

РАСШИРЕНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЯР ВИР-2М ПРИ РАБОТЕ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

Л. Ю. Глухов, С. П. Котков, А. А. Кубасов, С. Ф. Мельников, О. В. Оловянный

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Статья поступила в редакцию 06.06.2019, после доработки – 21.08.2019, принята к публикации – 04.10.2019

Исследованы новые режимы работы реактора ВИР-2М, которые позволили существенно расширить облучательные возможности реактора. Применительно к импульсному режиму разработаны новые алгоритмы управления реактором, позволяющие реализовывать гамма-нейтронные пуски специфической формы с характерным временем воздействия 1–20 с. Исследована возможность генерирования так называемого импульса с мощности, позволяющего проводить облучения в диапазоне значений энерговыделения за импульс от 1 до 25 МДж (диапазон значений «полуширины» импульса от 5 до 100 мс).

Ключевые слова: импульсный ядерный реактор, гамма-нейтронный импульс, квазиимпульс, импульсный стержень, топливный раствор, реактивность.

PULSED OPERATION OF REACTOR VIR-2M. ENHANCEMENT OF PERFORMANCE CAPABILITIES / L. Yu. GLUKHOV, S. P. KOTKOV, A. A. KUBASOV, S. F. MELNIKOV, O. V. OLOVYANNY // There are investigated new modes of VIR-2M reactor operation that made it possible to extend essentially the reactor irradiation capabilities. For the pulsed mode irradiation there are developed new algorithms of reactor control allowing realization of gamma-neutron quasi-pulses of the specific shape with the characteristic exposure time 1–20 s. The possibility of generating the so-called «additional-power pulses» making it possible to fulfill irradiation in the range of energy release values per pulse from 1 to 25 MJ (the range of pulse «half-width» values is from 5 to 100 ms) is studied.

Key words: pulsed nuclear reactor, gamma-neutron pulse, quasi-pulse, pulsed rod, fuel solution, reactivity.

Введение

Водный импульсный реактор ВИР-2М [1] относится к классу апериодических импульсных реакторов самогасящегося действия «нулевой мощности» и представляет собой рас творный вариант исследовательских ядерных реакторов (ИЯР), отличающийся простотой изготовления и эксплуатации, малым количеством делящегося материала, используемого в качестве топлива (в реакторе ВИР-2М всего около 7 кг урана).

ИЯР ВИР-2М используется, в основном, для получения одиночных импульсов делений

(длительность воздействия не более 10 мс) и для работы на постоянной (статической) мощности. Однако для некоторых экспериментов требуются импульсы делений с длительностью ~1 с или последовательные импульсы, разделенные небольшим временным интервалом. Возможность генерирования на ИЯР ВИР-2М таких импульсов и была исследована в данной работе.

Подобные работы ранее проводились на схожем с ИЯР ВИР-2М реакторе ИГРИК [2], поэтому нынешние исследования учитывали ранее полученных на ИЯР ИГРИК результаты.

Отработка на ИЯР ВИР-2М режима «Облако»

На ИЯР был проведен ряд экспериментов, связанных с отработкой нового для реактора ВИР-2М режима «Облако». Данный режим характеризуется временем воздействия, 1–100 с. Для реализации таких условий на ИЯР необходимо вывести реактор с периодом нарастания мощности от 0,005 до 1 с в надкритическое состояние, что соответствует вводу избыточной реактивности от 3 до 0,5 $\beta_{эф}$ соответственно.

Для реализации работы ИЯР ВИР-2М в режиме «Облако» были решены следующие задачи:

а) отработана возможность ввода положительной реактивности со скоростями $\sim 0,2-4,0 \beta_{эф}/с$, что соответствует скоростям извлечения импульсных поглощающих стержней 0,01–1 м/с. (В штатном импульсном режиме работы реактора группы импульсных стержней могут перемещаться при помощи электромеханического привода со скоростью до 2 мм/с, а при помощи пневмопривода – со скоростью ~ 5 м/с.) Получение нужных скоростей ввода реактивности достигалось путем варьирования следующих параметров:

– диаметра проходного сечения линии подачи воздуха в пневмоприводы импульсных стержней;

– времени открытого состояния управляющего электропневмоклапана, обеспечивающего управление временем подачи воздуха в пневмопривод импульсных стержней;

– давления воздуха в пневмосистеме привода импульсных стержней;

б) обеспечена регистрация формы пуска в диапазоне контролируемых параметров: мощность от 100 Вт до 2,5 ГВт; длительность от 0,005 до 20 с. (Имеющимися на установке штатными каналами контроля нейтронного потока невозможно в полном объеме фиксировать характер изменения плотности нейтронного потока при работе реактора в режиме «Облако».) Смонтированы дополнительные измерительные каналы контроля потока нейтронов на основе нейтронной камеры типа КНК-4 и счетчика нейтронов СНМ-11;

в) разработан алгоритм перевода реактора из подкритического состояния в надкритическое на запаздывающих нейтронах, так как в рамках штатной эксплуатации реактора в импульсном режиме работы подобные алгоритмы управления не предусмотрены.

После проведения вышеперечисленных подготовительных работ была генерирована серия гамма-нейтронных пусков специфической формы. Данные пуски можно разделить на 3 типа. Ниже приводятся примеры пусков каждого из типов.

1. Генерирование импульса на запаздывающих нейтронах (импульс с затянутым «хвостом») (рис. 1).

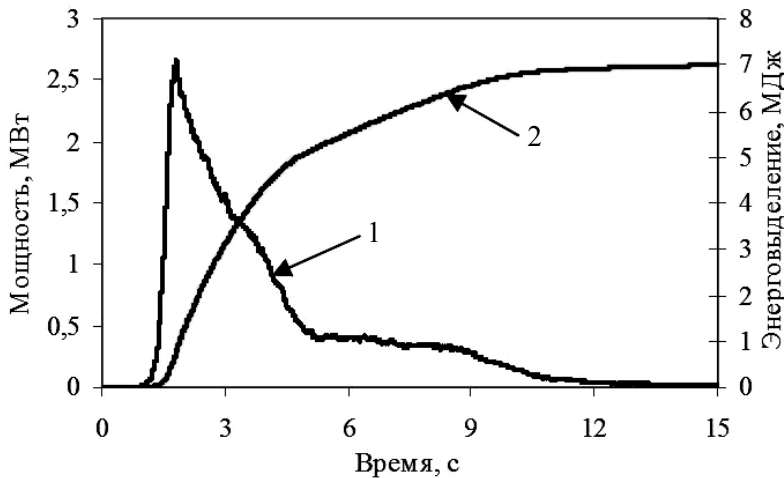


Рис. 1. Форма импульса, генерированного извлечением одной группы импульсных стержней: 1 – мощность; 2 – энерговыделение

Данные пуски генерируются с помощью только одной группы стержней, вследствие чего им характерно невысокое энерговыделение (менее 10 МДж).

2. Генерирование серии из двух импульсов на мгновенных нейтронах («двугорбый» импульс) (рис. 2).

Важным обстоятельством для возможности генерации полноценного «двугорбого» пуска является то, что после первого импульса топливный раствор разлетается (за счет радиолитического вскипания) и собирается обратно не ранее, чем через 1 с. Таким образом,

для обеспечения возможности генерации второго импульса в подобном пуске необходимо, чтобы задержка извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга была не менее 1,5 с. Также следует отметить, что в таком типе пусков есть возможность реализовать практически весь имеющийся запас реактивности, в результате чего суммарное энерговыделение достигает 50 МДж.

3. Генерирование серии последовательных импульсов на запаздывающих нейтронах (рис. 4).

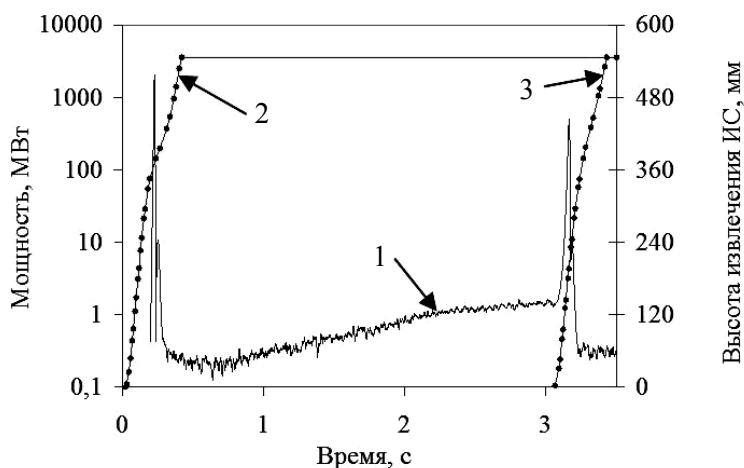


Рис. 2. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга в 3 с: 1 – мощность; 2 – высота извлечения ИС-1; 3 – высота извлечения ИС-2

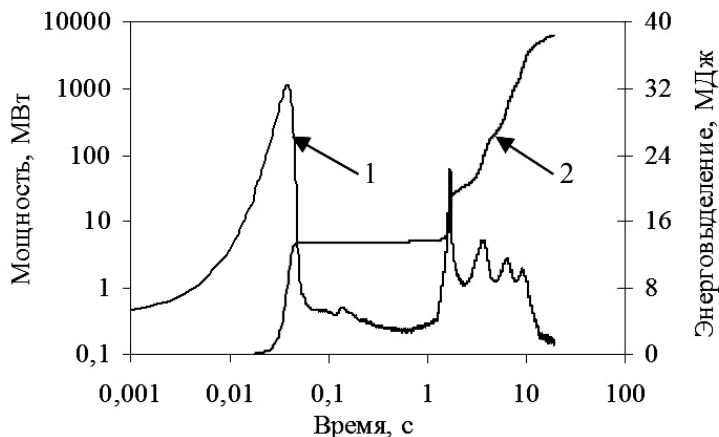


Рис. 3. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга в 1,5 с: 1 – мощность; 2 – энерговыделение

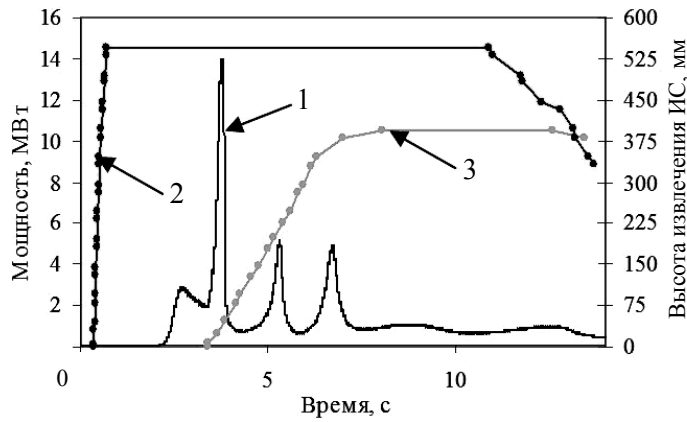


Рис. 4. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга в 3,1 с: 1 – мощность; 2 – высота извлечения ИС-1; 3 – высота извлечения ИС-2

В данном типе пусков (так же, как и для импульсов с затянутым «хвостом») невозможно реализовать весь имеющийся запас реактивности, в результате чего полное энерговыделение не превышает 25 МДж.

Анализ полученных результатов

Во всех проведенных пусках отмечались колебания мощности, обусловленные нестабильностью геометрии АЗ растворного реактора, которая сильно зависит от температурных и мощностных эффектов. При работе реактора на мощности происходит нагрев топливного раствора (ТР) и образование парогазовых пу-

зырьков (в результате протекания процессов радиолитического кипения), которые уменьшают плотность топливного раствора. Выход пузырьков из ТР в надтопливное пространство приводит к повышению плотности ТР по объему, что сопровождается всплеском мощности. Однако в [2] было установлено, что давление газа в надтопливном пространстве влияет на параметры импульсов на запаздывающих нейтронах (квазиимпульсов) (уменьшает амплитуду всплесков мощности). Для оценки такого влияния было проведено несколько пусков с повышенным давлением в АЗ. На рис. 5 показана форма пуска при начальном давлении в АЗ 280 кПа.

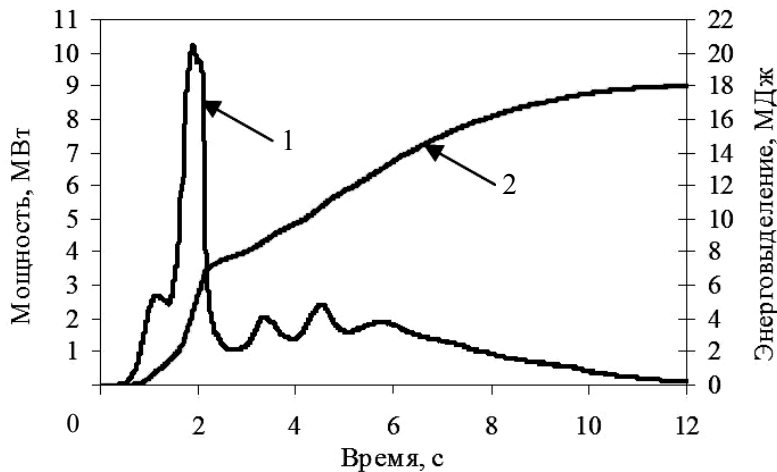


Рис. 5. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения группы ИС-2 от ИС-1 в 3,1 секунды и давлением в АЗ 280 кПа: 1 – мощность; 2 – энерговыделение

На рис. 6 приведена зависимость изменения реактивности от энергии, выделяющейся в растворе. Реактивность определялась с помощью обратного решения уравнений кинетики по временной зависимости интенсивности делений в АЗ, которая измерялась камерой КНК-4.

Как видно из рис. 6, на начальном этапе развития квазиимпульса зависимость реактивности от выделенной в АЗ энергии прямо пропорциональна, однако при достижении энерговыделения, равного ~ 6 МДж, эффективность обратной связи резко возрастает. Для оценки изменения эффективности обратной

связи построен график (рис. 7) зависимости квазистатического коэффициента обратной связи, определяемого как $\gamma = -\frac{d\rho}{dE}$, от выделяемой в квазиимпульсе энергии при различных давлениях в АЗ.

Таким образом, можно констатировать, что при увеличении давления буферного газа резкое увеличение эффективности обратной связи наступает при большем энерговыделении. Оценки показывают, что на ИЯР возможно получить квазиимпульсы с параметрами, приведенными в таблице.

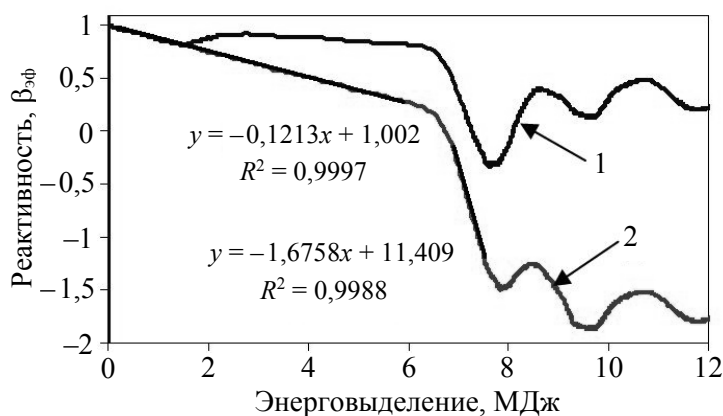


Рис. 6. Зависимость реактивности АЗ от энерговыделения (для пуска, изображенного на рис. 5): 1 – реактивность АЗ; 2 – реактивность АЗ без учета реактивности, вносимой ИС-2 (реактивность, внесенная ИС-1 еще до начала развития квазиимпульса, равна $1,00 \beta_{эф}$)

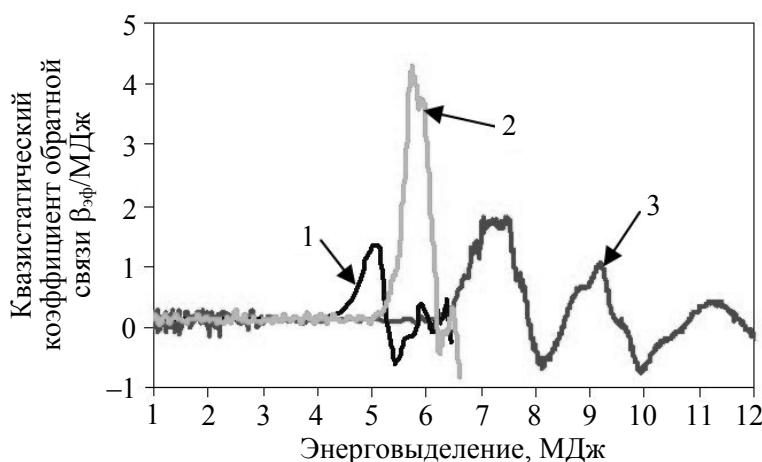
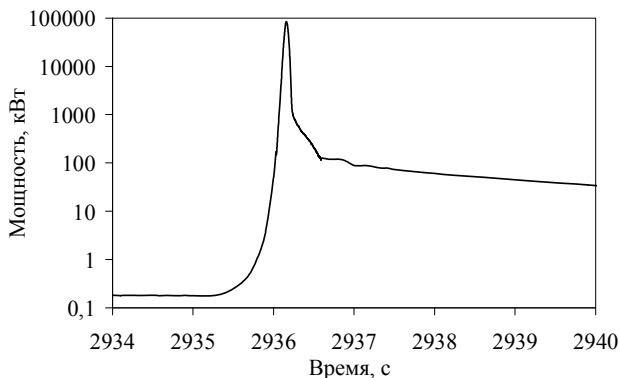


Рис. 7. Зависимость квазистатического коэффициента обратной связи от энерговыделения при различном давлении в АЗ: 70 кПа (1); 150 кПа (2); 280 кПа (3)

Расчетные параметры возможных квазиимпульсов на ИЯР ВИР-2М

Длительность квазиимпульса, с	Энерговыделение в импульсе, МДж	Необходимое давление в надтопливном пространстве, МПа
1	10	0,5
1	30	10



Генерация импульса с мощности

В процессе отработки режима «Облако» было генерировано несколько так называемых импульсов с мощности. Импульсы с мощности в отличие от стандартных импульсов генерируются из критического состояния при работе на мощности (стандартные импульсы генерируются из подкритического состояния). Если диапазон стандартно воспроизводимых значений энерговыделения за импульс находится в пределах от 5 до 56 МДж, то в режиме генерации импульса с мощности были получены значения энерговывделений (непосредственно за импульс) в диапазоне от 1 до 25 МДж. На рис. 8 приведена типичная форма такого импульса, генерированного с мощности ~ 200 Вт.

Энерговывделение в данном пуске составило:

- за время работы на статической мощности ~0,15 МДж;
- за импульс ~5 МДж («полуширина» импульса ~ 50 мс).

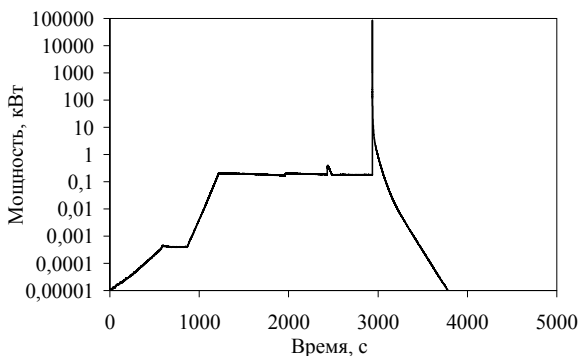


Рис. 8,а. Работа ИЯР ВИР-2М в режиме генерации импульса с мощности (полный вид)

Рис. 8,б. Работа ИЯР ВИР-2М в режиме генерации импульса с мощности. Увеличенный фрагмент рис. 8,а (момент импульса)

Список литературы

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеевко А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1990, вып. 3, с. 3–15.
2. Колесов В. Ф., Лукин А. В., Магда Э. П. Импульсные ядерные реакторы РФЯЦ-ВНИИТФ. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2002. 608 с.

Контактная информация –
 Глухов Леонид Юрьевич,
 заместитель начальника
 отдела ИЯРФ,
 РФЯЦ-ВНИИЭФ,
 e-mail: otd4@expd.vniief.ru

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2019, вып. 4, с. 114–119.