

DOI: 10.18721/JEST.27103  
УДК 621.311.25.621.039

*А.В. Попов<sup>1</sup>, Е.Д. Федорович<sup>2</sup>,  
Е.Н. Кулаков<sup>1</sup>, И.Б. Денисова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова", Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

### **ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА КОНДЕНСАТНЫХ НАСОСОВ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ В СХЕМЕ ЭНЕРГОБЛОКА БРЕСТ-ОД-300**

Проведен анализ конденсатно-питательного тракта действующих зарубежных и отечественных атомных и тепловых электрических станций с бездеаэрационной тепловой схемой. Выполнено сравнение располагаемого кавитационного запаса питательного насоса действующих блоков с блоком с РУ БРЕСТ-ОД-300. Установлено, что количество КЭН-2 и ПЭН-1 на блоках с бездеаэрационными схемами согласовано. Произведен выбор предпочтительной схемы тракта. С использованием динамической модели энергоблока проведен расчет и анализ режима с отключением КЭН-2 без включения резервного. На основании результатов расчета выставлены требования к характеристике КЭН-2 при их согласованном количестве. По характеристикам, полученным от заводов-изготовителей, выполнен расчет режима с отключением конденсатного насоса без включения резервного при их согласованном количестве. Использование динамической модели энергоблока делает возможным еще до строительства станции оценивать надежность оборудования в режимах с нарушением работы оборудования. На основании результатов расчетов обосновано использование согласованного количества ПЭН-1 и КЭН-2.

*Ключевые слова:* АЭС, надежность, питательный насос, кавитационный запас, бездеаэрационная тепловая схема, динамическая модель.

*Ссылка при цитировании:*

Попов А.В., Федорович Е.Д., Кулаков Е.Н., Денисова И.Б. Влияние количества конденсатных насосов на надежность работы питательных насосов в схеме энергоблока БРЕСТ-ОД-300 // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 1. С. 31–40. DOI: 10.18721/JEST.27103

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.V. Popov<sup>1</sup>, E.D. Fedorovich<sup>2</sup>,  
E.N. Kulakov<sup>1</sup>, I.B. Denisova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Joint-Stock Company "I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment", St. Petersburg, Russia;

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

### **INFLUENCE OF NUMBER OF ELECTRIC CONDENSATE PUMPS ON FEEDWATER PUMP OPERATING RELIABILITY IN THE BREST-OD-300 POWER UNIT CIRCUIT**

The paper presents an analysis of a condensate-feedwater system of foreign and domestic nuclear and thermal power plants with a closed-feed cycle. This analysis includes a comparison of the available cavitation reserve of feedwater pumps (FWPs) of operating units with that of BREST-OD-300. We established that the number of electric condensate pumps (ECPs) on closed-feed cycle units is equal to the number of FWPs. A preferable system cycle was selected. We used a dynamic model of the BREST-OD-300 power unit to calculate and analyze the mode with failure of the ECP-2 without switching on the reserve pump. Based on the calculation results, we formulated certain characteristics requirements ECP-2 should meet in case their number agrees with that of FWPs. According to the characteristics obtained from the manufacturers, a calculation was made for the same ECP failure mode with an ECP-and-FWP number ratio equal to one. The use of the dynamic model of a power unit makes it possible to assess the reliability of equipment in modes with equipment failure even before the construction of the plant. Based on the study results, it is clear that the number of ECPs of the BREST-OD-300 unit should be no less than the number of FWPs.

*Keywords:* NPP, reliability, feedwater pump, cavitation reserve, closed-feed cycle, dynamic model.

*Citation:*

A.V. Popov, E.D. Fedorovich, E.N. Kulakov, I.B. Denisova, Influence of number of electric condensate pumps on feedwater pump operating reliability in the BREST-OD-300 power unit circuit, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 31–40, DOI: 10.18721/JEST.27103

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** В настоящее время рядом организаций разрабатывается проект реакторной установки на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (РУ БРЕСТ-ОД-300). Поскольку данный блок является опытно-демонстрационным, главная его функция заключается в отработке новых технологий, связанных с использованием в качестве теплоносителя свинца [1–3], следовательно, вопрос экономичности отодвигается на второй план.

Использование в качестве теплоносителя первого контура жидкого свинца накладывает ряд эксплуатационных ограничений, одним из которых является минимальная температура подачи питательной воды в проточный ПГ [4, 5], которая должна быть не менее 335 °С во всех режимах работы блока. Для обеспечения данного условия ОАО «ВТИ» была предусмотрена бездеаэрационная тепловая схема с установкой смешивающего подогревателя питательной воды (СППВ) с давлением  $P_s = 15$  МПа ( $t_s = 342$  °С) перед парогенератором [6, 7]. Этот подогреватель также играет роль емкости запаса питательной воды перед парогенератором, что обусловило необходимость установки питательного насоса второго подъема за СППВ. Поскольку электроприводные насосы на такие высокие параметры отсутствуют, было предложено применение питательного насоса с гидротурбинным приводом (ПГТН), использующего в качестве силовой воды воду с напорного коллектора питательного насоса с электроприводом (ПЭН-1). Как итог, конденсатные электронасосы второго подъема (КЭН 2) выполняют роль бустерного насоса для ПЭН-1 и в номинальном режиме в количестве 2 работающих агрегатов обеспечивают работу 3-х ПЭН-1 и 2-х ПГТН.

Поскольку АЭС является ядерно опасным объектом, крайне важно обеспечить надежность и безопасность при производстве электрической энергии. Создание модели, имитирующей работу станции, позволяет проводить анализ процессов, протекающих в оборудовании энергоблока при различных режимах работы еще на стадии проектирования, что позволяет снизить затраты на натурные испытания.

**Цель работы** – определение необходимых с точки зрения надежности конденсатно-питательного тракта характеристик насосной группы КЭН 2 путем проведения динамического расчета энергоблока с перспективной РУ БРЕСТ ОД 300.

### Бездеаэрационные схемы АЭС

Родоначальниками применения бездеаэрационных схем в тепловой энергетике являются американские турбостроительные фирмы. Отсутствие деаэратора было обусловлено тем, что деа-

эрация основного конденсата выполнялась в конденсаторе до требуемого содержания кислорода не более 10 мг/кг. При развитии атомной энергетики в США, следуя традициям тепловой энергетики, стали также применять на АЭС бездеаэрационные тепловые схемы. Но в 1979 году на АЭС «ТМ1» произошла самая большая на то время авария с частичным расплавлением активной зоны реактора и выбросом радиоактивного загрязнения в окружающую среду. Исходным событием этой аварии было ошибочное закрытие арматуры на входе и выходе фильтров конденсатоочистки, вследствие чего отключились последовательно расположенные конденсатные и питательные насосы.

Таблица 1

**Основные результаты анализа КПП бездеаэрационных схем**

Table 1

**Main analysis results of closed-feed water schemes FWCS**

Параметр	Величина					
	Kashiwazaki-Kariwa	Palo Verde	Surry	БРЕСТ-ОД-300		Каширская ГРЭС
Блок	5,6	1,2,3	1,2	–	–	3
Разработчик РУ	GE/Toshiba/Hitachi	CE	Westinghouse	НИКИЭТ		–
Тип РУ	ABWR	PWR	PWR	БР		–
Электрическая мощность блока, МВт	1356	1412	838	305,6	305,7	330
Температура ПВ перед ПЭН/ТПН	154,9	174,7	188,2	198,1	200,2	188
Давление на всасе ПЭН/ТПН, МПа	2,20	1,85	2,83	2,15		1,74   1,98
Давление на всасе ПЭН/ТПН, МПа	0,54	0,89	1,21	1,49	1,56	1,20
Располагаемый кавитационный запас, МПа	1,66	0,96	1,62	0,66	0,59	0,54   0,78
	185	11	188	77	69	62   91
Схема КЭН	2 + 1	2 + 1	2 + 1	2 + 1	2 + 1	2 + 1   3 + 0
Тип привода ПН	ТПН	ТПН	ТПН	ПЭН		ТПН
Схема ПЭН/ТПН	2 ТПН+2 ПЭН	2 + 0	2 + 0	3+1		ТПН+ПЭН
Закачка дренажа на всас ПЭН/ТПН	+	+	+	+	+	+
Дренаж	КГП ПВД-5,6	КГП ПВД-5,7+ сепарат СПП	Сепарат СПП+КГП ПНД-5	ПГТН+ КГП ПВД-6	КГП ПП-2 + ПГТН + КГП ПВД-6	КГП ПВД-7
Наличие дренажного бака	+	+	+	–	–	–
Способ закачки	СКЭН	СКЭН	СКЭН	б/н	б/н	б/н

Отсутствие подачи воды в прямоточные парогенераторы, нарушения в работе САОР и ошибки операторов привели к аварии 5 уровня по международной шкале ядерных событий. Затраты на

ликвидацию последствий аварии составили ~ 1 млрд. \$ [8]. После этой аварии до 2012 г. на территории США не было выдано ни одной новой лицензии на сооружение АЭС. В дальнейшем, блоки, получившие лицензии NRC на сооружение, были спроектированы с деаэраторами [9, 10] – АЭС «Vogtle»-3,4 (AP1000) и «North-Anna»-3 (ESBWR).

ОАО «НПО ЦКТИ» провело анализ конденсатно-питательного тракта (КПТ) действующих АЭС США разных разработчиков РУ и отечественных ТЭС с внедрёнными бездеаэрационными схемами [11–15]; основные результаты этого анализа представлены в табл. 1.

Основные выводы анализа:

- количество конденсатных и питательных насосов на блоках с бездеаэрационными схемами взаимосогласовано;
- располагаемый кавитационный запас питательного насоса на действующих блоках превышает такой для БРЕСТ-ОД-300 до 2,7 раз. Из-за низкого кавитационного запаса турбопитательного насоса (ТПН) на блоке №3 Каширской ГРЭС в работе на номинальной мощности находится 3 КЭН-2 [13] (работа без резерва);
- на блоках АЭС с бездеаэрационными схемами как с BWR, так и с PWR, разработанными американскими фирмами, закачка дренажей в тракт перед питательными насосом выполняется из дренажного бака сливным насосом, а не самотеком через смеситель (со смешением двухфазной среды с основным конденсатом), как на отечественных ТЭС;
- температура основного конденсата перед питательным насосом на действующих блоках не превышает 190 °С (давление насыщения  $P_s = 1,26$  МПа, что близко к давлению в деаэраторах современных блоков АЭС –  $1,2 \div 1,3$  МПа).

### Выбор предпочтительной схемы тракта

Балансовый расчёт тепловой схемы турбоустановки К-300-15,7/50 был выполнен для РУ БРЕСТ для двух вариантов схем слива конденсата греющего пара ПП-2: в ПВД-6 и смеситель перед ПЭН-1. Согласно результатам расчёта, мощность генератора при использовании схемы со смесителем повышается на ~ 100 кВт, однако при этом растёт потребляемая мощность ПЭН-1 на 130 кВт, что вызвано увеличением удельного объёма питательной воды. Мощность СКЭН снижа-

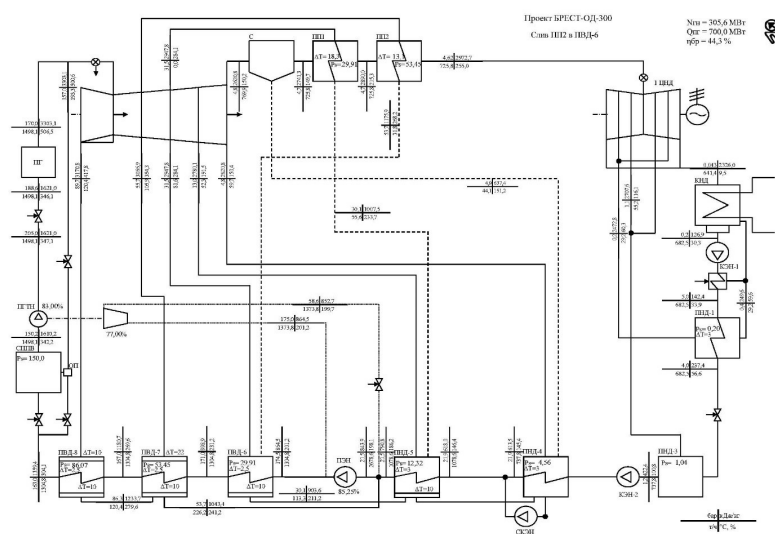


Рис. 1. Балансовая схема К-300-15,7/50 РУ БРЕСТ-ОД-300: сброс конденсата греющего пара ПП-2 в ПВД-6  
Fig. 1. Heat balance diagram of K-300-15,7/50 reactor unit BREST-OD-300: reheater-2 drains to HPH-6

ется на 24 кВт при условии сохранения постоянства КПД. Таким образом при реализации схемы со смесителем ожидать увеличения мощности нетто и, соответственно, выработки электроэнергии, не приходится. При этом имеются негативные последствия в части снижения располагаемого кавитационного запаса ПЭН-1 (табл. 2). Исходя из вышесказанного, для расчета был выбран более предпочтительный вариант тепловой схемы второго контура – со сливом КГП ПП-2 в ПВД-6.

Таблица 2

**Параметры основного конденсата во всасывающем коллекторе ПЭН-1**

Table 2

**FWP-1 inlet collector main condensate parameters**

Параметр	Вариант схемы слива КГП ПП-2	
	Слив в смеситель	Слив в ПВД-6
Температура ОК в ВК ПЭН-1, °С	200,2	198,1
Давление во ВК ПЭН-1, МПа	~ 2,15*	
Давление насыщения, МПа	1,56	1,49
Располагаемый кавитационный запас ПЭН 1, МПа/м	0,59	0,66
	69	77
* – возможно снижение давления до 40 кПа за счёт установки дополнительного смесителя в соответствующей схеме.		

**Выбор характеристики КЭН-2**

Изначально было заложено в проектную документацию использование насосов КЭН-2 по схеме 2+1 – 2 в работе, один в резерве. Далее при детальном анализе прохождения режима отключения КЭН-2 без включения резервного насоса с целью недопущения отключения ПЭН-1 по давлению во всасывающем коллекторе было предложено использовать схему 3+1 КЭН 2. Напорная характеристика должна соответствовать следующим требованиям:

- Напор насоса в безрасходном режиме  $H_0 = 260$  м;
- Напор насоса в номинальном режиме  $H_n = 240$  м.

Заводами-изготовителями было предложено 2 варианта характеристики (прототип А и Б), представленные на рис. 2

**Результаты расчета**

Разработка модели энергоблока и расчеты велись в среде динамического моделирования ПО SimInTech с интегрированным кодом TRP<sup>1</sup>, используемый для моделирования динамических процессов в сложных теплогидравлических сетях и оборудовании ТЭС и АЭС. SimInTech позволяет создавать комплексную модель за счет ее разбиения на пакет проектов, которые обмениваются между собой сигналами через базу данных.

Сценарий для данного режима следующий. По факту отключения одного КЭН-2 без АВР через 5 с (2 с задержка на запаздывание в цепи управления + 3 с на разворот) на блоке формируется режим БУСМ 2 – тепловая мощность реактора снижается со скоростью ~ 1%/с до 50%  $Q_{ном}$  с соответствующим снижением заданного расхода свинца через активную зону до 57,1%  $G_{ном}$ . Мощность турбины снижается действием САРЗ, которая в режиме «РДС» поддерживает давление в ГПК ~ 16,5 МПа. Питательные насосы отключались по давлению за ЦВД, соответствующему мощности 50 %  $Q_{ном}$ , для снижения скорости изменения температуры свинца и, следовательно, активной зоны.

<sup>1</sup> Программа «TRP» для моделирования нестационарных и установившихся процессов в энергетическом оборудовании ТЭС: Отчет о НИР/ НПС «ПРИОРИТЕТ» инв. № НТО001/1997. Руководитель: не ук. – М.,1997.– 46 с.

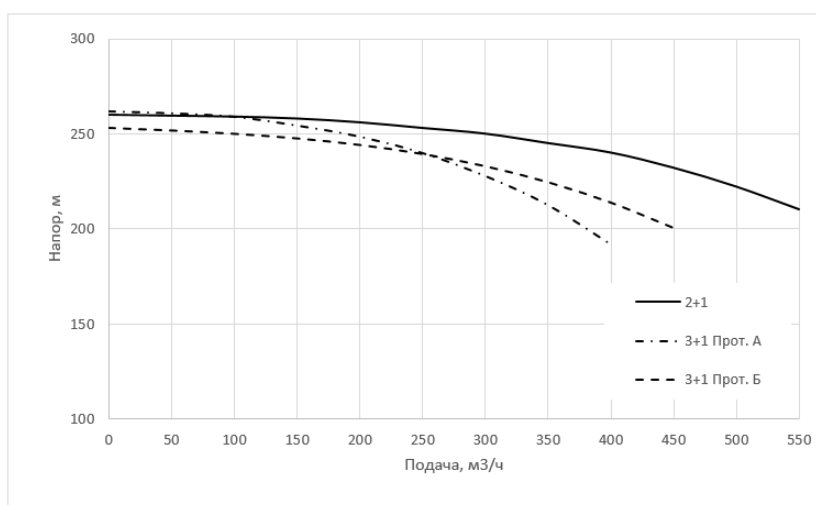


Рис. 2. Напорные характеристики насосов КЭН-2  
 Fig. 2. Pressure head characteristics of ECP-2

Согласно проведенным расчётам снижение располагаемого кавитационного запаса при отключении КЭН-2 со схемой 2+1 составило 0,13 МПа. При этом стоит отметить, что значение провала давления сильно зависит от исходного состояния блока перед отключением насоса, а именно от положения регулирующего клапана уровня КСБ и СППВ. Первоначально уставка защиты по отключению ПЭН-1 по кавитационному срыву была принята 0,1 МПа (12 м) с выдержкой по времени 5 секунд в связи с отсутствием технического проекта ПЭН 1. В дальнейшем при поступлении предложений от потенциальных поставщиков минимальный располагаемый кавитационный запас был принят в диапазоне от 13 м (0,11 МПа) до 30 м (0,26 МПа). Причём минимальное значение было для предложения с отдельным бустерным насосом (со своим двигателем), что неприемлемо для бездеаэрационной схемы, где роль бустерного насоса выполняет КЭН-2.

Таблица 3

**Параметры КПТ при прохождении режима**

Table 3

**FWCS parameters due to analyzed mode**

Параметр	Количество насосов		
	2 + 1	3 + 1 прототип А	3 + 1 прототип В
Температура ПВ во ВК ПЭН-1, °С	198,1		
Провал давления во ВК ПЭН-1, МПа	1,64	1,81	1,97
Располагаемый кавитационный запас, МПа/м	0,13	0,30	0,46
	15	35	55
Дополнительные операции	Блокировка РК уровня СППВ	Нет	Нет

Параметры и переходный процесс в конденсатно-питательном тракте в зависимости от типа насоса КЭН-2 представлены в табл. 3 и на рис. 3, соответственно. На 10 с расчета после отключения насоса происходит снижение давление во всасывающем коллекторе ПЭН-1, что обусловлено взятием нагрузки рабочими насосами. Давленийший рост давления по схеме 3+1 КЭН-2 обуслов-

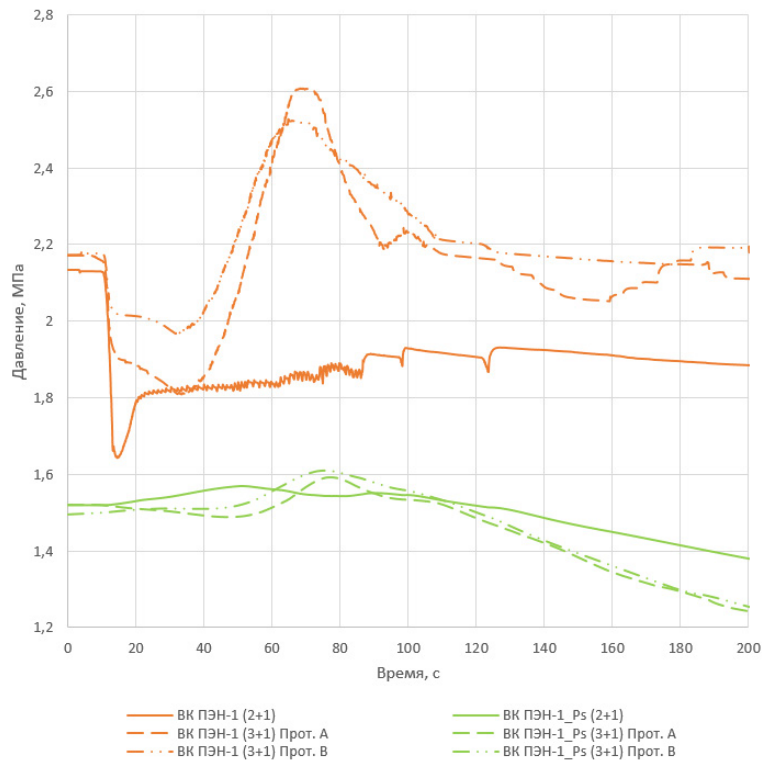


Рис. 3. Давления во всасывающем коллекторе ПЭН-1 для различных характеристик КЭН 2

Fig. 3. Pressure in FWP-1 collector for different characteristics of ECP-2

лен прикрытием клапана уровня СППВ из-за разгрузки энергоблока и отсутствием на нем блокировок по прохождению режима.

### Заключение

Исходя из данных проведенного расчета, использование согласованной схемы КЭН-2 и ПЭН-1 значительно повышает надежность конденсатно-питательного тракта. Кроме того, для возможности прохождения режима по схеме 2+1 КЭН-2 приходится вводить дополнительные блокировки, в частности блокировку регулирующего клапана уровня СППВ, с целью недопущения перегрузки оставшегося в работе КЭН-2 и последующего его отключения.

При согласованном количестве насосов КЭН-2 и ПЭН-1 снижение располагаемого кавитационного запаса ПЭН-1 составляет 0,30 и 0,46 МПа для прототипа А и В, соответственно. Эти значения превышают значение уставки по отключению ПЭН-1 по кавитационному срыву, а также не требуют введения дополнительных блокировок, что обеспечивает надежную работу КПП в режиме с отключением КЭН-2 без АВР.

### Список использованных сокращений

- ABWR – advanced boiling water reactor;
- BWR – boiling water reactor;
- CE – Combustion Engineering;
- ESBWR – economic simplified boiling water reactor;
- FWCS – feedwater-condensate system;
- FWP – feedwater pump;
- GE – General Electric;
- HPH – high-pressure heater;

ЕСР – electric condensate pump;  
NRC – nuclear regulation commission;  
PWR – pressurized water reactor;  
W – Westinghouse;  
АВР – автоматический ввод резерва;  
АЭС – атомная электрическая станция;  
БУСМ – быстрое управляемое снижение мощности;  
ГПК – главный паровой коллектор;  
ГРЭС – государственная районная электрическая станция;  
КГП – конденсат греющего пара;  
КПТ – конденсатно-питательный тракт;  
КСБ – конденсато-сепаратосброник ПНД-4 и сепаратора СПП;  
КЭН – конденсатный электронасос;  
ПВД – подогреватель высокого давления;  
ПГ – парогенератор;  
ПГТН – питательный насос с гидроприводом;  
ПЭН – питательный электронасос;  
РК – регулирующий клапан;  
РУ – реакторная установка;  
САОР – система аварийного охлаждения реактора;  
САРЗ – система автоматического регулирования и защиты турбины;  
СКЭН – насос закачки дренажа КСБ в конденсатный тракт;  
СППВ – смешивающий подогреватель питательной воды высокого давления;  
ТПН – турбопитательный насос;  
ТЭС – тепловая электрическая станция;  
ЦВД – цилиндр высокого давления.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рачков В.И., Сорокин А.П., Жуков А.В. Теплогидравлические исследования жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. №1. С. 121–136.
- [2] Алексахин Р.М., Спирин Е.В., Соломатин В.М., Спиридонов С.И. Некоторые экологические аспекты сооружения опытно-демонстративного энергокомплекса в проекте «Прорыв» // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 6. С. 312–318.
- [3] Лемехов В.В., Саркулов М.К. Пассивные элементы безопасности для реакторных установок со свинцовым теплоносителем // Энергетик. 2017. №1. С. 8–11.
- [4] Семченков А.А., Чеков М.Е., Васильев С.В., Кузьминов Ю.В. Парогенератор РУ БРЕСТ-ОД-300: Расчетно-экспериментальное обоснование // Вопросы атомной науки и техники. Обеспечение безопасности АЭС. 2016. № 36. С. 33–37.
- [5] Блохина А.Н., Лякишев С.Л., Зубченко А.С. Вертикальные парогенераторы отечественных и зарубежных реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем // Тяжелое машиностроение. 2016. № 7–8. С. 21–28.
- [6] Валамин А.Е., Култышев А.Ю., Шибяев Т.Л., Гольдберг А.А., Степанов М.Ю. Деаэрационная и бездеаэрационная тепловые схемы паротурбинных установок с турбинами Т 250/300-23.5 // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 27–30.



- [7] **Тарасов Е.В., Жинов А.А.** Оптимизация бездеаэратоной тепловой схемы паротурбинной установки с теплообменными аппаратами смешивающего типа // Электронный журнал: наука, техника и образование. № 2 (12) 2017. С. 56–63.
- [8] 14-Year Cleanup at Three Mile Island Concludes // NY Times, 1993, August 15.
- [9] ESBWR design control document. Rev. 10. – Tier 2 Chapter 10 Steam and Power Conversion System – USA.: GE, 2011.
- [10] Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19 – Tier 2 Chapter 10 – Steam and Power Conversion System – USA.: W, 2011.
- [11] Palo Verde Nuclear Generating Station. Updated FSAR. Heat balance at guaranteed power. Revision 19. – USA.: Palo Verde Nuclear Generating Station, 2017.
- [12] Surry 1 & 2 heat balance diagram 2451.6 MWt load. – USA.: Virginia Power Company, 1985.
- [13] **Авруцкий Г.Д. и др.** Опыт эксплуатации бездеаэраторной тепловой схемы блока 330 МВт ст. № 3 Каширской ГРЭС // Электрические станции. № 6. 2012. С. 22–26.
- [14] **Туркин А.Д. и др.** Исследование работы питательных насосов бездеаэраторной тепловой схемы турбоустановки К-300-240 ЛМЗ // Электрические станции. № 12. 1983.
- [15] **Ефимочкин Г.И.** Бездеаэраторные схемы паротурбинных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВ Алексей Валентинович** – инженер 3-й категории, ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова", без степени.

E-mail: alex-origami@yandex.ru

**ФЕДОРОВИЧ Евгений Данилович** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: efed1@yandex.ru

**КУЛАКОВ Егор Николаевич** – инженер 3-й категории, ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова", без степени.

E-mail: KulakovEN@ckti.ru

**ДЕНИСОВА Ирина Борисовна** – студент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: vol4atka67@list.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 11.02.2021

#### REFERENCES

- [1] **V.I. Rachkov, A.P. Sorokin, A.V. Zhukov**, Thermal hydraulic studies of liquid metal coolant in nuclear power facilities. High Temperature, 56 (1) (2018) 121–136.
- [2] **R.M. Aleksakhin, Ye.V. Spirin, V.M. Solomatin, S.I. Spiridonov**, Environmental aspects of a pilot power complex in project breakthrough. Atomic Energy, 120 (6) (2016) 312–318.
- [3] **V.V. Lemekhov, M.K. Sarkulov**, Passive safety components for lead-cooled reactor facilities // Energetik, 1 (2017) 8–11.

- [4] A.A. Semchenkov, M.Ye. Chekov, S.V. Vasilyev, Yu.V. Kuzminov, Steam generator RF BREST-OD-300: Calculation and experimental justification, *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Obespecheniye bezopasnosti AES*, 36 (2016) 33–37.
- [5] A.N. Blokhina, S.L. Lyakishev, A.S. Zubchenko, Vertical steam generators of domestic and foreign reactor plants with liquid-metal coolant. *Heavy engineering*, 7–8 (2016) 21–28.
- [6] A.Ye. Valamin, A.Yu. Kultyshev, T.L. Shibayev, A.A. Goldberg, M.Yu. Stepanov, Deaerator and deaeratorless thermal diagrams of steam turbine plants with T 250 / 300-23.5 turbines, *Teploenergetika*, 11 (2016) 27–30.
- [7] Ye.V. Tarasov, A.A. Zhinov, Optimization of the thermal scheme of a steam turbine plant without the deaerator with mixing-type heat exchanger. *Electronic journal: science, technology and education*, 2 (12) (2017) 56–63.
- [8] 14-Year Cleanup at Three Mile Island Concludes, *NY Times*, August 15, 1993.
- [9] ESBWR design control document. Rev. 10, Tier 2 Chapter 10 Steam and Power Conversion System, USA, GE, 2011.
- [10] Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19, Tier 2 Chapter 10, Steam and Power Conversion System, USA, W, 2011.
- [11] Palo Verde Nuclear Generating Station. Updated FSAR. Heat balance at guaranteed power. Revision 19, USA, Palo Verde Nuclear Generating Station, 2017.
- [12] Surry 1 & 2 heat balance diagram 2451.6 MWt load, USA, Virginia Power Company, 1985.
- [13] G.D. Avrutskiy and other, Operating experience of unit 3 of 330 MW absence of deaerator thermal scheme at kashira GRES, *Electrical stations*. 6 (2012) 22–26.
- [14] A.D. Turkin and other, Issledovaniye raboty pitatelnykh nasosov bezdeaeratornoy teplovoy skhemy turbostanovki K-300-240 LMZ [Investigation of the operation of feed pumps of the deaerator-free thermal circuit of the K-300-240 LMZ turbine unit], *Electrical stations*. 12 (1983).
- [15] G.I. Yefimochkin, Deaeratorless schemes of steam turbine plants, Moscow, Energoatomizdat, 1989.

## THE AUTHORS

**POPOV Aleksey V.** – *Joint-Stock Company "I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment"*.  
E-mail: alex-origami@yandex.ru

**FEDOROVICH Evgeniy D.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: efed1@yandex.ru

**KULAKOV Egor N.** – *Joint-Stock Company "I.I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment"*.  
E-mail: KulakovEN@ckti.ru

**DENISOVA Irina B.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: vol4atka67@list.ru

**Received: 11.02.2021**