

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
L. Y. Glukhov, S. P. Kotkov, A. A. Kubasov, S. F. Melnikov, O. V. Olovyanny

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

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

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 of 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 1–20s. 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 1MJ to 25 MJ (the range of pulse «half-width» values is from 5ms to 100ms) is studied.

Введение

Водный импульсный реактор ВИР-2М [1] относится к классу аperiodических импульсных реакторов самогасящегося действия «нулевой мощности» и представляет собой растворный 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, разделённые 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 проводились с учётом ранее полученных на ИЯР ИГРИК результатов.

Отработка на ИЯР ВИР-2М режима «Облако»

На ИЯР был проведён 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 ~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 достиглось 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;
- величины 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 с 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 счётчика нейтронов СНМ-11;

в) разработан алгоритм перевода реактора из подкритического состояния в надкритическое на запаздывающих нейтронах, т. к. 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»);

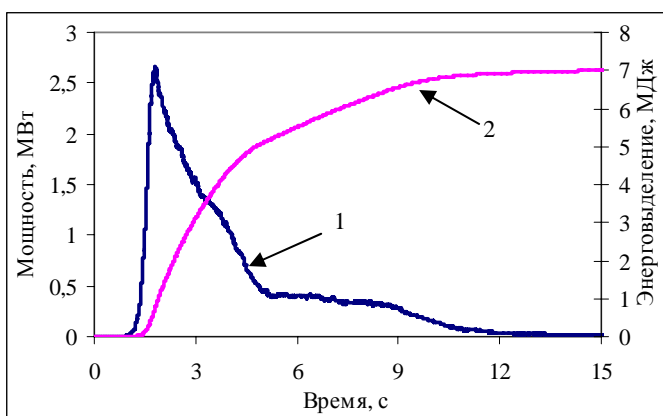


Рис. 1. Форма импульса, генерированного извлечением одной группы импульсных стержней: 1 – мощность; 2 – энерговыделение

Данные пуски генерируются с помощью только одной группы стержней, вследствие чего такие пуски характеризуются невысоким энерговыделением (менее 10 МДж).

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

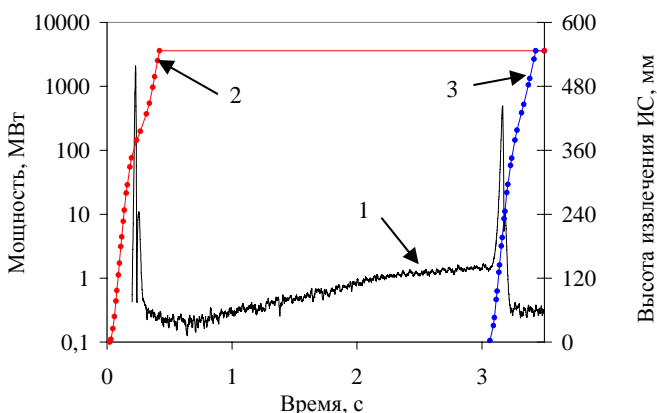


Рис. 2. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга в 3 секунды: 1 – мощность, 2 – высота извлечения ИС-1; 3 – высота извлечения ИС-2

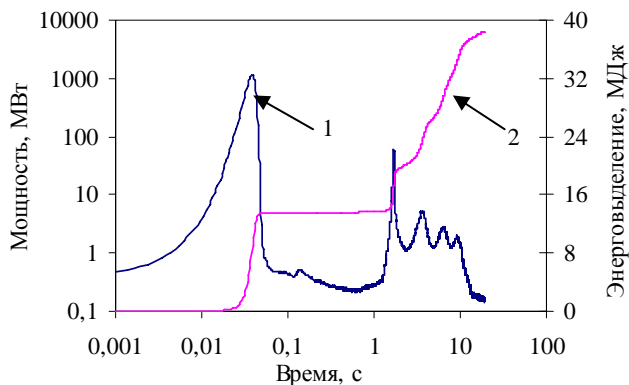


Рис. 3. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга в 1,5 секунды: 1 – мощность; 2 – энерговыведение

Важным обстоятельством для возможности генерации полноценного «двугорбого» пуска является то, что после первого импульса топливный раствор разлетается (за счёт радиолитического вскипания) и собирается обратно не ранее, чем через 1 секунду. Т.о. 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 энерговыведение достигает 50 МДж.

3) Генерирование серии последовательных импульсов на запаздывающих нейтронах

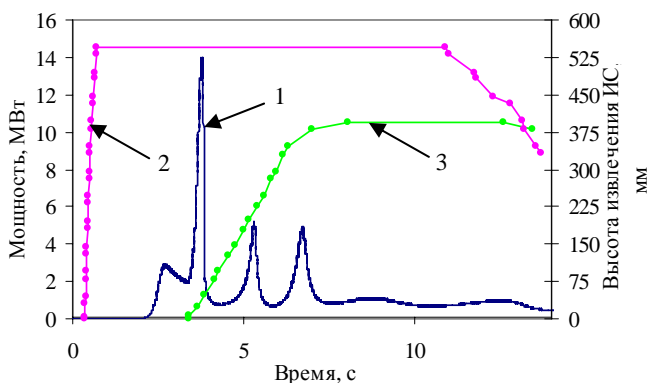


Рис. 4. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения групп импульсных стержней друг относительно друга в 3,1 секунды: 1 – мощность; 2 – высота извлечения ИС-1; 3 – высота извлечения ИС-2

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

Анализ полученных результатов

Во всех проведённых пусках отмечались колебания мощности, обусловленные нестабильностью геометрии АЗ растворного реактора, которая сильно зависит от температурных и мощностных эффектов. А именно, при работе реактора на мощности происходит нагрев топливного раствора (ТР) и образование парогазовых пузырьков (в результате протекания процессов радиолитического кипения), которые уменьшают плотность топливного раствора. Выход пузырьков из ТР в надтопливное пространство приводит к повышению плотности ТР по объёму, что сопровождается всплеском мощности. Однако, в [2] было установлено, что давление газа в надтопливном про-

странстве влияет на параметры 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.

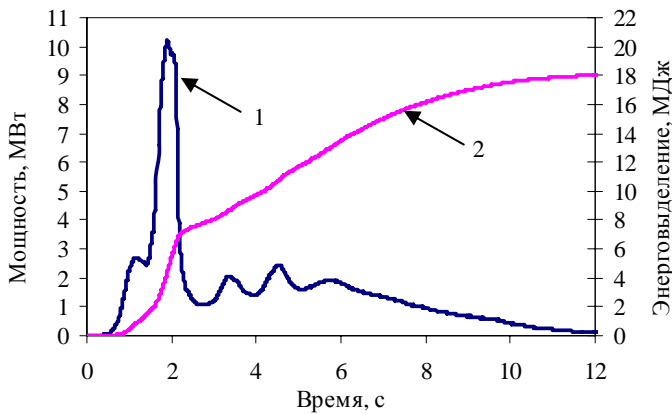


Рис. 5. Форма пуска, генерированного с задержкой извлечения группы ИС-2 от ИС-1 в 3,1 секунды и давлением в АЗ 280 кПа: 1 – мощность; 2 – энерговыделение

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.

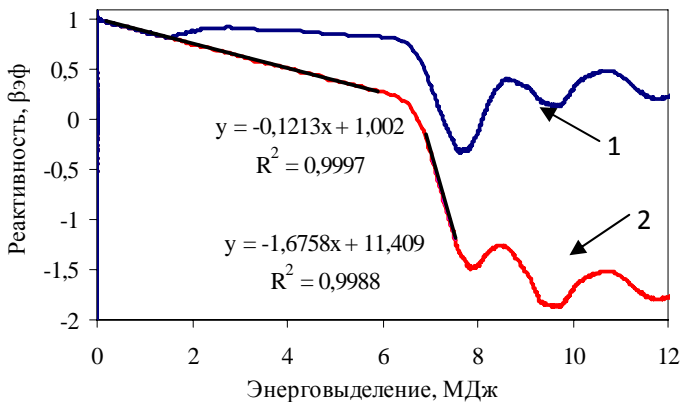


Рис. 6. Зависимость реактивности АЗ от энерговыделения (для пуска, изображённого на рис. 5): 1 – реактивность АЗ; 2 – реактивность АЗ без учёта реактивности, вносимой ИС-2 (реактивность, внесённая ИС-1 ещё до начала развития квазиимпульса равна 1,00 βэф)

Как видно из рис. 6 на начальном этапе развития квазиимпульса зависимость реактивности от выделенной в АЗ энергии прямо пропорциональная, 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.

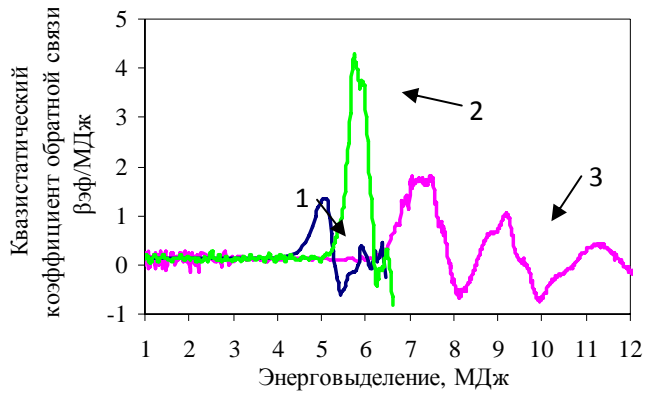


Рис. 7. Зависимость квазистатического коэффициента обратной связи от энерговыделения при различном давлении в АЗ: 1 – давление в АЗ 70 кПа; 2 – давление в АЗ 150 кПа; 3 – давление в АЗ 280 кПа

Т.о. 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 со следующими параметрами:

Таблица 1

Расчётные 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 т. н. 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 МДж до 56 МДж, то в режиме генерации импульса с мощности были получены значения энерговыделений (непосредственно за импульс) в диапазоне от 1 МДж до 25 МДж. На рис. 8 приведена типичная форма такого импульса, генерированного с мощности ~200 Вт.

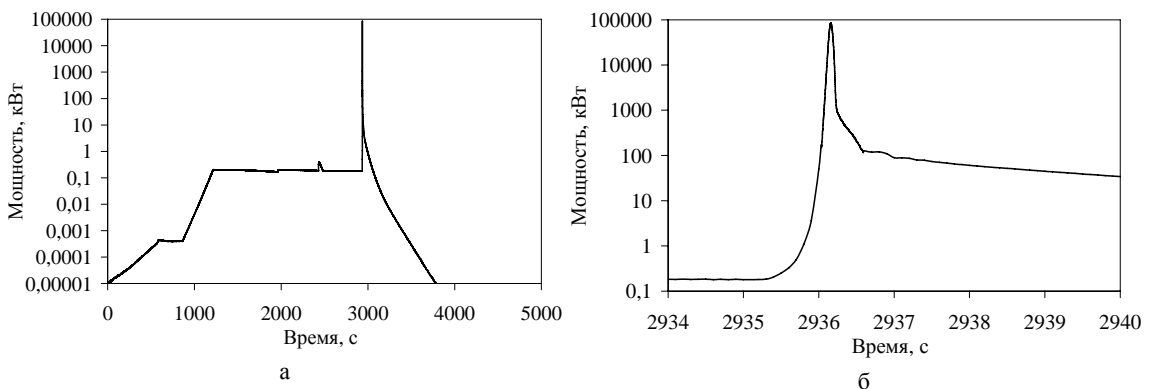


Рис. 8. Работа ИЯР ВИР-2М в режиме генерации импульса с мощности: а) полный вид, б) увеличенный фрагмент рис. 8а (момент импульса)

Энерговыделение в данном пуске составило:

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

Список литературы

1. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Серия: 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. С. 608 с.