

P13-2019-24

Ю. Н. Пепельшев, А. К. Попов, Д. Сумхуу

**КИНЕТИКА ИМПУЛЬСНОГО БУСТЕРА  
С ИНЖЕКЦИЕЙ ПРОТОНОВ**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.  
Кинетика импульсного бустера с инъекцией протонов

P13-2019-24

Рассмотрена кинетика импульсного бустера как перспективного источника мощных нейтронных импульсов взамен импульсного реактора ИБР-2М после выработки его ресурса. В качестве бустера рассмотрена подкритическая размножающая сборка с модулятором реактивности, усиливающая нейтронные импульсы, генерируемые на неразмножающей мишени в результате инъекции в нее протонов ускорителя. Рассчитаны параметры нейтронных импульсов сборки при частоте 30 Гц при разных значениях времени жизни мгновенных нейтронов и умножении сборки (20 и 50), т. е. при коэффициенте размножения 0,95 и 0,98. Приведенные расчеты позволяют выбрать оптимальный вариант параметров модулятора реактивности, уровень подкритичности, время жизни мгновенных нейтронов сборки и др.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2019

Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.  
The Kinetics of the Pulsed Booster with a Proton Injector

P13-2019-24

The kinetics of the pulsed booster as an advanced high-flux pulsed neutron source, which is foreseen to replace the IBR-2M pulsed reactor after an exhaust of its service life, is considered. As a booster, a subcritical multiplying assembly with a reactivity modulator, which amplifies neutron pulses generated on a non-multiplying target as a result of the injection of accelerator protons into it, is described. The parameters of neutron pulses of the assembly with a frequency of 30 Hz at various values of the effective lifetime of prompt neutrons and effective multiplication factor of assembly (0.95 and 0.98) are calculated. These calculations allow one to choose the optimal variant of the parameters of the modulator of reactivity, the subcritical rate, the effective lifetime of the prompt neutrons of the assembly, etc.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

В качестве импульсных источников нейтронов, управляемых ускорителями заряженных частиц, в основном используются неразмножающиеся мишени из неделящегося материала [1]. Плотность потока нейтронов на поверхности нейтронного источника многократно усиливается при использовании неразмножающейся мишени в размножающей среде (среде из делящегося материала). Такой источник малой мощности с ускорителем электронов многие годы работал в Дубне в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований [2]. Использование в качестве инжектора ускорителя не электронов, а протонов позволяет получить более высокий выход нейтронов. Импульсный источник такого типа с размножающей подкритической сборкой (импульсный бустер) на основе плутония с мишенью из вольфрама предлагается рассмотреть взамен импульсного реактора ИБР-2М после его останова [3]. В связи с этим большой практический интерес имеет анализ кинетики импульсного бустера, управляемого пучком ускоренных до высоких энергий (сотни МэВ) протонов. Особенно важен расчет импульсных характеристик активной зоны, параметров модулятора реактивности и обоснование базового уровня подкритичности. Динамические свойства источника с включенными в модель бустера обратными связями будут рассмотрены позже.

## МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ ИМПУЛЬСНОГО БУСТЕРА

Как пример импульсного бустера рассмотрим вариант высокопоточного импульсного источника, предназначенного на смену реактора ИБР-2М (Дубна, ОИЯИ). Схема источника показана на рис. 1 и 2. В тексте для названия нейтронного источника используются также некоторые общепринятые термины: подкритическая сборка, импульсная сборка, бустер и др.

Источник состоит из активной зоны (АЗ) с топливом из двуокиси плутония ( $\text{PuO}_2$ ), разделенной на две части. Между отдельными частями АЗ помещен вращающийся диск, выполняющий несколько функций: мишень для протонного пучка, модулятор реактивности для уменьшения фона между импульсами и функцию облегчения теплоотвода. Ось вращения мишенного диска направлена вертикально (рис. 2). Загрузка АЗ выполняется в горизонтальной плоскости с плотной упаковкой тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) в бескассетном варианте. Охлаждение АЗ осуществляется водой. Таким образом, бустер относится к источникам со смешанным спектром нейтронов: 98 % нейтронов в АЗ составляют быстрые и резонансные нейтроны. Частота импульсов мощности равна 30 Гц.

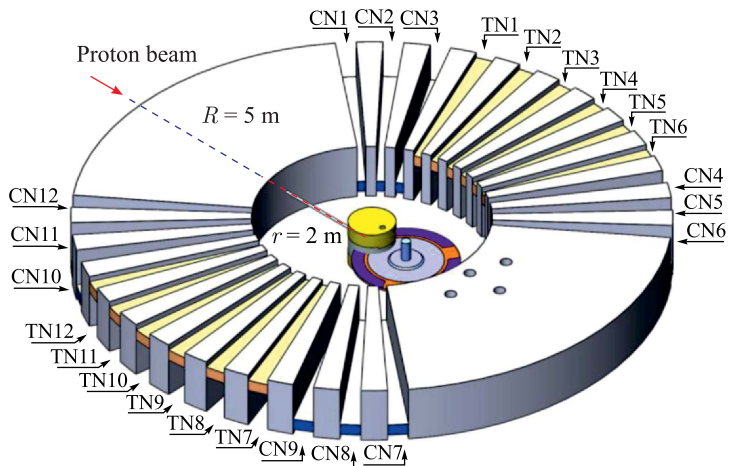


Рис. 1. Общий вид подкритической импульсной сборки (бустера) с инъекцией протонов на внутреннюю вольфрамовую мишень [3]

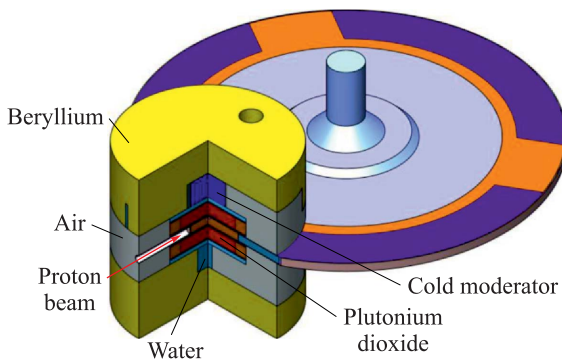


Рис. 2. Расчетная модель импульсного бустера с вращающимся модулятором реактивности и активной зоной из двуоксида плутония [3]

Активная зона окружена бериллиевым отражателем. Выход тепловых нейтронов осуществляется с поверхности водяных и холодных замедлителей, установленных в двух плоскостях — над и под активной зоной. Замедлители примыкают к поверхности соответствующих предзамедлителей, расположенных непосредственно над АЗ. Предзамедлители отделены от АЗ слоем гадолиния или вольфрам-ренийевым сплавом — материалом с высоким сечением в резонансной области энергии нейтронов. Вывод нейтронных пучков осуществляется в тангенциальной геометрии, что уменьшает прямой фон от

АЗ. Таким образом, исследователи, работающие на выведенных нейтронных пучках, имеют возможность использовать широкий спектр нейтронов — от тепловых до холодных.

## УРАВНЕНИЯ КИНЕТИКИ ОДНОТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ С ИНЖЕКТОРОМ ПРОТОНОВ И МОДУЛЯТОРОМ РЕАКТИВНОСТИ

Сборка из делящегося материала с вращающейся мишенью, генерирующей нейтроны в результате инжекции в нее заряженных частиц ускорителя, — это по сути реактор в подкритическом состоянии с глубокой модуляцией коэффициента размножения (см. рис. 3). Поэтому для анализа такой сборки использованы уравнения кинетики одноточечной модели реактора с двумя особенностями: учет ценности нейтронов мишени и использование коэффициента размножения вместо реактивности. Параметры обратной связи, вызванные разогревом топлива, здесь не учитывались, поскольку анализ проводился для описания формы достаточно короткого импульса длительностью, как правило, много меньшей характерных периодов действия обратных связей: длительность нейтронного импульса в активной зоне управляемого протонами бустера составляет десятки–сотни микросекунд, а тепловая инерционность тепловыделяющих элементов — секунды. Поэтому из-за малой длительности импульса мощности влияние разогрева сборки на изменение коэффициента размножения за время импульса мало, и им (разогревом) можно пренебречь. Уравнения кинетики имеют следующий вид [4]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1-\beta) - 1}{\bar{\tau}} n + \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i + S_{\text{вн}}, \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{k\beta_i}{\bar{\tau}} n - \lambda_i C_i. \quad (2)$$

Здесь использованы следующие обозначения:  $n$  — число нейтронов данного поколения в реакторе;  $t$  — время (с);  $k$  — эффективный коэффициент размножения, т. е. отношение числа нейтронов данного поколения к числу нейтронов предшествующего поколения в реакторе конечных размеров;  $\beta$  — суммарная доля запаздывающих нейтронов;  $\bar{\tau}$  — среднее время жизни мгновенных нейтронов (с);  $I$  — количество групп запаздывающих нейтронов (в расчетах использовано  $I = 6$ );  $C_i, \lambda_i$  — концентрация источников запаздывающих нейтронов группы  $i$  и их постоянная распада ( $\text{с}^{-1}$ ) соответственно;  $S_{\text{вн}}$  — интенсивность внешнего источника нейтронов с учетом их ценности ( $\text{с}^{-1}$ );  $\beta_i$  — доля запаздывающих нейтронов группы  $i$ .

В уравнении (1)  $S_{\text{вн}} = \Pi_n S_{\text{вн}}^0$ , где  $\Pi_n$  — ценность нейтронов внешнего источника, отражающая лучшие длительные свойства нейтронов, генерируемых мишенью (энергетический спектр, место расположения), по сравнению

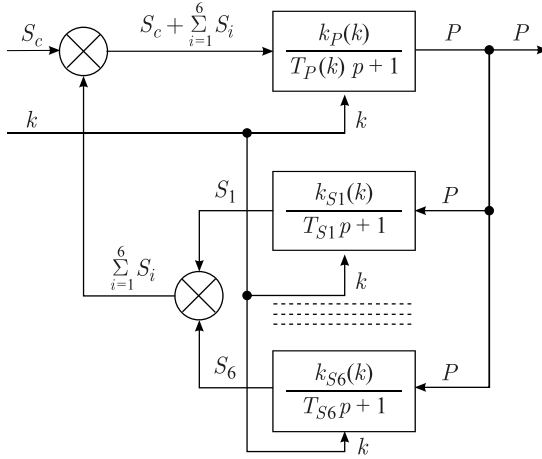


Рис. 3. Блок-схема для вычисления импульса мощности сборки

с нейтронами сборки, появляющимися в результате деления ядер (по расчету  $\Pi_n = 1, 2$ );  $S_{\text{вн}}^0$  — интенсивность нейтронов, генерируемых мишенью ( $\text{с}^{-1}$ ).

Появление нейтронов в результате деления ядер в сборке сопровождается выделением энергии. Выделяемая энергия пропорциональна числу делений ядер делящегося материала, т.е. числу нейтронов в сборке, а мощность — интенсивности нейтронов (числу нейтронов, образовавшихся за 1 с). С учетом этого в уравнениях (1) и (2) проведена замена переменной: число нейтронов  $n$ , образовавшихся за время  $\bar{\tau}$ , заменено интенсивностью образования нейтронов  $N$  ( $\text{с}^{-1}$ ) — числом нейтронов, образовавшихся в сборке за 1 с:

$$N = \frac{n}{\bar{\tau}}. \quad (3)$$

В результате уравнения (1) и (2) преобразованы в уравнения

$$\bar{\tau} \frac{dN}{dt} = [k(1 - \beta) - 1] N + \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i + S_{\text{вн}}, \quad (4)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = k\beta_i N - \lambda_i C_i. \quad (5)$$

При анализе удобно оперировать мощностью сборки. В связи с этим от уравнений (4) и (5) сделан переход к уравнениям, в которых переменные выражены в единицах мощности:

$$\bar{\tau} \frac{dP}{dt} = [k(1 - \beta) - 1] P + \sum_{i=1}^I S_i + S_c, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} \frac{dS_i}{dt} + S_i = k\beta_i P, \quad (7)$$

где  $P = k_N N$  — мощность реактора;  $k_N$  — коэффициент пропорциональности между интенсивностью нейтронов, образовавшихся в результате деления ядер (сопровождающегося выделением энергии), и обусловленной этим мощностью реактора (Вт/с<sup>-1</sup>);  $S_i = k_N \lambda_i C_i$  — интенсивность источников запаздывающих нейтронов группы  $i$  в единицах мощности;  $S_c = k_N S_{\text{вн}}$  — интенсивность постоянного источника нейтронов в единицах мощности. Следует особо подчеркнуть, что  $S_c$  — это мощность заряженных частиц ускорителя, вызывающих генерацию нейтронов мишенью. Коэффициент пропорциональности  $k_N$  равен

$$k_N = \frac{q}{v}, \quad (8)$$

где  $q = 3,2 \cdot 10^{-11}$  Вт/(дел./с) — мощность в ваттах, соответствующая одному делению ядра за 1 с,  $v = 3,1$  нейтр./дел. — число нейтронов, рождаемых при одном делении.

**Здесь в уравнениях кинетики необходимо обратить внимание на следующую особенность.** В реакторном режиме коэффициент размножения  $k$  мало отличается от единицы, поэтому для удобства анализа работы реактора обычно в уравнениях кинетики делают переход от коэффициента размножения к реактивности  $\rho = (k - 1)/k$ . При этом становится возможным упростить анализ в режиме стабилизации мощности за счет линеаризации нелинейных уравнений (6) и (7). В результате от исходной нелинейной зависимости мощности от реактивности делается переход к приближенной линейной зависимости. Для подкритической сборки такой переход от коэффициента размножения  $k$  к реактивности нецелесообразен, поскольку  $k$  меньше единицы, а при наличии модулятора реактивности еще и изменяется во времени. Поэтому главным параметром кинетики подкритической сборки в работе принят коэффициент размножения, а не реактивность. В практическом плане это мало что меняет, но уравнения кинетики подкритической сборки с модулятором реактивности при таком переходе становятся более корректными.

Для расчетов подкритической сборки в будущем по ее динамике (с учетом обратных связей) уравнения кинетики представим в форме, удобной для анализа методами теории управления. Тогда уравнения (6) и (7) запишем в виде

$$T_P \frac{dP}{dt} + P = k_P \left( \sum_{i=1}^I S_i + S_c \right), \quad (9)$$

$$T_{S_i} \frac{dS_i}{dt} + S_i = k_{S_i} P. \quad (10)$$

Введенные в уравнения (9) и (10) параметры  $T_P$ ,  $T_{S_i}$  (постоянные времени) и  $k_P$ ,  $k_{S_i}$  (коэффициенты передачи) выражаются следующим образом:

$$T_P = \frac{\bar{\tau}}{1 - k(1 - \beta)}, \quad k_P = \frac{1}{1 - k(1 - \beta)}, \quad T_{S_i} = \frac{1}{\lambda_i}, \quad k_{S_i} = k\beta_i. \quad (11)$$

При наличии у сборки модулятора реактивности ее коэффициент размножения в течение периода импульсов изменяется весьма существенно. При расчетах по уравнениям (9) и (10) это было учтено. Блок-схема, соответствующая уравнениям (9)–(11), показана на рис. 3, где  $p = d/dt$  — символ дифференцирования. Входными сигналами являются интенсивность источника нейтронов  $S_c$ , обусловленная инжектором (в единицах мощности), и коэффициент размножения  $k$ , выходным — мощность импульса сборки.

Необходимое для расчетов начальное значение интенсивности источников запаздывающих нейтронов  $S = \sum_{i=1}^I S_i$  (значение перед началом развития импульса коэффициента размножения) определено в предположении, что мощность сборки представляет собой последовательность идеальных импульсов (бесконечно узких и бесконечно высоких, площади которых равны энергиям импульсов).

Такое упрощение допустимо, поскольку длительность импульсов мощности на несколько порядков меньше периода их следования и подавляющая часть энергии, выделяемой за период, выделяется в импульсе мощности, обусловленном внешним источником нейтронов. Для определения значения энергии импульса мощности, соответствующей установившемуся режиму, использовано уравнение, вытекающее из уравнений (6) и (7):

$$\bar{\tau} \frac{dP}{dt} = (k - 1) P - \sum_{i=1}^I \frac{1}{\lambda_i} \frac{dS_i}{dt} + S_c. \quad (12)$$

Поскольку амплитуда импульса внешнего источника нейтронов на несколько порядков больше значения источников запаздывающих нейтронов и постоянные времени запаздывающих нейтронов существенно больше длительности импульса мощности, изменением запаздывающих нейтронов за время импульса мощности можно пренебречь. Это дает основание в уравнении (12) принять  $k = \text{const}$  и  $dS_i/dt = 0$ . Уравнение (12) в этом случае принимает вид

$$\frac{\bar{\tau}}{1 - k} \frac{dP}{dt} + P = \frac{1}{1 - k} S_c. \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что в идеальном случае, когда внешний источник нейтронов с мощностью  $S_c$  представляет собой идеальный импульс (т. е. импульс, пропорциональный дельта-функции) с энергией  $E_{S_c}$ , мощность импульса сборки будет равна

$$P = \frac{1}{\bar{\tau}} E_{S_c} \exp\left(-\frac{1 - k}{\bar{\tau}} t\right), \quad (14)$$

а энергия импульса сборки

$$E = \frac{1}{1 - k} E_{S_c} = Y E_{S_c}. \quad (15)$$



Здесь величина

$$Y = \frac{1}{1-k} \quad (16)$$

называется умножением, показывающим, во сколько раз энергия импульса мощности сборки больше энергии импульса внешнего источника.

При прямоугольном импульсе внешнего источника нейтронов амплитудой  $A_{Sc}$  и длительностью  $\Delta t_{Sc}$  из уравнения (13) вытекают следующие выражения для импульса мощности сборки.

Для интервала времени от 0 (начало инжекции) до  $\Delta t_{Sc}$  (конец инжекции)

$$P = \frac{1}{1-k} A_{Sc} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} t\right) \right], \quad (17)$$

для интервала времени  $t \geq \Delta t_{Sc}$

$$P = \frac{1}{1-k} A_{Sc} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} \Delta t_{Sc}\right) \right] \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} (t - \Delta t_{Sc})\right). \quad (18)$$

Из уравнений (17) и (18) вытекают следующие зависимости энергии, выделяемой в импульсе мощности, от времени. В интервале времени от 0 до  $\Delta t_{Sc}$

$$E = \frac{1}{1-k} A_{Sc} \left\{ t + \frac{\bar{\tau}}{1-k} \left[ \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} t\right) - 1 \right] - \frac{\bar{\tau}}{1-k} \right\}, \quad (19)$$

а в интервале  $t \geq \Delta t_{Sc}$

$$E = \frac{1}{1-k} A_{Sc} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} \Delta t_{Sc}\right) \right] \times \\ \times \left[ \left(-\frac{\bar{\tau}}{1-k}\right) \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} (t - \Delta t_{Sc})\right) + \frac{\bar{\tau}}{1-k} \right]. \quad (20)$$

Таким образом, в течение времени от 0 до  $\Delta t_{Sc}$  в импульсе выделяется энергия

$$E_1 = \frac{1}{1-k} A_{Sc} \left\{ \Delta t_{Sc} + \frac{\bar{\tau}}{1-k} \left[ \exp\left(-\frac{1-k}{\bar{\tau}} \Delta t_{Sc}\right) - 1 \right] - \frac{\bar{\tau}}{1-k} \right\}, \quad (21)$$

или в иной форме записи:

$$E_1 = Y A_{Sc} \left\{ \Delta t_{Sc} + Y \bar{\tau} \left[ \exp\left(-\frac{1}{Y \bar{\tau}} \Delta t_{Sc}\right) - 1 \right] - Y \bar{\tau} \right\}. \quad (21a)$$

В течение времени  $t \geq \Delta t_{Sc}$  в импульсе выделяется энергия

$$E_2 = \frac{1}{1-k} A_{Sc} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1-k}{\bar{\tau}} \Delta t_{Sc} \right) \right] \frac{\bar{\tau}}{1-k}, \quad (22)$$

или в ином виде:

$$E_2 = Y A_{Sc} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{1}{Y\bar{\tau}} \Delta t_{Sc} \right) \right] Y\bar{\tau}. \quad (22a)$$

Энергия импульса мощности в целом равна

$$E = E_1 + E_2. \quad (23)$$

## МОДУЛЯТОР РЕАКТИВНОСТИ

Зависимость коэффициента размножения модулятора реактивности  $\Delta k_{MP}$  от времени представлена в виде трех сопряженных параболических фрагментов (рис. 4).

В качестве нулевого принят момент времени, соответствующий максимуму импульса коэффициента размножения. Принято, что в районе максимума в диапазоне времени  $-t_1 \leq t \leq t_1 \Delta k_{MP} = -\alpha t^2$ , где  $\alpha = 1,145 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ . Нарастание и спад импульса коэффициента размножения описаны соответственно  $\Delta k_{MP} = -k_{MP} + \bar{\alpha}(t+t_2)^2$  при  $-t_2 \leq t \leq -t_1$  и  $\Delta k_{MP} = -k_{MP} + \bar{\alpha}(t_2-t)^2$  при  $t_1 \leq t \leq t_2$ , где параметр параболы  $\bar{\alpha}$  определяется выбором параметра  $t_1$  и эффективностью модулятора реактивности  $k_{MP}$ . Рассмотрены два варианта эффективности модулятора реактивности  $k_{MP} = 4$  и  $2\%$  с параметром  $t_1 = 400$  и  $200$  мкс соответственно. При этом полная ширина импульса реактивности для обоих вариантов составила  $2t_2 = 1600$  мкс (рис. 4).

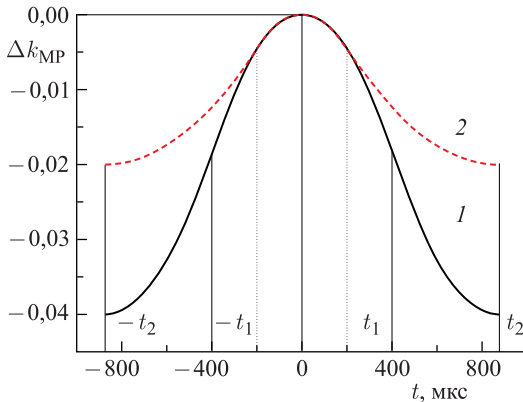


Рис. 4. Используемый в расчетах импульс коэффициента размножения, обусловленный модулятором реактивности, при эффективности модулятора  $4\%$  (1) и  $2\%$  (2)

## РАСЧЕТ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ С ИНЖЕКТОРОМ ПРОТОНОВ И МОДУЛЯТОРОМ РЕАКТИВНОСТИ

Вычислены импульсы мощности размножающей сборки из плутония, обусловленные прямоугольными нейтронными импульсами, генерируемыми мишенью в результате инъекции в нее протонов ускорителя. Вычисления проведены по уравнениям кинетики для двух вариантов сборки — с модулятором реактивности и без модулятора.

В варианте с модулятором для предельного уменьшения фона (мощности между импульсами) частота импульсов коэффициента размножения принята равной частоте нейтронных импульсов мишени. Момент инъекции (момент появления нейтронного импульса мишени) соответствует наименьшей подкритичности сборки, т. е. моменту максимума импульса коэффициента размножения. Расчеты проведены для подкритической сборки с активной зоной из двуокиси плутония на промежуточных нейтронах, мишенью из вольф-

Таблица 1. Параметры сборки для расчета

Доля запаздывающих нейтронов $\beta$ , $10^{-3}$	2,16
Частота импульсов $f$ , Гц	30
Длительность нейтронного импульса мишени $\Delta t_{sc}$ , мкс	20
Эффективное время жизни мгновенных нейтронов сборки, мкс	0,5 и 1,3
Умножение (обратная величина наименьшего значения подкритичности в течение импульса коэффициента размножения)	20 и 50
Средняя мощность мишени $P_t$ , кВт	100
Эффективность модулятора реактивности $k_{MP}$ , %	4 и 2

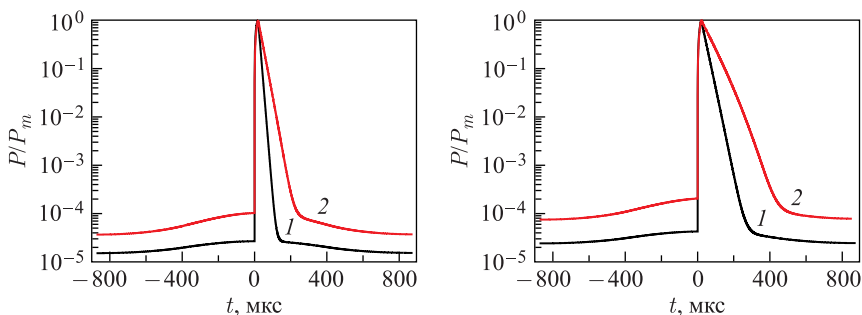


Рис. 5. Мощность импульса плутониевой сборки в долях от максимального значения при наличии модулятора реактивности с эффективностью 4% при мощности мишени 100 кВт и умножении сборки: 20 (1) и 50 (2). Слева — при эффективном времени жизни мгновенных нейтронов сборки 0,5 мкс, справа — 1,3 мкс

рама и модулятором реактивности при следующих значениях параметров сборки (табл. 1).

Проведены также аналогичные расчеты для сборки без модулятора реактивности. Сборка без модулятора реактивности конструктивно существенно проще сборки с модулятором, но характеризуется бóльшим фоном. Результаты расчетов сведены в табл. 2 и отражены на рис. 5–7. Интервал времени на рис. 5 и 6 равен длительности импульса реактивности, обусловленного модулятором реактивности. Подъем мощности сборки перед импульсами, вызванными инъекцией протонов, и ее спад после импульсов обусловлены модулятором реактивности.

Указанный в таблицах фон есть доля энергии, выделяемой сборкой в интервале между импульсами, от полной энергии за период импульсов. Расчеты приведены без учета обратной связи, обусловленной разогревом сборки, поскольку ее постоянная времени на несколько порядков больше ширины импульса коэффициента размножения, обусловленного модулятором реактивности [5].

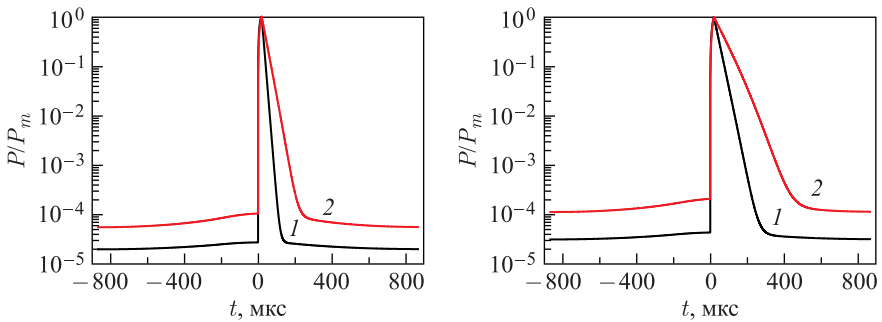


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но при эффективности модулятора реактивности 2%

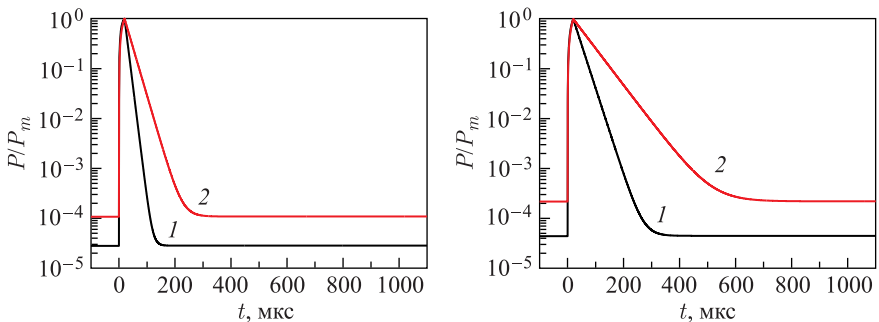


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но при отсутствии модулятора реактивности

Таблица 2. Параметры импульса мощности плутониевой подкритической сборки при средней мощности мишени 100 кВт при наличии и отсутствии модулятора реактивности с разной эффективностью

Параметр	Эффективность модулятора реактивности, %											
	4				2				—			
Умножение	20		50		20		50		20		50	
Эффективный коэффициент размножения	0,95		0,98		0,95		0,98		0,95		0,98	
Эффективное время жизни мгновенных нейтронов, мкс	0,5	1,3	0,5	1,3	0,5	1,3	0,5	1,3	0,5	1,3	0,5	1,3
Средняя мощность, МВт	1,96	1,96	4,66	4,55	1,98	1,97	4,75	4,63	2,00	2,00	5,01	5,01
Максимальное значение мощности, $10^3$ МВт	2,80	1,76	4,42	2,17	2,80	1,76	4,42	2,17	2,80	1,76	4,43	2,17
Фон, %	2,16	2,17	3,49	3,58	2,80	2,81	5,16	5,28	3,91	3,91	9,48	9,48
Длительность импульса мощности на половине высоты, мкс	21,1	29,2	27,8	51,2	21,1	29,2	27,8	51,2	21,1	29,3	27,8	51,6

Из приведенных расчетов следует, что наличие модулятора реактивности приводит к существенному уменьшению фона, что важно при использовании сборки как источника для физических экспериментов. Сборка с модулятором реактивности является более предпочтительной.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена кинетика импульсного бустера, управляемого ускорителем протонов при глубокой модуляции реактивности (10 и более процентов).

Такой бустер, как вариант, предлагается рассмотреть вместо нейтронного источника ИБР-2М после выработки его ресурса. Коэффициент размножения бустера заметно меньше единицы, поэтому в уравнении кинетики бустера вместо реактивности был использован эффективный коэффициент размножения,

что качественно сказалось на корректности расчетов основных параметров сборки, например, формы импульса мощности, фона между импульсами и т. д.

Показано, что длительность импульса мощности в предлагаемом источнике нейтронов с инжекцией протонов и топливом в виде двуокиси плутония с водяным охлаждением активной зоны существенно зависит от времени жизни нейтронов. Например, при умножении 20 изменение времени жизни нейтронов с 0,5 до 1,3 мкс приводит к уширению импульса с 21 до 29 мкс, т. е. почти в 1,4 раза.

В то же время такой показатель подкритической сборки, как фон между импульсами, практически не зависит от времени жизни нейтронов, но значительно зависит от подкритичности (умножения) и глубины модуляции реактивности. При глубоком уровне подкритичности фон в зависимости от эффективности модулятора составляет 2–3 %. При отсутствии модулятора фон при малых умножениях (20) не превышает 4 %.

При больших умножениях (50 и выше) эффективность модулятора существенно понижает фон от  $\sim 10$  до 3,5 %.

Таким образом, расчет кинетических параметров подкритической импульсной сборки с инжекцией высокоэнергичных протонов на неразмножающую мишень позволяет оптимизировать параметры модулятора реактивности и выбрать некоторые основные параметры сборки, такие как подкритичность, мощность установки, время жизни нейтронов и др.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Пепельшев Ю. Н., Rogov A. Д., Сидоркин С. Ф.* Расчеты по оптимизации нейтронно-физических характеристик размножающих импульсных источников нейтронов на основе протонного ускорителя. Препринт ОИЯИ Р13-2018-28. Дубна, 2018.
2. *Аксенов В. Л.* Пульсирующие ядерные реакторы в нейтронной физике // УФН. 2009. Т. 179. С. 434–441.
3. *Виноградов А. В., Пепельшев Ю. Н., Rogov A. Д., Сидоркин С. Ф.* Высокопоточный импульсный источник нейтронов для пучковых исследований, управляемый ускорителем протонов. Препринт ОИЯИ Р13-2018-40. Дубна, 2018.
4. *Кипин Дж. Р.* Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1976.
5. *Пепельшев Ю. Н., Попов А. К., Сумхуу Д.* Оценка параметров мощностной обратной связи реактора ИБР-2М с помощью прямоугольных колебаний реактивности // АЭ. 2017. Т. 122, № 2. С. 63–67.

Получено 17 апреля 2019 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.05.2019.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,94. Уч.-изд. л. 0,92. Тираж 215 экз. Заказ № 59703.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)