

УДК 621.039.532.54

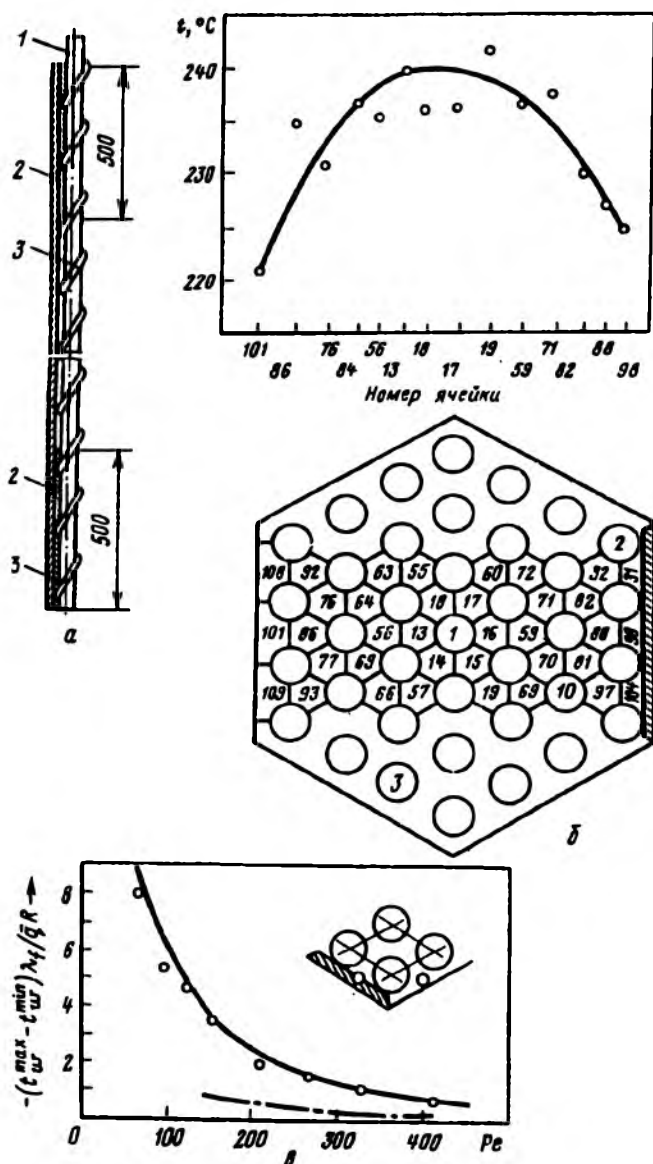
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ФОРМОИЗМЕНЕННЫХ ТВС АКТИВНОЙ ЗОНЫ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Богатырев И.Л., Жуков А.В., Матюхин Н.М., Сорокин А.П., Ушаков П.А. (ФЭИ)

Температурные поля в ТВС формируются под воздействием неравномерного энерговыделения твэлов, их радиационного формоизменения в процессе кампании, межканального обмена массой, импульсом и энергией и межпакетного теплообмена.

В работах [1—4] было показано воздействие межпакетного теплообмена на распределение температуры в ТВС, расположенных в периферийной области активной зоны. Эти исследования были проведены без учета влияния межпакетной протечки теплоносителя и формоизменения ТВС на температурное поле чехлов в системе взаимодействующих ТВС, что важно для термомеханического анализа. Исследованию влияния указанных факторов на температурное поле в системе взаимодействующих ТВС и посвящена настоящая работа.

Методика. Методика теплогидравлического расчета ТВС с неadiaбатическими условиями на чехле разработана на основе поканального метода расчета [5—7]. При этом система уравнений макропереноса массы, импульса и энергии для ячеек в ТВС дополняется уравнениями макропереноса энергии для ячеек в межпакетных зазорах. Распределение температуры оболочки твэлов при этом находится интерполяционно по характерным точкам периметра (в узкой и широкой частях ячеек). В характерных точках периметра твэла температура находится как суперпозиция температуры теплоносителя в ячейках, рассчитываемой по поканальной методике, и локального перегрева (недогрева) поверхности твэла.



Р и с. 1. Температурное поле в модельной ТВС, охлаждаемой внешним потоком теплоносителя, с имитацией деформации чехла ТВС: а — схематическое изображение деформации чехла ТВС; б — сравнение расчетного (—) и экспериментального (о) распределения температуры в поперечном сечении пучка на конце участка энерговыделения; в — сравнение расчетной (—) и экспериментальной (о) максимальной азимутальной неравномерности температуры углового имитатора твэла; 1 — твэл; 2 — кожух ТВС; 3 — проволоочная навивка ТВС

Задача решается в области, включающей семь взаимодействующих ТВС. На внешней границе области задаются адиабатические условия. Может быть задано произвольное распределение энерговыделения твэлов и формоизменение оболочек твэлов (пучков) и чехлов ТВС. Ширина зазоров между пакетами и расход теплоносителя через зазоры между ТВС могут изменяться также произвольно.

Методика поканального расчета реализована в программе МИФ-А3, которая апробирована на большом экспериментальном материале, например, см. рис. 1.

Результаты исследования для ТВС в центральной области активной зоны. В результате выполнения расчетов получены формулы для распределения скорости и подогрева теплоносителя по радиусу ТВС с неадиабатическими условиями на чехле и максимальной азимутальной неравномерности температуры пристенных твэлов в ТВС, которые приведены в работе [8].

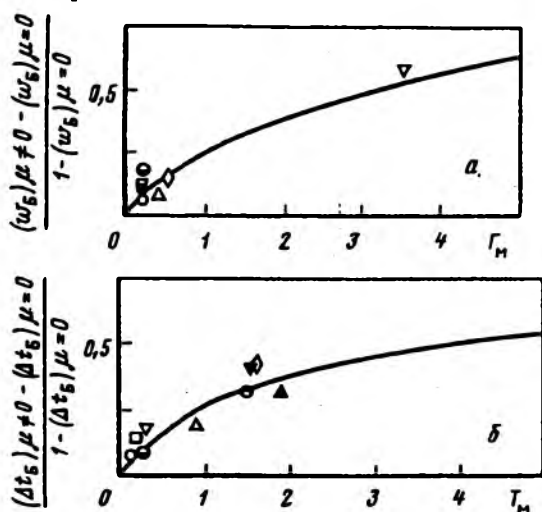
При равномерном энерговыделении по сечению ТВС распределение скорости, подогрева теплоносителя и максимальная азимутальная неравномерность температуры пристенных твэлов зависят от распределения исходных геометрических параметров и комплексов Γ_m , T_m и T_p . Комплекс Γ_m характеризует соотношение между потерями давления в канале за счет межканального обмена импульсом и, кроме того, за счет гидравлического сопротивления канала. Комплексы T_m и T_p характеризуют соотношение между поперечными потоками тепла за счет межканального обмена между ячейками решетки твэлов или обмена теплом через чехол ТВС соответственно и продольным конвективным потоком тепла во внутреннем канале ТВС.

Характер зависимостей и сравнение расчетных и экспериментальных данных [8—12] по соотношению скорости и подогрева теплоносителя в пристенных и центральных ячейках ТВС показан на рис. 2.

В случае слабого межканального обмена импульсом ($\Gamma_m < 1$), характерного для сборок гладких твэлов, распределение скорости в значительной степени определяется соотношением между гидравлическим диаметром и коэффициентом сопротивления для боковых и центральных ячеек пучка. Интенсивный межканальный обмен в сборках с дистанционирующими проволочными навивками ($\Gamma_m > 3$) существенно выравнивает поле скорости. Аналогично интенсификация межканального теплообмена в сборках твэлов, дистанционируемых проволочной навивкой ($T_m > 5$), уменьшает неравномерность подогрева теплоносителя по радиусу ТВС.

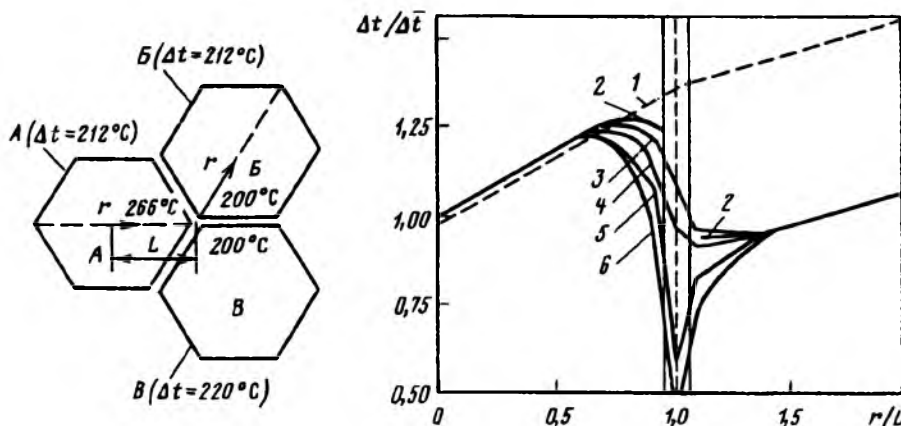
При низкой интенсивности теплообмена через чехол ТВС ($\mu_{\text{тс}}^T < 1 \text{ м}^{-1}$) или небольшой протечке теплоносителя ($g_{\text{пр}} \ll 1\%$) теплоотдача в межпакетный зазор незначительно влияет на температурное поле ТВС. При высокой интенсивности межпакетного теплообмена ($\mu_{\text{тс}}^T > 2 \text{ м}^{-1}$) и большой протечке теплоносителя в межпакетном зазоре ($g_{\text{пр}} > 2\%$) подогрев теплоносителя на периферии ТВС снижается на несколько десятых долей среднего подогрева теплоносителя в ТВС. Это существенно увеличивает неравномерность температуры по периметру пристенных твэлов. Вместе с тем теплообмен через чехол ТВС воздействует на температурное поле максимум трех-четырёх рядов твэлов, примыкающих к чехлу.

Расчетные исследования для ТВС в периферийной области активной зоны. Расчеты температурного поля для груп-



Р и с. 2. Выравнивание скорости (а) и подогрева (б) теплоносителя в боковых и центральных ячейках ТВС.

— — — расчетные зависимости: $\bullet, \circ, \square, \Delta, \diamond, \nabla, \ominus, \blacktriangle, \blacktriangledown$ — экспериментальные данные



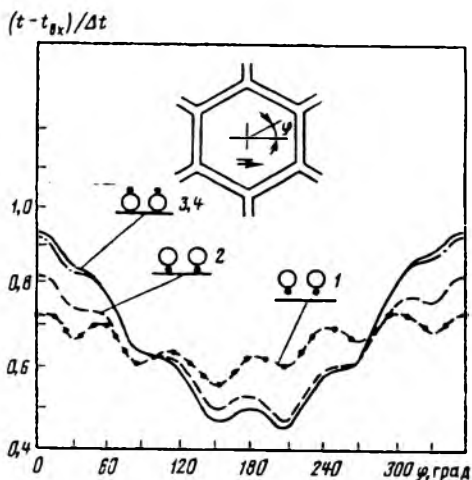
Р и с. 3. Распределение температуры в системе взаимодействующих ТВС на периферии активной зоны: 1 — закон энерговыделения; 2 — межпакетный обмен отсутствует; 3 — отсутствует межпакетная протечка теплоносителя; 4, 5, 6 — с учетом протечки теплоносителя 2; 4 % в межпакетных зазорах и ∞ соответственно

пы взаимодействующих ТВС в периферийной области активной зоны быстрого реактора с неравномерным энерговыделением в поперечном сечении показывают, что при небольших протечках теплоносителя в зазорах между ТВС ($g_{\text{пр}} \leq 2\%$) наряду с некоторым снижением максимального уровня подогрева теплоносителя в области ТВС с высоким энерговыделением наблюдается увеличение подогрева теплоносителя в смежной ТВС в области низкого энерговыделения. С ростом протечки теплоносителя в межпакетных зазорах происходит снижение подогрева теплоносителя в периферийных областях ТВС (рис. 3).

Расчеты температурного поля активной зоны в реакторах с учетом эффектов межканального и межпакетного теплообмена показывают значительную неравномерность температуры в ТВС и различие в температуре между ТВС, а также существенные азимутальные неравномерности температуры по периметру чехлов ТВС.

Температурный режим в системе формоизмененных ТВС. Неравномерное энерговыделение обуславливает неравномерное протекание процессов радиационного формоизменения и в конечном итоге деформацию чехлов и пучков твэлов, характер которой может меняться в процессе кампании.

В случае изгиба пучка твэлов в сторону центра активной зоны с касанием периферийными твэлами с дистанционирующей проволокой (или в предельном случае их оболочкой) чехла ТВС в сечении по центру активной зоны наблюдается существенное повышение максимальной температуры оболочки в областях ТВС, ориентированных к центру активной зоны. Существенно увеличивается и максимальная азимутальная неравномерность температуры твэлов. В то же время у противоположных граней чехла ТВС отмечается уменьшение температуры оболочки твэлов, что связано с ростом зазора между периферийными твэлами и чехлом ТВС. Однако азимутальная неравномерность температуры твэлов увеличивается.



Р и с. 4. Распределение температуры по периметру чехла ТВС при различных формоизменениях пучка твэлов и чехла ТВС в направлении к центру активной зоны: 1 — номинальная геометрия; 2 — изгиб пучка твэлов с касанием проволоочными навивками периферийных твэлов одной грани чехла ТВС в сечении по центру активной зоны; 3 — изгиб пучка твэлов с касанием оболочками периферийных твэлов чехла ТВС в сечении по центру активной зоны; 4 — вариант 3, дополненный изгибом чехла ТВС в направлении к периферии активной зоны до касания с чехлом смежной ТВС в сечении по центру активной зоны

Деформация пучка твэлов повышает азимутальную неравномерность температуры чехла ТВС более чем в 2 раза при касании пристенных твэлов с проволочными навивками чехла ТВС (в сечении по центру активной зоны) и примерно в 4 раза при касании оболочками твэлов чехла ТВС по сравнению с вариантом недеформированного пучка твэлов (рис. 4).

При деформации пучка твэлов в направлении к периферии активной зоны меньше наблюдаются эффекты деформации температурного поля по сравнению с уже рассмотренным вариантом. Наличие отражателей СУЗ приводит к некоторой деформации поля температуры в периферийных областях прилегающих к ним ТВС.

Заключение. Экспериментальные и расчетные исследования показали, что межпакетный теплообмен оказывает локальное воздействие на температурные режимы твэлов в пристенной области ТВС. Происходит снижение температуры пристенных твэлов (кроме отдельных ситуаций), увеличивается азимутальная неравномерность температуры твэлов в пристенной области ТВС. К значительным дополнительным неравномерностям приводит деформация пучка твэлов и чехлов ТВС в процессе кампании. Особенно увеличивается азимутальная неравномерность температуры чехлов ТВС.

Безразмерные параметры

$$\Gamma_m = 0,57 \frac{\mu_{\Sigma}^w d_{\Gamma_0}}{\lambda_{\text{бл}}} \left(1 + \frac{\omega_0}{\omega_6}\right), \quad T_n = \frac{\mu_{i\bar{z}}^T L}{g_{\text{пр}}},$$

$$T_m = \frac{\mu_{\text{эф}}^{T_{n,u}} L}{g_{\text{эф}}} \left[1 + \frac{\mu_{i\bar{z}}^T}{\mu_{\text{эф}}^{T_{n,u}}} \exp(-T_n)\right],$$

$$g_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пр}}}{W_0} \frac{\omega_{\text{пр}}}{\omega_0}, \quad g_6 = \frac{W_6}{W_0} \frac{\omega_6}{\omega_0}, \quad g = g_6 + g_{\text{пр}} \exp(-1/T_n).$$

Условные обозначения

d — диаметр твэлов; g — относительный расход теплоносителя; L — длина участка энерговыделения; t — температура; $W, \Delta t$ — скорость и подогрев теплоносителя; λ — коэффициент гидравлического сопротивления (теплопроводности); μ — коэффициент межканального обмена; ω — площадь проходного сечения ячеек.

Индексы

б — боковой; г — гидродинамический; пр — протечка теплоносителя в межпакетных зазорах; п.ц — зазор между периферийными и центральными ячейками; т — тепловой; эф — эффективный; f — жидкость (теплоноситель); i, j — индексы ячеек; $i\bar{z}$ — теплообмен через чехол ТВС; о — центральная область ТВС; μ — с учетом межканального обмена; $\mu = 0$ — без учета межканального обмена; W — обмен импульсом; бл — расчет по формуле Блазиуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chang L. The prediction of temperature distribution of a including interassembly heat transfer. — Nucl. Engng Des., 1977, № 2, v. 42, p. 223—236.
2. Chen B., Todreas N. Prediction of the coolant temperature field in a breeder reactor including interassembly heat transfer. — Ibid., 1975, v. 35, № 3, p. 423—440.
3. Carelli M., Bach C. Thermal-hydraulic analysis for CRBRP core-restraint design. — Transact. Nucl. Soc., 1975, v. 21, № 1, p. 393—395.
4. Sha W., Schmitt R. A model to account for bypass-fluid and inter-fuel assembly heat transfer. — Ibid., v. 22, № 1, p. 575—576.
5. Жуков А.В., Сорокин А.П., Ушаков П.А. и др. Поканальный теплогидравлический расчет сборок твэлов ядерных реакторов. — Атомная энергия, 1981, т. 51, вып. 5, с. 307—311.
6. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов (теоретические основы и физика процесса). М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Жуков А.В., Сорокин А.П., Матюхин Н.М. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Жуков А.В., Сорокин А.П., Ушаков П.А. и др. Влияние межканального обмена на выравнивание полей скорости и температуры в кассетах твэлов: Препринт ФЭИ-1062, 1980.

9. Жуков А.В., Свириденко Е.Я., Матюхин Н.М. и др. Поля скоростей в твэльных сборках быстрых реакторов при изменении геометрии периферийных зон. — В сб.: Теплофизические исследования. М., изд. ВИМИ, 1977, с. 17—22.
10. Субботин В.И., Ибрагимов М.Х., Ушаков П.А. и др. Гидродинамика и теплообмен в атомных энергетических установках (основы расчета). М.: Атомиздат, 1975.
11. Bogoslovskaya G.P., Zhukov A.V., Kirillov P.L. et al. Problems of core thermal-hydraulics in LMFBR. — In: Proc. Intern. Top. Meeting on Nucl. Reactor Thermal-Hydraulics, Karlsruhe, 1979, v. 1, p. 1319—1324.
12. Грязев В.М., Асеев Н.А., Маркин С.А. и др. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизики и гидродинамики пакетов активной зоны реактора БОР-60. — В сб.: Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов. Прага, изд. ЧСКАЭ, 1978, т. 1, с. 182—209.

Поступила в Редакцию 22.02.93

УДК 621.039.588+532.501.34

ПОВЕРХНОСТНЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ДИНАМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЖИДКОГО ОБЪЕМА

Зверев А.А. (*Ин-т молекулярной физики РНЦ "Курчатовский ин-т"*)

Катастрофическое нарастание реактивности в реакторах способно приводить к частичному или полному разрушению его активной зоны. Запредельное энерговыделение может вызвать расплавление ядерного топлива в ТВС. Процесс фрагментации расплава и его взаимодействия с теплоносителем определяет масштаб и скорость энергообмена между ними и амплитуду волн, воздействующих на конструкции реактора.

Экспериментальные исследования процесса разрушения твэла при энерговыделении, моделирующем аварию RIA (Reactivity Initiated Accident), проводились, например, в работах [1, 2]. В результате энерговыделения ядерное топливо переходило в расплавленное состояние и при взаимодействии с теплоносителем диспергировалось. В работе [1] приводятся результаты экспериментального исследования дисперсного состава фрагментов топлива. Представляет интерес описание процесса разрушения твэла и оценка характерных размеров осколков.

Рассмотрим жидкий цилиндрический столб расплава ядерного топлива, окруженный водой. Начальное энерговыделение в расплаве, сопровождающееся ростом давления, инициирует радиальное движение вещества. Для расширяющегося твэла используем приближение цилиндрического слоя, аксиальная полость которого заполнена газами, изначально содержащимися в ТВС. В качестве механизма разрушения топлива будем рассматривать нарастание и отрыв возмущений внешней границы расплава при его радиальном расширении. Как известно [3], при торможении расширяющегося жидкого слоя на его границе с окружающим веществом (если плотность последнего ниже плотности слоя) возникают условия для экспоненциального роста возмущений поверхности. После того, как амплитуда возмущения становится примерно равной длине волны, наступает нелинейная стадия, сопровождающаяся отрывом возмущений в виде фрагментов тяжелой жидкости [4].

На линейной стадии инкремент нарастания возмущений для случая гравитационной неустойчивости границы раздела тяжелой и легкой жидкостей (индекс 2 и 1 соответственно) равен [3]

$$I(\lambda) = \left[\frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 + \rho_2} \frac{2\pi g}{\lambda} - \frac{\Sigma}{\rho_1 + \rho_2} \frac{8\pi^3}{\lambda^3} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где λ — длина волны возмущения; $\rho_{1,2}$ — плотность; g — ускорение, знак которого выбран таким, что первый член в соотношении (1) положителен при торможении тяжелой жидкости о легкую; Σ — поверхностное натяжение. Влиянием вязкости на развитие поверхностных волн в настоящей работе будем пренебрегать, хотя в области коротковолновых возмущений для $\lambda \ll 4\pi^2 \nu / I$ вязкость может играть стабилизирующую роль