

P13-2025-48

Ю. Н. Пепельшев¹, А. Д. Рогов¹,
Д. Сумхуу^{1,2}, Ц. Цогтсайхан^{1,2},
С. Магеррамова³

О ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ РЕАКТОРА **ИБР-2М**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт физики и технологий МАН, Улан-Батор, Монголия

³ Институт радиационных проблем НАН Азербайджана, Баку,
Азербайджан

О выборе оптимального режима работы реактора ИБР-2М

Импульсный реактор ИБР-2М имеет одно неприятное свойство — низкочастотную колебательную нестабильность. Для обеспечения безопасной работы ИБР-2М организована система диагностики по шумам энергии импульсов с использованием модели динамики реактора. С учетом довольно значительного ослабления мощностной обратной связи, вызывающего усиление низкочастотного резонанса в колебаниях энергии импульсов при энерговыработке выше 1830 МВт·сут, консервативная оценка оптимального уровня мощности для обеспечения надежной и безопасной работы реактора при расходе натриевого теплоносителя через активную зону $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ может быть выбрана равной 1,35 МВт. При такой мощности полное календарное время работы реактора равно 3 года. Оптимальное значение мощности может быть увеличено путем дополнительной оптимизации расхода натрия через активную зону.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2025

Choosing the Optimal Operation Mode of the IBR-2M Reactor

The IBR-2M pulsed reactor has one unpleasant property — low-frequency oscillatory instability. For ensuring safe operation of the IBR-2M, a pulse energy noise diagnostic system has been set up using a reactor dynamics model. Taking into account the rather strong weakening of the power feedback, which causes an increase in low-frequency resonance in pulse energy fluctuations during energy release above 1830 MW·day, a conservative estimate of the optimal power level to ensure reliable and safe operation of the reactor can be chosen equal to 1.35 MW with a sodium coolant flow rate through the core of $100 \text{ m}^3/\text{h}$. At this power, the total calendar operating time of the reactor is 3 years. The optimal power value can be increased by further optimizing the sodium flow through the core.

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

ВВЕДЕНИЕ

Импульсный реактор периодического действия ИБР-2М работает в г. Дубне (Россия) с 2012 г. при номинальной мощности 2 МВт и частоте повторения импульсов 5 с^{-1} [1]. Реактор имеет одно неприятное свойство — низкочастотную колебательную нестабильность. Для обеспечения безопасной работы ИБР-2М организована система диагностики по шумам энергии импульсов с использованием модели динамики реактора. Суть ее состоит в постоянном контроле энергии импульсов с периодическим измерением параметров быстрой мощностной обратной связи. Далее с помощью модели динамики реактора проводится оценка запаса устойчивости и на основе полученных данных корректируются допустимый уровень мощности и длительность реакторного цикла [2–6]. При такой схеме контроля достигается безопасный и оптимальный по энерговыработке режим работы реактора. Предлагается и другая схема работы реактора. Согласно этой схеме, например, мощность реактора изначально устанавливается на заведомо безопасном низком уровне, но время работы реактора в отдельном цикле продлевается. Задача исследований состояла в том, чтобы определить наилучший вариант работы реактора.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОЙ И ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОТЫ РЕАКТОРА

Принцип работы и основные характеристики реактора ИБР-2М подробно представлены в работе [1]. Импульс мощности развивается с помощью двух подвижных отражателей, вращающихся вблизи одной из граней шестигранного корпуса активной зоны. Подвижные отражатели выполняют роль модулятора реактивности, который на короткое время переводит реактор из глубокоподкритического состояния в равновесное надкритическое. Активная зона с двуокисью плутония охлаждается жидким натрием, расход $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Реактор работает циклами: работа на мощности от 10 до 18 сут, затем перерыв на 7 сут. Экспериментально известно, что к концу каждого цикла реактор ИБР-2М испытывает существенное усиление колебаний резонансного типа на частоте, близкой к $0,1 \text{ Гц}$, а в процессе останова реактора к началу следующего цикла — их восстановление до практически прежнего уровня в соответствии с выгоранием топлива за цикл [5]. Иллюстрация колебательной нестабильности

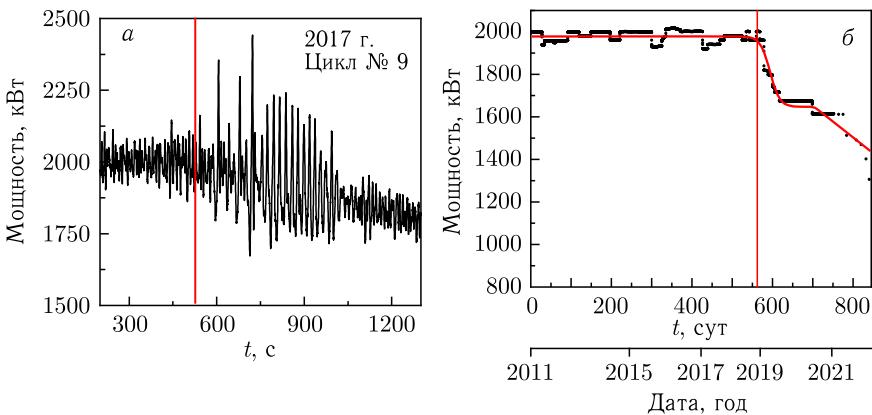


Рис. 1. а) Появление низкочастотных колебаний мощности на частоте 0,1 Гц при штатном снижении средней мощности ИБР-2М с 2 МВт в 2017 г. Красной линией отмечено начало снижения мощности. б) Изменение средней мощности реактора ИБР-2М в циклах в период работы реактора с 2011 по 2021 г. Красной вертикальной линией отмечен цикл со снижением мощности, приведенный на рис. 1, а

мощности ИБР-2М приведена на рис. 1, где показан процесс штатного снижения мощности в конце одного из реакторных циклов в 2017 г. Видно появление и исчезновение низкочастотных колебаний мощности (энергии импульсов) с частотой 0,1 Гц при мощности вблизи 1800 МВт. Также на рис. 1 показано изменение средней мощности ИБР-2М в циклах за весь период работы реактора. Необходимо выбрать оптимальный режим работы реактора. Оптимальность в данном случае понимается как условие безопасной работы реактора при мощности, позволяющей получить максимально возможную энерговыработку и, соответственно, флюенс нейтронов в физический эксперимент.

С этой целью были проведены следующие исследования. С помощью модели динамики реактора рассмотрены два эффекта: медленный процесс ослабления мощностной обратной связи и усиления низкочастотной нестабильности от начала одного реакторного цикла к началу следующего и второй процесс — усиление нестабильности непосредственно в самом цикле. Схематическое представление ослабления быстрой мощностной обратной связи (МОС) ИБР-2М в зависимости от времени работы реактора показано на рис. 2.

Исследования включали в себя определение зависимости изменения амплитуды низкочастотных колебаний энергии импульсов с изменением мощности и энерговыработки. Далее с помощью модели динамики оценивалась устойчивость реактора к изменению амплитуды низкочастотных колебаний. Отсюда появляется возможность выбора оптимального режима работы реактора.

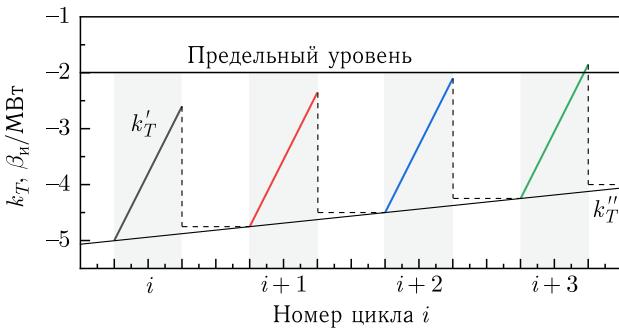


Рис. 2. Схематическое представление ослабления быстрой мощностной обратной связи ИБР-2М в зависимости от времени работы реактора: k_T — полный коэффициент быстрой МОС; k'_T — циклическое изменение; k''_T — глобальное изменение коэффициента быстрой МОС

Необходимо отметить следующее: динамические характеристики реактора, кроме мощности и энерговыработки, зависят от множества других реакторных параметров. Эти параметры в данной работе считаются постоянными. На практике это условие строго не выполняется, поскольку существует естественный разброс параметров с допустимым по безопасности диапазоном их изменения. Например, колебания расхода натрия через активную зону малы ($\sim 2\%$), но довольно сильно влияют на динамику реактора и условия устойчивости. В среднем с начала эксплуатации реактора расход натрия был установлен на постоянном уровне — $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Исследование влияния шумов реакторных параметров на устойчивость реактора представляется отдельной задачей и в данной работе не рассматривается.

Кратко представим описание модели реактора ИБР-2М. Модель динамики построена на основе блочной структуры и представляет собой импульсную нелинейную систему автоматического регулирования (АР) мощности (рис. 3). В блок-схему модели входят блок кинетики, блок мощностной обратной связи, обусловленной разогревом реактора, блок автоматического регулирования и блок возмущающей реактивности. По-

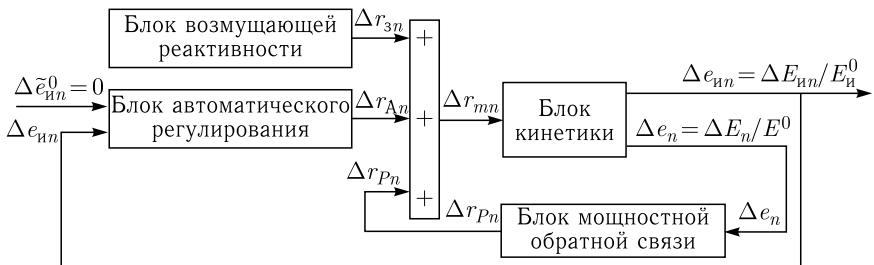


Рис. 3. Структурная блок-схема модели динамики реактора ИБР-2М

следний позволяет моделировать разнообразные изменения реактивности. Подробное описание модели приведено в работах [2–5]. Линеаризованные части системы характеризуются дискретными передаточными функциями, полученными в результате Z -преобразования переменных.

Все параметры модели, кроме параметров быстрой мощностной обратной связи, известны подробно (кинетика, автоматическое регулирование, возмущение). Параметры МОС определялись экспериментально [4, 5]. Суммарное воздействие быстрой МОС на динамику реактора представлено импульсной характеристикой МОС, т. е. изменением реактивности МОС при воздействии единичного импульса мощности. Эффекты нестабильности определяются формой импульсной характеристики МОС. Из практики известно, что при любом изменении формы импульсной характеристики параметры МОС ИБР-2М могут быть описаны тремя слагаемыми следующим образом:

$$w_{rE} = \sum_{j=1}^3 \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \exp\left(-\frac{t}{T_{Tj}}\right), \quad \beta_i/\text{МДж}; \quad t \text{ — время, с,}$$

$$\Delta r_{Tn} = \sum_{j=1}^3 \Delta r_{Tjn}, \quad \Delta r_{Tjn} = \left(\Delta r_{Tjn-1} + \Delta E_{n-1} \frac{k_{Tj}}{T_{Tj}} \right) \exp\left(-\frac{T_i}{T_{Tj}}\right),$$

где Δr_{Tn} и Δr_{Tjn} — суммарная реактивность МОС и ее j -е составляющие, соответствующие n -му импульсу мощности в долях ($\beta_i = 1,60 \cdot 10^{-4}$); k_{Tj} , T_{Tj} — коэффициент передачи в $\beta_i/\text{МВт}$ и постоянная времени в секундах j -й составляющей МОС ($j = 1, 2, 3$) соответственно; ΔE_n — отклонение полной энергии за период n -го импульса от базового значения; T_i — период импульсов мощности ($T_i = 0,2$ с).

Необходимо отметить, что в модели динамики реактора импульсная характеристика используется в целом, а не по ее отдельным компонентам. Ниже, в разд. 2 и 3, будет показано изменение низкочастотной нестабильности энергии импульсов в зависимости от полной энерговыработки и от энерговыработки в отдельных реакторных циклах.

2. ОПТИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ МОЩНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПОЛНОЙ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ ИБР-2М

Динамические и частотные свойства реактора, например амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), во многом определяются формой импульсной характеристики. Для примера на рис. 4 показано изменение импульсной характеристики и АЧХ ИБР-2М в зависимости от изменения мощности. При мощности 1,5 МВт виден довольно сильный резонанс на частоте, близкой к 0,1 Гц. Резонанс понимается как превышение АЧХ над единицей.

Рассмотрим поведение АЧХ ИБР-2М в процессе длительной работы реактора в зависимости от полной энерговыработки и уровня мощности.

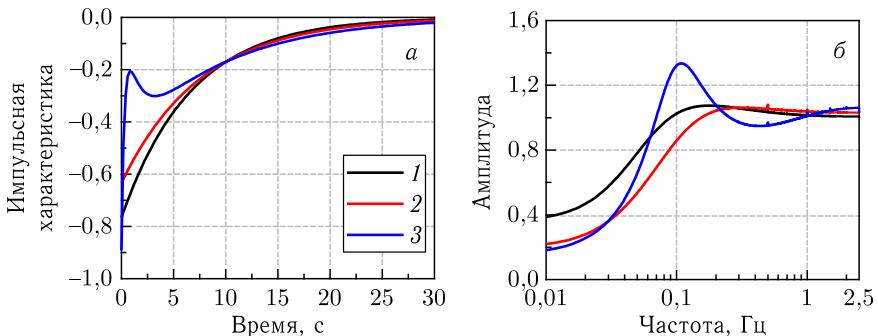


Рис. 4. Импульсная характеристика МОС (а) и амплитудно-частотная характеристика ИБР-2М (б) в режиме саморегулирования при энерговыработке 1830 МВт·сут в конце 2021 г. при некоторых значениях мощности: 0,5 (1); 1,0 (2) и 1,5 (3) МВт

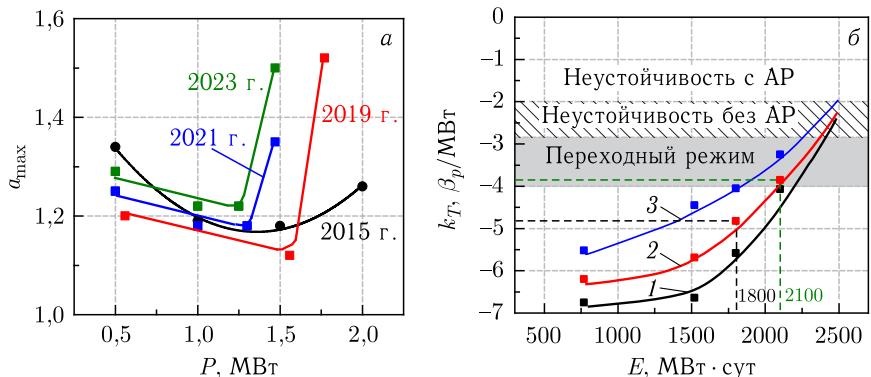


Рис. 5. а) Изменение пикового (резонансного) значения АЧХ ИБР-2М (a_{\max}) в зависимости от мощности реактора в режиме автоматического регулирования в разные периоды работы реактора: 2015, 2019, 2021 гг. и прогноз на 2023 г. б) Суммарный коэффициент передачи быстрой МОС ИБР-2М в зависимости от энерговыработки реактора при некоторых уровнях мощности: 0,5 (1); 1,0 (2); 1,5 (3) МВт. Точки при энерговыработке 2100 МВт·сут есть расчет

На рис. 5 приведена картина изменения амплитуды низкочастотного резонанса в АЧХ ИБР-2М в зависимости от мощности реактора при некоторых значениях энерговыработки. Там же показан экстраполированный ход изменения амплитуды резонанса при дополнительном увеличении энерговыработки на 270 МВт·сут от 1830 МВт·сут в 2021 г. до 2100 МВт·сут. На рис. 5, а отчетливо виден пороговый характер изменения амплитуды резонанса с ростом мощности. На рис. 5, б показано изменение колебательного состояния реактора в виде функции полного коэффициента МОС в зависимости от энерговыработки и мощности реактора как параметра. Точки при энерговыработке 2100 МВт·сут есть расчетные состояния.

Из рис. 5, б видно, что с ростом энерговыработки происходит ослабление отрицательной МОС с резким усилением колебательности при энерговыработке выше 2100 МВт·сут. Рост энерговыработки выше этого значения сопровождается переходом реактора в область неустойчивости сначала в режиме саморегулирования, а затем — автоматического регулирования мощности.

Для оценки запаса устойчивости модель динамики была представлена в виде линеаризованной замкнутой системы. Устойчивость реактора оценивалась в режиме саморегулирования (без АР) с помощью частотного критерия Найквиста [7–10]. Кроме того, использовали так называемый показатель колебательности [11]. В данном случае показатель колебательности — это максимальное значение АЧХ ИБР-2М в режиме саморегулирования. Зависимость запаса устойчивости от мощности ИБР-2М и зависимость показателя колебательности от энерговыработки приведены на рис. 6.

Из рис. 6, б видно, что показатель колебательности реактора в диапазоне мощности от 0,5 до 1,4 МВт мало меняется в процессе работы реактора. Существенно то, что с увеличением мощности от 1,5 до 2 МВт при энерговыработке более 1830 МВт·сут показатель колебательности резко возрастает на 20 %.

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что допустимый и заводом безопасный уровень мощности ИБР-2М при общей энерговыработке, равной или большей 1830 МВт·сут, может быть определен как 1,40 МВт. Работа реактора при такой мощности, судя по данным рис. 5 и 6, может продолжаться до достижения полной энерговыработки 2350 МВт·сут, после чего реактор может перейти в область неустойчивости в режиме саморегулирования (без АР).

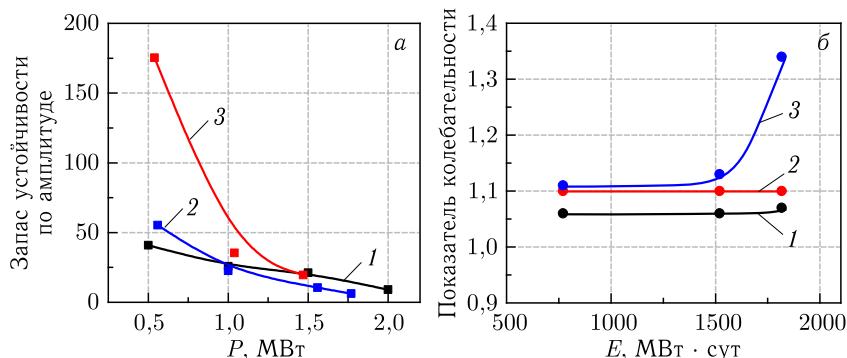


Рис. 6. а) Зависимость запаса устойчивости по амплитуде низкочастотных колебаний от мощности реактора (кривые 1, 2 и 3 — 770, 1520 и 1830 МВт·сут соответственно); б) показатель колебательности в зависимости от энерговыработки ИБР-2М (кривые 1, 2 и 3 — 0,5, 1,0 и 1,5 МВт соответственно) в режиме саморегулирования (без АР)

3. ОПТИМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ МОЩНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЭНЕРГОВЫРАБОТКИ ИБР-2М В ОТДЕЛЬНЫХ РЕАКТОРНЫХ ЦИКЛАХ

Как показано в работе [5], в каждом реакторном цикле происходит постепенное изменение динамических параметров в сторону усиления резонансных явлений. Но в период останова реактора в конце текущего цикла и до начала следующего параметры МОС восстанавливаются. На рис. 7 показано изменение максимальной амплитуды низкочастотных резонансных колебаний (A , кВт) при штатном снижении мощности ИБР-2М в зависимости от величины энерговыработки в цикле. В качестве параметра приведено значение мощности. Заштрихованная область на рис. 7 включает в себя все значения амплитуды низкочастотного резонанса, зарегистрированные при мощности менее 1,4 МВт.

На рис. 8, в дополнение к рис. 7, показано изменение суммарного коэффициента передачи быстрой МОС ИБР-2М k_T в зависимости от средней мощности реактора в отдельных реакторных циклах. По данным, представленным на рис. 7 и 8, получена зависимость изменения допустимой энерговыработки в отдельном реакторном цикле от средней мощности ИБР-2М (рис. 9).

Рис. 7. Изменение максимальной амплитуды низкочастотных резонансных колебаний (A , кВт) при штатном снижении мощности ИБР-2М в зависимости от энерговыработки в отдельных реакторных циклах. Состояния 1 и 2 — нестабильные, 3 (заштрихованная область) — состояния стабильные при мощности менее 1,4 МВт

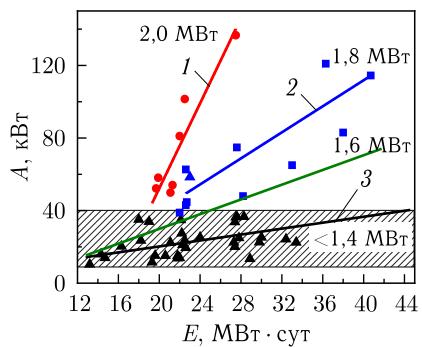
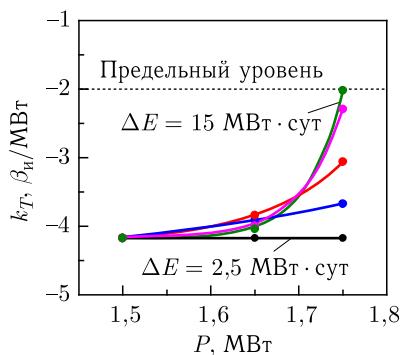


Рис. 8. Изменение суммарного коэффициента передачи быстрой МОС ИБР-2М в зависимости от средней мощности реактора в отдельных реакторных циклах. Предельное значение $k_T = -2\beta_u/M\text{Вт}$ получено расчетным путем как граница устойчивости реактора в режиме автоматического регулирования. ΔE — энерговыработка в цикле



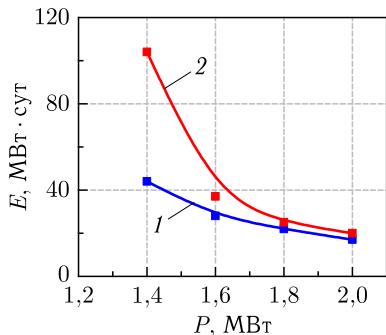


Рис. 9. Изменение допустимой энерговыработки в отдельном реакторном цикле в зависимости от средней мощности ИБР-2М при амплитуде низкочастотного резонанса 40 (1) и 60 (2) кВт

Нижний уровень амплитуды допустимых резонансных колебаний был выбран равным 40, верхний — 60 кВт. Диапазон изменения допустимой амплитуды резонансных колебаний определяется общим уровнем шумов энергии импульсов, который при нормальной работе реактора довольно высокий ($\pm 25\%$), а также возможностью стабилизации колебаний мощности с помощью системы автоматического регулирования мощности [12, 13].

Характер изменения допустимой энерговыработки в зависимости от мощности, показанный на рис. 9, предоставляет возможность безопасной работы реактора при энерговыработке от 30 до 70 МВт·сут в цикле при мощности до 1,4 МВт.

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Получены два ограничения по безопасному уровню средней мощности реактора: 1) безопасный уровень мощности при оценке общей энерговыработки реактора выше 1830 МВт·сут (W_S); 2) безопасный уровень мощности при оценке энерговыработки в отдельном реакторном цикле (W_{cycl}). Показано, что уровни W_S и W_{cycl} равны и составляют 1,40 МВт. Из условия надежности выбора оценки средней мощности взята консервативная оценка оптимального уровня мощности, равная 1,35 МВт.

Если исходить из реальных условий работы реактора на физический эксперимент при длительности цикла, равной 14 сут, и из того, что число циклов в году 9, то из условий безопасной работы реактора получается следующее:

- средняя мощность реактора — 1,35 МВт;
- полная допустимая энерговыработка сверх 1830 МВт·сут — 520 МВт·сут;
- энерговыработка в цикле — 19 МВт·сут;
- число циклов в году — 9;
- время работы реактора при вышеуказанных условиях — 3 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. С учетом довольно сильного ослабления мощностной обратной связи, вызывающего усиление низкочастотного резонанса в колебаниях энергии импульсов при энерговыработке выше 1830 МВт·сут, оптимальный уровень мощности при обеспечении надежной и безопасной работы реактора может быть выбран равным 1,35 МВт. Эта мощность справедлива при расходе натрия через активную зону, равном 100 м³/ч. При такой мощности продолжительность реакторного цикла может составлять 14 сут, а полное календарное время работы реактора в таком режиме — 3 года. В дальнейшем, после истечения указанного выше срока, для безопасной и надежной работы реактора можно уменьшать резонансные явления в реакторе с помощью изменения расхода натрия через активную зону, а также путем оптимизации параметров системы автоматического регулирования мощности [12, 13].

Авторы выражают благодарность коллективу ИБР-2 за помощь в проведении многочисленных реакторных экспериментов и Тайыбовой Наиде за помощь в подготовке работы к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dragunov Yu. G., Tretiyakov I. T., Lopatkin A. V. et al.* Modernization of the IBR-2 Pulsed Research Reactor // Atom. Energy. 2012. V. 113, No. 1. P. 29–34.
2. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Model of the IBR-2M Pulsed Reactor Dynamics for Investigating Transition Processes in a Wide Range of Power Variation // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 85. P. 488–493; doi: 10.1016/j.anucene.2015.06.002.
3. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Sangaa D.* Dynamics Model of the IBR-2M Pulsed Reactor for Analysis of Fast Transition Processes // Phys. Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 3. P. 435–438; doi: 10.1134/s1547477115030188.
4. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* IBR-2M Reactor Power Feedback Parameters Evaluation Using Square Reactivity Oscillations // Atom. Energy. 2017. V. 122, No. 2. P. 75–80; doi: 10.1007/s10512-017-0238-8.
5. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuu D.* On the Cyclic Change in the Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor // Nucl. Eng. Technol. 2023. V. 55, No. 5. P. 1665–1670; doi: 10.1016/j.net.2023.01.004.
6. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D., Rogov A. D.* On the Limits of Oscillatory Instability of Pulsed Reactors of Periodic Operation // Phys. Atom. Nucl. 2021. V. 84, No. 8. P. 1445–1458; doi: 10.1134/s1063778821080172.
7. Попов А. К. Основы управления ядерным реактором. М.: МГУ, 2012.
8. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Stability Analysis of the IBR-2M Pulsed Reactor in Automatic Regulated Regime at Various Levels of Average Power // Eur. Phys. J. Web Conf. 2018. V. 173. P. 04012.
9. *Pepelyshev Yu. N., Popov A. K., Sumkhuu D.* Investigation of Dynamics of the IBR-2M Pulsed Reactor with Energy-Production up to 1200 MW·day // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1391. P. 012099.

10. *Сумхүү Д.* Исследование мощностной обратной связи и ее влияния на устойчивость импульсного реактора ИБР-2М: Дис.... канд. физ.-мат. наук. Дубна: ОИЯИ, 2019.
11. *Кудинов Ю.И., Пашенко Ф.Ф.* Теория автоматического управления (с использованием MATLAB-SIMULINK): Учеб. пособие. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2019. 312 с.
12. *Pepelyshev Yu. N., Sumkhuiu D.* Optimization of Automatic Power Control of Pulsed Reactor IBR-2M in the Presence of Instability // Nucl. Eng. Technol. 2022. V. 54, No. 8. P. 2877–2882; doi: 10.1016/j.net.2022.03.017.
13. *Пепельышев Ю.Н., Сумхүү Д.* Влияние автоматического регулятора мощности импульсного реактора ИБР-2М на его динамику. Препринт ОИЯИ Р13-2023-64. Дубна, 2023.

Получено 17 сентября 2025 г.

Редактор *E. B. Григорьева*

Подписано в печать 27.10.2025.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 110 экз. Заказ № 61198.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/