

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ В НАСЫПНЫХ СБОРКАХ

Исследование течений рабочих тел в каналах технических устройств и аппаратов является важным и эффективным средством решения различных задач, направленных как на энергосбережение при эксплуатации, так и на повышение надежности и безопасности их работы. Самым наглядным видом таких исследований является непосредственное наблюдение за течениями. Проиллюстрирую это на примере визуализации течения в насыпных сборках.

Общие положения

Противоречие между способностью ядерного топлива выделять огромную удельную мощность (вплоть до взрыва) и пока скромной возможностью безопасного отвода и преобразования ее является постоянно действующим фактором, склоняющим развитие реакторостроения в сторону увеличения энергонапряженности активной зоны.

К настоящему времени технические показатели ядерных реакторов со стержневыми твэлами практически достигли своего предела. Удельная мощность энергетических реакторов не превышает $0,5 \text{ кВт/дм}^3$. Поток нейтронов в исследовательских установках составляет $5 \cdot 10^{14}$ нейтрон/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$). Причем рекомендуемый МАГАТЭ переход на низко обогащенное топливо

(до 20%) по U^{235} с целью предотвращения террористических актов с использованием ядерных материалов делает проблемным обеспечение даже этого не столь высокого нейтронного потока.

Формирование экономики в соответствии с пятым-седьмым технологическими укладами требует разработки и внедрения ядерных реакторов различного целевого назначения со значительно большими нейтронными потоками 10^{16} нейтрон/(см²·с) и энергонапряженностью не менее 5 МВт/дм³. Наличие таких аппаратов придаст должный импульс развитию биотехнологии, медицины, космической техники, материаловедения.

Различные вещества и в первую очередь топливо, находящиеся в активной зоне действующей установки, являются главным источником опасности. Поэтому внедрение высоконапряженных аппаратов позволяет не только сохранить прежний уровень потенциальной угрозы при увеличении числа ядерных установок в стране, но даже дает возможность ее снизить.

Для дальнейшего развития ядерной энергетики необходима разработка качественно новых аппаратов, обладающих широким спектром возможностей. К ним относятся реакторы с микротвэлами — тепловыделяющими элементами сферической формы диаметром порядка миллиметра, покрытыми защитной оболочкой для удержания радиактивных продуктов деления. Топливо в виде микротвэлов обладает дополнительными положительными свойствами — сыпучестью и высокой удельной поверхностью теплосъема. Сама же конструкция тепловыделяющей сборки (ТВС) с микротвэлами, получившая название насыпной, в отличие от традиционной, допускает раздачу теплоносителя по радиусу и высоте активной зоны.

Здесь (рис. П1 и рис. П2) микротвэлы находятся между двумя цилиндрическими решетками. Теплоноситель подается в распределительный канал, откуда в радиальном направлении фильтруется сквозь топливный слой, снимает генерируемое там тепло, выходит в отводной канал, а затем покидает активную зону. Реактор состоит из одной (монокассетный) или многих тепловыделяющихборок. Основная задача при разработке

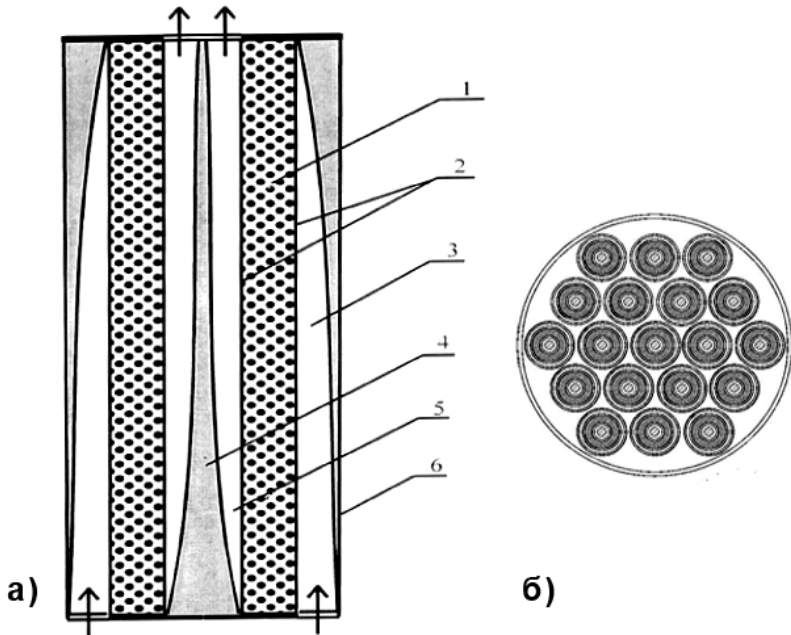


Рис. П1. Многокассетная активная зона: а) насыпная ТВС с непрофилированными торцами; б) активная зона с насыпными ТВС: 1 — слой из микротвэлов; 2 — ограждающие слой решетки; 3 — распределительный канал; 4 — вытеснительный стержень; 5 — отводной канал; 6 — обсадная трубка

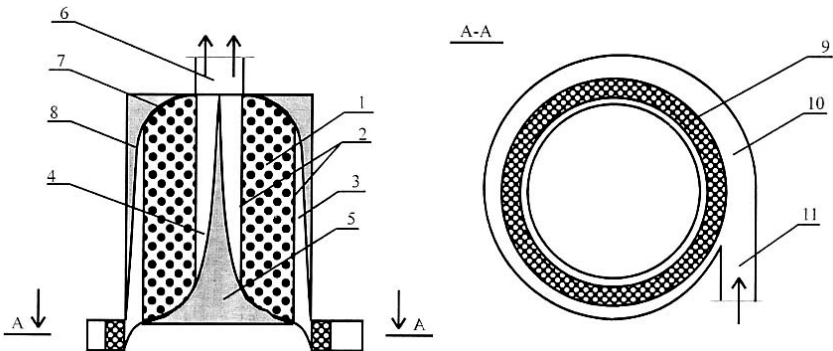


Рис. П2. Активная зона монокассетного насыпного реактора с устройством ввода теплоносителя: 1 — слой микротвэлов; 2 — ограждающие слой решетки; 3 — распределительный канал; 4 — отводной канал; 5 — вытеснительный стержень; 6 — выходной патрубков; 7 — торцевая стенка; 8 — обечайка; 9 — пористая кольцевая перегородка; 10 — улиточный канал; 11 — вход в улиточный канал

таких аппаратов состоит в организации распределения потока теплоносителя в топливном слое в соответствии с объемным тепловыделением в нем q_v при работе реактора, как на номинальной нагрузке, так и на частичных. Решение ее потребовало взаимозависимого профилирования распределительного и отводного каналов и торцевых ограждающих поверхностей. Визуализацию наиболее оригинальных случаев течения жидкостей в макетах тепловыделяющих сборок с микротрещинами рассмотрим ниже.

Торцевые эффекты

В научной литературе широкое распространение получили методы расчета термогидродинамических параметров потока в ТВС и выбора его оптимальных размеров, базирующиеся на модели строго радиального движения теплоносителя в слое. Их наглядность и математическая простота сыграли положительную роль при обосновании целесообразности создания ядерных реакторов с насыпными сборками. Однако присущее этой модели внутреннее противоречие — одновременное существование осевой составляющей градиента давления в слое и строго радиального движения теплоносителя свидетельствует о незавершенности теоретических работ по созданию надежных расчетных методов.

Противоречие несколько иного содержания проявляется при анализе двумерной фильтрации жидкости вблизи торцов слоя. Действительно, падение давления при движении теплоносителя в каналах ТВС, в особенности на входе и выходе, приводит к возникновению осевой составляющей градиента давления на торцах слоя; если принять за основной закон фильтрации классическую модель Дарси, то наличие осевой составляющей градиента давления на торцах слоя несовместимо с их непроницаемостью. Учет в уравнении фильтрации сил инерции и/или вязкости устраняет эту несовместимость, но зачастую оказыва-

ется, что толщина «погранслоя» на торцах сравнима с размером микротрещины.

При исследовании теплосъема на полномасштабных макетах сборки имели место случаи перегрева микротрещин вблизи торцов слоя. Многие специалисты считали, что теплосъем в указанных местах снижен в результате нарушения струйного обтекания частиц, вызванного пристеночной анизотропией слоя. Однако при выработке конкретных практических рекомендаций, направленных на увеличение интенсивности теплосъема, эта гипотеза оказалась малоэффективной.

В сложившейся ситуации было решено провести визуальное наблюдение за картиной течения жидкости. Был изготовлен плоский макет насыпной ТВС со стенками из оргстекла. Слой размером $400 \times 70 \times 40$ мм набирался из стеклянных шариков диаметром 3 мм. Конструкция макета позволяла в процессе опытов изменять угол наклона α и зазор δ между стенками каналов и ограждающими слой решетками в пределах $\alpha = 0—0,122$ рад, $\delta = 0—50$ мм. Вода двумя параллельно соединенными насосами КМВ8—18 подавалась в ресивер с регулировочным перепускным клапаном, откуда она поступала в распределительный канал и далее по тракту. Весь поток воды перед входом в распределительный канал периодически подкрашивался.

Было установлено: после отключения подачи красителя основная часть слоя практически мгновенно становилась прозрачной; наряду с тем вблизи торцов слоя оставались темные (подкрашенные) области (рис. ПЗ). Их следует рассматривать как зоны «аномальной» фильтрации. Примерно через 8—14 с после прекращения подкраски темные пятна рассасывались, и, что характерно: при расположении плоских торцевых стенок ортогонально продольной оси макета зона аномалий занимала больший объем, чем при косом их размещении (рис. ПЗ), но время полного рассасывания этих областей в первом случае в полтора-два раза меньше, чем во втором.

Сравнительно низкий уровень обмена между жидкостью, находящейся в зоне застоя, и основным потоком лимитирует



Рис. П3. Застойные зоны (темные пятна) у торцов топливного слоя насыпной ТВС

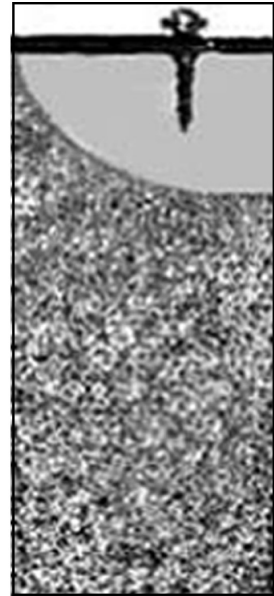


Рис. П4. Профиль торцевой стенки, устраняющий непроточные зоны в слое из микровзлов насыпной ТВС

интенсивность теплосъема в реакторе. Устранение этого негативного гидродинамического эффекта в топливном слое является важной практической задачей. Это необходимо и потому, что ведущие научные центры проектируют тепловыделяющие сборки с плоскими (не профилированными) поверхностями.

Профилирование торцевых ограждающих поверхностей основывается на условии, что торцевые стенки совпадают с поверхностями, образованными линиями тока на краях слоя потоком, подчиняющимся классическому закону фильтрации. Форма торцов определяется путем решения полной системы уравнений фильтрации в слое с незакрепленными границами и условиями на торцах в виде тождества

$$V_n \Big|_{\phi_{0,L}} \equiv 0,$$

где V_n — проекция вектора скорости фильтрации на нормаль к торцевым поверхностям Φ_0 и Φ_L .

Визуальные наблюдения за картиной течения в макете с профилированными торцами показали: после прекращения подкраски воды все части шарового слоя одновременно становились прозрачными, темные пятна на краях засыпки отсутствовали (рис. П4).

Об устойчивости течения в каналах сборки

Математическая модель движения теплоносителя в насыпной сборке с параболическими линиями тока в топливном слое позволила определить направление фильтрации в зависимости от формы распределительного

$$\text{sign}\left(\frac{dG}{dx}\right)_1 = \text{sign}\left(\frac{1}{F} \frac{dF}{dx} - \xi/2\bar{D}\right)_1 \quad (\text{П1})$$

и отводного

$$\min\left(\frac{\xi}{2\bar{D}} - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx}\right)_2 > 0 \quad (\text{П2})$$

каналов.

Здесь: G — расход жидкости в канале; \bar{D} — гидравлический диаметр канала; ξ — коэффициент гидравлического сопротивления канала; F — проходное сечение канала; x — продольная координата; индексом 1 отмечены величины, относящиеся к распределительному каналу, индексом 2 — к отводному.

Из выражения (П1) следует, что тепловыделяющие сборки, проходные сечения распределительных каналов которых описываются монотонно убывающими функциями, наиболее работоспособны: у них отсутствует локальный подсос теплоносителя из топливного слоя обратно в раздающую магистраль.

Для таких устройств при выполнении условия (П2) по всей высоте насыпной сборки происходит вдув теплоносителя в отводной канал. При наблюдении за течением воды в плоском

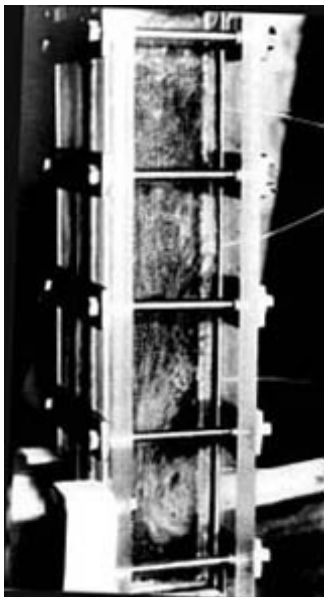


Рис. П5. Потеря устойчивости движения жидкости в распределительном канале плоского макета насыпной ТВС; иллюстрация осциллирующего вихря



Рис. П6. Фрагмент отводного канала плоского макета насыпной ТВС; иллюстрация шаровой завихренности

макете ТВС со знакопеременными $dF_{1,2}/dx$ было установлено, что в области, где правая часть выражения (П1) больше нуля, происходит подсос воды из слоя в распределительный канал. Это приводит к зарождению осциллирующего вихря (рис. П5), который хаотически колеблется вдоль магистрали с довольно-таки большой амплитудой; поток имеет все признаки потери устойчивости движения. В отводном канале при нарушении условия (П2) образуется шаровая завихренность (рис. П6), но само течение спокойное.

Работа входного устройства монокассетного реактора

Наличие устойчивого и псевдоустойчивого состояний фильтрации газа в тепловыделяющем слое и возможные неконтро-

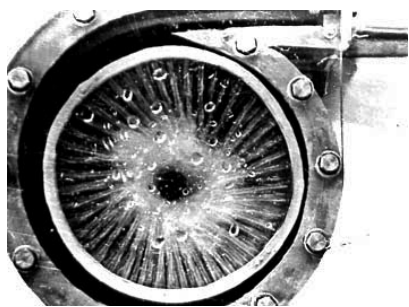


Рис. П7. Иллюстрация равномерного распределения жидкости по кольцу входного устройства

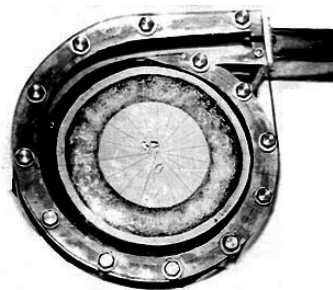


Рис. П8. Иллюстрация генерации входным устройством торoidalной вихревой пелены

лируемые переходы во время работы реактора из одного такого состояния в другое в результате термомеханической неустойчивости препятствуют организации равномерной раздачи теплоносителя по окружности слоя, которая соответствует рациональному теплосъему.

Возложив обязанности по распределению потока газа вместо слоя на специальное входное устройство с каналом формы «улитки» (см. рис. П2), можно решить проблему устойчивой равномерной раздачи газа. Экспериментально и теоретически показано, что такое входное устройство препятствует образованию и росту динамических возмущений переменной величины, и, тем самым, вместе с распределительным и отводным каналами обеспечивает устойчивость распределения потока теплоносителя по поверхности топливного слоя. В этом случае сохраняется компактность аппарата и повышается его надежность.

Следует отметить, что обычный ресивер является пассивным элементом и не стоит на пути зарождения и распространения возмущений.

Для демонстрации устойчивой равномерной раздачи был изготовлен макет входного устройства из оргстекла, «пористая» стенка которого имела сравнительно низкое гидравлическое сопротивление. Но и в этих преднамеренно ухудшенных условиях магистраль формы «улитки» обеспечила по окружности

ПРЕДИСЛОВИЕ.

Визуализация течения в насыпных сборках

равномерное распределение потока жидкости (рис. П7) в широком диапазоне изменения входного расхода.

Генерируемая этим устройством тороидальная завихренность (рис. П8) распространяется по потоку, турбулизируя его в распределительном канале, и тем самым обеспечивает работоспособность реактора при подаче расхода теплоносителя, отличного от номинального. Снимки (см. рис. П7 и рис. П8) демонстрируют также успешное решение задачи идеального слияния потоков. На входе-выходе жидкости из улиточной магистрали в ТВС, т.е. в области их стыка, турбулентность отсутствует.

В свете изложенного выше можно отметить, что визуализация течений является мощным научным инструментом. Поэтому монография Деменка С. Л., Медведева В. В. и Сивухи С. М. «Визуализация течения жидкости в каналах» представляет значительный практический и научный интерес. Представленные в книге сведения важны и как иллюстрация разных гидродинамических явлений, и как пример органичной связи теоретических моделей и их практического воплощения.

*Зам. директора Института энергетики
Национальной академии наук Беларуси, доктор физ.-мат. наук
Колос В. П.*