

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРА ЯГУАР ПОСЛЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

А. А. Манаков, А. Ш. Хамидулин, В. В. Захаров, О. А. Мингазов, С. А. Андреев,
С. В. Шугаев, С. Г. Порубов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск Челябинской обл.

В статье представлены результаты экспериментальных исследований характеристик ядерного гомогенного уранового аperiodического реактора (ЯГУАР), полученные в процессе физического пуска реактора после его модернизации.

Ключевые слова: реактор ЯГУАР, активная зона реактора, физический пуск.

RESULTS OF RESEARCH OF REACTOR «YAGUAR» CHARACTERISTICS AFTER MODERNIZATION / A. A. MANAKOV, A. SH. KHAMIDULIN, V. V. ZAKHAROV, O. A. MINGAZOV, S. A. ANDREEV, S. V. SHUGAEV, S. G. PORUBOV // The paper presents the results of experimental studies of the characteristics of a nuclear homogeneous aperiodic uranium reactor obtained after modernization.

Key words: reactor «YAGUAR», the reactor core, the unit physical launch.

Установление зависимости коэффициента умножения от количества залитого раствора и определения критического объема

Работы по установлению зависимости коэффициента умножения от количества залитого раствора производились на всех статических пусках. По результатам всех выходов реактора в критическое состояние на запаздывающих нейтронах, для каждого импульсного канала контроля нейтронного потока построены линейные аппроксимации зависимости обратного коэффициента умножения « $1000/Q$ » от объема топливного раствора в активной зоне (АЗ). Полученные графики представлены на рис. 1.

Полученные линейные аппроксимации « $1000/Q$ » для импульсных каналов ИК1 и ИК2 описываются следующими уравнениями:

$$1000/Q_1 = -65,0V_{AZ} + 2077; \quad (1)$$

$$1000/Q_2 = -66,6V_{AZ} + 2131. \quad (2)$$

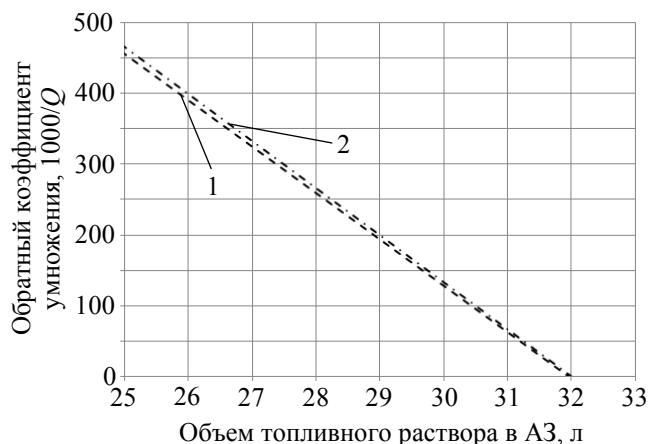


Рис. 1. Линейная аппроксимация обратного коэффициента умножения « $1000/Q$ » для импульсных каналов ИК1 (1) и ИК2 (2) от количества залитого в АЗ топливного раствора (начиная с 25 л)

Из (1) и (2) получен усредненный коэффициент $\frac{\partial(1000/Q)}{\partial V_{AZ}}$, связывающий изменение объема топливного раствора в АЗ реактора

ЯГУАР с изменением обратного коэффициента умножения $1000/Q$ (удельный «вес» топливного раствора реактора ЯГУАР в единицах « $1000/Q$ »):

$$\frac{\partial(1000/Q)}{\partial V_{A3}} = 65,8 \left(\frac{1000/Q}{\text{л}} \right). \quad (3)$$

Среднее значение критического объема АЗ реактора составило 31,85 л.

Воспроизводимость критического объема АЗ реактора ЯГУАР относительно среднего значения составила $\pm 0,28$ л, или $\sim 1\%$. Это соответствует изменению уровня раствора в АЗ $\sim \pm 3,3$ мм или изменению внешнего радиуса границы области, заполненной раствором, на $\sim \pm 0,55$ мм.

Определение квазистатического коэффициента гашения реактивности

Суть работы заключалась в том, что реактор из глубоко подкритического состояния выводился на установившийся период разгона, после чего управление реактивностью прекращалось и в АЗ реактора происходил процесс разгона и самогашения (переходный процесс). Коэффициент гашения определялся в результате обработки полученной зависимости мощности реактора от времени.

Зависимость реактивности от наработанного энерговыделения в статическом пуске № 1 приведена на рис. 2. За начало отсчета принимался момент прекращения изменения реактивности.

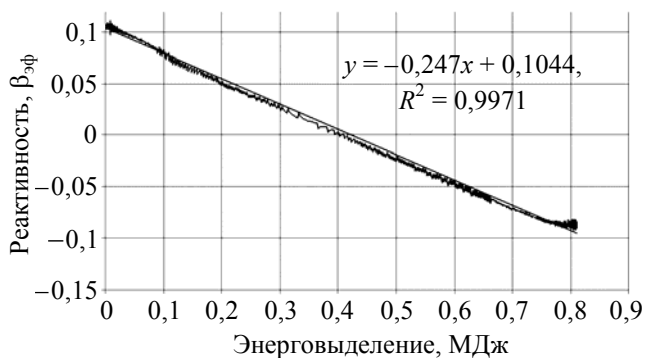


Рис. 2. Зависимость реактивности от наработанного энерговыделения в статическом пуске № 1

Линия тренда, проведенная по всем точкам графика рис. 2, описывается уравнением (4), связывающим реактивность АЗ ρ_{AZ} (в $\beta_{эф}$) с энерговыделением в АЗ (в МДж):

$$\rho_{AZ} = -0,247E + 0,104. \quad (4)$$

Отсюда квазистатический коэффициент гашения реактивности, определенный по результатам обработки данных, полученных в статическом пуске № 1, составит

$$\gamma_1 = -\frac{\partial \rho}{\partial E} = 0,25 \left(\frac{\beta_{эф}}{\text{МДж}} \right).$$

Определение квазистатического коэффициента гашения реактивности производилось по результатам, полученным в трех статических пусках реактора. Усредненный квазистатический коэффициент гашения реактивности для реактора ЯГУАР составил

$$\gamma = -\frac{\partial \rho}{\partial E} = 0,26 \pm 5\% \left(\frac{\beta_{эф}}{\text{МДж}} \right).$$

Определение температурного коэффициента реактивности

Определение температурного коэффициента гашения (ТКР) производилось по результатам, полученным в трех статических пусках реактора, следующим образом. Определялись критический объем АЗ $V_{AZ}^{кр}$ и начальная температура топливного раствора t_n , после чего реактор выводился на мощность и работал некоторое время в статическом режиме. В процессе работы реактора на мощности уменьшение реактивности за счет нагрева ΔT_t компенсировалось добавлением топливного раствора в АЗ. По окончании статического режима определялась конечная температура топливного раствора t_k .

Определялась реактивность, внесенная за время работы в статическом режиме,

$$\Delta \rho = \Delta V \frac{\partial \rho}{\partial V}, \quad (5)$$

где ∂V – объем топливного раствора, добавленный за время работы в статическом режиме.

ТКР определялся следующим образом:

$$\gamma_t = -\frac{(V_{A3}^K - V_{A3}^{KP})}{t_k - t_n} \frac{\partial \rho}{\partial V} \left(\frac{\beta_{эф}}{^{\circ}C} \right),$$

где V_{A3}^{KP} – критический объем АЗ (л), V_{A3}^K – конечный объем АЗ (л), t_n , t_k – начальная и конечная температура топливного раствора ($^{\circ}C$), $\frac{\partial \rho}{\partial V} = 0,9$ – удельный «вес» порции топливного раствора ($\beta_{эф}/л$).

Усредненный температурный коэффициент реактивности для реактора ЯГУАР составляет

$$\gamma_t = -0,034 \pm 5\% \left(\beta_{эф}/^{\circ}C \right).$$

Определение эффективности импульсных стержней и запаса реактивности АЗ

При подготовке к каждому импульсу в процессе вывода реактора в стартовое состояние определялась эффективность ИС в единицах «1000/Q» по показаниям импульсных каналов контроля нейтронного потока. Эффективность определялась как разность обратного коэффициента умножения «1000/Q» непосредственно перед вводом стержня в АЗ и после ввода.

Эффективность нижнего импульсного стержня (НИС) ~ 203 (1000/Q), верхнего импульсного стержня (ВИС) ~ 72 (1000/Q). Среднее значение $\Delta V_{НИС}^{cp} = 3,97$ л. Среднее значение удельного «веса» порции топливного раствора

$$\frac{\partial \rho}{\partial V} = 0,9 \left(\beta_{эф}/л \right).$$

Эффективность НИС и ВИС в единицах $\beta_{эф}$:

$$\begin{aligned} \rho_{НИС} &= \\ &= (1000/Q)_{НИС}^{cp} \frac{\partial \rho}{\partial V} \bigg/ \frac{\partial (1000/Q)}{\partial V_{A3}} = 3,56 \left(\beta_{эф} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho_{ВИС} &= \\ &= (1000/Q)_{ВИС}^{cp} \frac{\partial \rho}{\partial V} \bigg/ \frac{\partial (1000/Q)}{\partial V_{A3}} = 1,26 \left(\beta_{эф} \right). \end{aligned}$$

Запас реактивности определялся следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_{зап} &= (V_{\Sigma p-ра} - V_{нкс}) \frac{\partial \rho}{\partial V} \approx \\ &\approx (39,5 - 31,9) \cdot 0,9 = 6,84 \left(\beta_{эф} \right). \end{aligned}$$

Здесь $V_{\Sigma p-ра}$ – суммарный объем топливного раствора в технологической системе реактора; $V_{нкс}$ – объем топливного раствора в АЗ в критическом состоянии на запаздывающих нейтронах.

Определение скорости введения отрицательной реактивности стержнями ВИС и НИС и в процессе слива топливного раствора

Измерены времена движения ВИС и НИС при вводе в АЗ. Среднее время движения НИС составляет 200 мс, ВИС – 160 мс. Скорость ввода отрицательной реактивности НИС и ВИС составляет:

$$\frac{\rho_{НИС}}{t_{НИС}} = \frac{3,56}{0,2} = 17,8 \left(\beta_{эф}/c \right);$$

$$\frac{\rho_{ВИС}}{t_{ВИС}} = \frac{1,26}{0,16} = 7,9 \left(\beta_{эф}/c \right).$$

В совокупности скорость ввода отрицательной реактивности ИС составляет $25,7 \left(\beta_{эф}/c \right)$.

Экспериментальное определение деформации корпуса активной зоны

Для подтверждения прочностных характеристик корпуса АЗ реактора ЯГУАР и назначения пределов безопасной эксплуатации реактора были проведены работы по экспериментальному измерению деформаций корпуса активной зоны при генерировании импульсов делений с целью определения инерциального давления в топливном растворе реактора ЯГУАР.

Объектом тензометрирования являлся корпус активной зоны реактора ЯГУАР при гене-

рировании импульса делений и возникающих при этом ударных нагрузках. Оценочные максимальные динамические деформации корпуса реактора ЯГУАР не превысили 200 млн^{-1} , что соответствует инерциальному давлению в топливном растворе $\sim 10 \text{ МПа}$. Полученные значения инерциального давления в топливном растворе расходятся с данными, измеренными на физическом пуске в 1990 г. На рис. 3 приведены временные зависимости мощности и инерциального давления в растворе, полученные на физическом пуске в 1990 г.

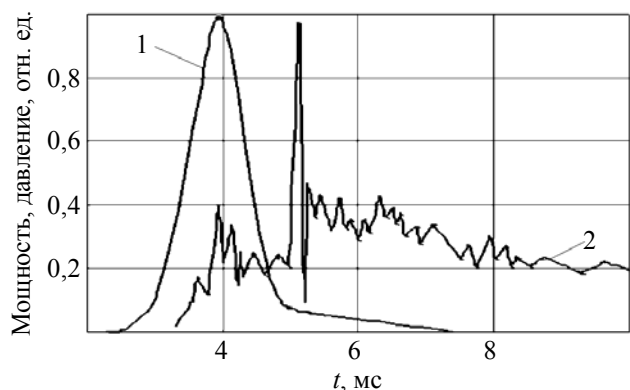


Рис. 3. Зависимости от времени t мощности (1) и давления (2) для импульса с $E = 23 \text{ МДж}$

Проводя анализ полученных результатов измерений, пришли к следующим умозаключениям. Основные измерения инерциального давления на физическом пуске в 1990 г. проводились при помощи многофункциональной измерительной штанги, установленной непосредственно в корпусе реактора. В качестве первичного преобразователя давления использовался датчик ДДИ-20, который устанавливался на нижнем торце штанги.

Анализ полученных временных зависимостей давления в растворе показал, что в момент времени, примерно совпадающий с максимумом мощности, наблюдается первый максимум давления. Далее начинается спад давления, продолжающийся от 0,5 до 1 мс. А затем снова наблюдается резкое возрастание давления в растворе, в основном, в нижних частях АЗ.

Образование второго, максимального по значению, пика давления интерпретировали следующим образом. Спад давления продолжается до тех пор, пока резко не возрастает давление «задавленного» буферного газа в па-

зухах сотовой ячейки, под действием которого раствор тормозится и начинает двигаться в обратном направлении. Это снова приводит к резкому возрастанию давления в растворе (образованию второго, максимального по значению, пика давления) в основном в нижних частях АЗ. В результате образуются «волны» коротких пиков давления длительностью $\sim 80 \text{ мкс}$ и менее, причем максимальная амплитуда наблюдается у второго пика. Давление, соответствующее этому пику, может в несколько раз превосходить давление в первом пике. Позднее давление достаточно быстро (в течение 15–20 мс) понижается. Экспериментальная зависимость давления P (МПа) в растворе от энерговыделения E (МДж), полученная во время физического пуска в 1990 г., приведена на рис. 4.

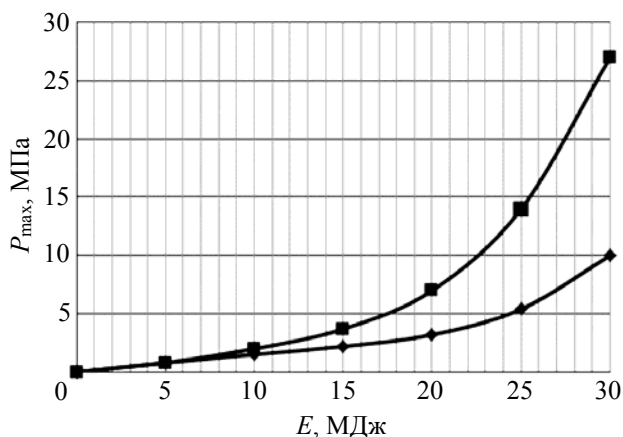


Рис. 4. Зависимость давления P_{max} в растворе у дна корпуса от энерговыделения E за импульс (—◆— — первый пик давления; —■— — второй пик давления)

При проведении работ в 2014 г. зарегистрированные в опыте сигналы динамических деформаций корпуса реактора ЯГУАР свидетельствуют об отсутствии второго пика давления такой величины.

В 2012 г. в ходе осмотра внутренней поверхности ампулы на реакторе ЯГУАР обнаружены механические повреждения ребер ампулы; на шести нижних – локальные вмятины (забои) без разрывов материала и трещин. Размер вмятин уменьшается по направлению от нижнего поврежденного ребра к верхнему.

Вмятины имеют дугообразную форму, центры вмятин лежат на одной оси, образующей угол $\sim 30^\circ$ с осью отверстия для установки измерительных штанг. Глубина вмятин составляет от ~ 3 до ~ 5 мм. На шести верхних ребрах ампулы механические повреждения не обнаружены.

Локальный характер повреждений позволяет сделать однозначный вывод, что они обусловлены не давлением раствора на ребра ампулы, а каким-либо твердым предметом. Расположение и характер повреждений предполагает, что они нанесены измерительной штангой, двигавшейся в радиальном направлении от центра АЗ, в результате разлета топливного раствора при генерации импульса делений. При монтаже измерительных штанг в корпус АЗ реактора ЯГУАР технологически предусмотрено, что верхний конец жестко зафиксирован в корпусе АЗ, а нижний конец не закреплен. При производстве импульса раствор разлетается в радиальном направлении со скоростью ~ 100 м/с и увлекает за собой незакрепленный конец штанги. В случае отклонения штанги на угол $\sim 30^\circ$, как схематично показано на рис. 5, она могла нанести описанные повреждения ребер ампулы. Диаметр измерительной штанги хорошо согласуется с радиусом вмятин, наблюдаемых на ребрах ампулы.

Все это позволяет сделать вывод, что повторный пик в показаниях датчика давления ДДИ-20 обусловлен ударом измерительной штанги о ребра ампулы и не связан с реальным давлением в АЗ.

В ходе проведения измерений в 2014 г., установлено, что амплитуда импульса давления при максимальном энерговыделении не превышает 12 МПа. Максимальное давление, полученное на физическом пуске в 1990 г. ошибочно завышено в виду воздействия удара измерительной штанги о корпус АЗ реактора.

Были проведены расчеты для определения остаточного ресурса корпуса ЯГУАР с учетом пластических деформаций, полученных в ходе предыдущей эксплуатации. Согласно результатам расчетов, остаточный ресурс при действии импульса давления амплитудой 20 МПа и последующего разогрева до температуры 220°C определяется разогревом раствора и составляет 2000 пусков. При давлении $q > 22$ МПа мо-

жет иметь место существенный рост накапливаемых деформаций, что приведет к снижению усталостной прочности и, соответственно, остаточного ресурса реактора.

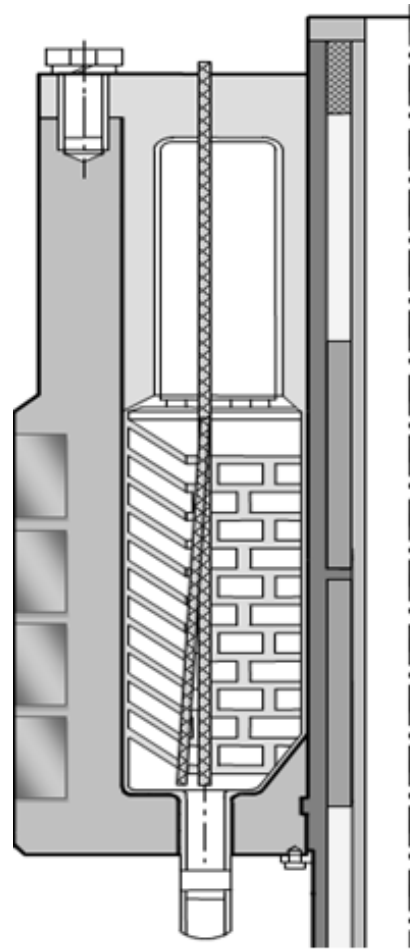


Рис. 5. Изгиб измерительной штанги при разлете топливного раствора

По данным проведенных экспериментов можно сделать вывод, согласующийся с результатами предварительных расчетов, что при ударных нагрузках корпус активной зоны реактора ЯГУАР работает в упругой области деформирования материала, и остаточный ресурс реактора, определяемый последующим разогревом раствора до максимальной температуры 220°C , составляет не менее 2000 пусков.

Определение энерговыделения в АЗ ИЯУ ЯГУАР

Первоначально при физическом пуске в 1990 г. энерговыделение определено на ос-

нове измерений распределения числа делений урана-235 и данных расчетов Монте-Карло. В отчете по физическому пуску в 1990 г. было отмечено, что «приведенные данные энерговыделения следует считать предварительными, так как при расчетах пренебрегли некоторыми различиями опыта и исходных данных модели расчетов». Несмотря на это замечание, полученные коэффициенты связи между энерговыделением и показаниями штатных средств мониторинга были использованы во всех последующих экспериментах и испытаниях, проводимых на реакторе.

При проведении физического пуска в 2014 г., на основе определения числа делений в калиброванных по объему пробах топливного раствора реактора ЯГУАР и показаний нейтронно-активационных детекторов-мониторов, получены значения коэффициентов связи между энерговыделением и активационными интегралами детекторов-мониторов. В результате проведенных исследований выяснилось, что коэффициенты градуировки детекторов-мониторов, полученные на физическом пуске в 1990 г., превышали энерговыделение от значений, полученных в исследованиях, проведенных на физпуске в 2014 г., на 12–16 %.

Определение параметров импульсов делений и установление связи между ними

В каждом импульсе делений определялись основные параметры: энерговыделение в импульсе, длительность (полуширина) импульса, начальный период разгона, реализованная реактивность, давление после импульса в корпусе, температура топливного раствора после импульса, а также величина деформаций корпуса в местах размещения тензодатчиков. По полученным данным установлены зависимости энерговыделения от обратного периода разгона, полуширины импульса от энерговыделения, динамического коэффициента гашения реактивности от энерговыделения и давления

газа в корпусе АЗ непосредственно после генерации импульса от энерговыделения в импульсе.

В таблице приведены основные характеристики реактора ЯГУАР, полученные на физпусках в 1990 и 2014 гг.

Характеристики реактора ЯГУАР

| Параметр | Физпуск 1990 | Физпуск 2014 |
|--|--------------|--------------|
| Объем раствора в системе, л | 39,5 | 39,5 |
| Концентрация U в растворе, г/л | 460 | 434±4,12 |
| Концентрация Sd в растворе, г/л | 5 | 5,55±0,57 |
| Критический объем раствора при ИС в АЗ, л | 37,9 | 38 |
| Эффективность НИС, $\beta_{эф}$ | 3,18 | 3,56 |
| Эффективность ВИС, $\beta_{эф}$ | 1,5 | 1,26 |
| Скорость ввода реактивности при «выстреле» ИС, $\beta_{эф}/с$ | 85±15 | 90 |
| Статический коэффициент гашения реактивности, $\beta_{эф}/K$ | 0,031 | 0,034 |
| Максимальное энерговыделение в импульсе делений на мгновенных нейтронах (реализованное на физпуске), МДж | 27,2 | 23,8 (26,8)* |
| Максимальное давление в растворе P_{max} , МПа | 23 | 12 |

*Значение энерговыделения с учетом коэффициентов связи, полученных в 1990 г.

Контактная информация –
 Манаков Андрей Александрович,
 инженер-исследователь 2 кат.,
 РФЯЦ-ВНИИТФ,
 e-mail: dep5@vniitf.ru

Статья поступила в редакцию 20.06.18.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2018, вып. 4, с. 78–83.