

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY



<https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-07>

EDN UGPXUX

Оригинальная статья / Original paper

Обоснование значений уровня в парогенераторах с РУ В-392м при нормальной эксплуатации и нарушении нормальной эксплуатации

П.В. Поваров

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (Нововоронежская АЭС),
г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация

✉ nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Аннотация. Возможность несения нагрузки при переходных процессах без достижения условий срабатывания систем безопасности и аварийной защиты реактора называется динамической устойчивостью энергоблока АЭС. Регулирование уровня воды в парогенераторах РУ ВВЭР-1200 (В-392М) осуществляется для поддержания баланса между отводом пара, продувкой и подачей воды. Изменение уровня воды в парогенераторе, обусловленное переходными процессами, может привести к достижению уставок технологических защит и блокировок с последующим отключением главного циркуляционного насоса и снижением нагрузки. Анализ проведённых на этапах пусконаладочных испытаний энергоблоков Нововоронежской, Ленинградской и Белорусской АЭС, а также имевших место отключений основного оборудования по причине изменения уровня в парогенераторах позволил определить возможные пути повышения динамической устойчивости энергоблоков с РУ ВВЭР-1200. Поддержание номинального уровня воды в парогенераторе позволяет не допустить поступление на турбину пара с повышенной более 1% влажностью. Имеются реальные перспективы повышения динамической устойчивости энергоблоков ВВЭР-1200 за счёт модернизации запорной арматуры на узле питания парогенератора с повышением её быстродействия и соответствующих корректировок уставок по уровню воды в парогенераторе. Повышение динамической устойчивости энергоблоков ВВЭР-1200 позволит внести существенный дополнительный вклад в экономическую привлекательность усовершенствованного проекта АЭС отечественного дизайна.

Ключевые слова: ВВЭР, уровень воды в парогенераторе, уставка ТЗиБ, срабатывание АЗ, отключение ГЦНА.

Для цитирования: Поваров П.В. Обоснование значений уровня в парогенераторах с РУ В-392м при нормальной эксплуатации, нарушении нормальной эксплуатации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2025;15(1):67–73. <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-07>

For citation: Povarov P.V. Justification of level values in steam generators with V-392m reactor unit during normal operation and normal operation disturbance. *Nuclear Safety*. 2025;15(1):67–73. (In Rus.). <https://doi.org/10.26583/gns-2025-01-07>

Justification of level values in steam generators with V-392m reactor unit during normal operation and normal operation disturbance

Petr V. Povarov

Branch of JSC Concern Rosenergoatom Novovoronezh Nuclear Power Plant (Novovoronezh NPP), Novovoronezh,
Voronezh Region, Russian Federation

✉ nvnpp1@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. The ability to carry the load during transients without achieving the operating conditions of the safety and emergency control action of the reactor is called the dynamic stability of the NPP power unit. Water level control in steam generators RU VVER-1200 (V-392M) is carried out to maintain a balance between steam removal, purging and water supply. A change in the water level in the steam generator caused by transients can lead to the achievement of technological protection and blocking settings, followed by the shutdown of the main circulation pump and a reduction in load. An analysis of the commissioning tests of the Novovoronezh, Leningrad and Belorussian NPP power units, as

well as the shutdowns of the main equipment due to changes in the level in the steam generators, allowed us to identify possible ways to increase the dynamic stability of the VVER-1200 power units. Maintaining the nominal water level in the steam generator makes it possible to prevent steam from entering the turbine with an increased humidity of more than 1%. There are real perspectives for VVER-1200 power units dynamic stability improving by upgrading the shut-off valves at the steam generator power supply unit with increased performance and appropriate adjustments to the water level settings in the steam generator. Increasing the dynamic stability of the VVER-1200 power units will make a significant additional contribution to the economic attractiveness of the improved nuclear power plant design of domestic design.

Keywords: VVER, steam generator level, technological protection and blocking setting, emergency control action, main circulation pump shutdown.

Измерение уровня воды в парогенераторах ПГВ-1000МКП (ПГ) РУ с В-392М [1] осуществляется гидростатическим методом, то есть путем сравнения давления переменного гидростатического столба воды в парогенераторе («минус») с давлением постоянного гидростатического столба конденсата («плюс»), создаваемого с помощью уравнительного сосуда. Уравнительный сосуд в комплекте с преобразователем разности давлений (дифманометром) называют уровнемером. На ПГ предусмотрены штуцеры (по два на каждый уровнемер) для отбора стати-

ческого давления и подсоединения уравнительных сосудов и преобразователей разности давлений. Уравнительные сосуды располагаются непосредственно у парогенератора, дифманометры располагаются в помещениях датчиков КИП вне герметичной оболочки и подсоединяются к ПГ и УС посредством трубных импульсных линий.

Измерение уровня питательной воды в ПГВ-1000МКП осуществляется с помощью семи однокамерных уравнительных сосудов (УС-1÷УС-7) и одного двухкамерного уравнительного сосуда УС-8 (рис. 1).

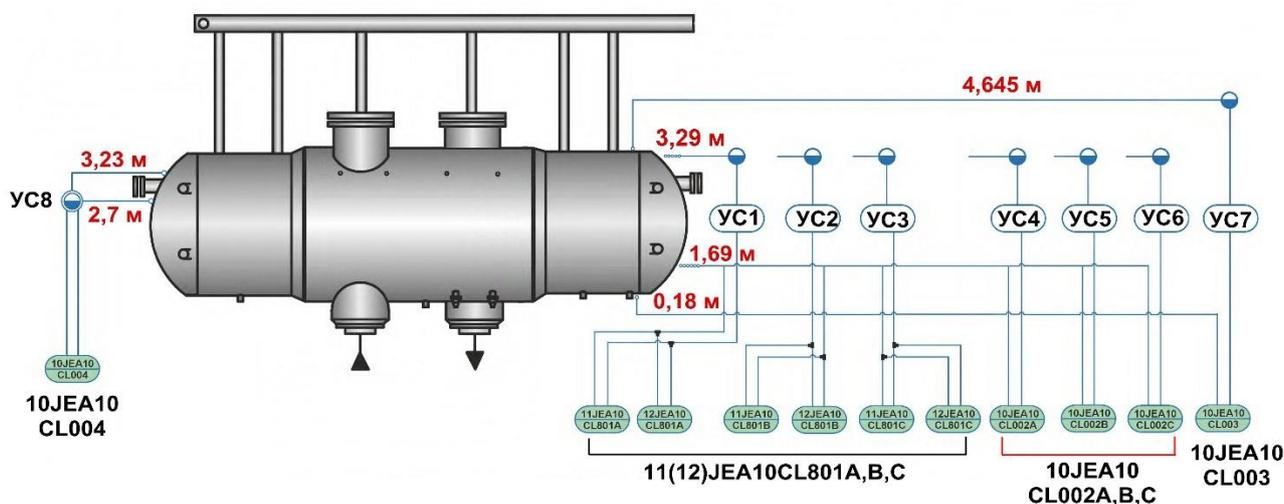


Рисунок 1. Расположение уравнительных сосудов на парогенераторе ПГВ-1000МКП
Figure 1. Location of reference vessels on the PGV-1000MKP steam generator

Для однокамерных уровнемеров в сигналы датчиков вводится автоматическая коррекция по давлению в ПГ. Для двухкамерного уровнемера УС-8 подобная коррекция не предусмотрена.

Однокамерные уровнемеры УС-1÷УС-6 имеют базу 1,6 м (уровнемеры с «малой» базой), уровнемер УС-7 имеет базу 4,465 м («большая» база).

Для повышения точности контроля и управления (например, работы регулятора уровня ПГ) используют усредненные показания от датчиков уровнемеров УС-1÷УС-6.

Назначение уровнемеров парогенератора представлено в таблице 1.

Таблица 1. Назначение уровнемеров ПГВ-1000МКП

Table 1. Purpose of PGV-1000MKP level gauges

№ УС	База уровнемера	Назначение сигнала	Представление информации
УС-1	1,69÷3,29 (1,6) м	АЗ-УСБТ	<ul style="list-style-type: none"> показывающие приборы на панелях безопасности (БПУ, РПУ) видеокадр СВБУ «JEA10-40»
УС-2			
УС-3		ТЗБ, регулятор, СВБУ	<ul style="list-style-type: none"> показывающие приборы на панелях РО и ТО (БПУ); видеокадр СВБУ «JEA10-40»
УС-4			
УС-5			
УС-6			
УС-7	0,180÷4,645 (4,465) м	Контроль заполнения / дренаживания ПГ	видеокадр СВБУ «JEA10-40»
УС-8	2,70÷3,23 (0,53) м	СВБУ	видеокадр СВБУ «JEA10-40»

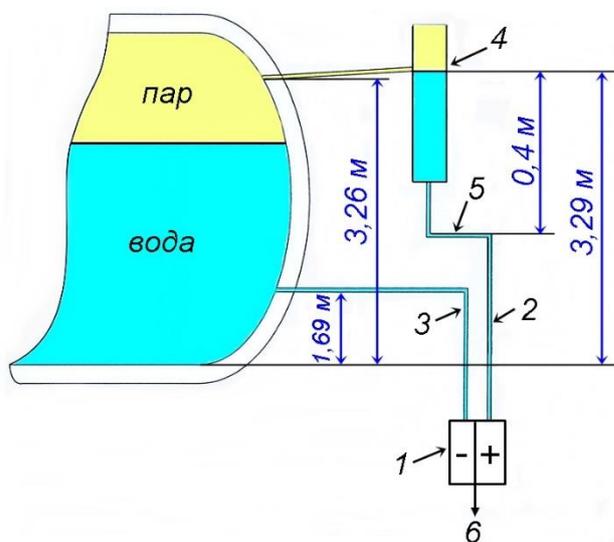
Примечание. В скобках указано значение базы уровнемера без учёта расположения минусового и плюсового штуцера относительно начала шкалы

Сигналы от уравнильных сосудов (УС-1, УС-2, УС-3) используются для организации защит управляющей системы безопасности (УСБТ) и выполнены по независимым каналам.

Однокамерный уравнильный сосуд состоит из корпуса, штуцеров и доннышек. Через верхний штуцер сосуд соединяется с паровым объёмом парогенератора, к нижнему штуцеру подсоединяется «плюсовая» линия преобразователя разности давлений.

Уровень воды в уравнильном сосуде поддерживается постоянным за счет конденсата, образующегося при конденсации пара в верхней части УС. Излишек воды при этом сливается из уравнильного сосуда обратно в ПГ за счет того, что соединительные трубки выполнены с уклоном в сторону корпуса ПГ.

На рисунке 2 представлена схема измерения уровня в ПГ с помощью однокамерного уравнильного сосуда с «малой» базой.



1. Дифманометр
2. «Плюсовая» линия дифманометра
3. «Минусовая» линия дифманометра
4. Однокамерный уравнильный сосуд
5. Горизонтальный участок стабилизации
6. Токовый сигнал $20 \div 4$ мА, соответствующий изменению перепада давления при изменении уровня от 1,69 до 3,29 м.

Рисунок 2. Схема измерения уровня в ПГ с помощью однокамерного УС

Figure 2. Scheme of level measurement in a steam generator using a single-chamber reference vessel

Двухкамерный уровнемер не задействован в ТЗБ и в регулировании уровня. Он предназначен для измерения уровня воды над погружным дырчатый листом (ПДЛ) при проведении сепарационных испытаний ПГ и для настройки однокамерных уровнемеров.

Опыт эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 (энергоблоки с РУВ-392М, Рус В-491) показывает, что при нарушении нормальной эксплуатации оборудования систем подпитки-продувки первого контура, питательной воды, основного конденсата, циркуляционной воды, происходит повыше-

ние уровня в парогенераторах. В переходных процессах возможно достижение уставок технологических защит и блокировок (ТЗиБ) на отключение основного оборудования энергоблока: главного циркуляционного насоса (ГЦНА), турбогенератора (ТГ). Таким образом, не обеспечивается динамическая устойчивость энергоблока. В качестве критерия динамической устойчивости принимается условие не достижения в переходных процессах уставок срабатывания аварийной защиты реактора, включения в работу систем безопасности, а также уставок на срабатывание технологических защит, приводящих к отключению основного оборудования и/или снижению нагрузки [2].

В течение 15 топливных кампаний на энергоблоках №№ 6 и 7 Нововоронежской АЭС произошло 5 случаев отключения ГЦНА при повышении уровня в ПГ в переходных режимах, связанных с отключением циркуляционных насосов, ростом уровня в сепараторе, повышением давления в конденсаторах турбины, срабатыванием аварийной защиты.

В соответствии с проектом в нормальных условиях эксплуатации система питательной воды должна поддерживать в парогенераторе номинальный уровень (2700 ± 50) мм по показаниям однокамерных уравнительных сосудов на «холодном» днище ПГ с влажностью отбираемого пара не более $0,2\%$ ¹.

При увеличении уровня воды в парогенераторе на «+200 мм» от номинального значения и запасе до кипения в каждой из горячих ниток более $15,5^\circ\text{C}$ отключается ГЦНА соответствующей петли. Основная защитная функция отключения оборудования энергоблока при повышении уровня в ПГ заключается в предотвращении (ограничении) дальнейшего роста уровня в парогенераторах с целью недопущения поступления на турбину пара с повышенной влажностью.

Фактические сепарационные характеристики парогенераторов на энергоблоках № 6 и № 7, в том числе зависимость влажности пара при изменении уровня в ПГ были опре-

делены в ходе проведения сепарационных испытаний при проведении пусконаладочных работ (ПНР). Целью сепарационных испытаний являлось подтверждение проектного значения номинального уровня в ПГ при нормальной эксплуатации. В рамках ПНР выполнены сепарационные испытания ПГ энергоблоков № 6 и № 7 НВАЭС, получены сепарационные характеристики и предельно-допустимые уровни, обеспечивающие влажность пара на выходе из ПГ не более $0,2\%$ ².

На рисунке 3 представлены результаты сепарационных испытаний ПГ-3 энергоблока № 6, на рисунке 4 представлена аппроксимация зависимости влажности пара от уровня в ПГ по 4-м парогенераторам полиномом 6-й степени.

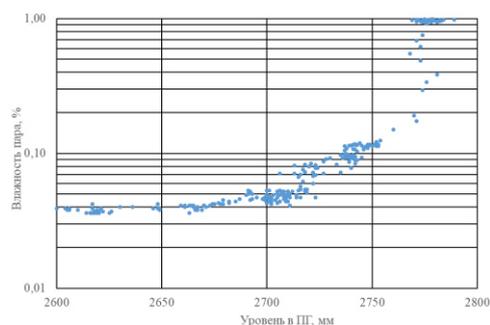


Рисунок 3. Результаты сепарационных испытаний ПГ-3 энергоблока № 6

Figure 3. Results of separation tests of PG-3 of power unit No. 6

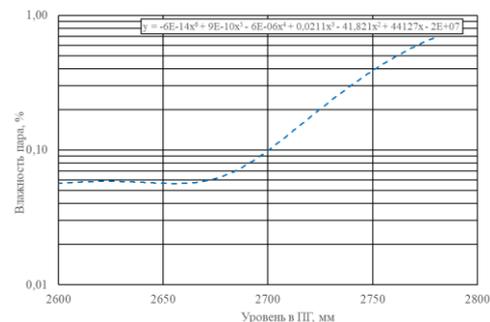


Рисунок 4. Аппроксимация по четырем парогенераторам блока № 7

Figure 4. Approximation for four steam generators of power unit No. 7

¹ Инструкция по эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000МКП 20JEA10,20,30,40АС001 энергоблока №2 Нововоронежской АЭС-2. Версия 2, 2023.

² «Расчетный анализ режимов нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2 по теме: «Комплексный анализ режимов с отключением основного оборудования первого и второго контуров и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. Технический отчет ВНИИАЭС, 2017.

В результате испытаний установлено, что на энергоблоках № 6 и № 7 Нововоронежской АЭС наиболее неблагоприятным по сепарационным характеристикам является парогенератор № 4 7-го блока, предельное значение по влажности отбираемого пара 0,2 % достигается при уровне в ПГ 2715 мм. На основании анализа обобщенных результатов сепарационных испытаний, с учетом погрешности измерения уровня в ПГ 25 мм, в качестве номинального уровня ПГ на энергоблоках № 6 и № 7 НВАЭС³ принято значение 2600 мм.

В случае отказа основного регулирующего клапана при медленном повышении уровня в ПГ, после формирования сигнала на закрытие отсечной задвижки (уставка закрытия запорной арматуры на узле питания ПГ «+150») и работающем ГЦНА в переходном процессе, возможна циклическая работа задвижки в режиме закрытия-открытия с опасностью «раскачки» уровня и вероятностью достижения условий срабатывания АЗ по снижению уровня в ПГ. Такие случаи циклической работы отсечной задвижки в режиме закрытия-открытия со срабатыванием АЗ по снижению уровня в ПГ при некорректной работе узла питания ПГ зафиксированы в базе данных по нарушениям в работе АЭС. При этом инерционность сигнала по уровню – 1 с; время прохождения команды в цепях при закрытии запорной задвижки – 0,5 с.

В расчетном анализе режимов нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2, выполненном ВНИИАЭС, сформулированы предложения, направленные на расширение пределов повышения уровня в ПГ без отключения основного оборудования, с реализацией ряда мероприятий по модернизации. Так, отсечную задвижку целесообразно модернизировать, увеличив ее быстродействие до 25÷30 с, что позволит обосновать расширение допустимого диапазона изменения уровня в ПГ с корректировкой уставок ТЗиБ

³ Отчет по обоснованию безопасности. Нововоронежская АЭС-2. Энергоблок № 2. Глава 15 «Анализ аварий», 2016.

на одновременное закрытие задвижки и отключение ГЦНА при повышении уровня в ПГ до «+300» мм от номинального. Подобное решение в своё время было реализовано и подтверждено положительным опытом эксплуатации в рамках модернизации узла питания ПГ на АЭС с ВВЭР-1000.

По условиям эксплуатации турбоустановки допускается длительная работа турбины при начальной влажности свежего пара не более 0,5 % при нормальной эксплуатации, а также допускается временное повышение влажности до 1,0 % в переходных процессах, в режимах с отклонениями от нормальных условий эксплуатации и при отклонениях параметров, вызванных работой регуляторов ПГ [3].

По данным расчетов⁴, для начала и конца кампании 18-ти месячного топливного цикла с применением программного-технического комплекса «Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР»⁵ и расчетного кода RELAP5/Mod3.2⁶ время превышения уровня воды в переходном процессе от номинального до уровня, соответствующего уставке отключения ГЦНА в наихудшем по сепарационным свойствам ПГ составляет не более 30 с., при влажности пара – 1 % . При отключении ГЦНА в ПГ практически сразу прекращается парообразование и поступление влажного пара в проточную часть турбины.

Кроме того, проточная часть турбины К-1200/6.8/50 (рис. 5) имеет эффективную систему влагоудаления:

⁴ Технический отчет ВНИИАЭС «Расчетный анализ режимов нормальной эксплуатации и с нарушением нормальной эксплуатации систем и оборудования энергоблока № 2 Нововоронежской АЭС-2 по теме: «Комплексный анализ режимов с отключением основного оборудования первого и второго контуров и разработка рекомендаций по повышению динамической устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ. ВНИИАЭС», 2024.

⁵ Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР, АО «Концерн Росэнергоатом», Режим доступа: <https://www.rosenergoatom.ru/about/programmnye-produkty/virtualno-tsifrovaya-aes-s-vver/> (дата обращения: 22.12.2024).

⁶ Программа RELAP5/Mod3.2 для теплогидравлического расчета переходных и аварийных режимов РУ ВВЭР. Регистрационный номер паспорта аттестации программного средства, №180 от 28.10.2004.

- применение торцевой сепарации влаги с поверхности наружного бандажа диафрагмы;
- организация периферийного влагоудалителя за направляющим аппаратом;
- внутриканальное влагоудаление через систему узких щелей на выпуклой и вогнутой поверхностях во внутренние полости направляющих лопаток;
- организация дробления и сброса влаги с вогнутой поверхности направляющих лопаток вблизи выходной кромки.

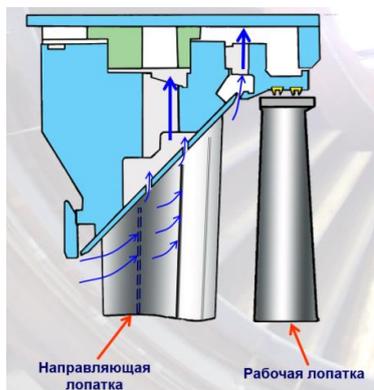


Рисунок 5. Система влагоудаления проточной части турбины K-1200/6.8/50
Figure 5. Moisture removal system of the flow section of K-1200/6.8/50 turbine

По результатам анализа отраслевой базы данных Npp Exr на энергоблоках с ВВЭР-1200 (Нововоронежская, Ленинградская, Белорусская АЭС) за время эксплуатации произошло 10 случаев отключения ГЦНА по уставке превышения уровня 2900 мм в переходных процессах, связанных с отказами оборудования систем питательной воды, основного конденсата, циркуляционной воды. В 3-х событиях зафиксировано кратковременное увеличение показаний уровнемеров ПГ до $L_{ном} + 200$ мм. В 5-ти событиях имело

место «перепитка» ПГ в переходных процессах энергоблока. Коренными причинами обоих этих групп событий определены проектные несоответствия, связанные с уставками ТЗИБ, а также недостатки проектного алгоритма узла питания ПГ, приводящие к повышению уровня котловой воды в ПГ. В 3-х событиях эти несоответствия привели к срабатыванию АЗ, в 2-х – к дополнительным разгрузкам энергоблока.

При этом ни в одном из случаев не зафиксировано повреждение элементов проточной части турбины.

Выводы

Опыт эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200 показывает, что в переходных процессах при нарушении нормальной эксплуатации с повышением уровня в парогенераторах возможно достижение уставок ТЗИБ на отключение ГЦНА.

В качестве номинального уровня ПГ, по результатам сепарационных испытаний, на энергоблоках ВВЭР-1200 принято значение 2600 мм, с учетом погрешности измерения уровня в ПГ – 25 мм.

В рекомендациях ВНИИАЭС по повышению динамической устойчивости предлагается повысить быстродействие запорной задвижки на основной линии узла питательной воды ПГ.

Существенно повысить динамическую устойчивость энергоблока возможно также за счет комплексного изменения уставок ТЗИБ по повышению уровня в ПГ, сохранив уставку отключения ГЦНА при повышении уровня в ПГ – 2900 мм и тем самым увеличив оперативный запас для регулирования уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Поваров В.П., Платонов П.Д., Украинцев И.Ф. и др. Оборудование и технологические системы нормальной эксплуатации ядерной установки в проекте АЭС-2006. Воронеж: Кварта, 2023. 780 с.
2. Гусев И.Н., Смородинов Д.С., Казаков К.В., Жуденков В.В., Мамонтов Г.А. К вопросу динамической и эксплуатационной устойчивости энергоблоков АЭС с ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;1:18–27. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.02>
- Gusev I.N., Smorodinov D.S., Kazakov K.V., Zhudenkov V.V., Mamontov G.A. On dynamic and operational stability of NPP power units with VVER-1200. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;1:18–27. (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2024.1.02>

3. Лисянский А.С Разработка мощных паровых турбин для быстроходной энерготехнологии АЭС : автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.04.12. Санкт-Петербург, 2014. 35 с. Режим доступа: <https://click.ru/3HaU59> (дата обращения: 22.12.2024).

Lisyansky A.S. Development of high-power steam turbines for high-speed power technology of NPP. Abstract of disc. ... Doctor of technical sciences 05.04.12. St Petersburg, 2014. 35 p. Available at: <https://click.ru/3HaU59> (accessed: 22.12.2024).

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Автор заявляет об отсутствии источников финансирования.

FUNDING:

The author declares no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ:

Поваров Пётр Владимирович, начальник РЦ-6 филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Российская Федерация.
e-mail: pv_povarov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR:

Petr V. Povarov, Head of the Reactor Department, Novovoronezh Nuclear Power Plant a branch of Rosenergoatom Concern JSC , Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: pv_povarov@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 30.12.2024

После доработки / Revised 13.03.2025

Принята к публикации / Accepted 18.03.2025