о теплообмене в жидком металле в трубах, исключая влияние контактного термического сопротивления, были получены по распределению температуры в потоке [19]. Для практических расчетов теплообмена жидких металлов в круглых трубах в диапазоне $Re < 2 \cdot 10^4$ и $3 \cdot 10^3 < Re < 10^6$ принята формула (2).

В ходе исследований выдвигались разные гипотезы о природе контактного термического сопротивления теплообмену, включая газовые пленки, смачиваемость поверхности, растворенный в жидком металле газ и др. Существовало

мнение об отсутствии влияния смачиваемости, однако было отмечено уменьшение теплообмена в ртути на 10%. Высказана гипотеза о подвижном слое оксидов и других отложений в области стенки, которая нашла дальнейшее развитие [20, 21] (1967 г.). Наиболее полное обобщение данных о контактном термическом сопротивлении приведено в работах [21, 22].

Экспериментальными исследованиями в ФЭИ было показано, что основной причиной контактного термического сопротивления является осаждение на поверхности теплообмена взвешенных в потоке жидких металлов твердых частиц [23—29]. Вблизи стенки в области ламинарного подслоя жидкости примеси скапливаются в слой, сцепленный со стенкой и представляющий собой почти плотную упаковку кристаллов примеси, и в переходный слой с переменной концентрацией. В турбулентном потоке концентрация примесей в тысячи раз меньше, чем в области стенки, и близка к концентрации насыщения.

Для расчета максимального контактного термического сопротивления предложена формула [14]

$$R_k \frac{\lambda}{d} = 200Re^{-0,75}.$$

Исследование зависимости контактного термического сопротивления при теплообмене в жидких металлах в каналах сложной формы от различных факторов, прежде всего от содержания в теплоносителе кислорода должно быть продолжено.

Моделирование теплогидравлики в сборках твэлов. Поскольку теплообмен осуществляется конвективным переносом, высокая теплопроводность не гарантирует отсутствие больших неравномерностей температуры в конструкциях, охлаждаемых жидкими металлами. Низкое число Прандтля, присущее жидким металлам, не дает какого-либо преимущества в части уменьшения неравномерностей температуры в конструкциях по сравнению с водой. Поле температуры определяется степенью подогрева струй теплоносителя, а не коэффициентами теплообмена, что существенно повышает требования к организации гидродинамики реакторов.

Высокий подогрев натрия в быстрых реакторах (ΔT_f) по сравнению с невысоким темпе-

ратурным напором стенка—жидкость (ΔT_α) $\Delta T_\alpha / \Delta T_f = (d_r / 4H) (Pe / Nu)$ вызывает повышенное внимание к снижению гидродинамических развязок и выбору оптимальной степени перемешивания теплоносителя в каналах ТВС.

В каналах с узкими застойными зонами (плотные упаковки твэлов, эксцентричные кольцевые зазоры и др.) наблюдаются большие неравномерности скорости и температуры в азимутальном направлении. Для таких каналов эквивалентный гидравлический диаметр не является универсальным характерным размером даже при развитом турбулентном течении. Тем более этот эффект характерен для температуры в пучках стержней, поскольку профиль температуры в жидких металлах имеет ярко выраженный ламинаризованный характер.

Конвективный обмен в сложных каналах должен рассматриваться в совокупности с теплопередачей в стенках, т.е. в твэлах реакторов (сопряженная задача теплоотдачи от твэлов). Для учета теплофизических свойств твэлов разработана теория приближенного теплового подобия твэлов, расположенных в правильных решетках [11, 30]. Распределение температуры твэлов в пучке зависит не только от классических критериев подобия, но и от конструкции и теплофизических характеристик элементов твэлов и ТВС.

В полученных на основе экспериментов и расчетов обобщениях о теплообмене в жидких металлах, рекомендациях и формулах для определения коэффициентов теплоотдачи и неравномерностей температуры в правильных решетках твэлов теплофизические свойства твэлов учитывают через критерий их теплового подобия $\epsilon_6 \sim \lambda_w / \lambda_f$. Для теплообмена в жидких металлах в каналах и сборках твэлов характерны плавные переходы от турбулентного режима к ламинарному, поскольку при низких числах Прандтля ощутимо влияние продольных перетечек тепла.

На основании работ [23, 30—32] рекомендована обобщенная зависимость для расчета теплоотдачи и температурных полей в каналах сложной формы, учитывающая влияние геометрии и материалов твэлов:

$$Nu = Nu_{\text{лам}} + \frac{0,041}{x^2} \times \left[1 - \frac{1}{(x^{30} - 1)/6 + (1,15 + 1,24\epsilon_6)^{1/2}} \right] Pe^a; \quad (3)$$

$$Nu_{\text{лам}} = 7,55x - \frac{6,3}{x^b} \left[1 - \frac{3,6x}{x^{20}(1 + 2,5\epsilon_6^{0,86}) + 3,2} \right],$$

где $a = 0,56 + 0,19x - 0,1/x^{80}$; $b = 17x(x - 0,81)$.

Диапазон использования формулы (3): $1 < x = s/d < 2$, $1 < Pe < 4000$, $0,01 < \epsilon_6 < \infty$, где ϵ_6 — критерий приближенного теплового подобия твэлов в треугольной решетке. Характерным размером служит эквивалентный гидравлический диаметр. Ожидаемая погрешность расчета 12—15%. При $x = 1,12—1,14$ число Нуссельта можно рассчитывать по формуле для круглой трубы.

Расчеты неравномерностей температуры твэлов по периметру выполняются по формуле [24]

$$\Delta T_w^{\text{max}} = \frac{t_w^{\text{max}} - t_w^{\text{min}}}{\bar{q}R} \lambda_f = \frac{(\Delta T_w^{\text{max}})_{\text{лам}}}{1 + \gamma(\epsilon_6) Pe^{\beta(x)}},$$

где $\gamma(\epsilon_6) = 0,008(1 + 0,03\epsilon_6)$; $\beta(x) = 0,65 - 51(\lg x)/x^{20}$; $\epsilon_6 > 0,2$; $1 < x < 1,15$; $1 < Pe < 2000$; ΔT_w^{max} для ламинарного течения рассчитывается по методике [11].

Аналогичные формулы были получены и для квадратных решеток твэлов. Данные о теплообмене для плотной упаковки ($x < 1,1$) приведены в работах [25, 26].

При теплосъеме жидкими металлами, как показали эксперименты, отмечаются пульсации температуры непосредственно в потоке теплоносителя и на стенках каналов. При течении жидкометаллических теплоносителей в ТВС реакторов, тем более в активной зоне бескассетного типа тепловая стабилизация по длине отсутствует. При наблюдаемой квазистабильности теплообмена для центральной области ТВС можно рассматривать теплогидравлические процессы в ней как в бесконечной решетке твэлов. Неравномерности температуры по периметру твэлов, окруженных нестандартными ячейками (угловые, периферийные твэлы), как правило, изменяются по всей высоте активной зоны.

Особенностью теплогидравлики сборок твэлов является влияние на распределение параметров межканального массо- и теплообмена. Исследования межканального обмена были инициированы А.И. Лейпунским. Под межканальным обменом понимается перенос субстанции между двумя соседними потоками среды в каналах (ячейках). Когда обмен происходит под действием возмущающих геометрических элементов типа ребер на твэлах, то речь идет о межканальном обмене. Однако понятие физики процесса обмена нарушается, если поток субстанции по длине стержня направлен преимущественно в одну сторону. В этом случае правильнее иметь в виду просто сложное течение, а не обмен субстанцией между ячейками.

Для измерения коэффициентов межканального взаимодействия разработаны тепловые и электромагнитные методы, метод фреонового трассера, а также датчики для измерений температуры и расхода теплоносителя по высоте сборки. Конвективный межканальный перенос в пучках твэлов обеспечивается дистанционирующими спиральными ребрами или проволочными навивками.

В реакторах с охлаждением натрием проволочное спиральное оребрение (касание проволоки типа «ребро по телу») приводит к поперечным потокам теплоносителя, которые изменяют направление в каждом поперечном сечении ТВС. В результате расход теплоносителя в зазорах каждой из ячеек изменяется периодически по высоте, температура теплоносителя повышается немонотонно.

Предложена обобщающая формула для расчета средних коэффициентов конвективного обмена массой [27, 33]

$$\mu_k^m = \frac{1}{3h} \Phi^*(x) \Psi(\text{Re});$$

$$\Phi^*(x) = A(x) + B - C \exp(-D),$$

где $\Psi(\text{Re}) = 1,85 - 0,754 \exp(-132\text{Re} \cdot 10^{-6})$; $1,01 < x < 1,5$; $5 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^5$; $5 < h/d < 65$; h/d — относительный шаг спирального оребрения; A, B, C, D — функции относительного шага решетки твэлов. Исследования показали, что для жидкого металла коэффициент межканального конвективного теплообмена на 30% меньше по сравнению с коэффициентом массообмена [27, 33].

Предложены формулы для коэффициентов взаимодействия между ячейками путем теплопроводности μ_λ , турбулентной диффузии μ_τ и при их суммарном влиянии $\mu_{\tau\lambda}$ [33]:

$$\mu_\lambda = \frac{6,7(x-1)100}{x \text{Re} d}; \quad \mu_\tau = \frac{1}{1,5(x-1)^{0,5} \text{Re}^{0,2} d};$$

$$\mu_{\tau\lambda} = \frac{(x-1)^{0,5} 100}{x \text{Re}^{0,7} d},$$

где $1,1 < x < 1,35$; $4 \cdot 10^3 < \text{Re} < 5 \cdot 10^4$.

Межканальный теплообмен посредством теплопроводности твэлов оценивается по формуле [33]

$$\mu_{\lambda, \text{ТВЭЛ}}^\tau = \frac{16}{3d \text{Re}} \left(1 + 2 \frac{d_\tau \varepsilon_1}{d \text{Nu}} \right)^{-1},$$

где d/d_τ — отношение диаметра твэлов к гидравлическому диаметру окружающих ячеек для решетки твэлов; ε_1 — критерий теплового подобию твэлов, рассчитанный по первой гармонике.

Интенсивность межканального обмена играет существенную роль в выравнивании температуры в горячих пятнах решетки твэлов, образующихся вследствие неравномерного энерговыделения одиночных или группы твэлов и/или неравномерностей температуры при наличии нестандартных ячеек.

Моделирование полей температуры и скорости в баке быстрого реактора. Первый контур циркуляции при баковой конструкции быстрого реактора — сложное сочетание последовательно и параллельно соединенных элементов с разной ориентацией в поле тяжести, геометрические характеристики проходных сечений которых резко меняются по ходу движения. Теплоноситель всегда неизотермичен из-за неравномерности энерговыделения, перепада температуры между узлами контура циркуляции, особенностей теплосъема в переходных и аварийных режимах работы.

Для изучения теплогидравлических процессов в баках реакторов и элементах системы аварийного отвода тепла в Германии в рамках проекта европейского быстрого реактора EFR были созданы водяные стенды RAMONA (M: 1:20), NEPTUN (1:5), водовоздушный стенд KIVA (M: 1:10) [28], натриево-воздушный стенд ILONA (1:3) [29], в Японии — водяные стенды (M: 1:20, 1:6, 1:8). Использование крупномас-

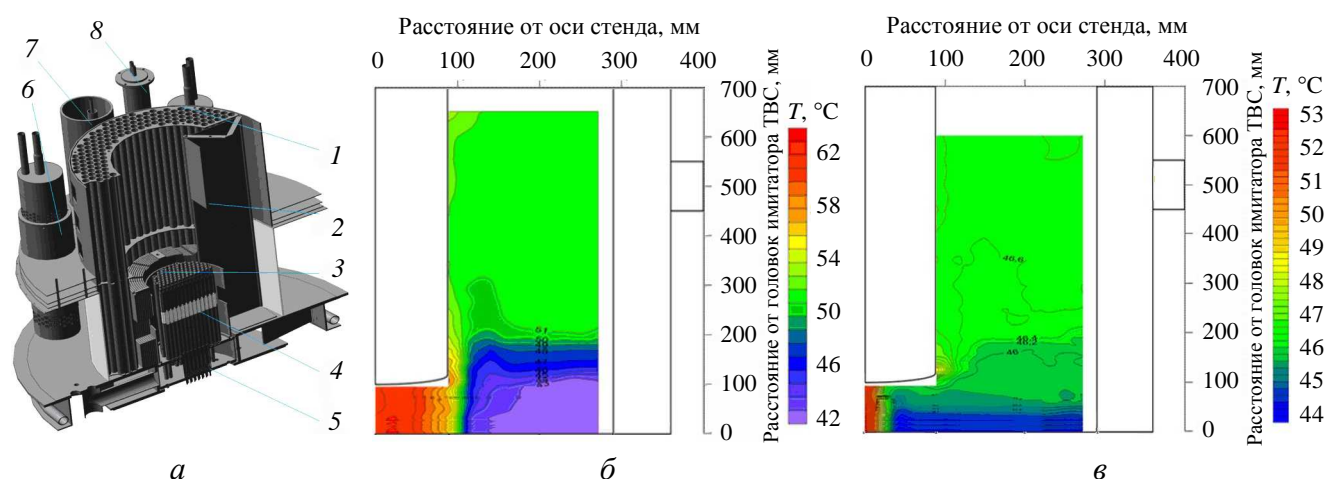
штабных моделей с натурным теплоносителем приводит к высокой стоимости экспериментов.

Точное моделирование гидродинамики и теплообмена на мелкомасштабных моделях с натурным теплоносителем (жидким металлом) невозможно из-за одновременного несоблюдения важнейших критериев подобия — чисел Рейнольдса ($Re = wl/\nu$), Пекле ($Pe = wl/a$), Фруда ($Fr = w^2/g\beta\Delta Tl$). Исследования показали, что при числе $Re > 10^4$ размеры застойных и рециркуляционных образований при равных числах Фруда для модели и реактора ($Fr_m = Fr_p$) не изменяются. Таким образом, моделирование по числу Рейнольдса не требуется. В данном случае в вязкой жидкости возможно моделирование по числам Фруда и Ричардсона без сохранения числа Рейнольдса. Вопросы моделирования теплогидравлики в первом контуре циркуляции реакторов с жидкометаллическими теплоносителями на водяных моделях рассмотрены в исследованиях [34—38]. В режимах принудительной циркуляции моделирование осуществляется по числам Фруда и Пекле. Приближенное моделирование режимов естественной циркуляции обеспечивается консервативным моделированием по числу Эйлера $Eu = \Delta P/\rho W^2$.

В ГНЦ РФ — ФЭИ проведены исследования теплогидравлики на модели первого контура в масштабе 1:10 быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем с интегральной компоновкой оборудования (рис. 3, а). Совместные экспериментальные исследования ГНЦ

РФ — ФЭИ, МЭИ и ОИВТ РАН показали, что воздействие термогравитационных сил приводит к температурному расслоению с возникновением застойных и рециркуляционных образований, перестройке характера течения и температурного режима (рис. 3, б). На стратифицированных границах раздела возникают внутренние волны, которые вызывают пульсации температуры на стенках реакторного оборудования [39]. Это приводит к термической усталости конструкционных материалов и снижению сроков эксплуатации реакторного оборудования [40]. Установившийся режим естественной циркуляции характеризуется значительно меньшими градиентами температуры в вертикальном направлении над боковыми экранами (рис. 3, в).

Критериями, определяющими подобие течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя, являются число Фруда, Пекле и локальное градиентное число Ричардсона $Ri = g\beta(\partial t/\partial z)/(\partial w/\partial z)^2$. Характеристиками устойчиво стратифицированного течения теплоносителя являются частота Вайсяля — Брента $N^2 = (g/\rho)(\partial\rho/\partial z)$ и масштаб плавучести $l_{\pi} = \rho(\partial\rho/\partial z)^{-1}$. В устойчиво стратифицированном турбулентном потоке максимальный размер вихрей не может превышать масштаб плавучести. Поэтому крупномасштабные вихри больше масштаба плавучести подавляются и растекаются вдоль стратифицированной области раздела в виде внутренних волн. Внутренние волны со-



Р и с. 3. Экспериментальная водяная модель первого контура реактора с интегральной компоновкой оборудования (а), усредненная температура теплоносителя в верхней камере при перемещении подвижных термозондов по высоте в номинальном (б) и установившемся режиме расхолаживания естественной конвекцией (в): 1, б — промежуточный теплообменник; 2 — элеваторная выгородка; 3 — элементы внутрибаковой защиты; 4 — активная зона (имитаторы ТВС); 5 — напорная камера; 7 — имитатор ГЦН-1; 8 — автономный теплообменник

здают пульсации температуры в материале стенок оборудования с частотой $f \leq N$. В предельном случае, например, при срабатывании быстрой аварийной защиты, когда $l_{п} < l_{к}$, конвективный перенос через поверхность раздела между холодной и горячей областью потока полностью подавляется. Здесь $l_{к} = (v^3/\varepsilon)^{0,25}$ — масштаб Колмогорова, ε — скорость диссипации кинетической энергии турбулентности.

Моделирование теплообмена при кипении жидких металлов в пучке твэлов. Теплоотдача при кипении жидких металлов в критериальном виде описывается зависимостью числа Нуссельта от числа Пекле и комплекса K_p [41]:

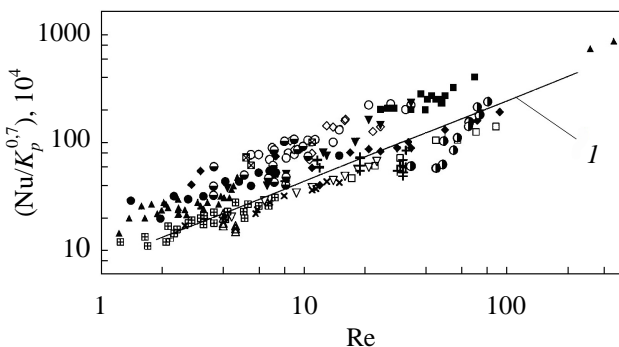
$$\text{Nu} = \frac{\alpha}{\lambda'} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}}; \quad \text{Pe} = \frac{q c \rho'}{r \rho'' \lambda'} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}};$$

$$K_p = \frac{P}{\sqrt{\sigma g (\rho' - \rho'')}}.$$

Обобщение экспериментальных данных о теплоотдаче при кипении жидких металлов в большом объеме, щелях и трубах в указанных условиях — критериях подобия представлено в работах [42—44]. Экспериментальные данные о кипении натрия и калия в большом объеме и каналах и натрий-калиевого сплава в 7-стержневом пучке (рис. 4) [45] согласуются с зависимостью

$$\text{Nu} = 8,7 \cdot 10^4 \text{Pe}^{0,7} K_p^{0,7}. \quad (4)$$

Это указывает на возможность переноса данных о теплообмене при кипении, получен-



Р и с. 4. Теплоотдача при кипении в большом объеме калия при давлении 0,12 (⊕), 0,11 (●), 0,07 (×), 0,04 (▽), 0,004 МПа (□), натрия при давлении 0,1 (▲), 0,0472 (⊖), 0,026 (◇), 0,01 МПа (▼), при нормальных условиях 0,1 МПа (◆), натрия в щели диаметром 2 (■), 4 (○), 6 мм (⊗), калия в трубе диаметром 22 (△), 8,3 мм (⊕) [45], натрий-калиевого сплава в 7-стержневом пучке (⊙): 1 — расчет по формуле (4)

ных на натрий-калиевом теплоносителе, на натрий.

Заключение. Результаты исследования показывают:

определяющим критерием моделирования гидродинамических процессов в каналах является число Re;

в условиях, когда концентрация примесей в теплоносителе не превышает их растворимость при температуре циркулирующего жидкого металла, теплоотдача к жидким металлам Pb, Pb—Bi, Hg, Na, Na—K, Li и др. описывается единой критериальной зависимостью от числа Пекле. Основной причиной контактного термического сопротивления является осаждение на поверхности теплообмена взвешенных в потоке жидкого металла твердых частиц. Установлена зависимость контактного термического сопротивления от числа Рейнольдса и содержания кислорода;

гидродинамика и теплообмен в жидких металлах в ТВС активной зоны реактора определяются критериями подобия Re, Pe (Pr), Gr, конструкцией и теплофизическими характеристиками твэлов и ТВС, обобщенным критерием приближенного подобия твэлов;

приближенное моделирование гидродинамики и теплообмена в жидких металлах в баке реактора на мелкомасштабных моделях при использовании в качестве моделирующей жидкости воды в режиме принудительной циркуляции осуществляется по числам Фруда и Пекле, в режиме естественной циркуляции обеспечивается по числу Эйлера. Подобие течений в устойчиво стратифицированных зонах теплоносителя определяется числами Фруда, Пекле и локально градиентным числом Ричардсона $\text{Ri} = g\beta(\partial t/\partial z)/(\partial w/\partial z)^2$;

обобщение в критериальном виде результатов экспериментальных исследований теплоотдачи при кипении жидких металлов в пучках твэлов указывает на возможность переноса данных, полученных на натрий-калиевом теплоносителе, на натрий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Учебное пос. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: ИздАт, 2007.

2. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. Новосибирск: Наука, 1982.
3. Гухман А.А., Кирпичев М.В. Теория моделей. — Изв. Ленинградского политехн. ин-та, 1927, т. 30, с. 1—50.
4. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов теплопереноса. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1973.
5. Конаков П.К. Коэффициент скольжения для гладких труб. — Изв. АН СССР, 1948, № 7, с. 1029—1032.
6. Канаев А.А. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при течении ртути в трубах. — Котлотурбостроение, 1953, № 2, с. 58—82.
7. Warburg E. On the flow of mercury in glass capillaries. — Ann. Phys. V. CXL, 1870, p. 367—372.
8. Кондратьев Н.С. Гидравлическое сопротивление при движении жидких металлов в трубах. — В сб.: Теплопередача и тепловое моделирование. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959, с. 93—106.
9. Брайтон Дж. Полностью развитый турбулентный поток в канале кольцевого сечения. — Теоретические основы инженерных расчетов, 1964, № 4, с. 240.
10. Толстой Д.М. Скольжение ртути по стеклу. — Докл. АН СССР, 1952, т. LXXXI, с. 1329—1334.
11. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках. М.: Атомиздат, 1975.
12. Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В. Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках. — Теплофизика выс. темп., 2017, т. 56, № 1, с. 121—136.
13. Lyon R. Heat transfer coefficient in liquid metals. — Chem. Engng Progress, 1951, v. 47, № 2, p. 75—81.
14. Кириллов П.Л. Теплообмен жидких металлов в круглых трубах (однофазный и двухфазный потоки). Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. М., ИВТАН СССР, 1969.
15. Ибрагимов М.Х., Субботин В.И., Ушаков П.А. Исследование теплоотдачи при турбулентном течении в трубах жидких металлов. — Атомная энергия, 1960, т. 8, вып. 1, с. 54—56. // Ibragimov M.Kh., Subbotin V.I., Ushakov P.A. Investigation of Heat Transfer in the Turbulent flow of Liquid Metals in Tubes. — Soviet Atomic Energy, 1961, v. 8, p. 48—50.
16. Таланов В.Д., Ушаков П.А. Теплообмен в круглых, кольцевых и квадратных каналах. — В сб.: Жидкие металлы. М.: Атомиздат, 1967, с. 9—15.
17. Субботин В.И., Ушаков П.А., Габрианович Б.Н. Теплообмен при течении жидких металлов в круглых трубах. — Инж.-физ. журн., 1963, т. 4, № 4, с. 16—21.
18. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986.
19. Кириллов П.Л. Теплообмен в турбулентном потоке. Ч. 2. Распределение скорости и температуры. — Атомная энергия, 2017, т. 122, вып. 4, с. 192—203. // Kirilov P.L. Heat Transfer in Turbulent Flow. Pt 2. Velocity and Temperature Distributions. — Atomic Energy, 2017, v. 122, № 3, p. 230—242.
20. Кокорев Л.С., Ряпосов В.Н. Измерение распределения температуры в турбулентном потоке ртути в круглой трубе. — В кн.: Жидкие металлы. М.: Изд-во ГКИАЭ СССР, 1963, с. 27—31.
21. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Орлов Ю.И. Термическое контактное сопротивление при охлаждении каналов жидкими металлами. — Теплофизика выс. темп., 1967, т. 5, № 6, с. 1025—1031.
22. Кириллов П.Л. Учет контактного термического сопротивления теплообмену жидкого металла в круглой трубе: Препринт ФЭИ-284, 1971.
23. Булеев Н.И., Миронович Р.Я. Теплоотдача в турбулентном потоке жидкости в треугольной решетке стержней. — Теплофизика выс. темп., 1972, т. 10, № 5, с. 1031.
24. Ушаков П.А., Жуков А.В., Матюхин Н.М. Азимутальные неравномерности температуры твэлов, расположенных в правильных решетках, при турбулентном течении жидких металлов. — Там же, 1977, т. 15, № 1, с. 76—82.
25. Ушаков П.А., Субботин В.И., Габрианович Б.Н., Жуков А.В. Теплообмен при течении ртути и воды в плотно упакованном пучке стержней. — Атомная энергия, 1962, т. 9, вып. 6, с. 461—469. // Ushakov P.A., Subbotin V.I., Gabrianovich B.N., Zhukov A.V. Heat Exchange During the Flow of Mercury and Water in a Tightly Packed Rod Pile. — Soviet Atomic Energy, 1962, v. 9, p. 1001—1009.
26. Ушаков П.А., Субботин В.И., Габрианович Б.Н. и др. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление в плотно упакованных пучках стержней. — Там же, 1962, т. 13, вып. 2, с. 162—169. // Ushakov P.A., Subbotin V.I., Gabrianovich B.N. et al. Heat Transfer and Hydraulic Resistance in Tightly Packed Corridor Bundle of Rods. — Soviet Atomic Energy, 1963, v. 13, p. 761—768.
27. Жуков А.В., Кириллов П.Л., Матюхин Н.М. и др. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. Вып. 29. М.: Энергоатомиздат, 1985.
28. Weinberg D., Hoffmann H., Ohira H., Schnetgoke G. The Status of studies using RAMONA and NEPTUN models on decay heat removal by natural convection for the european fast reactor. — In: IWGFR/88, 1993, p. 51—57.
29. Betts C. et al. Europe on studies on fast reactor core inter-wrapper flows. — In: Intern. Conf. Fast Reactors and Related Fuel Cycles. Kyoto, Japan, October 28 — November 1, 1991, v. III, p. 1—15.
30. Ушаков П.А. Приближенное тепловое моделирование цилиндрических тепловыделяющих элементов. — В сб.: Жидкие металлы. М.: Атомиздат, 1967, с. 137—148.
31. Ушаков П.А., Жуков А.В., Матюхин Н.М. Теплоотдача к жидким металлам в правильных решетках твэлов. — Теплофизика выс. темп., 1977, т. 15, № 5, с. 1027—1033.
32. Ушаков П.А., Жуков А.В., Матюхин Н.М. Температурные поля стержневых твэлов, расположенных в правильных решетках, при ламинарном течении теплоносителя. — Там же, 1976, т. 14, № 3, с. 538—545.
33. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (теоретические основы и физика процесса). Сер. Физика и техника ядерных реакторов. Вып. 38. М.: Энергоатомиздат, 1989.

34. **Takeda H., Koga T., Kanno J.** Study on similarity rule for natural convection water test of LMFBR. — In: IWGFR/88, 1993, p. 58—66.
35. **Ушаков П.А., Сорокин А.П.** Проблемы моделирования на воде аварийного отвода остаточного тепловыделения естественной конвекцией в камерах быстрых реакторов: Препринт ФЭИ-2585, 1997.
36. **Ushakov P.A., Sorokin A.P.** Modeling problems of emergency natural convection heat removal in the upper plenum of LMR using water. — In: Proc. of 9th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-9). USA, October 3—8, 1999.
37. **Ушаков П.А., Сорокин А.П.** Роль гидравлических сопротивлений при моделировании на воде естественной конвекции в баках быстрых реакторов. — Теплоэнергетика, 2000, № 5, с. 9—14.
38. **Опанасенко А.Н.** Теплогидравлика в верхней области бака быстрого реактора в различных режимах работы: Препринт ФЭИ-2623, 1997.
39. **Опанасенко А.Н., Сорокин А.П., Труфанов А.А. и др.** Экспериментальные исследования полей температуры и скорости на интегральной водяной модели быстрого реактора в различных режимах работы. — Атомная энергия, 2017, т. 123, вып. 1, с. 21—27.
40. **Shulz H.** Experience with thermal fatigue in LWR piping caused by mixing and stratification. — In: Specialists Meeting Proc. Paris, 1998, p. 13—18.
41. **Боришанский В.М., Готовский М.А., Фирсова Э.В.** Теплоотдача к жидким металлам в продольно омываемых пучках стержней. — Атомная энергия, 1969, т. 27, вып. 6, с. 549—551. // **Borishanskii V.M., Gotovskii M.A., Firsova E.V.** Heat Transfer to Liquid Metals in Longitudinally Wetted Bundles of Rods. — Soviet Atomic Energy, 1969, v. 27, p. 1347—1350.
42. **Shah M.** A survey of experimental heat transfers data for nuclear pool boiling of liquid metals and new correlations. — Intern. J. Heat Fluid Flow, 1992, v. 13, № 4, p. 370—379.
43. **Корхов О.А., Богословская Г.П., Сорокин А.П.** О сопоставлении данных по кипению жидких металлов: Препринт ФЭИ-2649, 1997.
44. **Кириллов П.Л.** Банк данных по теплообмену в жидких металлах: Препринт ФЭИ-3276, 2017.
45. **Сорокин А.П., Иванов Е.Ф., Мальков В.Л. и др.** Экспериментальные исследования теплообмена и устойчивости кипения жидкометаллического теплоносителя в контуре естественной циркуляции: Препринт ФЭИ-2631, 1997.

Поступила в Редакцию 25.05.19

УДК 621.039.586

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЙ В ПУЧКАХ ТВЭЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОДА CONV-3D

Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

e-mail: chud@ibrae.ac.ru

Для обоснования теплогидравлических характеристик ядерных энергетических установок и анализа их изменения в переходных процессах и аварийных ситуациях используются как системные, так и универсальные термогидродинамические CFD-коды [1]. При этом на основе экспериментальных исследований пополняется база данных, назначением которой является обеспечение конструкторов и разработчиков расчетных кодов экспериментальными данными о распределении наиболее важных гидродинамических характеристик при течении теплоносителя в ТВС. Полученные данные позволят указать направления оптимизации параметров ТВС и твэлов реакторных установок промышленно-энергетического комплекса и дополнить матрицу верификации разрабатываемых CFD-кодов.

Для пополнения верификационной базы данных разрабатываемых CFD-кодов были использованы эксперименты по исследованию па-

раметров течения теплоносителя в пучках твэлов, проводимые в Новосибирском филиале ИБРАЭ РАН [2].

В настоящей статье приведены результаты верификационных расчетов, выполненных по программе «Прецизионный масштабируемый вихреразрешающий CFD-модуль на базе DNS-приближения, ориентированный на петафлопсные (10^{15}) вычислительные ЭВМ. Версия 3.0» (сокращенно код CONV-3D) [3].

Постановка задачи. Для расчетов были взяты обечайка и дистанционирующая решетка в формате STEP и конвертированы в формат STL, после чего добавлены семь твэлов и построена расчетная сетка с помощью специально разработанного для кода CONV-3D модуля расчетных областей и сеток GeometryEditor [4] (рис. 1, 2). Длина твэлов 400 мм. Основные результаты были получены для диаметра твэла 9 и 10 мм и расстояния между твэлами s/d по отношению к диаметру 1,4. Расчеты проводили