
**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)**

УДК 614.842

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ
В ПРОТИВОПОЖАРНОМ ВОДОСНАБЖЕНИИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

В. Б. БУБНОВ, Д. С. РЕПИН

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: kafppv@mail.ru

В работе рассмотрены способы управления насосными установками путем изменения гидравлических характеристик в системе «насосная станция – водопроводная сеть». Рассмотрена модель рабочих характеристик многонасосных систем в противопожарном водоснабжении при частотном регулировании подачи, а также при применении байпасирования и дроссельного регулирования на нагнетании. Предложены подходы к корректировке гидравлических характеристик для систем пожаротушения при использовании в качестве огнетушащей среды воды с добавками водорастворимых полимерных материалов. Разработаны программно-аппаратные комплексы для исследования рассматриваемых систем.

Предложенные модели составят основу для разработки рекомендаций по оптимизации режимов работы насосов (многонасосных групп), мероприятий по энергосбережению и повышению эффективности работы систем водяного пожаротушения.

Результаты, полученные в работе, представляют интерес для создания актуализированной научно-методической базы, которая будет включать в себя современные расчетные методики, практические рекомендации и способствовать проведению качественных проектных и экспертных работ в области обеспечения пожарной безопасности объектов защиты.

Ключевые слова: насос, противопожарное водоснабжение, водопроводная сеть, моделирование, напорно-расходная характеристика, оптимизация, энергосбережение.

**MATHEMATICAL DESCRIPTION OF OPERATING CHARACTERISTICS OF PUMPS
IN FIRE-FIGHTING WATER SUPPLY WITH VARIOUS REGULATION METHODS**

V. B. BUBNOV, D. S. REPIN

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: kafppv@mail.ru

The paper considers the methods of controlling pumping units by changing the hydraulic characteristics in the «pumping station – water supply network» system. The model of the operating characteristics of multi-pump systems in fire-fighting water supply with frequency regulation of the feed, as well as with the use of bypass and throttle regulation on the discharge is considered. Approaches to adjusting the hydraulic characteristics for fire extinguishing systems using water with additives of water-soluble polymeric materials as a fire extinguishing medium are proposed. Software and hardware complexes for studying the systems under consideration have been developed.

The proposed models will form the basis for developing recommendations for optimizing the operating modes of pumps (multi-pump groups), energy saving measures and increasing the efficiency of water fire extinguishing systems.

The results obtained in the work are of interest for creating an updated scientific and methodological base, which will include modern calculation methods, practical recommendations and contribute to the implementation of high-quality design, expert work in the field of ensuring fire safety of protected facilities.

Key words: pump, fire-fighting water supply, water supply network, modeling, pressure-flow characteristic, optimization, energy saving.

Насосы представляют собой важный элемент систем наружного и внутреннего противопожарного водоснабжения. Их применяют в системах водоснабжения внутри зданий и сооружений, в том числе в автоматических системах водяного пожаротушения, в наружном противопожарном водоснабжении объектов защиты, при подаче огнетушащей жидкости в различных насосно-рукавных системах [1, 2].

Характеристики насосов и водопроводной системы, в которой используются насосы, определяют положение рабочей точки. Важное условие энергоэффективного использования насосного оборудования – согласованная работа на водопроводную систему, когда рабочая точка находится в рабочем диапазоне характеристики насоса.

Целью работы является моделирование рабочих характеристик насосных систем с учетом различных способов регулирования работы насосов в противопожарном водоснабжении, что в дальнейшем позволит предложить мероприятия по энергосбережению и повышению эффективности работы систем водяного пожаротушения, обеспечить компьютерную поддержку решения оптимизационных задач для насосных систем.

Анализ практики эксплуатации насосных систем [3] показал наличие нескольких подходов к управлению их работой, регулированию подачи. Используются методы дросселирования и байпасирования на нагнетательной линии. В этом случае изменяется положение рабочей точки в системе «насосная станция-водопроводная сеть» благодаря изменению характеристики водопроводной сети. Значительное распространение получил такой метод регулирования подачи насосов, как частотное регулирование [4]. При данном методе регулирования изменяется рабочая характеристика насосов.

Одним из способов регулирования работы насосов является их совместная работа (последовательная или параллельная). В этом случае многонасосная станция подает жидкость в одну систему. Так, когда создаваемый одним насосом напор недостаточен (случаи перекачки воды на дальние расстояния, подачи в здания повышенной этажности) патрубков насоса (напорный) подключают к патрубку второго насоса (всасывающего), т.е. применяют последовательную работу насосов. Если необходимо увеличить подачу, совместно работает

группа насосов, которые напорными патрубками присоединены к общей схеме (параллельная работа), например подача большого количества воды для обеспечения работы лафетного ствола. Анализ подходов к математическому описанию многонасосных систем [5–8] позволил выявить существующие недостатки. Так, при осуществлении регулирования не учитывается влияние каждого насоса на рабочую характеристику и режим работы многонасосной системы. В работах [7, 8] предложены методики, заключающиеся в графическом сложении рабочих характеристик.

К изменению гидравлических характеристик также приводит добавление в поток воды при ее подаче на пожаротушение водорастворимых полимеров. Они могут быть эффективно использованы в системах водяного пожаротушения для снижения величины гидравлических сопротивлений, неизбежно возникающих при транспортировке огнетушащей жидкости и, как следствие, снижения энергетических затрат [9]. Поэтому при математическом описании таких систем необходимо учитывать влияние свойств воды с добавками полимера на гидравлические характеристики.

Интегрирование математических моделей насосов (многонасосных систем) и водопроводной сети представляется наиболее эффективным вариантом математического описания для решения задач снижения энергетических затрат.

Рассмотрим математическую модель многонасосной станции в системе противопожарного водоснабжения.

Рабочие характеристики насосов описываются полиномами второго порядка (1)–(3).

Напор – подача

$$H_p(Q) = a_1 \cdot Q^2 + a_2 \cdot Q + a_3; \quad (1)$$

Мощность – подача

$$N_p(Q) = b_1 \cdot Q^2 + b_2 \cdot Q + b_3; \quad (2)$$

КПД – подача

$$kpd(Q) = c_1 \cdot Q^2 + c_2 \cdot Q + c_3. \quad (3)$$

Напорно-расходная характеристика насосной станции, состоящей из NP параллельно включенных насосов, имеет вид:

$$HS(Q) = a_1 \cdot (Q/NP)^2 + a_2 \cdot (Q/NP) + a_3. \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4): a , b , c – значения коэффициентов полиномов, характерные для рассматриваемого насоса; NP – количество параллельно работающих насосов в насосной станции; Q – подача, $м^3/ч$.

Для случая частотного регулирования подачи, при изменении частоты вращения вала от n_0 до n_w в формулах (1)–(3) рабочие характеристики описываются следующим образом ($n_p = n_w/n_0$):

$$H_{pn}(Q) = a_1 \cdot Q^2 + a_2 \cdot Q \cdot n_p + a_3 \cdot n_p^2; \quad (5)$$

$$N_{pn}(Q) = b_1 \cdot Q^2 \cdot n_p + b_2 \cdot Q \cdot n_p^2 + b_3 \cdot n_p^3; \quad (6)$$

$$k_{pdn}(Q) = c_1 \cdot Q^2/n_p^2 + c_2 \cdot Q/n_p + c_3. \quad (7)$$

Напорно-расходная характеристика насосной станции, состоящей из NP параллельно включенных насосов, имеет вид:

$$HS_n(Q) = a_1 \cdot (Q/NP)^2 + a_2 \cdot (Q/NP) \cdot n_p + a_3 \cdot n_p^2. \quad (8)$$

В уравнениях (5)–(8): H_{pn} , N_{pn} , k_{pdn} – напор (м), мощность (кВт) и коэффициент полезного действия насосов; n_p – глубина регулирования подачи.

Удельный расход электроэнергии на привод насосов для насосной станции ($кВт \cdot ч/м^3$):

$$W(Q) = NP \cdot N_{pn}(Q)/Q. \quad (9)$$

Гидравлическая характеристика водопроводной сети системы противопожарного водоснабжения, в которую подает воду насосная станция:

$$H_t(Q) = H_g + s \cdot Q^2, \quad (10)$$

где H_g – статический напор, м; s – гидравлическое сопротивление водопроводной сети, $м \cdot (ч/м^3)^2$; Q – подача, $м^3/ч$.

Если применяется байпасирование насосов, то уравнение (10) имеет вид

$$H_{tb}(Q) = H_g + s \cdot k_q \cdot Q^2, \quad (11)$$

где k_q – коэффициент, учитывающий байпасирование.

Коэффициент k_q определяется как отношение расхода, подаваемого в водопроводную сеть к подаче всех работающих в рассматриваемой группе насосов (суммарной подаче).

При дросселировании на линии нагнетания (байпасирование и частотное регулирование отсутствуют) величина гидравлического

сопротивления водопроводной сети увеличивается до следующего значения:

$$s_d = [HS(Q_w) - H_g]/Q_w^2, \quad (12)$$

где Q_w – подача, требуемая потребителям; HS – напор; H_g – статический напор.

Для того чтобы найти подачу насосной станции, требуется решить систему уравнений (8) и (11) относительно подачи Q (при отсутствии байпасирования следует принять $k_q=1$, при отсутствии частотного регулирования – принять $n_p=1$).

Рассмотрим систему для случая транспортировки огнетушащих сред, включающих воду с добавкой полимерного материала. Введение в поток воды раствора полимера может осуществляться путем применения специальных дозаторов, которые используются в установках водопенного тушения. Проведенные экспериментальные исследования с применением полимерных материалов акрилового ряда (полиакриламид, сополимеры на основе акриламида) показали, что эффект снижения гидropотерь в системе при их дозировании перед насосом значительно меньше, чем при дозировании после насоса. Это обстоятельство объясняется деструкцией водного раствора полимерного материала при его прохождении через насос. Перекачка таких огнетушащих жидкостей также сопровождается изменением рабочих характеристик.

Методы корректировки рабочих характеристик насосов с воды на другие, более вязкие среды, разработанные в теории гидромашин, базируются на определении поправочных коэффициентов к основным параметрам насосов (подаче, напору, КПД) в зависимости от числа Рейнольдса Re . Данные эмпирические коэффициенты получают обобщением результатов испытаний центробежных насосов на исследуемых средах с разной вязкостью.

Основоположником в области решения задач по исследованию вязкости перекачиваемой жидкости на работу центробежных насосов является советский ученый Ляпков П. Д. [10]. Исследователи установили [10, 11], что характеристика насоса на исследуемой жидкости в большей степени отклоняется от характеристики работы на воде при меньших значениях числа Рейнольдса.

Число Рейнольдса при моделировании исследуемых систем удобно использовать в виде уравнения (13).

$$Re = \frac{\sqrt[3]{n \cdot Q^2}}{\nu}, \quad (13)$$

где Q – подача жидкости, $\text{м}^3/\text{с}$; n – частота вращения вала насоса, $\text{об}/\text{мин}$; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Если при работе центробежного насоса на воде его параметры – напор H , подача Q и коэффициент полезного действия k_{pd} , то пересчет рабочих характеристик на растворы полимеров можно осуществить по соотношениям (14)–(16), где коэффициенты k_H , k_Q , k_K вычисляются по эмпирическим зависимостям для данного раствора полимера, представляющим собой функции от числа Рейнольдса.

$$H_p = k_H \cdot H; \quad (14)$$

$$Q_p = k_Q \cdot Q; \quad (15)$$

$$KPD_p = k_K \cdot k_{pd}, \quad (16)$$

где H , Q , k_{pd} – напор (м), подача ($\text{м}^3/\text{с}$) и коэффициент полезного действия насоса при работе на воде; H_p , Q_p , KPD_p – напор (м), подача ($\text{м}^3/\text{с}$) и коэффициент полезного действия насоса при работе насоса на жидкости с полимерной добавкой; k_H , k_Q , k_K – эмпирические коэффициенты.

Для учета в модели влияния полимерных добавок на характеристики насосных систем с учетом рассмотренного подхода, необходимо иметь информацию по вязкости при разных концентрациях водных растворов полимеров, в частности полиакриламида. Нами проведен ряд экспериментальных исследований, которые позволили определить значение

вязкости и получить зависимости приведенной вязкости от концентрации водного раствора полимера (рис. 1). Для проведения численных исследований работы насосных систем разработаны программно-аппаратные комплексы, в основе которых – предложенные математические модели.

Комплексы для исследования насосов (многонасосных групп) включают в себя блоки ввода исходных, управляющих параметров и вывода результатов экспериментального исследования, а также схемы экспериментальных стендов. Схема установки и блок вывода результатов исследований разработанного комплекса для испытания центробежного насоса представлен на рис. 2, комплекса для исследования работы многонасосных систем – на рис. 3.

Программно-аппаратные комплексы позволяют определять параметры работы насоса, в том числе насосных групп (при последовательном и при параллельном соединении) при разных режимах работы и получать графические зависимости в виде характеристик насосов и характеристики водопроводной сети, определять положение рабочей точки, отвечающей оптимальной работе насосов в рассматриваемой системе.

Блок ввода регулируемых параметров позволяет исследовать вопросы управления как характеристиками насосов (в частности, изменением числа оборотов приводных двигателей), так и характеристикой водопроводной сети отмеченными выше способами.

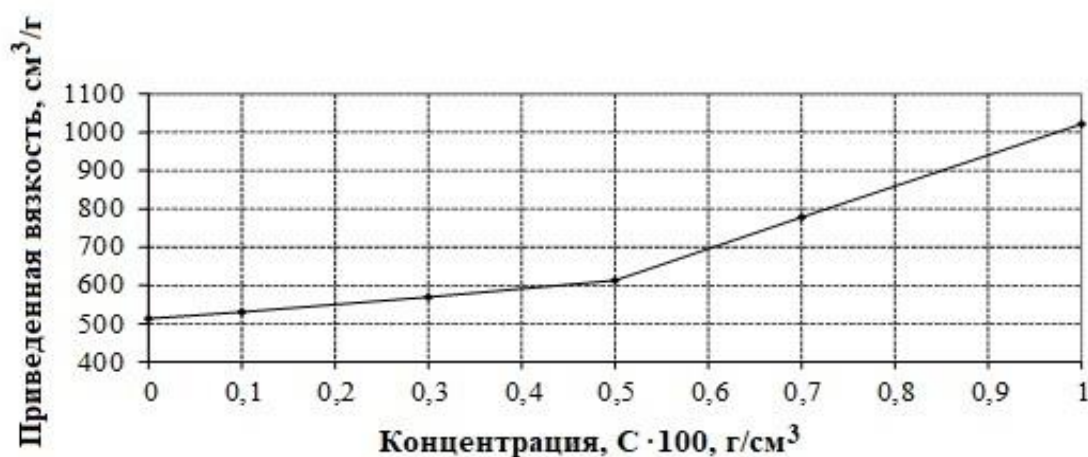


Рис. 1. Зависимость вязкости от концентрации полиакриламида в водном растворе

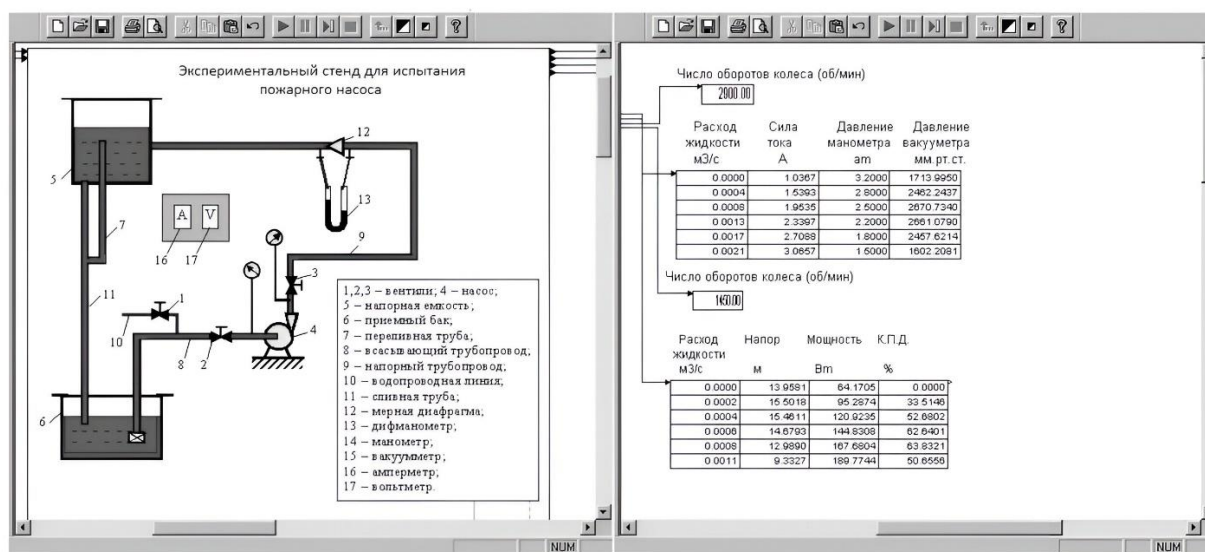


Рис. 2. Интерфейс программно-аппаратного комплекса для испытания центробежного насоса

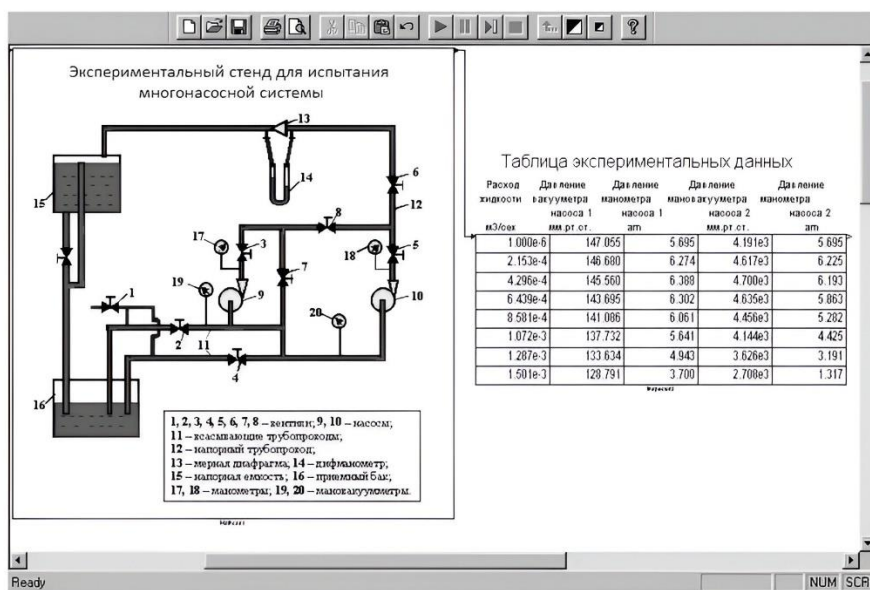


Рис. 3. Интерфейс программно-аппаратного комплекса для исследования характеристик многонасосных систем

Для определения значений коэффициентов полиномов в уравнениях предложенной математической модели используются фактические характеристики (принимаются из технического паспорта насосов или их получают в результате обработки опытных данных при проведении испытаний насосов, в том числе с помощью разработанных программно-аппаратных комплексов).

Различные способы регулирования водопроводной сети, представленные выше,

учитываются в модели соответствующим изменением величины гидравлического сопротивления – уравнения (10)-(12).

Некоторые результаты численных исследований (напорно-расходные характеристики насоса при его работе на воде и на исследуемой жидкости и гидравлические характеристики водопроводной сети) представлены на рис. 4.

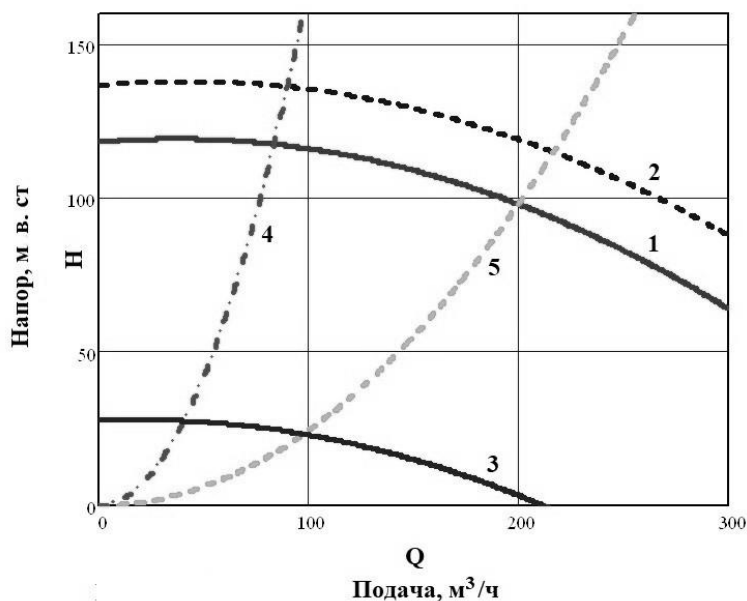


Рис. 4. Напорно-расходные характеристики исследуемой системы (центробежных насосов и водопроводной сети):
 1 – напорно-расходная характеристика насоса без регулирования частоты вращения при работе на исследуемой жидкости;
 2 – напорно-расходная характеристика насоса без регулирования частоты вращения при работе на воде;
 3 – напорно-расходная характеристика насоса при работе на исследуемой жидкости с регулированием частоты вращения;
 4 – гидравлическая характеристика водопроводной сети при дросселировании;
 5 – гидравлическая характеристика водопроводной сети без дросселирования

Из рис. 4 наглядно видно влияние водорастворимой полимерной добавки на рабочую характеристику насоса, а также возможности регулирования работы насоса методом частотного регулирования. Также показано, как изменяется характеристика водопроводной сети при дросселировании.

В дальнейших исследованиях предложенное математическое описание рабочих характеристик насосных систем в противопожарном водоснабжении и разработанные программно-аппаратные комплексы будут использоваться при изучении процессов регулирования подачи рассматриваемых систем. Модели составят основу для разработки подходов к

решению оптимизационных задач для насосных систем и рекомендаций по оптимизации режимов их эксплуатации, решения задач настройки пожарной насосной станции методом частотного регулирования и связанной с ней экономической задачи.

Результаты, полученные в работе, представляют интерес для создания актуализированной научно-методической базы, которая будет включать в себя современные расчетные методики, практические рекомендации и способствовать проведению качественных проектных и экспертных работ в области обеспечения пожарной безопасности объектов защиты.

Список литературы

1. Жучков В. В. Противопожарное водоснабжение. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 298 с.
2. Елин Н. Н., Бубнов В. Б., Снегирев Д. Г. Насосные станции: учебное пособие. Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2012. 129 с.
3. Бубнов В. Б., Репин Д. С. Анализ практики эксплуатации групп совместно работающих насосов в противопожарном водоснабжении и подходов к аналитическому описанию их характеристик // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 55–61.

4. Войтов И. В., Еловик В. Л. Методика моделирования режимов работы центробежных насосов, работающих с переменной частотой вращения рабочего колеса // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 12. С. 16–21. DOI: 10.35776/VST.2024.12.03

5. Барбул М. Л., Староверов С. В., Феоктистов А. Ю. Современные алгоритмы управления многонасосными станциями // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 5. С. 9–15.

6. Multiobjective Optimization of Low-Specific-Speed Multistage Pumps by Using Matrix Analysis and CFD Method / Si Qiaorui, Yuan

Shouqi, Yuan Jianping [et al.]. Journal of Applied Mathematics, vol. 2013, 10 p.

7. Турк В. И., Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции. М: Стройиздат, 1986. 304 с.

8. Чебаевский В. Ф., Вишневский К. П., Накладов Н. Н. Проектирование насосных станций и испытание насосных установок. М.: Колос, 2000. 320 с.

9. Абросимов Ю. Г. Гидравлика. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 312 с.

10. Ляпков П. Д. О влиянии вязкой жидкости на характеристику погружных центробежных насосов // Труды ВНИИ. 1964. Выпуск XLI. С. 71–107.

11. Боровский Б. И., Дихтярь Т. В. Оценка экономических показателей центробежных насосов при работе на вязких жидкостях // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 10 (62). С. 127–133.

References

1. Zhuchkov V. V. *Protivopozharnoye vodosnabzheniye* [Fire water supply]. Moscow: Akademija GPS MChS Rossii, 2016. 298 p.

2. Yelin N. N., Bubnov V. B., Snegirev D. G. *Nasosnyye stantsii* [Pumping stations]. Uchebnoe posobiye. Ivanovo: OONI IVI GPS MChS Rossii, 2012. 129 p.

3. Bubnov V. B., Repin D. S. Analiz praktiki ekspluatatsii grupp sovmestno rabotayushchikh nasosov v protivopozharnom vodosnabzhenii i podkhodov k analiticheskomu opisaniyu ikh kharakteristik [Analysis of the practice of operating groups of jointly operating pumps in fire water supply and approaches to the analytical description of their characteristics]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2023, vol. 3 (48), pp. 55–61.

4. Voytov I. V., Yelovik V. L. Metodika modelirovaniya rezhimov raboty tsentrobezhnykh nasosov, rabotayushchikh s peremennoy chastotoy

vrashcheniya rabocheho koleasa [Methodology for modeling operating modes of centrifugal pumps operating with variable impeller speed]. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*, 2024, issue 12, pp. 16–21. DOI: 10.35776/VST.2024. 12.03

5. Barbul M. L., Staroverov S. V., Feoktistov A. Yu. Sovremennyye algoritmy upravleniya mnogonasosnymi stantsiyami [Modern algorithms for controlling multi-pump stations]. *Energobezopasnost' i vodopodgotovka*, 2018, issue 5, pp. 9–15.

6. Multiobjective Optimization of Low-Specific-Speed Multistage Pumps by Using Matrix Analysis and CFD Method / Si Qiaorui, Yuan Shouqi, Yuan Jianping [et al.]. Journal of Applied Mathematics, vol. 2013, 10 p.

7. Turk V. I., Karelin V. Ya., Minayev A. V. *Nasosy i nasosnyye stantsii* [Pumps and pumping stations]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 304 p.

8. Chebayevskiy V. F., Vishnevskiy K. P., Nakladov N. N. *Proyektirovaniye nasosnykh stantsiy i ispytaniye nasosnykh ustanovok* [Design of pumping stations and testing of pumping units]. Moscow: Kolos, 2000. 320 p.

9. Abrosimov Yu. G. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow: Akademija GPS MChS Rossii, 2016. 312 p.

10. Lyapkov P. D. O vliyaniy vyazkoy zhidkosti na kharakteristiku pogruzhnykh tsentrobezhnykh nasosov [On the influence of viscous liquid on the characteristics of submersible centrifugal pumps]. *Trudy VNII*, 1964, issue XLI, pp. 71–107.

11. Borovskiy B. I., Dikhtyar' T. V. Otsenka ekonomicheskikh pokazateley tsentrobezhnykh nasosov pri rabote na vyazkikh zhidkostyakh [Evaluation of economic indicators of centrifugal pumps when operating on viscous liquids]. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*, 2018, vol. 10 (62), pp. 127–133.

Бубнов Владимир Борисович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: kafppv@mail.ru

Bubnov Vladimir Borisovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy

of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies

and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: kafppv@mail.ru

Репин Денис Сергеевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново

преподаватель

E-mail: denisrep@mail.ru

Repin Denis Sergeevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy
of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

teacher

E-mail: denisrep@mail.ru