

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-07>

УДК 621.1:621.039.5

EDN PMJIMT


Оригинальная статья / Original paper



Моделирование режимов работы турбоустановки при продлении
кампании энергоблока ВВЭР-1000

Г.Н. Никитас¹  , А.А. Лапкис^{1,2} , Д.А. Озерный¹ 

¹ Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация

² Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом» г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация
 nikitias.gleb@mail.ru

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью минимизации экономических потерь от недовыработки электроэнергии в период продления кампании энергоблоков ВВЭР-1000. Целью работы является анализ эффективности использования режима скользящего давления во втором контуре для высвобождения дополнительной реактивности за счет температурного эффекта и увеличения выработки электроэнергии. Разработана комплексная математическая модель, включающая уравнения баланса реактивности (температурный и мощностной эффекты), уравнения теплового баланса и теплопередачи в парогенераторе, а также уравнение Стодолы-Флюгеля для расхода пара. Моделирование выполнено в САПР United Cycle, где создана и верифицирована тепловая схема турбоустановки К-1000-60/1500-2. Проведена сравнительная оценка трех режимов продления кампании: снижение мощности при постоянном давлении, режим скользящего давления, и комбинированный режим скользящего давления с поэтапным отключением групп подогревателей высокого давления. Моделирование выполнялось для диапазона снижения тепловой мощности реактора, соответствующего периоду продления кампании. Установлено, что применение скользящего давления с отключением ПВД позволяет поддерживать электрическую мощность на более высоком уровне по сравнению с базовым режимом, что обеспечивает значительный дополнительный экономический эффект. При этом выявлен рост влажности пара на выходе турбины, что требует согласования с заводом-изготовителем. Предложен поэтапный график отключения ПВД, обеспечивающий оптимальное ведение режима по критерию максимизации выработки. Внедрение данной технологии наиболее актуально для АЭС, расположенных в южных регионах с более высоким давлением в конденсаторе. Полученные результаты могут быть использованы при разработке эксплуатационной документации и обосновании безопасности продления кампании для энергоблоков ВВЭР-1000.

Ключевые слова: реактор, ВВЭР-1000, кампания, запас реактивности, мощностной эффект, температурный эффект, парогенератор, скользящее давление


Для цитирования: Никитас Г.Н., Лапкис А.А., Озерный Д.А. Моделирование режимов работы турбоустановки при продлении кампании энергоблока ВВЭР-1000. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(1):61–68. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-07>

For citation: Nikitas G.N., Lapkis A.A., Ozerny D.A. Modeling of turbine operating modes of the stretch-out operation for VVER-1000 power unit. *Nuclear Safety*. 2026;16(1):61–68. (In Russ). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-01-07>

Modeling of turbine operating modes of the stretch-out operation
for VVER-1000 power unit

Gleb N. Nikitas¹  , Aleksander A. Lapkis^{1,2} , Dmitriy A. Ozerniy¹ 

¹ Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation

² Rostov Nuclear Power Plant – a branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodonsk, Rostov region, Russian Federation
 nikitias.gleb@mail.ru

Abstract. The relevance of this study is determined by the necessity to minimize economic losses resulting from reduced electricity output during the stretch-out operation of VVER-1000 power units. The objective of the work is to analyze the efficiency of utilizing the sliding pressure mode in the second circuit to release additional reactivity through the temperature effect and to increase electricity generation. A comprehensive mathematical model has been developed, incorporating reactivity balance equations (considering temperature and power effects), heat balance and heat transfer equations for the steam generator, and the Stodola–Flügel equation for steam flow rate. The simulation is performed using the United Cycle CAD system, where the thermal schematic of the K-1000-60/1500-2 turbine unit was created and verified. A comparative assessment of three extended campaign modes is conducted: power reduction at constant pressure, the sliding pressure mode, and a combined sliding pressure mode with staged disconnection of high-pressure heater (HPH) groups. The simulation is carried out for the range of reactor thermal power reduction corresponding to the extended campaign period. It is established that the application of sliding pressure with HPH disconnection allows maintaining a higher level of electrical power compared to the base mode, thereby providing a significant additional economic effect. Concurrently, an increase in exhaust steam moisture content at the turbine outlet is identified, which necessitates coordination with the manufacturer. A staged schedule for HPH disconnection is proposed, ensuring optimal mode management based on the criterion of maximizing power output. The implementation of this technology is most relevant for NPPs located in southern regions characterized by higher condenser pressure. The obtained results can be utilized in the development of operational documentation and the safety justification for extended campaigns of VVER-1000 power units.

Keywords: reactor, VVER-1000, campaign, reactivity reserve, power effect, temperature effect, steam generator, sliding pressure

Актуальность проблемы

В современной эксплуатации энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 продление топливной кампании является важным инструментом гибкого управления графиком планово-предупредительных ремонтов (ППР) [1]. Стандартный метод продления кампании, основанный на использовании мощностного эффекта реактивности (МЭР) при постоянном давлении свежего пара, сопровождается значительным снижением тепловой мощности реакторной установки – вплоть до 70% от номинала на завершающей стадии режима продления кампании. Прямым следствием такого снижения является недовыработка электроэнергии и существенные экономические потери для атомной станции [2].

Актуальной инженерно-экономической задачей является поиск и обоснование таких режимов продления кампании, которые позволяли бы максимизировать выработку электроэнергии в дополнительный период работы [1]. Перспективным направлением является переход от простого снижения мощности к комбинированному режиму, который наряду с МЭР задействует температурный эффект реактивности (ТЭР) [3]. Это достигается работой энергоблока на скользящем давлении во втором контуре. Снижение давления в парогенераторах и, как след-

ствие, температуры теплоносителя первого контура, высвобождает дополнительную реактивность. Этот запас можно целенаправленно использовать для поддержания тепловой мощности на более высоком уровне [4].

Исторический прецедент успешного применения подобного режима существует: в 1977 и 1986 гг. на блоках Кольской АЭС с ВВЭР-440 была осуществлена опытная эксплуатация со скользящим давлением, что позволило значительно продлить кампанию и получить дополнительную энерговыработку. Ключевой вывод из того опыта заключается в том, что внедрение такого режима требует решения ряда технических вопросов, связанных с перенастройкой защит и проверкой прочности оборудования в измененных температурных условиях, а его обоснование базировалось на возможностях вычислительной техники и методах 1980-х годов.

Для современного, более мощного и сложного энергоблока ВВЭР-1000 необходим новый уровень анализа. Ранее в ВИТИ НИЯУ МИФИ выполнили моделирование РУ ВВЭР-1000 в рамках продления топливной кампании [5], при этом, детальный расчет тепловой схемы не выполнялся. Именно такой расчет является необходимым этапом для количественной оценки прироста выработки, определения оптимальных парамет-

Уравнение Стодолы-Флюгеля в упрощенной форме при неизменном положении СРК можно записать формулой (2):

$$\frac{G_{п0}}{G_{п}} = \frac{p_0}{p} \quad (2)$$

где $G_{п0}$ – расход пара (кг/с) на номинальном давлении p_0 , МПа;

p – давление свежего пара перед турбиной, МПа.

Уравнение баланса реактивности определяется формулами (3–4):

$$\Delta\rho_T = \alpha_T \cdot (T_{x2} - T_{x1}) \quad (3)$$

$$\Delta\rho_N = \alpha_N \cdot (N_2 - N_1) \quad (4)$$

где $\Delta\rho_T$ – температурный эффект реактивности;

α_T – температурный коэффициент реактивности;

$(T_{x2} - T_{x1})$ – изменение температуры «холодной» нитки;

$\Delta\rho_N$ – мощностной эффект реактивности;

α_N – мощностной коэффициент реактивности;

$(N_2 - N_1)$ – изменение тепловой мощности реактора.

Выработка энергии АЭС определяется в значительной мере тепловой экономичностью турбинной установки и второго контура в комплексе. Для дополнительного снижения температуры теплоносителя можно отключать подогреватели высокого давления системы регенерации. Это приведет к снижению температуры питательной воды и, как следствие, к снижению температуры теплоносителя. Такие меры не приведут к повышению экономичности ЯЭУ, но позволят получить дополнительное высвобождение реактивности.

Данная система уравнений была решена при ступенчатом снижении тепловой мощности с 3120 МВт до 2800 МВт. Давление свежего пара снизилось с 64,5 кгс/см² до 53,2 кгс/см². Зависимости основных параметров второго контура, от времени продления кампании, полученные при решении системы уравнений приведены на рисунках 2 и 3.

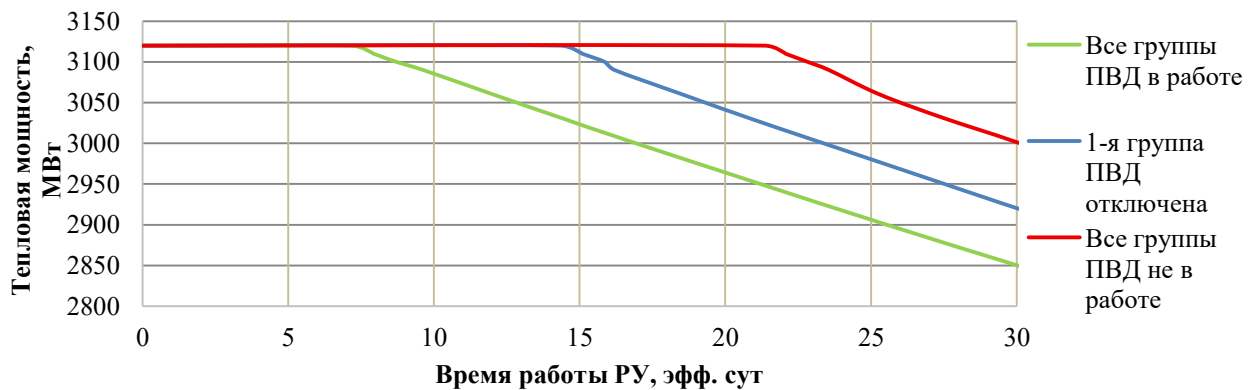


Рисунок 2. Тепловая мощность РУ ВВЭР-1000 в период продления кампании
Figure 2. Thermal capacity of VVER-1000 during the extended campaign period

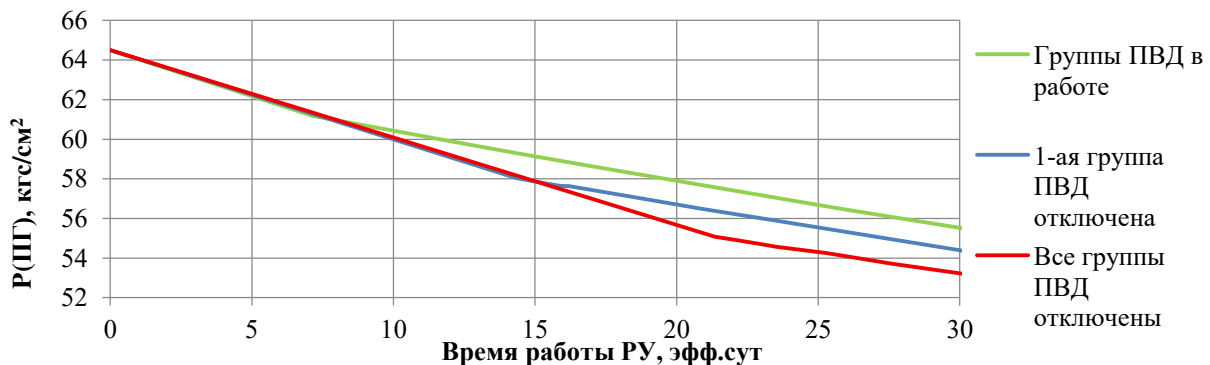


Рисунок 3. Давление свежего пара в ПГ в период продления кампании
Figure 3. Fresh steam pressure in the ПГ during the campaign extension period

Дальнейшее снижение параметров второго контура, а как следствие, и мощности, потребует перенастройки действующих защит и блокировок технологического оборудования, что может вызвать определенные затруднения при внедрении на действующие блоки ВВЭР-1000.

Результаты исследования

По итогам моделирования на 30-е эффективные сутки продления кампании наибольшую электрическую мощность показал режим на скользящем давлении с отключением всех групп ПВД. Разница с режимом продления кампании при пошаговом снижении мощности составила 185 МВт (рис. 4).

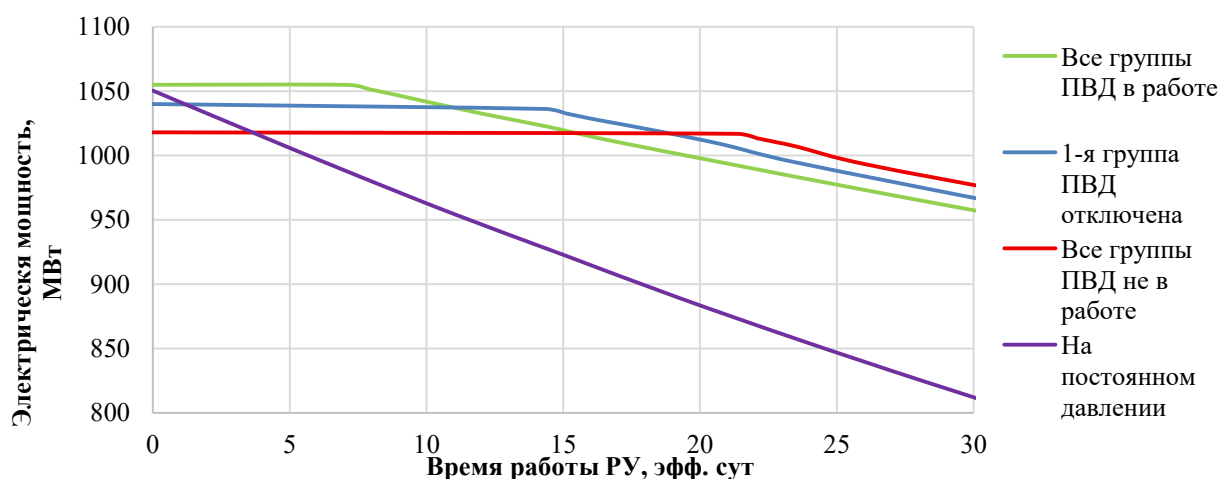


Рисунок 4. Электрическая мощность в период продления кампании
Figure 4. Electrical capacity during the campaign extension period

Однако этот эксплуатационный выигрыш сопряжен с существенной технологической платой – повышением влажности пара на выхлопе турбины. Результаты такого моделирования показывают, что при переходе на

режим скользящего давления влажность на выходе из ЦНД может возрасти с номинальных 12,5 % до 12,85 %, в зависимости от глубины снижения давления (рис. 5)

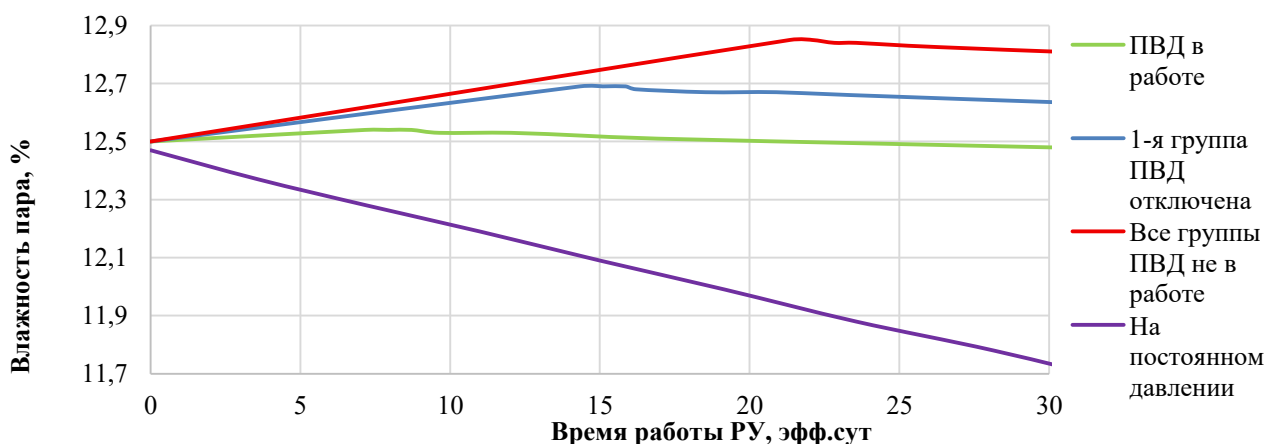


Рисунок 5. Влажность на выхлопе турбины в период продления кампании
Figure 5. Humidity at the turbine exhaust during the campaign extension period

Длительность кампании оказывает заметный эффект на экономическую эффективность блоков АЭС. Высвобождение реактивности за счет температурного эффекта

позволяет увеличить энерговыработку. Выполнен расчет экономического эффекта при средней отпускной оптовой цене электроэнергии 2,0 руб/(кВт·ч) (рис. 6).

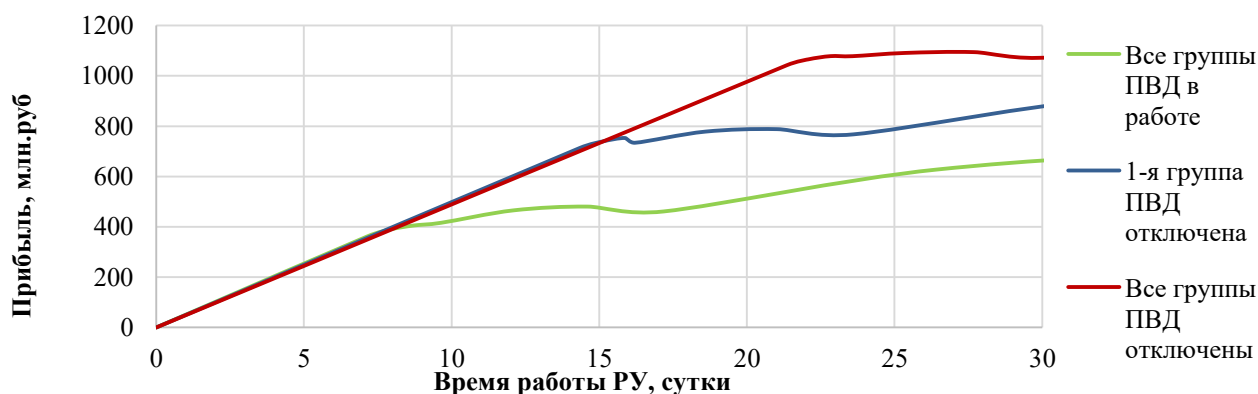


Рисунок 6. Экономия от продления кампании на скользящем давлении в течении 30 суток
Figure 6. Savings from extending the campaign on sliding pressure for 30 days

Расчеты показывают, что при продолжительности продления кампании на действующих АЭС на 30-е сутки, дополнительный экономический эффект может составлять до 1 млрд. рублей для одного энергоблока ВВЭР-1000 с турбоустановкой К-1000-60/1500-2 за одну кампанию.

Заключение

По результатам исследования потенциально наиболее эффективным режимом продления кампании является режим на скользящем давлении с отключением двух групп ПВД. Для получения максимального эффекта следует выполнять поэтапное отключение групп ПВД, на 11-е и 19-е эффективные сутки продления кампании, когда давление свежего пара снизится до 60 и 57,3 кгс/см² соответственно, максимально поддерживая электрическую мощность (табл. 1).

Таблица 1. Оптимальный комбинированный режим
Table 1. Optimal combined mode

Групп ПВД в работе	Давление свежего пара в ПГ, кгс/см ²	Электрическая мощность турбины, МВт	Эффективные сутки
2	63,5	1055	3
	61,5	1055	6
	61,0	1051	8
	60,0	1036	10
1	59,5	1036	11
	58,2	1036	14
	57,8	1028	16
	57,3	1017	18
0	56,2	1017	19
	54,6	1010	23
	53,7	987	27
	53,2	977	30

Таким образом, режим продления кампании на скользящем давлении с отключением ПВД является потенциально экономически выгодным мероприятием, при условии, что предприятие-производитель разрешит эксплуатацию турбоустановки при росте влажности на выхлопе на 0,2–0,4%. Однако рост влажности может быть менее значителен в летнее время, когда глубина вакуума в конденсаторе снижена. Установлено, что выигрыш в экономичности от применения скользящего давления больше для тех ЯЭУ, у которых выше давление в конденсаторе. Следовательно, вопрос о внедрении скользящего давления пара более актуален для АЭС южных районов, а также для АЭС с градирнями.

Стоит отметить, что данный режим требует дополнительных обоснований возможности работы основного оборудования энергоблока и внесения изменений в регламент безопасной эксплуатации энергоблока, а также в порядок расчета нейтронно-физических характеристик топливных загрузок [3].

Развитие методологии продления топливных кампаний и оптимизации режимов скользящего давления не ограничивается парком энергоблоков ВВЭР-1000. Полученные наработки, модели и, что важнее, системный подход к балансировке экономической выгоды, формируют прочный фундамент для проведения аналогичных и более комплексных исследований для энергоблоков ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Новая технология маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. *Тяжелое машиностроение*. 2019;(1-2):11-22. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38572342&ysclid=mluq2z8nwq582688226> (дата обращения: 02.10.2025).
Ponomarenko G.L., Rumik A.P. New technology of power maneuvering for nuclear power plant with WWER and PWR type part 1. *Heavy Engineering*. 2019;(1-2):11-22.2. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38572342&ysclid=mluq2z8nwq582688226> (accessed: 02.10.2025).
2. Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Анализ экономической целесообразности внедрения длительных топливных циклов на АЭС с ВВЭР-1000. *Энергетические установки и технологии*. 2019;5(1):7-13. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37145005&ysclid=mluq7bmia8983543441> (дата обращения 02.10.2025).
Braslavsky Yu.V., Matuzayev K.B., Merzlikin G.Ya., Sukrushev A.V. Analysis of the economic feasibility of implementing long fuel cycles at NPPs with VVER-1000. *Power Plants and Technologies*. 2019;5(1):7-13. (In Russ.). Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37145005&ysclid=mluq7bmia8983543441> (accessed: 02.10.2025).
3. Джарум Б., Соловьев Д.А., Семенов А.А., Щукин Н.В., Выговский С.Б., Аль-Шамайлах А.И., Танаш Х.А. Влияние температурного регулирования при работе ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 в режиме следования за нагрузкой. *Вестник НИЯУ МИФИ*. 2020;9(3):201-209. Режим доступа: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84/70?ysclid=mluq8sch8r644686969> (дата обращения: 02.10.2025).
Jarum B., Solovyov D.A., Semenov A.A., Shchukin N.V., Vygovsky S.B., Al-Shamileh A.I., Tanash Kh.A. Influence of temperature control during operation of VVER-1000 and VVER-1200 in load following mode. *Bulletin of NRNU MEPhI*. 2020;9(3):201-209. (In Russ.). Available at: <https://vestnikmephi.elpub.ru/jour/article/view/84/70?ysclid=mluq8sch8r644686969> (accessed: 02.10.2025).
4. Yang Zhang, Song Yinlei, Tian Wei. Optimal control of stretch-out operation for CPR1000 nuclear power unit. *Nuclear power engineering*. 2022;43(3):144-150. <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0144>
5. Грачев А.С., Лапкис А.А., Смолин А.Ю. Возможность продления кампании действующих энергоблоков ВВЭР-1000 за счет работы на скользящем давлении второго контура. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(2):66-76. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-08>
Grachev A.S., Lapkis A.A., Smolin A.Yu. The possibility of extending the campaign of operating VVER-1000 power units by operating at a sliding pressure of the second circuit. *Global Nuclear security*. 2023;13(2):66-76 <https://doi.org/10.26583/gns-2023-02-08>
6. Пономаренко Г.Л., Румик А.П. Патент № 2675380 С1 Российская Федерация, МПК G21C 7/00. Способ маневрирования мощностью ядерного энергетического реактора типа ВВЭР и PWR. Заявка №2018117898 от 15.05.2018; опубл. 19.12.2018. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/ (дата обращения: 02.10.2025).
Ponomarenko G.L., Rumik A.P. Patent No. 2675380 C1, Russian Federation, IPC G21C 7/00. Method for manipulating the power of a VVER and PWR nuclear power reactor. Application No. 2018117898, filed on May 15, 2018; published on December 19, 2018. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002675380_20181219_C1_RU/ (accessed: 02.10.2025).
7. Romanov S.N., Kutakhov A.G., Romanov K.S. Software united cycle for simulation of static operation modes of power plants. Proc. SPIE 4627, Fifth International Workshop on Nondestructive Testing and Computer Simulations in Science and Engineering, (18 February 2002). <https://doi.org/10.1117/12.456288>
8. Самойлович Г.С., Трояновский Г.С. Переменные и переходные режимы в паровых турбинах. Москва: Энергоатомиздат; 1982. 496 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001093298/?ysclid=mluqibbc1w356763517 (дата обращения: 02.10.2025)
Samoilovich G.S., Troyanovsky G.S. Variable and transient modes in steam turbines. Moscow: Energoatomizdat; 1982. 496 p. (In Russ.). Available at: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_001093298/?ysclid=mluqibbc1w356763517 (accessed: 02.10.2025).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Никитас Г.Н. – разработка и параметризация схемы, формирование текста статьи;
Лапкис А.А. – разработка концепции исследования, методических основ исследования;
Озерный Д.А. – выполнение исследовательских работ, обработка результатов, формирование текста статьи.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Nikitas G.N. – development and parameterization of the scheme, drafting the text of the article;
Lapkis A.A. – development of the research concept, methodological foundations of the study;
Ozerny D.A. – execution of research work, processing of results, drafting the text of the article.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без дополнительных источников финансирования

FUNDING:

No additional funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов нет.

БЛАГОДАРНОСТЬ:

Авторы выражают благодарность разработчику САПР United Cycle – ООО «М системы» – за предоставление программного обеспечения и техническую поддержку.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Глеб Николаевич Никитась, кафедра атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0008-4736-8984>

e-mail: nikitas.gleb@mail.ru

Александр Аркадьевич Лапкис, кандидат технических наук, доцент кафедры атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; ведущий инструктор учебно-тренировочного подразделения, Ростовская атомная станция – филиал АО «Концерн Росэнергоатом», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Дмитрий Александрович Озерный, кафедра атомной энергетики, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Волгодонск, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0000-4697-3885>

e-mail: dima-oz.2004@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 29.10.2025

После доработки / Revision 28.01.2026

Принята к публикации / Accepted 03.02.2026

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ACKNOWLEDGMENTS:

The authors express their gratitude to the developer of the United Cycle CAD system – LLC «M Systems» – for providing the software and technical support.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Gleb N. Nikitas, Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0008-4736-8984>

e-mail: nikitas.gleb@mail.ru

Aleksandr A. Lapkis, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI»; Senior Instructor of the Training Department, Rostov Nuclear Power Plant the branch of Rosenergoatom Concern JSC, Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-9431-7046>

e-mail: AALapkis@mephi.ru

Dmitry A. Ozerny, Department of Atomic Energy, Volgodosk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Volgodosk, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0000-4697-3885>

e-mail: dima-oz.2004@yandex.ru