

# ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЭНЕРГБЛОКА БН-350, ПОВЛИЯВШИЕ НА РАЗВИТИЕ НАПРАВЛЕНИЯ БН

**А.А. Камаев**

*АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»*

*249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*

**Для цитирования:** *Камаев А.А.* Основные технические решения энергоблока БН-350, повлиявшие на развитие направления БН. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 3. – С. 140-145. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.12>.

## ВВЕДЕНИЕ

16 июля 2023 г. – знаменательная для отечественного реакторостроения дата – 50 лет со дня энергетического пуска первого промышленного реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-350. Пуск установки ознаменовал выход нашей страны (в те годы Советского Союза) на передовые позиции в промышленном освоении технологии реакторов на быстрых нейтронах.

Развитие быстрых реакторов в мире охватывает период около 70-ти лет. Наиболее продуманная и последовательная программа их развития была выполнена в нашей стране, причем с самого начала приоритет был отдан быстрым реакторам с натриевым охлаждением [1]. В настоящее время наша страна обладает наибольшим опытом разработки и эксплуатации натриевых быстрых реакторов [2].

Важным этапом развития натриевых быстрых реакторов (БН) в нашей стране после ввода БР-5 (1959 г.) стал этап опытно-промышленного освоения натриевой технологии, а именно, разработка проекта, создание, ввод и эксплуатация реактора БН-350 [3, 4].

## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ЭТАПА ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ НАТРИЕВЫХ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Еще в 1950-х гг. руководство страны приняло решение о сооружении реактора БН-250 (с 1965 г. – БН-350) на Мангышлакском полуострове для обеспечения опресненной водой и электроэнергией предприятий г. Шевченко. Решение о его строительстве было принято в 1960 г., тогда же началось проектирование.

При создании БН-350 был сделан гигантский шаг от маленького исследовательского реактора БР-5 мощностью 5 МВт(т) к реакторной установке промышленного масштаба – 1000 МВт(т). Необходимость такого шага по мощности объясняется двумя обстоятельствами. Во-первых, как показали расчеты, экономика реакторной установки по производству энергии и вторичного горючего при меньшей мощности была бы убыточной. Во-вторых, строительство реактора меньшей мощности, которое первоначально намечалось в НИИАР (БН-50, 50 МВт(э)), не решало задачи овладения натриевой технологией в промышленном масштабе, т.е. не давало сделать реальный шаг вперед.

#### **Задачи, стоявшие перед БН-350**

1. Подтверждение принципиальных решений по конструкциям оборудования, построению технологических систем, принципам обеспечения безопасности, эксплуатационным режимам и т.д.

2. Получение реального опыта ввода в эксплуатацию промышленной установки, ведения эксплуатационных режимов, пусков и остановов, перегрузки топлива, ремонтов и текущего обслуживания, понимания правильности предусматриваемых мер предосторожности или их избыточности, оптимизации режимов и действий персонала в различных ситуациях и т.д.

3. Накопление статистики по отказам оборудования, узлов, механизмов, средств автоматики и защитных устройств, по типовым нарушениям режимов и ошибкам персонала, по влиянию этих отказов или нарушений на безопасность и работоспособность установки.

Скачок масштаба установки при переходе к РУ БН-350 и поставленные перед установкой задачи потребовали тщательного анализа технических решений и принципов, касающихся натриевой технологии, учета масштабного фактора.

В свете поставленных задач принципиальные решения по установке БН-350 были выбраны консервативно, с учетом имеющегося на начало 1960-х гг. опыта и знаний, а также назначения реактора как трехцелевого (производство электрической и тепловой энергии и наработки вторичного ядерного горючего – плутония). В проекте БН-350 были сохранены характерные параметры, уже освоенные на БР-5, что позволяло надеяться на надежную работу оборудования новой установки.

Основные характеристики отечественных реакторов типа БН указаны в табл. 1 [3].

Несмотря на хорошую работу основных элементов технологической схемы (реактора с его механизмами, главных циркуляционных насосов, промтеплообменников, арматуры большого диаметра и других), множественные течи воды в натрий в парогенераторах, связанные с грубым нарушением проектной технологии изготовления, привели к тому, что реактор так и не был выведен на номинальную мощность.

#### **ОСНОВНЫЕ ВЕХИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РУ БН-350**

• Первой вехой на пути создания БН-350 стала дата 25 августа 1960 г. Именно в этот день было принято Постановление Совета Министров СССР № 795-326, а неделей спустя и приказ министра МСМ о разработке промышленного двухцелевого атомного реактора на быстрых нейтронах тепловой мощностью 1 млн. кВт.

• Эскизный проект реакторной установки, разработанный ОКБМ и получивший внутренний индекс ОК-500, утвержден на заседании НТС № 1 Минсредмаша 12 апреля 1961 г.

• К середине 1963 г. завершены проекты РУ и АЭС с реактором БН-350, защита которых состоялась в 1964 г. Строительство реакторного здания началось в 1964 г.

**Основные характеристики отечественных быстрых натриевых реакторов**

Параметр	Реакторная установка				
	БР-5	БН-350*	БН-600	БН-800	БОР
Год начала проектирования	1956	1960	1963	1974	1964
Тепловая мощность, МВт	5 (8)****	1000	1470	2100	60
Электрическая мощность, МВт	–	350**	600	880	12
Компоновка первого контура	Петлевая	Петлевая	Бакочная	Бакочная	Петлевая
Топливо	PuO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	PuO <sub>2</sub> -UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Число ТВС в активной зоне (АЗ)	–	224	369	565	114
Энергонапряженность АЗ, кВт/л		500	400***	440	
Температура на выходе из реактора, °С	500	500	550	547	530
Температура на входе в реактор, °С	430	300	377	354	330
Температура свежего пара, °С	–	435	505	490	430
Давление свежего пара, МПа	–	4,9	13,7	13,7	9,0
Промежуточный перегрев пара	–	–	Натриевый	Паровой	–
Объем натрия в первом контуре при $t = 250^{\circ}\text{C}$ , м <sup>3</sup>	1,7	520	820	1000	17
Объем натрия в петле второго контура при $t = 250^{\circ}\text{C}$ , м <sup>3</sup>	1,2	70	320	300	13
Число теплопроводящих петель	2	6****	3	3	2
* – Приведены проектные параметры для мощности 1000 МВт(т). ** – Условно, без учета расхода тепла на опреснительные установки. *** – Данные 2005 г. – после модернизации АЗ. **** – В том числе одна резервная. ***** – В скобках: после реконструкции реактора.					

• На начало 1971 г. смонтированы корпуса насосов, теплообменников, парогенераторов. К концу 1971 г. завершены основные строительно-монтажные работы. К маю 1972 г. введены в эксплуатацию вспомогательные системы, обеспечивающие работу основных контуров установки.

• 11 сентября 1972 г. завершился разогрев реактора с первым контуром для заливки их натрием. 16–17 сентября при температуре корпуса реактора 200°С проведена заливка натрием, прошедшим полную очистку – было залито 490 м<sup>3</sup> металла.

• К октябрю 1972 г. прошли пуско-наладочные работы на основных контурах реактора, завершилась отладка всех важнейших узлов и механизмов, оборудования и систем установки в целом.

• 13 ноября 1972 г. началась загрузка АЗ реактора замещением пакетов-имитаторов топливными пакетами.

• 28 ноября 1972 г. в 15:00 зарегистрирована цепная реакция, т.е. реактор был выведен в надкритическое состояние и заглушен.

• 29 ноября 1972 г. осуществлен официальный физический пуск реактора БН-350. До марта 1973 г. проводились исследования физических характеристик реактора, которые подтвердили соответствие расчетных и фактических параметров установки.

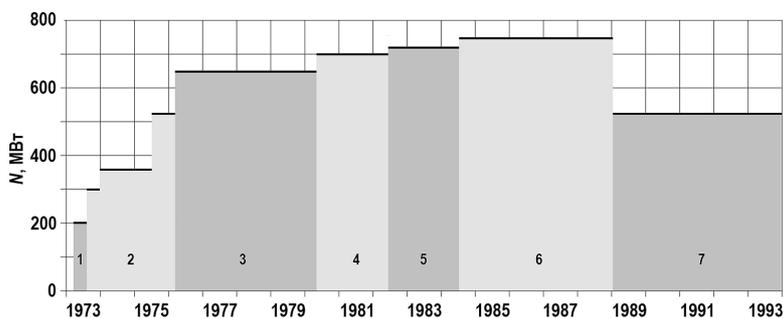


Рис. 1. Изменение тепловой мощности реактора БН-350 за период его эксплуатации: 1 – энергопуск БН-350, мощность 200 MWt(т) (16.07.1973); 2 – повышение мощности по мере выполнения ремонтных работ на парогенераторах; 3 – завершение ремонтных работ на ПГ (март 1976); 4 – запуск чешского ПГ «Надежность-1» (май 1980); 5 – запуск ПГ «Надежность-2» (июнь 1982); 6 – выход на максимальный разрешенный уровень мощности 750 MWt(т) (июль 1984); 7 – снижение мощности из-за течи чешского ПГ «Надежность» (январь 1989)

- 16 июля 1973 г. в г. Шевченко (ныне г. Актау) осуществлен энергетический пуск первого промышленного реактора БН-350. Реактор выведен на мощность 203 MWt(т), пар направлен на турбогенератор № 5 ТЭЦ-2.

На первых этапах эксплуатации уровень мощности РУ БН-350 ограничивался в связи с неудовлетворительной работой парогенераторов, а впоследствии – еще и по условиям обеспечения надежного расхолаживания. После проведения экспериментов по аварийному расхолаживанию реактора при потере системного энергоснабжения было установлено, что нормальное протекание процесса расхолаживания обеспечивается с уровня мощности 750 MWt. В ходе дальнейшей эксплуатации этот уровень мощности реактора не превышался (рис. 1).

- 1973 – 1975 гг. – работа на уровне мощности до 520 MWt(т).
- С марта 1975 г. по январь 1989 г. – работа на мощности 650 – 750 MWt(т) с выработкой электрической мощности (150 MWt(э)) и опреснение морской воды (100 000 тонн в сутки). Коэффициент использования времени реакторной установки к 1977 г. составил 86%.
- С января 1989 г. – работа на мощности 520 MWt(т) из-за течей на чешских парогенераторах «Надежность».
- Январь 1996 г. – июнь 1998 г. – работа на мощности 420 MWt(т), 50 MWt(э), опреснение 45 тыс. тонн воды в сутки (по условиям надежного отвода остаточных тепловыделений).
- 22 апреля 1999 г. – окончательная остановка.

### НАИБОЛЕЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОЗДАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РУ БН-350

Разработка БН-350 осуществлялась в период практического отсутствия нормативных документов обеспечения безопасности АЭС. После пуска реактора БН-350 начали разрабатывать нормативные документы, в том числе ОПБ и ПБЯ. Это потребовало при эксплуатации БН-350 анализировать отступления от постоянно меняющихся требований нормативных документов и доказывать при этих отступлениях безопасность эксплуатации энергоблока.

- К наиболее важным результатам эксплуатации БН-350, относятся [3, 4]
- надежность полномасштабного натриевого оборудования энергетического блока;
  - отработка технологии приготовления больших объемов натрия (~ 1000 м<sup>3</sup>), подготовки оборудования к заполнению натрием и технология их заполнения;
  - определение наведенной активности натрия в первом контуре энергетического блока (~ 20 Ки/л) и хорошего согласия измеренных и проектных характеристик радиационной обстановки;

– хорошее совпадение расчетных и измеренных физических характеристик АЗ, что впервые позволило проверить методы их предсказания для энергетических реакторов;

– отсутствие накопления газа в АЗ реактора по измерениям барометрического эффекта реактивности (оказался равным нулю) путем изменения давления в газовой подушке корпуса;

– малый гидродинамический эффект реактивности АЗ при изменениях расхода натрия (примерно в 10 раз меньше максимального расчетного);

– эффективность мер обнаружения утечек натрия в окружающую среду, средств тушения горения натрия и уборки продуктов горения.

Технические решения, реализованные в проекте петель первого контура и корпуса реактора БН-350, примененные при разработке последующих реакторов типа БН:

– схема удержания ТВС от всплытия в потоке теплоносителя;

– нижнее опирание корпуса реактора;

– организация снаружи корпуса реактора страховочного корпуса с заполнением аргоном пространства между ними;

– организация протока натрия из напорной камеры вдоль внутренней стенки корпуса для поддержания температуры корпуса в горячей зоне ниже 450°C;

– дросселирование расхода теплоносителя на входе в ТВС для выравнивания распределения подогрева теплоносителя по радиусу АЗ;

– размещение на напоре ГЦН-1 обратного клапана;

– отдельные натриевые камеры на всасе ГЦН-1 (по петлям), объединяющие выход двух ПТО.

В ходе проектирования реактора БН-350 кроме основного варианта (петлевой) рассмотрен вариант интегральной (баковой) компоновки [3], который имеет явные преимущества по многим показателям.

Главные технические решения, внесенные в проект БН-600 (а также в проект БН-800 и, частично, в проект БН-1200М) по результатам разработки, создания и эксплуатации реактора БН-350:

– интегральная компоновка первого контура;

– поглощающие органы компенсации изменения реактивности от выгорания топлива;

– ГЦН с регулированием частоты вращения;

– прямоточный секционнo-модульный парогенератор;

– повышенные параметры натриевых контуров и паросилового цикла.

При создании реактора БН-350 были разработаны и опробованы принципы построения ряда систем безопасности. Знания и опыт, полученные при проектировании и расчетно-экспериментальном обосновании эффективности данных систем, были применены при реализации проектов следующих энергоблоков с реакторами БН: БН-600, БН-800, БН-1200М и МБИР.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С пуском в 1973 г. первого отечественного промышленного реактора БН-350 страна вышла на высший уровень в освоении технологии реакторов на быстрых нейтронах и до сих пор остается мировым лидером в создании реакторов типа БН.

## **Литература**

1. Поплавский В.М. Быстрые ректоры. Состояние и перспективы. // Атомная энергия. – 2004. – Т. 96. – Вып. 5. – С. 327-335.

2. Багдасаров Ю.Е., Камаев А.А. Последовательные этапы освоения быстрых реакторов с натриевым теплоносителем в России. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – Вып. 6. – С. 320-329.

3. *Баклушин Р.П.* Технология энергоблоков АЭС с натриевым теплоносителем (История развития и опыт эксплуатации). – Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ, 2012. – 300 с.

4. *Кузнецов И.А., Поплавский В.М.* Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. – М.: ИздАТ, 2012. – 631 с.

Поступила в редакцию 09.08.2023 г.

**Автор**

Камаев Алексей Альфредович, начальник департамента, канд. техн. наук

E-mail: kamaev@ippe.ru

UDC 621.039.5

## Key Technical Solutions for the BN-350 Power Unit That Have Influenced the BN Reactor Design Evolution

Камаев А.А.

IPPE JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

### ABSTRACT

The paper describes the history of building and operating the BN-350 reactor in terms of solving the issues the developers of the BN fast reactors face at the stage of commercializing sodium cooled fast neutron reactors. The key objectives of the BN-350 project are formulated. Stages of the BN-350 production reactor design, development, commissioning and operation are described chronologically with a brief description of the issues involved and the results achieved through their solution.

The influence of the knowledge on the BN-350 reactor operation in the process of building and operating the BN-600 and BN-800 reactors has been shown for the selection of technical solutions for the reactor systems, and the key components and parameters of sodium circuits implemented in the BN-600 and BN-800 reactor designs.

**Key words:** sodium coolant, production reactor, BN-350, primary circuit, sodium circuit flow diagram, characteristics of Russian-designed BN fast reactors, large-scale factor, multi-purpose reactor.

**For citation:** Kamaev A.A. Key technical solutions for the BN-350 power unit that have influenced the BN reactor design evolution. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2023, no. 3, pp. 140-145; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.3.12> (in Russian).

### REFERENCES

1. *Poplavsky V.M.* Fast Reactors. Status and Prospects. *Atomnaya Energiya*. 2004, v. 96, iss. 5, pp. 327-335 (in Russian).

2. *Bagdassarov Yu.E., Kamaev A.A.* Sequential Stages of Development of Fast Reactors with Sodium Coolant in Russia. *Atomnaya Energiya*. 2011, v. 111, iss. 6, pp. 320-329 (in Russian).

3. *Bakluschin R.P.* Technology of Energy Units with Sodium Heat Coolants (History of Development and Operation Experience). Obninsk. ОНТИ ГНЦ РФ – ФЭИ Publ., 2012, 300 p. (in Russian).

4. *Kuznetsov I.A., Poplavsky V.M.* Safety of Nuclear Power Plants with Reactors on Fast Neutrons. Moscow. IzdAT Publ., 2012, 631 p. (in Russian).

**Author**

Aleksey A. Камаев, Head of Department, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: kamaev@ippe.ru