

Энергосбережение и энергоэффективность

УДК 628.1

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-2-123-130

© А. П. Авсюкевич, канд. техн. наук, доцент

© A. P. Avsyukevich, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Д. Н. Куликова, магистрант

© D. N. Kulikova, undergraduate

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: aap.ecoprom@gmail.com, dari.culickowa@yandex.ru

E-mail: aap.ecoprom@gmail.com, dari.culickowa@yandex.ru

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИХ НАСОСОВ И ВОДОВОДОВ

ANALYSIS OF THE SYSTEM OPERATION WITH PARALLEL CONNECTION OF PUMPS AND WATER PIPES

Рассмотрена формула для определения коэффициента изменения производительности насоса при его параллельном подключении в группе насосов. Применение данной формулы позволяет не только анализировать изменение производительности каждого насоса в различных режимах работы системы, но и прогнозировать их совместную работу на основе соотношений гидравлических сопротивлений, количества насосов и водоводов. Это дает возможность оптимизировать параметры системы таким образом, чтобы обеспечить ее функционирование в допустимых пределах, повышая эффективность работы насосного оборудования.

Ключевые слова: изменение производительности насоса, коэффициент параллельности, совместная работа насосов, насос, расчет подачи, насосное оборудование, эффективная и надежная работа насоса, рабочий диапазон насоса, рабочая точка, параллельная схема подключения.

This paper examines a formula for determining the performance change coefficient KK of a pump when operating in parallel within a group of pumps. The application of this formula not only enables the analysis of each pump's performance variations under different operating conditions but also allows for forecasting their joint operation based on the relationships between hydraulic resistances, the number of pumps, and pipelines. This provides an opportunity to optimize the system parameters to ensure operation within acceptable limits, thereby enhancing the efficiency of pumping equipment.

Keywords: change in the pump performance, parallelism coefficient, joint operation of pumps, pump, flow calculation, pump equipment, efficient and reliable pump operation, pump operating range, operating point, parallel connection scheme.

Введение

При проектировании и эксплуатации систем водоснабжения часто возникает необходимость увеличения производительности насосного оборудования. Одним из эффективных методов решения данной задачи является параллельное подключение нескольких насосов^{1,2} [1–4].

¹ ГОСТ Р 54809–2011. Насосы центробежные. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2011.

² СП 31.13330.2021. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения (СНиП 2.04.02–84*. Свод правил от 27.12.2021 № 31.13330.2021, применяется с 28.01.2022 взамен СП31.13330.2012).

Режим работы насосов зависит от графика водопотребления. При параллельной работе нескольких насосов их суммарная производительность равна сумме производительностей каждого из них при условии одинаковых характеристик насосов и равномерного распределения нагрузки. Если один или несколько насосов и водоводов отключаются или их производительность изменяется, общая производительность системы тоже будет меняться,

и изменится подача каждого из работающих насосов.

Основные технические характеристики центробежных насосов, указываемые производителями, позволяют потребителям выбрать оборудование, соответствующее конкретным условиям эксплуатации. Одним из ключевых параметров, определяющих рабочие возможности насоса, является его рабочая зона.

Рабочая зона насоса представляет собой диапазон значений производительности (Q) и напора (H), при которых насос может работать эффективно и надежно. Производители обычно указывают рабочую зону на специализированных графиках, известных как характеристические кривые насоса. Эти кривые строятся на основе испытаний и экспериментальных данных, полученных в процессе разработки и производства насосов [1, 7–9].

На графике характеристических кривых (рис. 1) по оси абсцисс откладывается производительность Q , а по оси ординат — напор H . Важно отметить, что рабочая зона насоса не совпадает с полной зоной характеристик, поскольку она ограничена мини-

мальными и максимальными значениями производительности и напора, при которых насос сохраняет свою надежность и эффективность [2, 10–15].

Энергетическая эффективность и надежность работы насоса зависят от положения его рабочей точки на кривых характеристики системы относительно допустимого рабочего диапазона. При выходе рабочей точки за пределы рабочего диапазона насос работает неэффективно и с низкой надежностью. Снижение коэффициента полезного действия насоса при выходе рабочей точки за указанные пределы является достаточно очевидным, и, имея на руках диаграмму с характеристикой КПД, пользователь всегда может оценить эффективность работы насоса в зависимости от положения его рабочей точки. Обычно допустимая рабочая зона соответствует отклонению от максимального КПД на $\pm 25\%$, но, как правило, регламентируется каждым производителем³ [3].

График на рис. 2 показывает, как зависит надежность насоса от положения рабочей точки относительно рабочего диапазона.

³ Каталог «Скважинные насосы ЭЦВ». URL: <https://livnasos.nt-rt.ru/>

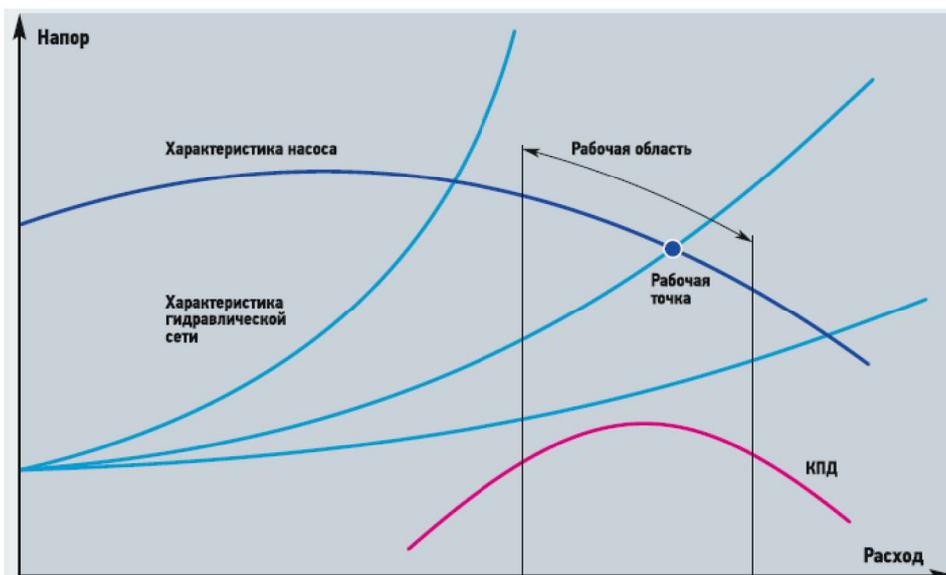


Рис. 1. Зависимость эффективности центробежного насоса от положения рабочей точки

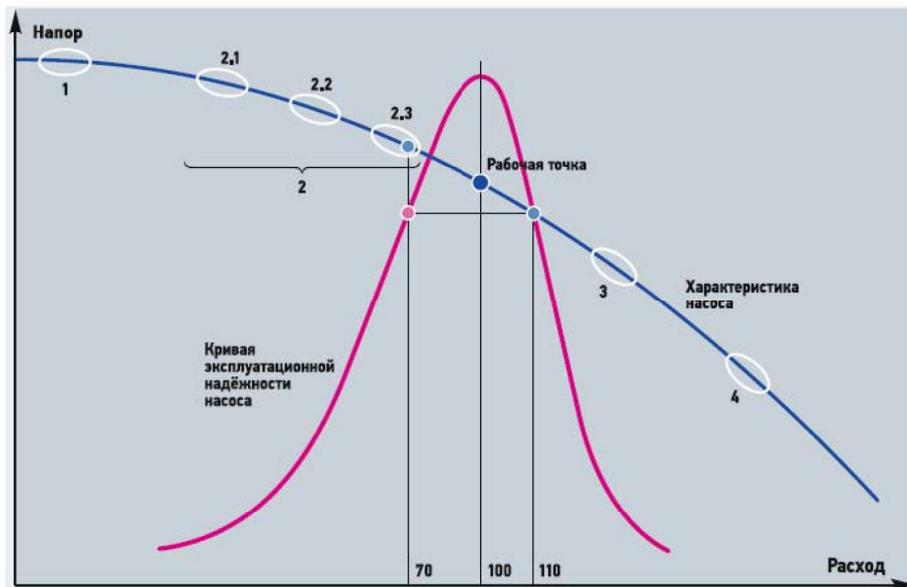


Рис. 2. График зависимости надежности насоса от положения рабочей точки [3]

Во всех рассуждениях о надежности и эффективности насосных систем ключевым является понятие рабочей точки насоса и ее положения. Основная задача водоснабжения — обеспечить потребителя необходимым количеством воды. Насос является элементом системы водоснабжения и подает воды столько, сколько позволяет система. Любые изменения работающих параметров системы или ее элементов вызывают изменения производительности, поэтому для анализа работы оборудования (насоса) требуется системный подход. Чтобы рассчитать изменения производительности одного насоса при различных режимах работы системы, необходимо определить, будут ли показатели насоса находиться в рабочей зоне при изменении режима работы и как стабилизировать работу системы.

Методы

Наиболее актуальным является вопрос обеспечения потребителей водой в требуемом количестве, чтобы при этом насосное оборудование работало надежно и эффективно. Для этого требуется анализ работы системы в различных ее режимах. Покажем актуальность на простом примере.

Из водоприемного колодца речная вода откачивается тремя погружными насосами по двум напорным водоводам на очистные сооружения. На рис. 3 представлена паспортная характеристика одного насоса $H - Q$, сопротивление одного насоса $S_n = 11\,667 \text{ с}^2/\text{м}^5$ (при Q в $\text{м}^3/\text{с}$). Статистический напор $H_{ст} = 30$ м. Гидравлическое сопротивление одного водовода $S_b = 7654 \text{ с}^2/\text{м}^5$ (при Q в $\text{м}^3/\text{с}$) [1].

Необходимо проанализировать работу системы в различных режимах, при этом производительность насосов должна быть обеспечена в пределах рабочей зоны, которую мы определим в пределах $\pm 25\%$ относительно рабочей точки при КПД 93%. Общая подача при отключении одного водовода составит величину $Q > 70\%$ от основной подачи.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим различные способы решения данной задачи.

Первый, классический метод решения, заключается в определении подачи насоса путем использования характеристических уравнений сети и насоса с построением графика совместной работы системы.

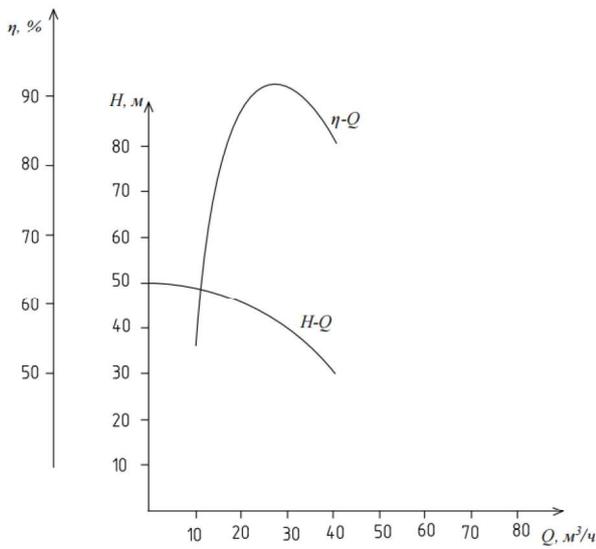


Рис. 3. Характеристика насоса

Совместную характеристику параллельно работающих насосов определим аналитическим путем с помощью зависимости

$$H = H_{\Phi} - \frac{S}{n^2} Q^2. \quad (1)$$

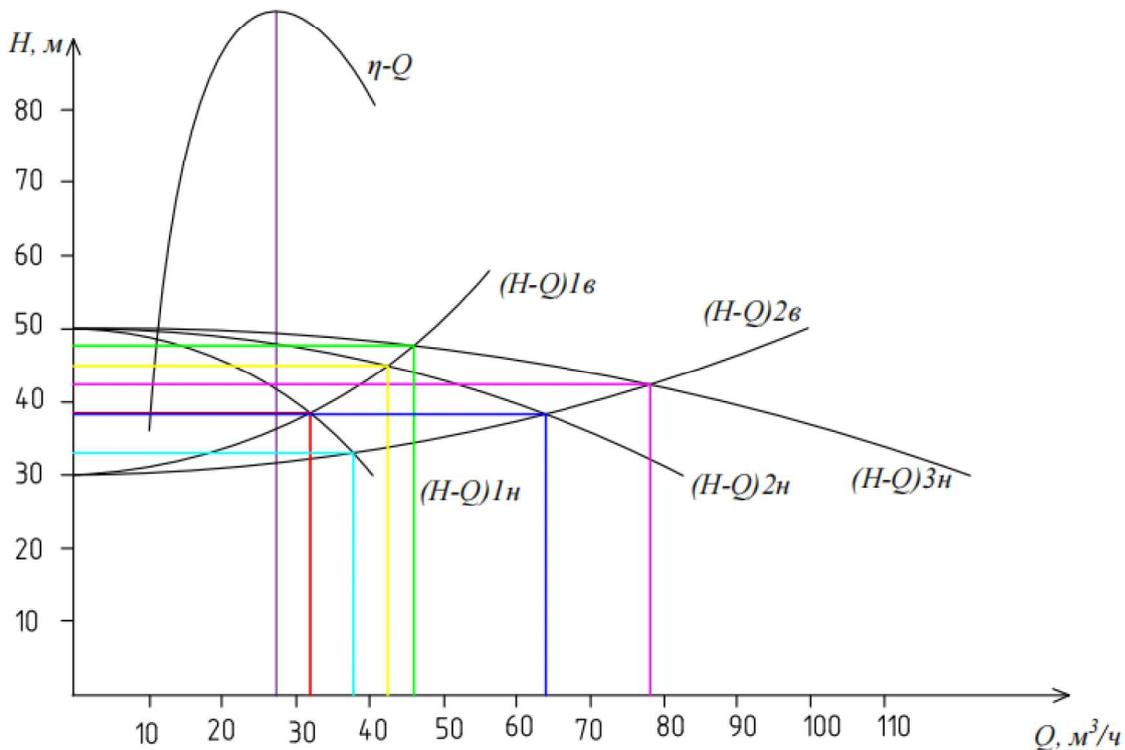


Рис. 4. Совместная характеристика работы насосов и водоводов (1в, 2в — один и два водовода; 1н, 2н, 3н — один, два, три насоса соответственно)

Соответственно характеристика одного насоса $(H - Q)_{\text{насос 1}}$ будет иметь вид

$$H = 49,7 - (11\ 667/1^2)Q^2. \quad (2)$$

Для записи характеристики сети воспользуемся зависимостью

$$H = H_{\text{ст}} + (S_{\text{в}}/p^2)Q^2. \quad (3)$$

В случае работы одного водовода характеристика $(H - Q)_{\text{сеть 1}}$ имеет вид

$$H = 30 + (7654/1^2)Q^2 = 30 + 7654Q^2. \quad (4)$$

Проанализируем полученный график (рис. 4).

На пересечении характеристик насосов и сети получим рабочие точки, которые определяют режим работы станции при различном сочетании работающих насосов и водоводов.

Также значения H и Q для различных режимов можно получить аналитическим путем, приравнивая соответствующие зависимости для насосов и сети. Значения полученных параметров представлены в табл. 1.

Разделим общий расход системы на количество насосов и таким образом определим подачу каждого насоса.

Подача в режиме «три насоса и два водовода» при максимальном КПД составит $Q = 26$ л/с. Тогда в соответствии с заданными условиями рабочая зона будет находиться в пределах изменения подачи от 32,5 до 19,5 л/с.

Таким образом, можно сделать вывод, что в данной системе недопустимы такие режимы работы, как «три насоса и один водовод» и «один насос и два водовода», которые выделены цветом в табл. 1, потому что их использование приводит к износу и поломкам насосного оборудования. Необходимо обратить внимание на то, что в этом случае при отключении из работы одного водовода при работающих трех насосах подача будет составлять $Q = 15,8$ л/с, т. е. насос работает за пределами рабочей зоны и не обеспечивает подачу $Q > 70$ % в сеть.

Второй предлагаемый метод основан на использовании коэффициента изменения производительности насоса, т. е. коэффициента, учитывающего изменение производительности одного насоса относительно его расчетного режима. Коэффициент определяется как отношение подачи одного насоса в группе насосов в i -м режиме к подаче одного насоса в группе насосов в расчетном режиме q_{pp} при параллельной работе одинаковых насосов и водоводов [4]:

$$K = \frac{q_{pp}}{q_i}, \quad (5)$$

где q_{pp} — подача каждого насоса при n насосов в группе при расчетном режиме; q_i — подача каждого насоса при $(n - k)$ насосов в группе при i -м режиме; k — количество выключенных рабочих насосов.

Коэффициент изменения производительности насоса можно вычислить по формуле (6), где в числителе стоит формула расчетного режима, а в знаменателе — формула изменения данного (расчетного) режима за счет изменения количества насосов и водоводов:

$$K = \frac{q_{pp}}{q_i} = \sqrt{\frac{1 + \frac{S_B \times n^2}{S_H \times p^2}}{1 + \frac{S_B \times (n \pm k)^2}{S_H \times (p \pm k')^2}}}, \quad (6)$$

где S_B — сопротивление водовода, c^2/m^5 ; S_H — сопротивление насоса, c^2/m^5 ; n — количество насосов; p — количество водоводов; k — количество выключенных рабочих насосов; k' — количество выключенных рабочих водоводов.

Выберем расчетный режим аналогично классическому методу для случая «три насоса и два водовода» и проанализируем работу системы с расчетом коэффициента изменения производительности насоса K по формуле (6).

Для примера определим подачу каждого насоса при режиме работы «три насоса и один водовод».

Определяем K по формуле (6)

$$K_{3-1} = \sqrt{\frac{1 + \frac{7654 \times 3^2}{11667 \times 2^2}}{1 + \frac{7654 \times 3^2}{11667 \times (2-1)^2}}} = \sqrt{\frac{2,476}{6,904}} = 0,60.$$

Таблица 1

Значения напора и расхода насосов, полученные классическим способом, аналитическим путем

Количество насосов	Параметры системы «один насос, один водовод»			Параметры системы «один насос, два водовода»		
	H , м	Q , л/с	η , %	H , м	Q , л/с	η , %
1	37,8	32,0	92	32,9	38	86
2	44,3	21,5	90	37,8	32	92
3	46,8	15,8	81	41,7	26	93

При изменении параметров производительность каждого насоса изменится, и мы сможем ее рассчитать с помощью формулы (5):

$$q_i = q_{pp} \times K_{3_1} = 26 \times 0,60 = 15,8.$$

Произведем аналогичные расчеты для всех i режимов данной системы. Результаты представим в табл. 2.

Анализ табл. 2 позволяет сделать следующие выводы:

- первый, классический метод, показывает, допустим ли данный режим работы или нет, но не может подсказать, как решить проблему;
- второй метод анализа и решения задачи с помощью формулы (6) показывает, что коэффициент изменения производительности насоса K зависит от соотношения сопротивлений S_B и S_H , а также числа работающих и выключенных насосов. Следовательно, мы можем вычислить сопротивление S_B , при котором будут выполняться условия задачи, что позволяет определить сопротивление водовода, при котором отклонения в работе насосов будут в пределах допустимого.

Например, запроектируем систему с заданными условиями, подобрав сопротивление напорного водовода. Для этого из формулы (6) рассчитаем сопротивление водовода S_B при условии работы системы в режиме «три насоса и один водовод». В этом случае отклонение коэффициента K при рабочем режиме должно быть не более 25 %, т. е. коэффициент изменения производительности насоса $K = 0,75$.

Проверим это расчетом.

Задавая значением $K = 0,75$, определим сопротивление водовода S_B :

$$K = \sqrt{\frac{1 + \frac{S_B \times n^2}{S_H \times p^2}}{1 + \frac{S_B \times (n \pm k)^2}{S_H \times (p \pm k')^2}}} \rightarrow 0,75^2 =$$

$$= \sqrt{\frac{1 + \frac{S_B \times 3^2}{11667 \times 2^2}}{1 + \frac{S_B \times 3^2}{11667 \times 1^2}}} \rightarrow S_B = 1793.$$

Рассчитаем коэффициент изменения производительности насоса в разных режимах с сопротивлением напорного водовода $S_B = 1793$ при расчетном режиме «три насоса и два водовода». Результаты расчета представлены в табл. 3.

Анализ табл. 3 показывает, что при рассчитанном сопротивлении водовода поставленные условия выполняются, а именно:

1. Производительность насосов обеспечивается в пределах рабочей зоны, которая определена как ± 25 % относительно рабочей точки при КПД 93 %.

2. Общий расход при отключении одного водовода соответствует условиям, т. е. $Q > 70$ % от основной подачи.

Вывод

Формула (6) по определению коэффициента изменения производительности насоса K при параллельном подключении его в группе насосов позволяет не только определить изменение производительности каждого насоса при разных режимах функционирования системы, но и на основании соотно-

Таблица 2

Значения напора, расхода насосов и коэффициент изменения производительности насоса K

Количество насосов	Параметры системы «один насос, один водовод»				Параметры системы «один насос, два водовода»			
	H , м	Q , л/с	η , %	K	H , м	Q , л/с	η , %	K
1	37,8	32	92	1,22	32,9	38	86	1,45
2	44,3	21,5	90	0,97	37,8	32	92	1,22
3	46,8	15,8	81	0,59	41,7	26	93	1

Пример расчета напора, расхода насосов и коэффициента изменения производительности насоса K при заданном сопротивлении S_v

Количество насосов	Параметры системы «один насос, один водовод»				Параметры системы «один насос, два водовода»			
	$H, м$	$Q, л/с$	$\eta, \%$	K	$H, м$	$Q, л/с$	$\eta, \%$	K
1	37,8	28	92	1,08	32,9	30	91	1,14
2	44,3	24	88	0,91	37,8	28	92	1,08
3	46,8	20	86	0,75	41,7	26	93	1

шений сопротивлений и количества насосов и водоводов спрогнозировать параллельную работу насосов при заданных коэффициентах изменения производительности, т. е. дает возможность подобрать необходимые параметры системы таким образом, чтобы система работала в допустимых пределах.

Библиографический список

1. Васильев В. М., Федоров С. В., Кудрявцев А. В. Насосы и насосные станции. СПб.: СПбГАСУ, 2017. Ч. 1. 131 с.
2. Кривченко Г. И. Гидравлические машины: турбины и насосы. М.: Энергия, 1978. 320 с.
3. Костюк А. В. Увеличение энергоэффективности и надёжности насосного оборудования // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. 2021. № 10. С. 10–12. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/uvlichenie-energoeffektivnosti-i-nadezhnosti-nasosnogo-oborudovaniya> (дата обращения: 21.02.2025).
4. Авсюкевич А. П. Повышение эффективности напорных систем водоснабжения с несколькими водопитателями: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Вологда, 2000. 24 с.
5. Абрамов Н. Н. Водоснабжение. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1974. 480 с.
6. Матвиенко А. В., Томилова Б. И., Фоканова М. И. Расчет совместной работы насосов при параллельном их подключении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 12. С. 271–273.
7. Буряк Д. С., Земляк Г. Н. Исследование гидравлических параметров центробежных насосов при параллельной схеме подключения // Научный вестник НИИГД «Респиратор». 2022. № 4 (59). С. 103–108.
8. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1986. 320 с.
9. Лобачев П. В. Насосы и насосные станции. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1983. 191 с.

10. Зацепин В. Н. Курсовое и дипломное проектирование водопроводных и канализационных сетей и сооружений. Л.: Стройиздат, 1973. 215 с.

11. Шевелев Ф. А., Шевелев А. Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1995. 171 с.

12. Николадзе Г. И. Водоснабжение. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 496 с.

13. Абрамов Н. Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. М.: Стройиздат, 1972. 287 с.

14. Артемьева Т. В., Лысенко Т. М., Румянцева А. Н., Стесин С. П. Гидравлика, гидромашины и гидропривод / под ред. С. П. Стесина. М.: Академия, 2005. 334 с.

15. Колесов А. А., Рыбкина Г. В. Энергоэффективность насосного оборудования // Молодые ученые — развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2024. № 1. С. 306–308.

References

1. Vasil'ev V. M., Fedorov S. V., Kudryavtsev A. V. *Nasosy i nasosnye stantsii* [Pumps and pumping stations]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2017, pt. 1, 131 p.
2. Krivchenko G. I. *Gidravlicheskie mashiny: turbiny i nasosy* [Hydraulic machines: turbines and pumps]. Moscow, Energiya Publ., 1978, 320 p.
3. Kostyuk A. V. *Uvelichenie energoeffektivnosti i nadyozhnosti nasosnogo oborudovaniya* [Increase of energy efficiency and reliability of pumping equipment]. *Santekhnika. Otoplenie. Konditsionirovanie – Plumbing. Heating. Conditioning*, 2021, no. 10, pp. 10–12. Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/uvlichenie-energoeffektivnosti-i-nadezhnosti-nasosnogo-oborudovaniya> (accessed: 21.02.2025).
4. Avsyukevich A. P. *Povyshenie effektivnosti napornykh sistem vodosnabzheniya s neskol'kimi vodopitateleyami. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* [Increase of efficiency of pressure water supply systems with several water feeders. Author's thesis of PhD in Sci. Tech. diss.]. Vologda, 2000, 24 p.

5. Abramov N. N. *Vodosnabzhenie* [Water supply]. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974, 480 p.
6. Matvienko A. V., Tomilova B. I., Fokanova M. I. *Raschet sovmestnoy raboty nasosov pri parallel'nom ikh podklyuchenii* [Calculation of joint operation of pumps at their parallel connection]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of TulSU. Technical Sciences*, 2019, iss. 12, pp. 271–273.
7. Buryak D. S., Zemlyak G. N. *Issledovanie gidravlicheskikh parametrov tsentrobezhnykh nasosov pri parallel'noy skheme podklyucheniya* [Investigation of hydraulic parameters of centrifugal pumps at parallel connection scheme]. *Nauchniy vestnik NIIGD «Respirator» – Scientific Bulletin of NIIGD «Respirator»*, 2022, no. 4 (59), pp. 103–108.
8. Karelin V. Ya., Minaev A. V. *Nasosy i nasosnye stantsii* [Pumps and pumping stations]. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 320 p.
9. Lobachev P. V. *Nasosy i nasosnye stantsii* [Pumps and pumping stations]. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983, 191 p.
10. Zatsepin V. N. *Kursovoe i diplomnoe proektirovanie vodoprovodnykh i kanalizatsionnykh setey i sooruzheniy* [Course and diploma design of water supply and sewerage networks and structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1973, 215 p.
11. Shevelev F. A., Shevelev A. F. *Tablitsy dlya gidravlicheskogo rascheta vodoprovodnykh trub* [Tables for hydraulic calculation of water pipes]. 7-th ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1995, 171 p.
12. Nikoladze G. I. *Vodosnabzhenie* [Water Supply]. 3-rd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989, 496 p.
13. Abramov N. N. *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody* [Theory and methodology of calculation of water supply and distribution systems]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, 287 p.
14. Artemeva T. V., Lysenko T. M., Rummyantseva A. N., Stesin S. P. *Gidravlika, gidromashiny i gidropnevmoprivod* [Hydraulics, hydromachines and hydropneumatic drive]. Ed. by Stesin S. P. . Moscow, Akademiya Publ., 2005, 334 p.
15. Kolesov A. A., Rybkina G. V. *Energoeffektivnost' nasosnogo oborudovaniya* [Energy efficiency of pumping equipment of pumping equipment]. *Molodye uchenye — razvitiyu Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK) – Young scientists for the development of the National Technological Initiative (POISK)*, 2024, no. 1, pp. 306–308.