

УДК 51-74

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.024](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.024)

## Математическое моделирование сложных технологических систем методом конечных элементов

С.В. Яуров<sup>1</sup>, А.Д. Данилов<sup>1</sup>, К.Ю. Гусев<sup>1</sup>, И.Н. Гусев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*«Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация*

**Резюме.** Метод конечных элементов известен достаточно давно, однако его активное применение в направлении моделирования физических процессов началось вскоре после развития современных компьютерных машин. Одним из достоинств подобного моделирования является сокращение временных и финансовых затрат по сравнению с классическими экспериментами. В работе представлены результаты гидравлического расчета проектного режима работы сложной технологической системы методом конечных элементов. Расчет выполнялся с использованием теплогидравлического модуля CFX программного комплекса Ansys. При этом в составе расчетной области была применена модель пористого тела в качестве альтернативы прямому моделированию устройств системы со сложной конструкцией. Объектом моделирования выступила система подпитки градирен энергоблока № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. Тестовый (верификационный) расчет показал приемлемое расхождение с реальными параметрами системы (в пределах 15 %). По результатам расчетного анализа выявлено оптимальное количество и комбинация постоянно работающих насосов в системе, при которых достигается увеличение расхода основной охлаждающей воды на 30÷40 %, что, в свою очередь, позволит снизить накопления карбоната кальция на основных конструктивных элементах градирен. Модель пористого тела может быть применена как для прогнозирования режимов работы оборудования сложной конструкции индивидуально, так и в составе технологических систем.

**Ключевые слова:** сложные технологические системы, продувка, эксплуатация, основная охлаждающая вода, градирня, водно-химический режим, модель пористого тела, метод конечных объемов.

**Для цитирования:** Яуров С.В., Данилов А.Д., Гусев К.Ю., Гусев И.Н. Математическое моделирование сложных технологических систем методом конечных элементов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1371> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.024

## Mathematical modeling of composite technological systems by the finite element method

S.V. Yaurov<sup>1</sup>, A.D. Danilov<sup>1</sup>, K.Y. Gusev<sup>1</sup>, I.N. Gusev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation*

<sup>2</sup>*The Branch of the Rosenergoatom, JSC Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, the Russian Federation*

**Abstract.** The finite element method has been known for a long time, but its active application for modeling physical processes began shortly after the development of modern computer machines. One of the advantages of such modeling is the reduction of time and financial costs compared to conventional experiments. The paper presents the results of hydraulic calculation of the design mode of a complex technological system operation by the finite element method. The calculation was performed using the

thermal hydraulic CFX module of Ansys software package. At the same time, as part of the computational domain, a porous body model was employed as an alternative to direct modeling of system devices with a complex design. The object of the simulation was the cooling tower recharge system of power unit No. 1, 2 of Novovoronezh NPP-2. The test (verification) calculation showed an acceptable discrepancy with the real parameters of the system (within 15 %). According to the results of the computational analysis, the optimal number and combination of constantly operating pumps in the system were identified which achieved an increase in the consumption of the main cooling water by 30-40 % which, in turn, will reduce the accumulation of calcium carbonate on the main structural elements of cooling towers. The porous body model can be used both to predict the operating modes of equipment with complex design individually and as part of technological systems.

**Keywords:** complex technological systems, purging, operation, main cooling water, cooling tower, water chemistry specifications, porous body model, finite volume method.

**For citation:** Yaurov S.V., Gusev I.N., Danilov A.D., Gusev K.Yu. Mathematical modeling of composite technological systems by the finite element method. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1371> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.024 (In Russ.).

## Введение

Как правило, одним из достоверных подходов к подтверждению расчетных/предполагаемых характеристик оборудования и параметров технологических и гидравлических систем является проведение экспериментов/испытаний на полномасштабных стендах. Данный подход достаточно ресурсозатратный, как с точки зрения капиталовложений, так и с точки зрения временных промежутков. В качестве альтернативы эмпирическим и полуэмпирическим методикам существуют подходы, в основе которых лежит механика сплошных сред, CFD-методы, в которых с помощью численных методов решается система уравнений Навье-Стокса или Рейнольдса [1-4].

В данной работе в качестве объекта математического моделирования выбрана система оборотного водоснабжения энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2, спроектированная по замкнутой схеме водоснабжения с башенной испарительной градирней на естественной тяге с противоточной схемой движения охлаждаемой воды и воздуха. Для восполнения потерь в качестве подпиточной воды используется вода р. Дон [5]. Указанная технологическая система является достаточно сложной, как с точки зрения конструкции входящего в него оборудования, так и с точки зрения физических характеристик. Натурное моделирование режимов работы такой системы нецелесообразно, а прямое численное моделирование всех элементов весьма трудоемкое. С целью сокращения затрат времени при моделировании режимов работы системы, авторами было принято решение использовать в составе расчетной модели модель пористого тела для замены особо сложного оборудования. Применение модели пористого тела сводится к определению гидравлического сопротивления, создаваемого особо сложным оборудованием при работе технологической системы. Данный подход актуален в случаях, когда требуется провести комплексную оценку работы сложной технологической системы и спрогнозировать различные режимы работы.

С практической точки зрения, расчет режимов работы системы оборотного водоснабжения АЭС позволит спрогнозировать допустимый запас по увеличению расходов подпиточной воды за счет увеличения количества постоянно работающих насосов, не прибегая к дорогостоящей модернизации системы.

Экономичность и надежность работы АЭС в значительной мере зависит от качества воды, используемой для охлаждения конденсаторов турбины. Вода содержит растворенные коллоидные и грубодисперсные вещества, а также растительные и животные организмы [6-9].

Загрязнение оборудования минеральными отложениями, прежде всего трубок конденсаторов турбины и оросителя градирен, приводит к снижению экономичности работы блока. Карбонатные отложения на поверхности оросителя градирни существенно снижают охлаждающую способность градирни, увеличивают нагрузку на несущие конструкции [10].

Одним из способов предотвращения выпадения карбоната кальция является продувка системы охлаждения. Сущность способа заключается в сбросе части оборотной воды из системы охлаждения к соответствующей подпитке ее свежей добавочной водой. Продувкой можно регулировать степень упаривания воды в системе и при соответствующей карбонатной жесткости добавочной воды обеспечить безнакипный режим [10-13].

### Материалы и методы

Система подпитки основной охлаждающей воды предназначена для восполнения потерь (испарение, унос, продувка) из системы основной охлаждающей воды и системы охлаждающей воды неотчетственных потребителей, а также для подачи воды для общестанционных потребителей промплощадки (химводоочистки, восстановления противопожарного запаса воды в резервуарах, полив).

Вода из р. Дон поступает в здание насосной, прокачивается через фильтры, находящиеся в камере переключений, и направляется на градирню блока № 1 и № 2 Нововоронежской АЭС-2 по отдельным трубопроводам [14].

Состав системы подпитки основной охлаждающей воды:

- четыре одинаковых подпиточных центробежных насоса (№ 41, 42, 43, 44; каждый  $Q=1343,6$  л/сек;  $H=62$  м);
- трубопроводы с арматурой;
- 1 фильтрующая установка (фильтр предочистки);
- 2 фильтрующие установки (фильтры тонкой очистки);
- трубопроводы с арматурой (в том числе трубопроводы от камеры переключений до градирен блока № 1, 2).

Технологическая схема трубопроводов подпитки градирен представлена на Рисунке 1.

Вода для подпитки градирен поступает из р. Дон на всас насосов № 41, 42, 43, 44 по трубопроводам Ду1000, затем насосами перекачивается в напорный коллектор (в камеру переключений), там проходит через фильтр предочистки (Ду1200), затем подается на два параллельно работающих фильтра тонкой очистки (Ду1200), после чего по двум трубопроводам перекачивается в градирни № 1 и № 2.

Объектом моделирования будет трассировка трубопроводов в камере переключений совместно с фильтрами предочистки и тонкой очистки.

Проектом предусмотрено, что в режиме нормальной эксплуатации (при работе двух энергоблоков) в работе находится 2 подпиточных насоса и 2 в резерве.

Контролируемые параметры в системе при проектном режиме работы указаны в Таблице 1.

Цель выполнения математического моделирования: с помощью CFD-кода (методом конечных элементов) выполнить расчетную оценку возможности увеличения расхода системы подпитки основной охлаждающей воды 1-го, 2-го блока Нововоронежской АЭС-2 за счет увеличения количества постоянно работающих штатных насосов системы.

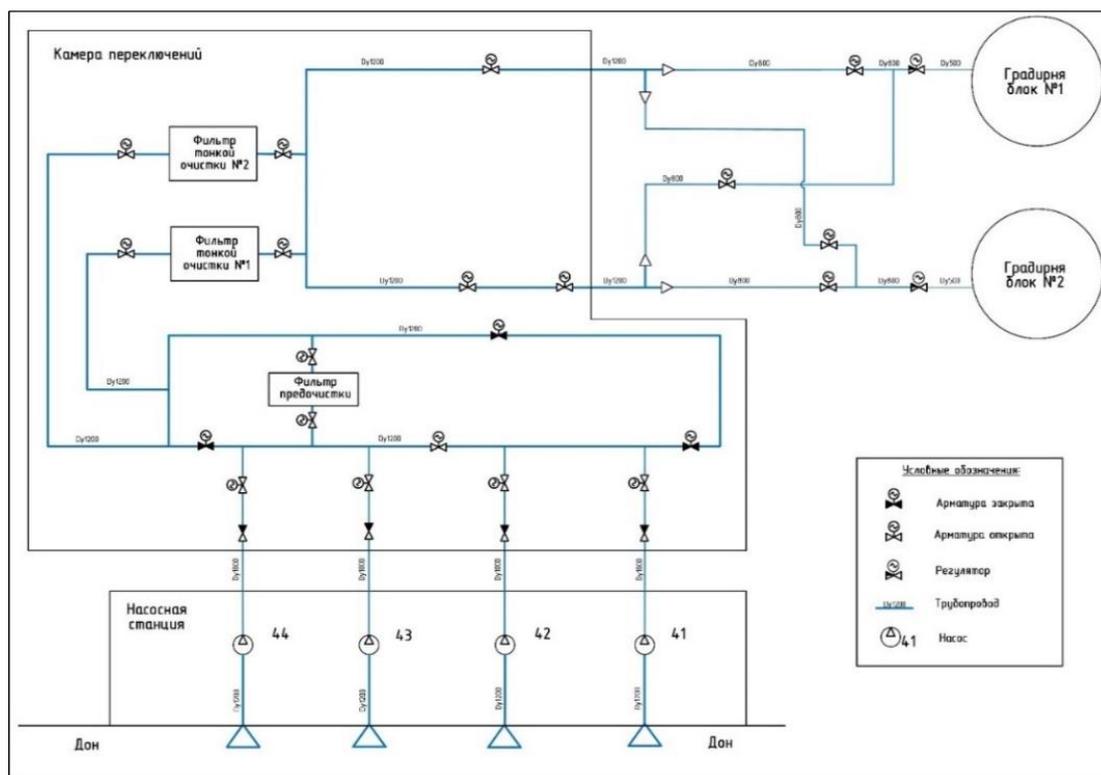


Рисунок 1 – Технологическая схема трубопроводов подпитки градирен  
Figure 1 – Flow diagram of cooling tower recharge pipelines

Таблица 1 – Контролируемые параметры в системе  
Table 1 – Controlled parameters in the system

| Параметр   | Текущее значение |
|--|------------------|
| P1 – давление на напоре насосов системы подпитки, МПа; | 0,62             |
| P2 – давление перед фильтром предочистки, МПа;         | 0,55             |
| P3 – давление после фильтра предочистки, МПа;          | 0,46             |
| P4 – давление перед фильтром тонкой очистки № 1, МПа;  | 0,41             |
| P5 – давление после фильтра тонкой очистки № 1, МПа;   | 0,4              |
| P6 – давление перед фильтром тонкой очистки № 2, МПа;  | 0,41             |
| P7 – давление после фильтра тонкой очистки № 2, МПа;   | 0,4              |
| P8 – давление на градирню блока № 6, МПа;              | 0,4              |
| P9 – давление на градирню блока № 7, МПа;              | 0,4              |
| G – общий расход на подпитку градирен, л/сек.          | 2613             |

Для определения расхода подпиточной воды на градирни при работе более двух насосов в системе необходимо выполнить:

- 1) построение напорно-расходной характеристики для одного, двух, трех, четырех работающих в параллель насосов;
- 2) расчет и построение гидравлической характеристики системы;
- 3) определение рабочего давления на напорном коллекторе при работе двух, трех, четырех насосов по напорно-расходной и гидравлической характеристикам;
- 4) моделирование режимов работы системы подпитки градирен в CFD-коде.

Построение напорно-расходной характеристики для одного, двух, трех, четырех работающих в параллель насосов. При параллельной работе насосов расходная

характеристика увеличивается (суммируется), а напорная характеристика остается неизменной. На Рисунке 2 представлены напорно-расходные характеристики для одного, двух, трех, четырех параллельно работающих насосов.

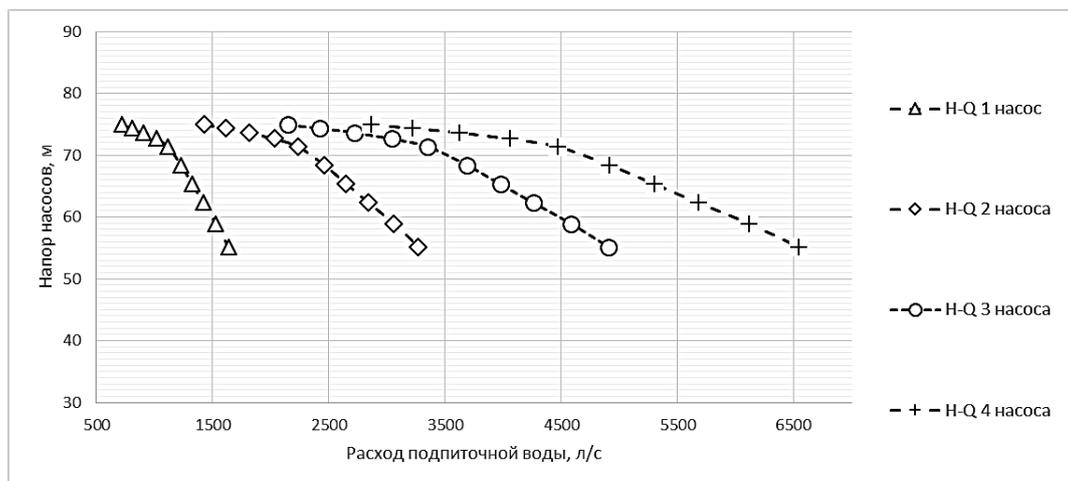


Рисунок 2 – Напорно-расходная характеристика одного, двух, трех, четырех параллельно работающих насосов

Figure 2 – Head and flow rate characteristics of one, two, three, four parallel pumps

*Методика оценки гидравлической характеристики системы.* Методика заключается в следующем:

1. Определение скорости потока среды для всего диапазона расхода насосов по формуле [15]:

$$w(Q) = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}, \quad (1)$$

где

$w$  – скорость потока среды в трубопроводе,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

$Q$  – объемный расход среды,  $\frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ ;

$d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м.

2. Определение значения критерия Рейнольдса [15]:

$$Re = \frac{w(Q) d_{\text{вн}} \rho}{\mu}, \quad (2)$$

где

$w$  – скорость потока среды в трубопроводе,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

$d_{\text{вн}}$  – диаметр трубопровода, м;

$\rho$  – плотность среды,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$\mu$  – вязкость среды, Па · с.

3. По формуле Блазиуса находим коэффициент трения [15]:

$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}}. \quad (3)$$

4. Потеря напора на трение для выбранного значения расхода (скорости) находится по формуле Дарси-Вейсбаха [10]:

$$h_{\text{тр}}(w) = \lambda \frac{l}{d_{\text{вн}}} \frac{w^2}{2g}, \quad (4)$$

где

$\lambda$  – коэффициент трения;  
 $l$  – длина трубопровода, м;  
 $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  
 $w$  – скорость потока среды, м/с;  
 $g$  – ускорение свободного падения м·с<sup>-2</sup>.

5. Напор, который требуется затратить на перекачку воды от р. Дон до градирен и на преодоление разницы давлений для проектной работы системы (в работе 2 насоса из 4-х):

$$H_3 = H_{\text{напора}} - h_{\text{тр}}(\text{проектное}) \quad (5)$$

Данная величина не зависит от скорости движения потока и является постоянной для любого количества работающих насосов в системе подпитки градирен, в дальнейшем данное значение нам понадобится для определения гидравлической характеристики всей системы подпитки градирен [15].

6. Общая потеря напора  $H(w)$ :

$$H(w) = H_3 + h_{\text{тр}}(w). \quad (6)$$

*Определение рабочего давления на напорном коллекторе при работе одного, двух, трех, четырех насосов по напорно-расходной и гидравлической характеристикам.* Рабочее давление на напорном коллекторе и общий расход от насосов системы при различном количестве работающих насосов определяется с помощью совмещения гидравлической характеристики системы с напорно-расходной характеристикой насосов.

Для определения предполагаемого давления и расхода в системе необходимо определить точки пересечения напорно-расходной и гидравлической характеристики системы. (Рисунок 4).

*Математическое моделирование режимов работы системы подпитки градирен.* С целью определения оптимального сочетания комбинаций работающих насосов с технико-экономической точки зрения, выполняется построение 3D-модели трубопроводов системы подпитки градирен в камере переключений (Рисунок 3).

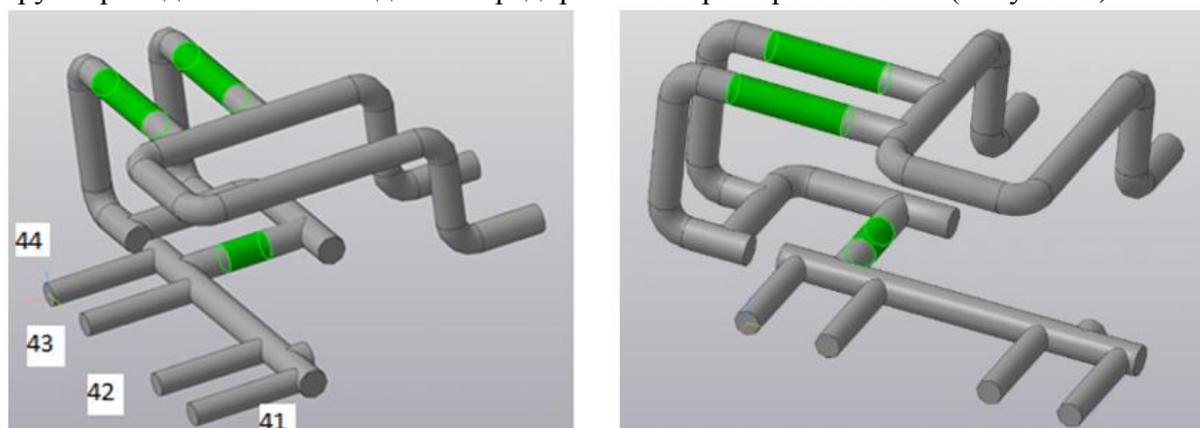


Рисунок 3 – 3D-модель трассировки трубопроводов в камере переключений  
 Figure 3 – 3D model of pipeline tracing in the switching chamber

Расчетная область разбивалась на элементы (метод конечных элементов), в которых выполнялось решение уравнения Навье-Стокса.

Далее выполняется серия расчетов для следующих комбинаций количества работающих насосов:

- 1) в работе насосы № 44, 42 (2 насоса);

- 2) в работе насосы № 44, 42, 41 (3 насоса);
- 3) в работе насосы № 44, 43, 42 (3 насоса);
- 4) в работе насосы: № 44, 43, 42, 41 (4 насоса).

Для упрощения расчетов и моделирования фильтры тонкой очистки и фильтр предочистки, имеющие сложную сеточную конструкцию, заменены моделями пористого тела. Модель пористого тела позволяет выполнять расчет систем со сложными элементами, имитируя их гидравлические сопротивления. Пористое тело заменяется сплошной средой с эквивалентным гидравлическим сопротивлением. Подробно проточная часть пористой вставки не моделируется. Определение приведенных коэффициентов сопротивления трению в продольном и поперечном направлении для фильтров выполнено по следующим зависимостям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p_3 &= \lambda \frac{\Delta \ell}{d_r} \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2 \\ \frac{\Delta p}{\Delta \ell} &= CR \cdot U^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow CR = \frac{\lambda}{d_r} \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2, \quad (7)$$

$$CR_{\parallel} = \frac{0,3164 \cdot \eta^{0,25}}{U^{0,25} \cdot d_r^{0,25} \cdot \rho^{0,25}} \cdot d_r^{-1} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2 = \frac{0,3164}{2} \cdot \eta^{0,25} \cdot \rho^{0,75} \cdot U^{-0,25} \cdot d_r^{-1,25} \cdot \varepsilon^{-2}, \quad (8)$$

$$CR_{\perp} = \frac{\lambda_{\perp}}{d_r} \frac{\rho U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2. \quad (9)$$

Чтобы оценить, что расчетная модель адекватно описывает течение воды в трубопроводах и в пористых телах, проводится тестовый расчет для текущего (реального) состояния системы (2 насоса в работе из четырех).

### Результаты

*Определение рабочего давления на напорном коллекторе при работе двух, трех, четырех насосов по напорно-расходной и гидравлической характеристикам.* Для двух работающих насосов давление в напорном коллекторе составляет 63,2 м, расход воды 2613 л/с. Стоит отметить, что текущее (проектное) значение давления на напоре двух насосов и расхода воды в системе от двух насосов совпадает с расчетным.

Для трех работающих насосов давление в напорном коллекторе составит 69 м, расход воды 3650 л/с.

Для четырех работающих насосов давление в напорном коллекторе составит 72 м, расход воды 4200 л/с.

Совмещенная гидравлическая характеристика системы и напорно-расходная характеристика насосов представлена на Рисунке 4.

При подключении насосов параллельно ожидаемо увеличение давления на напоре и расхода; давление и расход, как правило, увеличиваются по нелинейной зависимости.

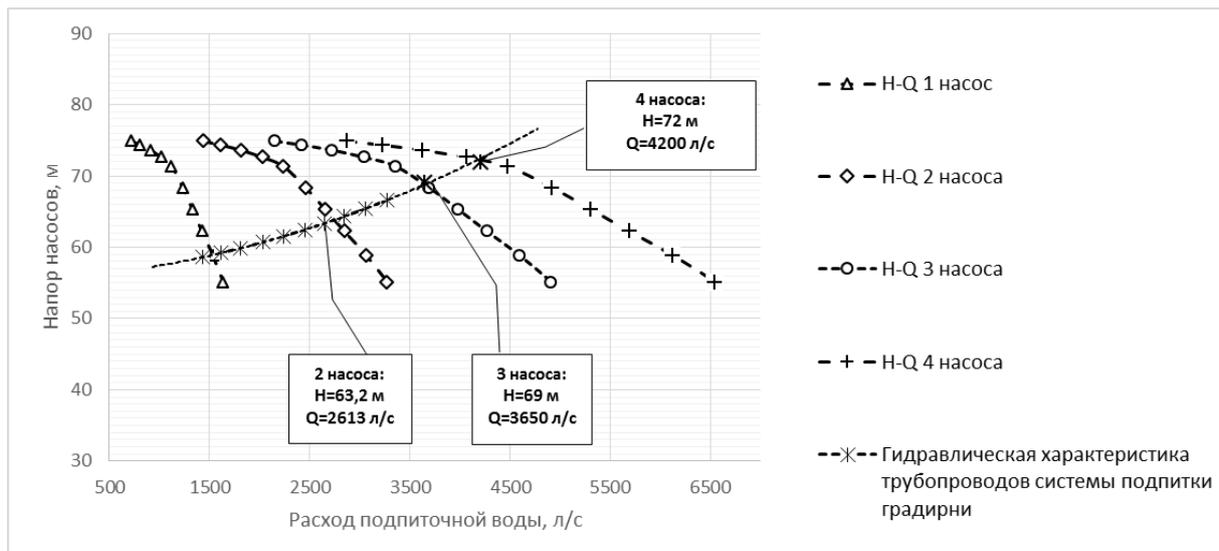


Рисунок 4 – Совмещенная гидравлическая характеристика системы и напорно-расходная характеристика насосов

Figure 4 – Combined hydraulic characteristics of the system and head and flow rate characteristics of pumps

*Математическое моделирование режимов работы системы подпитки градирен.*  
Результаты тестового расчета режимов работы системы подпитки градирен и сравнение с реальными параметрами в системе для работы насосов № 44, 42 представлены в Таблице 2.

Сравнительный анализ полученных данных и текущих параметров работы системы в режиме двух насосов показывает, что расчетная модель в полном объеме моделирует гидравлику трубопроводов для текущего режима работы системы. В дальнейшем полученные коэффициенты сопротивления для пористых тел, а также разработанная 3D-модель использованы для оценки параметров системы для трех, четырех работающих насосов.

Таблица 2 – Результаты тестового расчета режимов работы системы подпитки  
Table 2 – Test calculation results for operation modes of the recharge system

| Параметр   | Расчетное значение | Текущее значение |
|--|--------------------|------------------|
| P1 – давление на напоре насосов системы подпитки, МПа; | 0.62               | 0,62             |
| P2 – давление перед фильтром предочистки, МПа;         | 0.608              | 0,55             |
| P3 – давление после фильтра предочистки, МПа;          | 0.457              | 0,46             |
| P4 – давление перед фильтром тонкой очистки МПа;       | 0.45               | 0,41             |
| P5 – давление после фильтра тонкой очистки № 1, МПа;   | 0.405              | 0,4              |
| P6 – давление перед фильтром тонкой очистки № 2, МПа;  | 0.45               | 0,41             |
| P7 – давление после фильтра тонкой очистки № 2, МПа;   | 0.406              | 0,40             |
| P8 – давление на градирню блока № 6, МПа;              | 0.404              | 0,40             |
| P9 – давление на градирню блока № 7, МПа;              | 0.405              | 0,40             |
| G – общий расход на подпитку градирен, л/сек.          | 2613               | 2613             |

На Рисунке 5 представлено поле скорости воды в напорном коллекторе системы, полученное по результатам тестового (верификационного) расчета. Исходя из данных Рисунка 5 и Таблицы 2, можно сделать вывод, что основной вклад в общий расход

системы подпитки в режиме работы двух насосов, вносит насос № 44 (№ 44 – 1833 л/сек; № 42 – 779.9 л/сек).

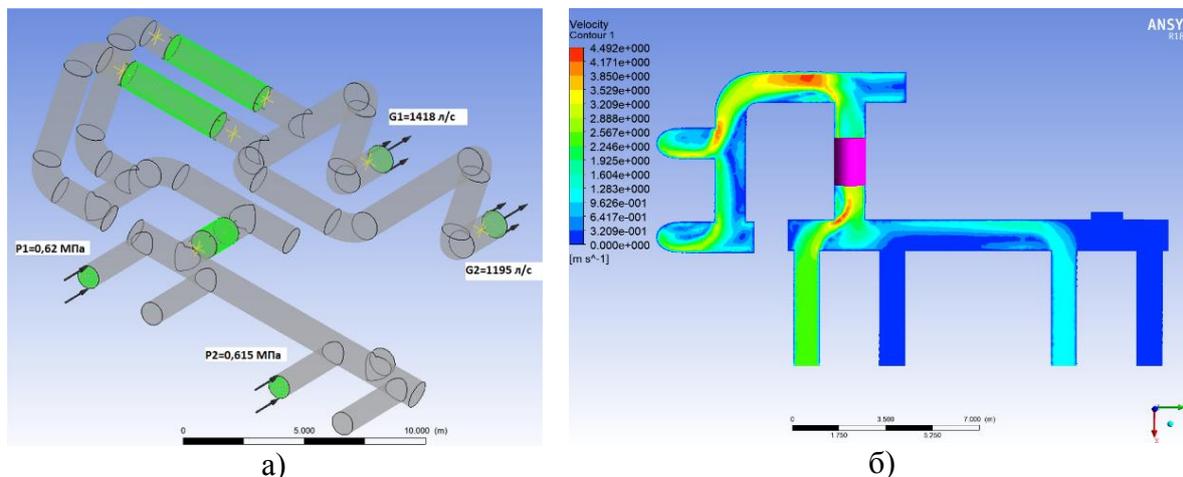


Рисунок 5 – Результаты тестового (верификационного) расчета:

- а) граничные условия для проведения расчета в режиме работы насосов № 44, 42;
- б) поле скорости воды в напорном коллекторе системы (вид сверху).

Figure 5 – Test calculation results

- a) Boundary conditions for the calculation in the operating mode of pumps No. 44, 42;
- b) Water velocity field in the pressure collector of the system (top view).

Режим «В работе насосы № 42, 43, 44»: граничные условия и результаты расчета при работе насосов № 44, 43, 42 представлены на Рисунке 6.

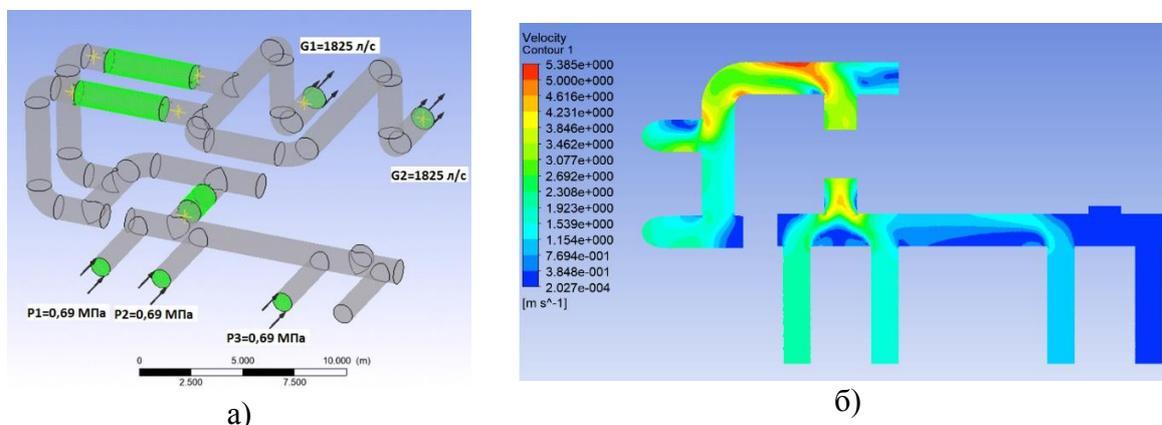


Рисунок 6 – Результаты расчета режима «В работе насосы № 42, 43, 44»:

- а) граничные условия для проведения расчета в режиме работы насосов № 44, 43, 42;
- б) поле скорости воды в напорном коллекторе системы (вид сверху).

Figure 6 – Results of "Pumps No. 42, 43, 44 in operation" mode

- a) Boundary conditions for the calculation in the operating mode of pumps No. 44, 43, 42;
- b) Water velocity field in the pressure collector of the system (top view).

Исходя из результатов расчетов на Рисунке 6, делаем вывод, что основной вклад в общий расход системы подпитки в режиме работы трех насосов вносит насос № 44 (№ 44 – 1575 л/сек; № 43 – 1270 л/сек, № 42 – 805,7 л/сек).

Режим «В работе насосы № 41, 42, 44»: граничные условия и результаты расчета при работе насосов № 41, 42, 44 представлены на Рисунке 7. Основной вклад в общий расход системы подпитки для данного режима работы вносят насосы № 42, 44 (№ 44 –

1406 л/сек; № 42 – 1415 л/сек, № 41 – 829 л/сек). Данная комбинация включенных насосов более предпочтительна по сравнению с режимом «В работе насосы № 42, 43, 44».

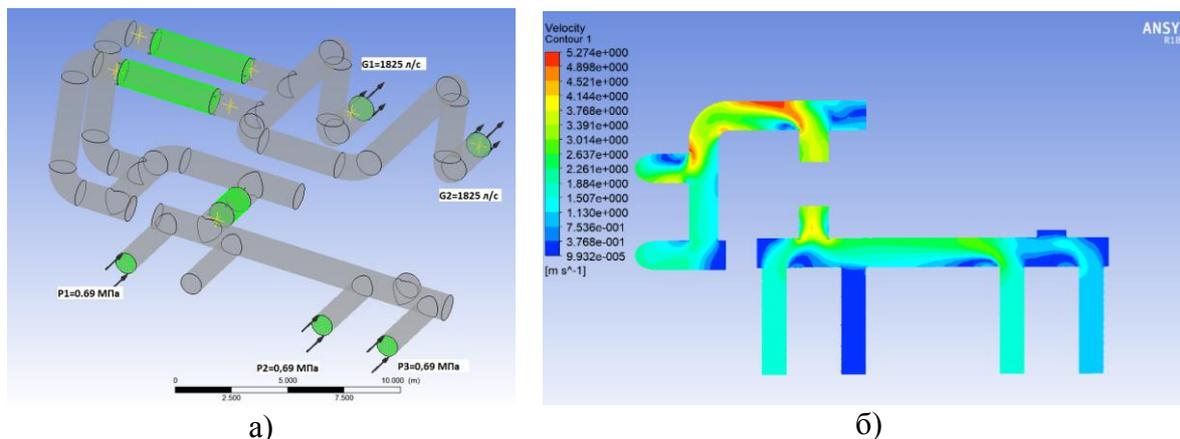


Рисунок 7 – Результаты расчета режима «В работе насосы № 41, 42, 44»

- а) граничные условия для проведения расчета в режиме работы насосов № 41, 42, 44;  
б) поле скорости воды в напорном коллекторе системы (вид сверху).

Figure 7 – Results of "Pumps No. 41, 42, 44 in operation" mode

- а) Boundary conditions for the calculation in the operating mode of pumps No. 41, 42, 44;  
б) Water velocity field in the pressure collector of the system (top view).

Режим «В работе насосы № 41, 42, 43, 44»: граничные условия и результаты расчета при работе насосов № 41, 42, 43, 44 представлены на Рисунке 8. Основной вклад в общий расход системы подпитки для данного режима работы вносят насосы № 42, 44 (№ 44 – 1776 л/сек; № 43 – 1377 л/сек; № 42 – 628,8 л/сек, № 41 – 363,9 л/сек). Данный режим работы нежелателен ввиду малого расхода со стороны насосов № 42, 41.

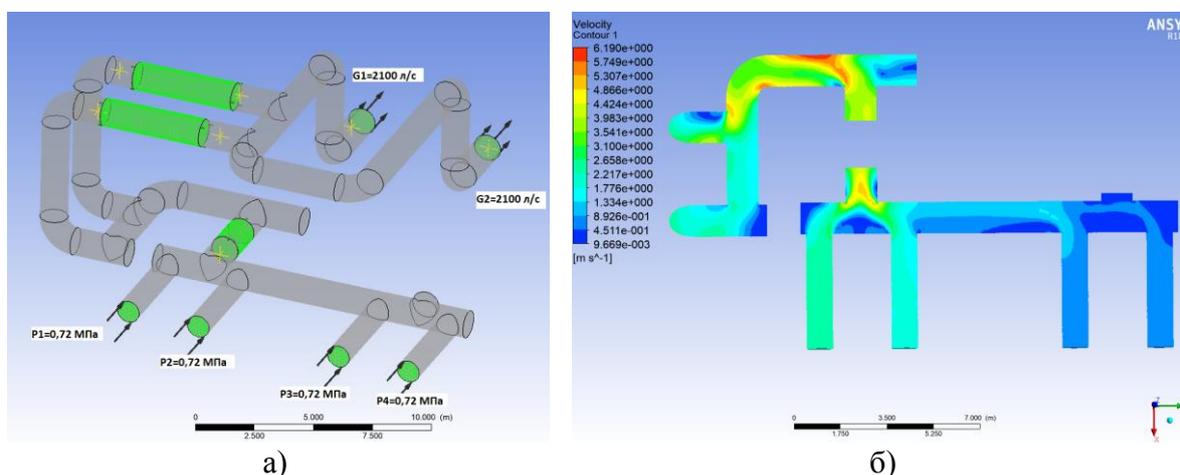


Рисунок 8 – Результаты расчета режима «В работе насосы № 41, 42, 43, 44»:

- а) граничные условия для проведения расчета в режиме работы насосов № 41, 42, 43, 44;  
б) поле скорости воды в напорном коллекторе системы (вид сверху).

Figure 8 – Results of "Pumps No. 41, 42, 43, 44 in operation" mode

- а) Boundary conditions for the calculation in the operating mode of pumps No. 41, 42, 43, 44;  
б) Water velocity field in the pressure collector of the system (top view).

Обобщенные результаты расчета для всех режимов работы системы представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Обобщенные результаты расчета  
Table 3 – Generalized calculation results

| Параметр   | Расчетное значение |                   |                   |                       | Текущее значение |
|--|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|------------------|
|  | 2 насоса           | 3 насоса          | 3 насоса          | 4 насоса              | 2 насоса         |
| <b>В работе насосы №</b>                               | <b>44, 42</b>      | <b>44, 43, 42</b> | <b>41, 42, 44</b> | <b>41, 42, 43, 44</b> | <b>44, 42</b>    |
| P1 – давление на напоре насосов системы подпитки, МПа; | 0.62               | 0.69              | <b>0.69</b>       | 0.72                  | 0,62             |
| P2 – давление перед фильтром предочистки, МПа;         | 0.608              | 0.6789            | <b>0.6787</b>     | 0.7055                | 0,55             |
| P3 – давление после фильтра предочистки, МПа;          | 0.457              | 0.4847            | <b>0.4998</b>     | 0.4463                | 0,46             |
| P4 – давление перед фильтром тонкой очистки МПа;       | 0.45               | 0.4741            | <b>0.4903</b>     | 0.4322                | 0,41             |
| P5 – давление после фильтра тонкой очистки №1, МПа;    | 0.405              | 0.3783            | <b>0.3923</b>     | 0.3083                | 0,4              |
| P6 – давление перед фильтром тонкой очистки №2, МПа;   | 0.45               | 0.4745            | <b>0.4907</b>     | 0.4327                | 0,41             |
| P7 – давление после фильтра тонкой очистки №2, МПа;    | 0.406              | 0.3780            | <b>0.3916</b>     | 0.3079                | 0,40             |
| P8 – давление на градирию блока № 6, МПа;              | 0.404              | 0.3735            | <b>0.3875</b>     | 0.3020                | 0,4              |
| P9 – давление на градирию блока № 7, МПа;              | 0.405              | 0.3758            | <b>0.3898</b>     | 0.3050                | 0,4              |
| G – общий расход на подпитку градирен, л/сек.          | 2613               | 3650              | <b>3650</b>       | 4200                  | 2613             |

### Заключение

1. Разработанная математическая модель позволила определить допустимые режимы работы сложной технологической системы, при этом использовалась модель пористого тела в составе системы в качестве замены оборудования сложной конструкции.

2. Тестовый (верификационный) расчет реального режима работы системы показал расхождение с экспериментальными данными в пределах 15 %, данное расхождение обусловлено использованием в составе расчетной модели элементов пористого тела. Выявленные расхождения могут быть связаны с необходимостью разработки уточняющей модели пористого тела, основные параметры которого будут учитывать особенности конструкции сложного оборудования (например, теплообменный аппарат, фильтр сетчатый, задвижка-регулятор и т. д.). Основные затруднения в применении модели пористого тела заключаются в определении

приведенных коэффициентов сопротивления трению в продольном и поперечном направлении.

3. С учетом полученных расхождений представленный подход в моделировании сложных технологических систем методом конечных элементов с применением модели пористого тела является приемлемым, особенно для ситуаций, когда необходимо выполнить комплексную оценку работы системы и спрогнозировать ее режимы работы.

4. Выполнение расчета позволило выяснить, что включение третьего насоса в системе подпитки градирен увеличит расход подпитки на 40 % (с 2613 л/сек до 3650 л/сек). Исходя из проведенного гидравлического расчета, оптимальное количество работающих насосов в системе возникает в режиме «В работе насосы № 41, 42, 44». Определен допустимый диапазон работающих насосов (от двух до трех), недопустимый режим работы системы: «В работе насосы № 41, 42, 43, 44».

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буряка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. *Инженерный анализ в Ansys Workbench*. Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-т; 2010. 271 с.
2. Ильин В.П. *Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений*. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики; 2000. 345 с.
3. Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013;17(5):45.
4. Снегирёв А.Ю. *Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие*. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та; 2009. 143 с.
5. Нововоронежская АЭС. Проект АЭС-2006. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (дата обращения 01.05.2023).
6. Абрамов Н.Н. *Водоснабжение: Учебник для вузов*. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат; 1982. 440 с.
7. Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П. и др. *Тепловые электрические станции. Учебник для вузов*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: «Издательский дом МЭИ»; 2007. 466 с.
8. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. *Водоподготовка в энергетике. Учебник*. 2-е изд. М.: МЭИ; 2006. 309 с.
9. Бункин В.И. *Обработка охлаждающей воды на тепловых электростанциях*. М.: Энергия; 1964. 161 с.
10. Боднар Ю.Ф. Оптимизация водно-химического режима оборотных систем охлаждения с градирнями. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2008;53(3):8–11.
11. Белоконова А.Ф. *Водно-химические режимы тепловых электростанций*. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ; 1985. 246 с.
12. РД 34.22.501-87 *Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке*.
13. РД 210.006-90 «*Правила технологического проектирования атомных станций (с реакторами ВВЭР)*». М.: Министерство атомной энергетики и промышленности СССР; 1990. 221 с.
14. Поваров В.П., Стацура Д.Б., Усачев Д.Е. Опыт эксплуатации и пути повышения эффективности работы системы технического водоснабжения энергоблоков № 1,2

Нововоронежской АЭС-2. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020;2:5–16. DOI: 10.26583/npe.2020.2.01.

15. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. *Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике*. М.: ИздАт; 2010. 776 с.

## REFERENCES

1. Buryaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E. *Engineering analysis in Ansys Workbench*. Samara, Publishing House of Samara State Technical University; 2010. 271 p. (In Russ.).
2. Ilyin V.P. *Methods of finite differences and finite volumes for elliptic equations*. Novosibirsk, Publishing House of the Institute of Mathematics; 2000. 345 p. (In Russ.).
3. Belova O.V., Volkov V.Yu., Skibin A.P., Nikolaeva A.V., Krutikov A.A., Chernyshev A.V. Methodological foundations of CFD calculations to support the design of pneumohydraulic systems. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii = Engineering Journal: Science and Innovation*. 2013;17(5):45. (In Russ.).
4. Snegirev A.Yu. *High-performance computing in technical physics. Numerical simulation of turbulent flows: a textbook*. Saint Petersburg, Publishing House of the Polytechnic University; 2009. 143 p. (In Russ.).
5. Novovoronezh NPP. NPP project-2006. URL: <http://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/f01/f01b5ca309dbda1917c112d6897c0959.pdf> (accessed 01.05.2023). (In Russ.).
6. Abramov N.N. *Water supply: Textbook for universities*. 3rd ed., reprint. and additional. Moscow, Stroyizdat; 1982; 440 p. (In Russ.).
7. Burov V. D. , Dorokhov E. V., Elizarov D. P., etc. *Thermal power stations. Textbook for universities*. 2nd ed., reprint. and additional. Moscow, Publishing house of MEI; 2007. 466 p. (In Russ.).
8. Kopylov A.S., Lavygin V.M., Ochkov V.F. *Water treatment in power engineering. Textbook*. 2nd ed. Moscow, MEI; 2006. 309 p. (In Russ.).
9. Bunkin V.I. *Cooling water treatment at thermal power plants*. Moscow, Energiya; 1964. 161 p. (In Russ.).
10. Bodnar Yu.F. Optimization of the water-chemical regime of circulating cooling systems with cooling towers. *Energy saving and water treatment*. 2008;53(3):8–11. (In Russ.).
11. Belokonova A.F. *Water-chemical regimes of thermal power plants*. Moscow, Energoatomizdat; 1985. 246 p. (In Russ.).
12. RD 34.22.501-87 *Guidelines for preventing the formation of mineral and organic deposits in turbine condensers and their cleaning*. (In Russ.).
13. RD 210.006-90 "Rules of technological design of nuclear power plants (with VVER reactors)". Moscow, Ministry of Atomic Energy and Industry of the USSR; 1990. 221 p. (In Russ.).
14. Povarov V.P., Statsura D.B., Usachev D.E. Operational experience and ways to improve the efficiency of the technical water supply system of power units No. 1,2 of Novovoronezh NPP-2. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika = News of universities. Nuclear power engineering*. 2020;2:5–16. DOI: 10.26583/npe.2020.2.01. (In Russ.).
15. Kirillov P.L., Bobkov V.P., Zhukov A.V., Yuryev Y.S. *Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power engineering*. Moscow, IzdAt; 2010. 776 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Яуров Сергей Васильевич**, аспирант, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [yaurovsv@gmail.com](mailto:yaurovsv@gmail.com)

**Sergey Vasilievich Yaurov**, Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Данилов Александр Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [danilov-ad@yandex.ru](mailto:danilov-ad@yandex.ru)

ORCID: [0000-0002-1534-5285](https://orcid.org/0000-0002-1534-5285)

**Aleksandr Dmitrievich Danilov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Гусев Константин Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [gusev\\_konstantin@mail.ru](mailto:gusev_konstantin@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-0517-5737](https://orcid.org/0000-0002-0517-5737)

**Konstantin Yurievich Gusev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

**Гусев Игорь Николаевич**, заместитель главного инженера по эксплуатации 4-очереди, АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Российская Федерация.

*e-mail:* [GusevIN@nvnpp1.rosenergoatom.ru](mailto:GusevIN@nvnpp1.rosenergoatom.ru)

**Igor Nilolaevich Gusev**, Deputy Chief Engineer for the Operation of the 4th Stage, the Branch of the Rosenergoatom, JSC Novovoronezh Nuclear Power Plant, Novovoronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 05.05.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 21.09.2023.*

*The article was submitted 05.05.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 21.09.2023.*