

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ РЕАКТИВНОСТИ В РЕАКТОРЕ ПИК

Гольцев А.О., Дегтярев А.М., Иванов А.А., Осипов А.М., Прохоренков С.В.
(НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия), Захаров А.С., Румянцев М.В.,
Севрюкова Я.В. (НИЦ «Курчатовский институт» –ПИЯФ, Гатчина, Россия)

Введение

Исследовательский ядерный реактор ПИК – один из самых передовых научных комплексов «Курчатовского института». [1]. Реактор предназначен для исследований в области фундаментальной физики, а также для решения многих прикладных технических задач.

Реактор корпусной, водо-водяного типа с баком отражателем с тяжелой водой. В реакторе использованы твэлы типа СМ с увеличенной до 500 мм высотой топлива, которые собраны в кассеты двух типов (тепловыделяющие сборки, ТВС), и они образуют активную зону (рис. 1–2).

Начиная с 2018 года реактор ПИК находится на этапе энергетического пуска [2]. По мере ввода в работу основных реакторных систем поэтапно реактор выводился на разные, в том числе мегаваттные уровни мощности.

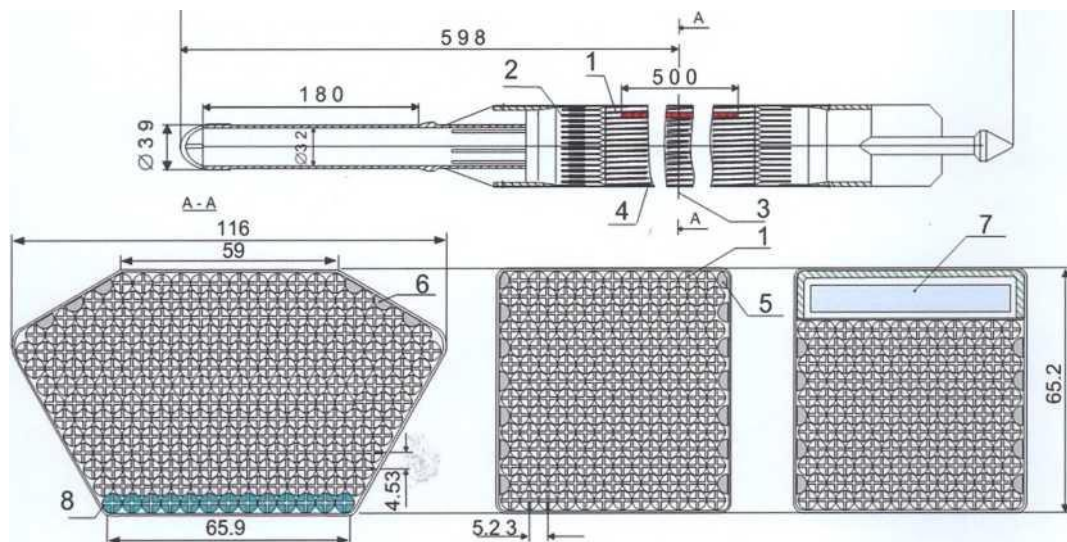


Рис. 1. ТВС реактора ПИК:

- 1 – твэлы; 2 – дистанционирующие обоймы; 3 – центр по высоте топливного слоя;
4 – чехол ТВС; 5 – вытеснитель угловой; 6 – СВП (нет в стартовом комплекте);
7 – ампула с образцами-свидетелями;
8 – твэлы со сниженной топливной загрузкой

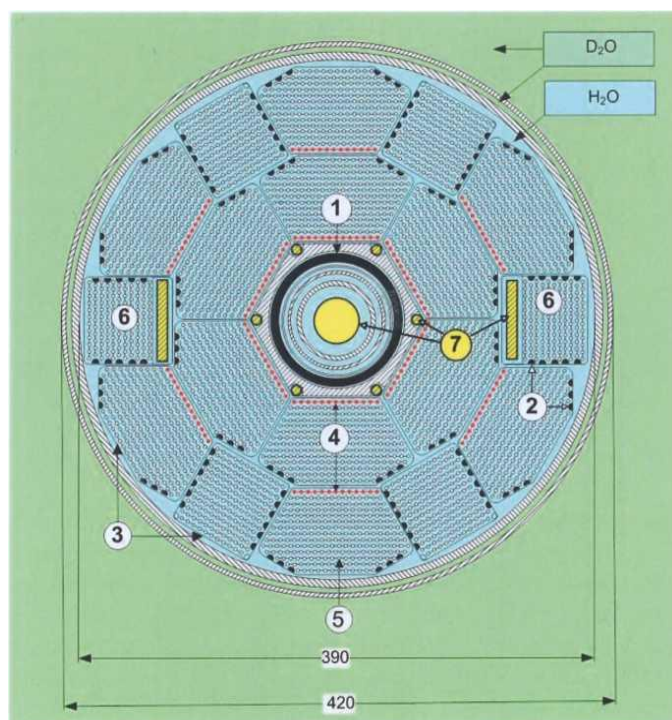


Рис. 2. Активная зона реактора ПИК:

- 1 – поглощающие шторки из гафния (выполняют функцию АР, РР, АЗ);
 2 – стержни выгорающего поглотителя (нет в пусковом комплекте);
 3 – чехлы ТВС; 4 – твэлы с уменьшенным содержанием топлива;
 5 – твэлы с номинальным содержанием топлива;
 6 – ТВС с образцами-свидетелями материала корпуса;
 7 – облучаемые образцы

Гидродинамический эффект реактивности

В 2021 году, в соответствии с программой энергетического пуска ИЯУ ПИК, были начаты эксперименты по определению эффектов реактивности. При выполнении гидродинамических измерений было выявлено, что при включении главных циркуляционных насосов (ГЦН) выделяется отрицательная реактивность. Измерения были проведены для двух уровней давлений (2,7 и 4,5 МПа) и температур воды в 1-м контуре (34 и 41 °С). Отключение насосов выполнялось в подкритическом состоянии и приводило к возврату до исходного значения реактивности (см. табл.1). Поскольку было установлено, что реактивность выделяется при изменении расхода теплоносителя, данное явление было названо гидродинамический эффект реактивности (ГДЭР). ГДЭР измерен на зоне из 12 ТВС стартового комплекта с шестью алюминиевыми вытеснителями.

Таблица 1

Результаты экспериментальных измерений

Количество ГЦН в работе	1	2	3	4	5	6
Эффект реактивности при включении ГЦН, $\beta_{эфф}$	-0,02	-0,19	-0,426	-0,575	-0,75	-0,764
Суммарный эффект при отключении ГЦН, $\beta_{эфф}$	0,02	0,19	0,42	0,55	0,71	0,73

Во второй половине 2021 года была выполнена серия дополнительных экспериментов по уточнению величины ГДЭР. В данных экспериментах были исследованы значение и динамика ГДЭР реактора ПИК в зависимости от параметров теплоносителя первого контура. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы:

- ГДЭР зависит от величины расхода теплоносителя через реактор;
- положительный эффект при отключении насоса приближается по абсолютной величине к отрицательному эффекту, возникающему при его включении;
- эксперименты по определению ГДЭР проведены в диапазоне температур теплоносителя 1 контура 22–46 °С, и показали слабое уменьшение эффекта при росте температуры: не более $0,04\beta_{эф}$.

Для анализа причин возникновения данного эффекта проводились расчеты на модели реактора в начальный период энергопуска с 12 ТВС и 6 вытеснителями. Они показали, что изменение реактивности при смещении ТВС (величина возможного смещения ~ 2 мм) составит ~ $-0,1\beta_{эф}$, а при смещении шторки (величина возможного смещения 1 мм) составит ~ $-0,02\beta_{эф}$, не позволяя, таким образом, увязать масштаб эффекта с экспериментальными результатами.

Еще одной вероятной причиной возникновения ГДЭР может являться процесс выделения пузырьков газов растворенных в теплоносителе (азот, кислород, водород и пр.), как за счет потери давления при проходе активной зоны, так и за счет турбулентности. В результате газовыделения уменьшается эффективная плотность теплоносителя, в результате чего вводится отрицательная реактивность.

Расчеты показывают (см. таблицу 2), что при включении 6 ГЦН значение реактивности при газовыделении с учетом зависимости плотности газов от давления (без учета турбулентности) примерно равно $-0,06 \beta_{эф}$ при 50 °С и $-0,08 \beta_{эф}$ при 20 °С. Это существенно меньше экспериментально измеренных, поэтому можно заключить, что эффект газовыделения в активной зоне за счет перепада давления при прохождении теплоносителя через активную зону является только частью, небольшим вкладом в общее значение ГДЭР. Другой такой частью могут являться другие гидродинамические эффекты, важные с точки зрения активизации процесса газовыделения в теплоносителе, турбулентность витых твелов и концевых деталях ТВС.

Таблица 2

Итоговые результаты расчетов для давления 5 МПа

Количество насосов в работе	Давление на входе в АЗ, МПа	Давление на выходе из АЗ, МПа	Расход теплоносителя через реактор, кг/с	Вводимая реактивность, $\beta_{эф}$	
				$T_{тн}=20^{\circ}\text{C}$	$T_{тн}=50^{\circ}\text{C}$
1	4,98	4,92	210	-0,00859	-0,00678
2	4,96	4,76	385	-0,02823	-0,02226
3	4,94	4,59	510	-0,0491	-0,03872
4	4,93	4,47	580	-0,06383	-0,05033
5	4,92	4,38	630	-0,07488	-0,05904
6	4,91	4,33	660	-0,08101	-0,06388

По сравнению со скоростью диффузионных процессов (изменение растворимости), сопровождающих газовыделение, пульсации давления можно считать высокочастотными. Основная и очень важная роль турбулентных пульсаций состоит в создании зародышевых пузырьков. Для оценки влияния интенсификации газовыделения за счет турбулентных пульсаций давления можно ограничиться

следующей эмпирической моделью, которая имеет предварительный характер и может быть обоснована лишь при наличии более представительных экспериментальных данных по изменению реактивности при включении/выключении ГЦН в широком диапазоне параметров.

Поскольку образование зародышевых пузырьков уменьшает плотность теплоносителя сверх того, что дает простое газовыделение (см. выше) и, следовательно, увеличивает по модулю вводимую реактивность, а с другой стороны на образование пузырьков тратится какая-то доля энергии потока, что, в свою очередь, обуславливает рост гидравлического сопротивления и падение давления вдоль тракта, то вполне правомерно предполагать, что суммарно вводимая отрицательная реактивность прямо пропорциональна реактивности, вносимой при уменьшении растворимости и обратно пропорциональна гидравлическим потерям. То есть:

$$\rho_{\text{сумм}} = \frac{\rho_{\text{раст}}}{\zeta_G} \cdot K \quad (1)$$

где: $\rho_{\text{раст}}$ – реактивность, вносимая при уменьшении растворимости, за счет уменьшения давления,

ζ_G – сумма гидравлических потерь на активной зоне,

K – некий безразмерный эмпирический коэффициент (был принят $=0,12 \times 10^{-3}$).

Сумму гидравлических потерь можно оценить,

как
$$\frac{1}{\zeta_G} = \rho \cdot V^2 / (2 \cdot \Delta P)$$

Здесь: ρ – средняя плотность воды,

V – средняя скорость воды,

ΔP – перепад давления на активной зоне.

Перепад давления на активной зоне – берется из эксперимента, а средние плотность и скорость воды – из гидравлических расчетов.

Используя эту модель по программам RELAP и MCU были выполнены модельные расчеты, результаты которых приведены на рисунке 3.

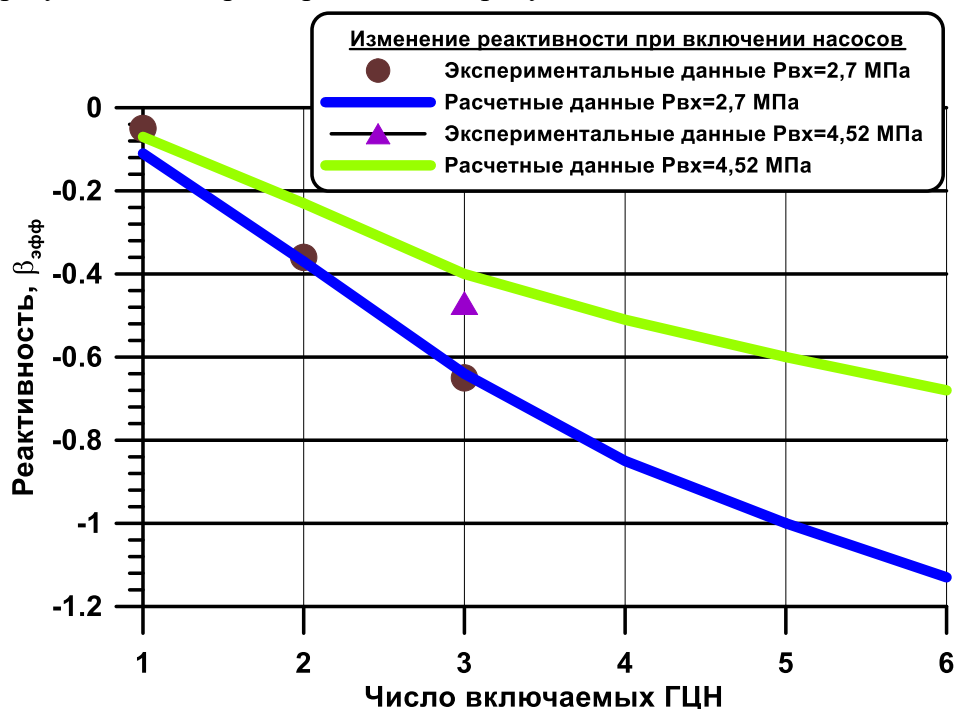


Рис.3 Изменение реактивности при включении ГЦН

Следует отметить, что представленные результаты ни в коей мере не являются обоснованием причины возникновения ГДЭР. Работы по изучению ГДЭР на реакторе ПИК планируется продолжить на последующих этапах энергопуска, в том числе при достройке активной зоны до 18 ТВС ПИК2.

В частности, программой энергопуска реактора с модернизированной активной зоной предусмотрено выполнение серии экспериментов по оценке ГДЭР, в которых будет исследована зависимость данного эффекта от расхода, температуры, давления в первом контуре. Будет оценено влияние концентрации растворенного газа в теплоносителе.

Эксперимент в НИУ МЭИ

Для подтверждения гипотезы о газовой природе ГДЭР в настоящее время рассматривается возможность выполнения серии экспериментов на гидравлическом контуре стенда “Тепловыделяющая сборка” в НИУ “МЭИ”.

Гидравлический контур представляет собой замкнутую систему, содержащую все необходимое гидравлическое, измерительное и электротехническое оборудование и рассчитанный на работу при режимных параметрах однофазного теплоносителя с давлением до 8 МПа, массовых расходах до 0,5 кг/с, и температурах до 250 °С. Разработанный рабочий участок – модель ячейки ТВС будет помещен в сосуд высокого давления для возможности проведения испытаний при параметрах теплоносителя определенных заказчиком. В процессе проведения каждого эксперимента с помощью системы сбора и обработки информации планируется фиксация следующих режимных параметров теплоносителя:

- расход теплоносителя на выходе из циркуляционного насоса;
- расход теплоносителя на входе или выходе из рабочего участка;
- избыточное давление теплоносителя в нескольких точках гидравлического контура, в том числе на входе в рабочий участок, после конечного элемента входного участка, на расстоянии 500 мм от входа в рабочий участок и выходе из рабочего участка;
- перепад давления на рабочем участке по показаниям дифференциального манометра;
- температура теплоносителя на входе и выходе из рабочего участка;
- температура теплоносителя/стенки (несколько точек по периметру имитатора ТВЭЛ) в нескольких точках по длине рабочего участка;
- частота вращения ротора циркуляционного насоса.

Для качественной и количественной оценки растворенного и выделяемого в испытаниях на рабочем участке газа планируется использовать следующие методы:

- расчетный, в соответствии с законом Генри о растворимости газов в жидкости при различных давлениях и температурах возможно провести количественную оценку различного рода газов содержащихся в объеме теплоносителя.
- экспериментальный – заключающийся в определении потерь давления на рабочем участке до и после проведения термической дегазации теплоносителя. Кроме того возможное газовыделение теплоносителем предполагается контролировать косвенными методами (стабильностью циркуляции теплоносителя в гидравлическом контуре посредством измерения

частоты вращения циркуляционного насоса, показаниям ультразвукового расходомера, принцип измерения которого основан на времени прохождения сигнала через среду с заданными свойствами).

При выявлении закономерности количественных характеристик выделения пузырьков газа от параметров теплоносителя, будет разработана эмпирическая зависимость $v = F(G, P, T)$, где G, P, T – расход, давление в контуре, температура теплоносителя соответственно.

Заключение

Природа возникновения ГДЭР является актуальной темой для изучения и проведения экспериментов.

Исследование наблюдаемого эффекта с вводом положительной реактивности при отключении насосов, обеспечивающих циркуляцию теплоносителя, имеет важное значение при обосновании безопасности реакторной установки, где на сегодняшний момент закладываются сверхконсервативные допущения. Разработка расчетной модели ГДЭР и применение ее при анализе переходных процессов позволит получить реальное представление об изменении параметров реакторной установки, важных для безопасности.

Список литературы

1. *Аксенов В.Л., Ковальчук М.В.* Концепция инвестиционного проекта «Модернизация инженерно-технических систем обеспечения эксплуатации реактора ПИК и работы его научных станций». Том 1. ФГБУ «ПИАФ» НИЦ «Курчатовский институт», 2015.
2. *А.А. Иванов, М.А. Калугин, А.В. Краюшкин, Ю.М. Семченков* Работы в обеспечение энергетического пуска реактора ПИК. ВАНТ Серия: Физика ядерных реакторов. Выпуск 1. 2023 год.