

Научная статья
УДК 614.814
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.59.54.017

Определение граничных параметров напора центробежного пожарного насоса в условиях бесперебойной подачи воды

Сергей Олегович Куртов¹
Вячеслав Юрьевич Яровой¹
Ярослав Владимирович Гребнев²
Андрей Сергеевич Дубовский¹

¹Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия

²Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Юрьевич Яровой, yarovoivacheslav@yandex.ru

Аннотация. В настоящей статье излагаются результаты комплексного исследования по определению предельных эксплуатационных параметров центробежного пожарного насоса, функционирующего в каскадном режиме с последовательной перекачкой воды по схеме «из насоса в насос». Исследование направлено на установление граничных условий, обеспечивающих безаварийную работу насосного оборудования. Методологической основой работы послужил аналитический расчет величины напора, развиваемого насосом, для широкого спектра эксплуатационных сценариев. В ходе анализа были рассмотрены различные конфигурации рукавных линий (варьируемая длина) и режимы работы, отличающиеся величиной подачи воды. По результатам расчетов установлены и количественно выражены функциональные зависимости между ключевыми параметрами системы: длиной развернутой рукавной линии, объемным расходом воды и требуемым напором на выходе насоса. Установлено, что наиболее опасный с точки зрения механической перегрузки и риска выхода из строя насосного агрегата режим возникает не при максимальной длине магистрали, а, напротив, при использовании коротких рукавных линий протяженностью 1–3 рукава в сочетании с высокой подачей воды в диапазоне 27–32 л/с. В данной конфигурации расчетное значение напора достигает критических величин порядка 80–90 м вод. ст., что может превышать паспортные характеристики приемного насоса и приводить к кавитации, повышенным вибрациям, перегрузке вала и двигателя.

Ключевые слова: насосно-рукавная система, напорные пожарные рукава, напор, давление, гидравлическое сопротивление, граничные параметры, пожарный насос, перекачка воды

Для цитирования: Куртов С.О., Яровой В.Ю., Гребнев Я.В., Дубовский А.С., Определение граничных параметров напора пожарного насоса в условиях бесперебойной подачи воды // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 220-226. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.59.54.017>.

Original article.

Determination of the boundary parameters of the pressure of a centrifugal fire pump under conditions of uninterrupted water supply

*Sergey O. Kurtov*¹

*Vyacheslav Yu Yarovoy*¹

*Yaroslav V. Grebnev*²

*Andrey S. Dubovskiy*¹

¹*Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

Corresponding author: *Viacheslav Yu. Yarovoy, yarovoiviacheslav@yandex.ru*

Abstract. This article presents the results of a comprehensive study to determine the maximum operational parameters of a centrifugal fire pump operating in cascade mode with sequential pumping of water according to the "pump to pump" scheme. The study is aimed at establishing boundary conditions that ensure trouble-free operation of pumping equipment. The methodological basis of the work was the analytical calculation of the pressure developed by the pump for a wide range of operational scenarios. During the analysis, various configurations of hose lines (variable length) and operating modes, differing in the amount of water supply, were considered. Based on the calculation results, functional dependencies between the key parameters of the system have been established and quantified: the length of the deployed hose line, the volume flow of water and the required pressure at the pump outlet. It was found that the most dangerous mode from the point of view of mechanical overload and the risk of failure of the pumping unit does not occur at the maximum length of the main line, but, on the contrary, when using short sleeve lines with a length of 1-3 sleeves in combination with a high water supply in the range of 27-32 liters/s. In this configuration, the design pressure value reaches critical values of the order of 80-90 m of water, which may exceed the rated characteristics of the intake pump and lead to cavitation, increased vibrations, and overload of the shaft and motor.

Keywords: pump-hose system, pressure fire hoses, head, pressure, hydraulic resistance, boundary parameters, fire pump, water transfer

For citation: Kurtov S.O., Yarovoy V.Yu., Grebnev Ya.V., Dubovsky A.S. Determination of the boundary parameters of a fire pump pressure in conditions of uninterrupted water supply // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 4 (39). С. 220-226. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.59.54.017>.

Организация бесперебойной подачи воды на месте пожара, особенно в условиях ограниченного водоснабжения, остается одной из наиболее актуальных задач для пожарно-спасательных подразделений. На сегодняшний день в практике широко применяются способы подвоза и перекачки воды [1-3]. Критическим элементом данных способов, определяющим их надежность и эффективность, является работа центробежных пожарных насосов в составе насосно-рукавных систем.

Анализ современных исследований [4-6] показывает, что, хотя общие принципы перекачки хорошо известны, вопрос точного определения граничных эксплуатационных параметров насоса, при которых обеспечивается его безаварийная работа в различных конфигурациях рукавных линий, раскрыт недостаточно. В частности, отсутствуют количественные рекомендации, связывающие подачу насоса, гидравлическое сопротивление конкретных типов напорных рукавов и предельно допустимый напор на входе в приемный насос, исключающий риск кавитации и повреждения его уплотнений.

Целью настоящего исследования является определение граничных значений напора на центробежном пожарном насосе при работе по схеме «из насоса в насос» на основе экспериментальных данных о гидравлическом сопротивлении современных напорных пожарных рукавов и последующая разработка практических рекомендаций для личного состава.

Научная новизна работы заключается в установлении количественных зависимостей предельного напора от расхода и длины рукавной линии для латексированных рукавов DN80, а также в выявлении парадоксальной закономерности о повышенном риске выхода из строя насоса при использовании магистральных линий малой длины.

Научным коллективом ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России разрабатывается проблема бесперебойной подачи воды к месту пожара способами подвоза и перекачки. Одним из актуальных фрагментов рассматриваемых способов является перелив воды из одной автоцистерны (далее – АЦ) в другую. В работе [1] был проведен анализ существующих устройств и вариантов, применяемых для организации бесперебойной подачи воды между АЦ пожарными подразделениями. При перекачке воды по схеме из насоса в насос на входе во всасывающую полость следующего насоса необходимо поддерживать напор, не менее 10 м, но не более $H_{\text{макс}} = 60$ м (для пожарных насосов с графитовыми уплотнительными сальниками) [2;7]. Личному составу, работающему на пожарном центробежном насосе необходимо понимать и знать граничные параметры его надежной работы $H_{\text{нас}}$ при переливе воды из одной АЦ в другую, особенно по схеме из насоса в насос, представленной на Рис.1.

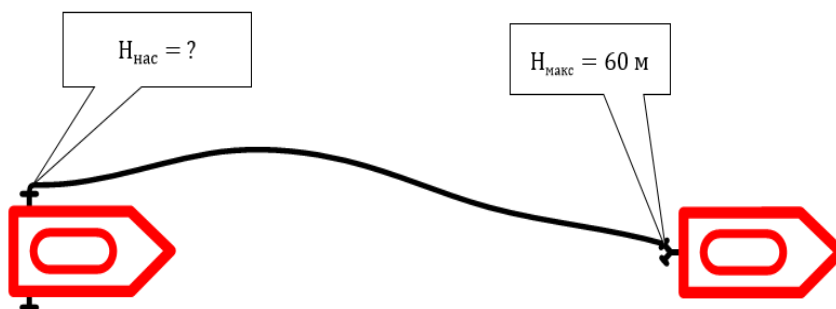


Рис.1. Схема перекачки воды из АЦ в АЦ способом «из насоса в насос» с использованием РПН DN80

Авторами, на основании ранее экспериментально полученных фактических значений гидравлических сопротивлений латексированных РПН производства РУСАРСЕНАЛ 20 - метровой длины с номинальными (условными) диаметрами DN80, DN 65, DN 50 (Табл.1) [8] проведен аналитический расчет по определению значений напора на насосе в зависимости от гидравлических сопротивлений РПН, применяемых для прокладки рукавных линий между АЦ Рис.1.

Табл.1. Экспериментальные значения гидравлических сопротивлений латексированных РПН 20 - метровой длины с номинальными (условными) диаметрами DN80, DN 65, DN 50, $(\text{с/л})^2 \times \text{м}$

Тип РПН	Значения гидравлических сопротивлений РПН $(\text{с/л})^2 \times \text{м}$, с номинальными диаметрами		
	DN50	DN65	DN80
Латексированный РПН производства РУСАРСЕНАЛ длиной 20 м	0,096	0,021	0,0088

Расчетно-аналитическое значение напора на пожарном насосе $H_{\text{нас}}$ при турбулентном режиме течения жидкости определяют по формуле:

$$H_{\text{нас}} = H_{\text{макс}} + H_{\text{рук}}^{\text{расч}} = H_{\text{макс}} + N_{\text{рук}} \times S_{\text{p}} \times Q^2, \text{ м} \quad (1)$$

где, $H_{\text{рук}}^{\text{расч}}$ – расчетное значение потерь напора в напорной рукавной линии между АЦ, м;

$N_{рук}$ – количество пожарных рукавов в рассматриваемой линии, шт.;

S_p – гидравлическое сопротивление одного латексированного пожарного рукава DN80 и длиной 20 метров [9], $((с/л)^2 \times м)$;

Q – объемный расход в рассматриваемой рукавной линии, л/с.

Используя формулу (1), рассчитали значения напора на центробежном пожарном насосе нормального давления (НЦПН – 40/100) Табл.2 при различных значениях его подачи и гидравлическом сопротивлении напорного пожарного рукава с номинальным (условным) диаметром DN80 Табл.2.

Табл.2. Расчетные значения напора на пожарном насосе в зависимости от количества применяемых напорных пожарных рукавов и его подачи

Количество $N_{рук}$ латексированных РПН производства РУСАРСЕНАЛ длиной 20 м, шт.	Расчетно-теоретические значения потерь напора в РПН между АЦ $H_{рук}^{расч}$, м	Расчетный напор на пожарном насосе $H_{нас}$, м
Поддача насоса АЦ – 32 л/с		
1	9,0	69,0
2	18,0	78,0
3	27,0	87,0
4	36,0	96,0
5	45,0	105,0
Поддача насоса АЦ – 30 л/с (2 РСКУ-70 с расходом 15 л/с)		
1	7,9	67,9
2	15,8	75,8
3	23,7	83,7
4	31,6	91,6
5	39,5	99,5
Поддача насоса АЦ – 27 л/с (2 РСКУ-70 с расходом 15 и 12 л/с)		
1	6,4	64,4
2	12,8	72,8
3	19,2	79,2
4	25,6	85,6
5	32,0	92,0
Поддача насоса АЦ – 24 л/с (2 РСКУ-70 с расходом 15 и 9 л/с)		
1	5,1	65,1
2	10,2	70,2
3	15,3	75,3
4	20,4	80,4
5	25,5	85,5
6	30,6	90,6
Поддача насоса АЦ – 15 л/с (1 РСКУ-70 с расходом 15 л/с)		
1	2,0	62,0
2	4,0	64,0
3	6,0	66,0
4	8,0	68,0
5	10,0	70,0
Поддача насоса АЦ – 8 л/с (1 РСКУ-50 с расходом 8 л/с)		
1	0,56	60,56
2	1,13	61,13
3	1,68	61,68
4	2,24	62,24
5	2,80	62,80
Поддача насоса АЦ – 4 л/с (1 РСКУ-50 с расходом 4 л/с)		
1	0,14	60,14
2	0,28	60,28
3	0,42	60,42
4	0,56	60,56
5	0,70	60,70

Проведенный расчет и анализ данных, представленных в Табл.2, позволяют выявить ключевую физическую закономерность. При использовании трех и менее рукавов DN80 и высокой подаче насоса (27-32 л/с) расчетный напор $H_{\text{нас}}$ стремительно приближается к значению 90 м и превышает его, что создает в приемном насосе условия, близкие к граничным для работы сальниковых уплотнений (60 м [10]).

Возникающий при этом избыточный напор на входе в приемный насос может привести к двум основным негативным последствиям:

1. Разрушение сальниковых уплотнений. Превышение давления, на которое рассчитаны уплотнения, ведет к их ускоренному износу, протечкам и выходу насоса из строя.

2. Кавитация. При определенных условиях высокое давление на входе в приемный насос может способствовать кавитационным явлениям, что снижает его КПД, вызывает вибрацию и эрозионное разрушение рабочих колес.

Практически значимым парадоксом, выявленным в исследовании, оказалась следующая зависимость: уменьшение длины магистрального рукава, хотя и ведет к снижению гидравлических потерь, создает повышенные риски для приемного насоса. Это опровергает интуитивное предположение о том, что более короткая рукавная линия всегда безопаснее.

Для наглядности анализа рисков, результаты Табл.2 визуализированы на Рис.2. На графике четко видно, что при расходах 24-32 л/с и длине магистрали до 60 м (3 рукава) напор $H_{\text{нас}}$ попадает в опасную зону, где превышение предела в 60 м для приемного насоса наиболее вероятно.

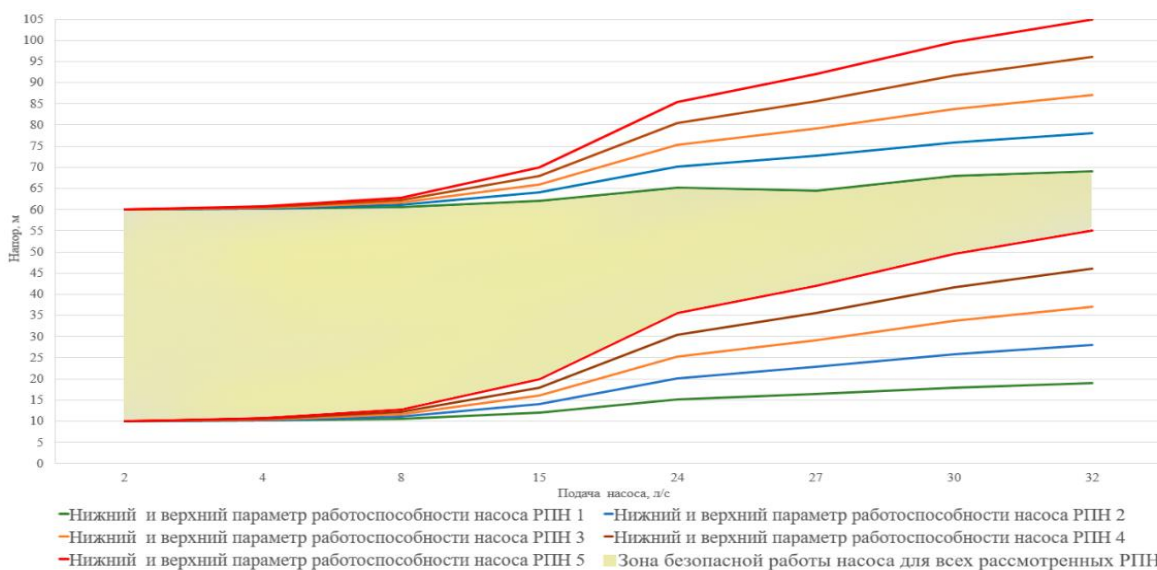


Рис.2. Зависимость расчетного напора на насосе $H_{\text{нас}}$ от длины рукавной линии (количества рукавов) при различной подаче. Желтой зоной обозначена безопасная область для всех рассмотренных РПН

Выводы

1. На основе экспериментальных данных о гидравлическом сопротивлении латексированных напорных рукавов DN80 и аналитического расчета по формуле (1) впервые установлены количественные граничные значения напора на пожарном насосе при работе по схеме «из насоса в насос».

2. Выявлен и описан парадокс повышенного риска при использовании коротких рукавных линий с высокой подачей, обусловленный малыми гидравлическими потерями и, как следствие, высоким остаточным напором на входе в следующий насос.

3. Разработаны и представлены в табличной и графической форме практические рекомендации для личного состава, позволяющие оперативно контролировать напор на насосе в зависимости от текущей конфигурации рукавной системы и расхода воды.

Перспективным направлением является разработка программного модуля или мобильного приложения, позволяющего оперативно рассчитывать безопасные режимы работы пожарных насосов в полевых условиях.

Список источников

1. Куртов, С.О. Критический анализ способов бесперебойной подачи воды к месту пожара / С.О. Куртов, А.Ю. Трояк, В.П. Малый // Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 21 апреля 2023 года. – Железногорск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий", 2023. – С. 97-101. – EDN PBNWVS.
2. Тарасов, С.В. Организация подачи (транспортировки) огнетушащих веществ на тушение пожаров способом перекачки / С.В. Тарасов, Д.Ю. Пигусов, Н.С. Пустовалова // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2024. – № 2. – С. 62-72. – DOI 10.25257/FE.2024.2.62-72. – EDN SRMTJD.
3. Тарасов С.В., Пигусов Д.Ю., Пустовалова Н.С. Организация и расчет количества автоцистерн для подвоза воды к месту пожара в сельских и городских поселениях //Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2025. – № 2. – С. 43-54.
4. Куртов, С.О. Эмпирические аспекты существующих методик организации бесперебойной подачи огнетушащих веществ на месте тушения пожара / С.О. Куртов, В.П. Малый, В.М. Макаров // Актуальные проблемы безопасности в техносфере. – 2025. – № 1(17). – С. 50-55. – DOI 10.34987/2712-9233.2025.42.50.007. – EDN OJMPSJ.
5. Бараковских С.А., Карама Е.А. Совершенствование способов тушения пожаров в условиях неудовлетворительного противопожарного водоснабжения //Техносферная безопасность. – 2018. – Т. 4. – № 21. – С. 26-29.
6. Дупляков Г.С., Малютин О.С., Лаптев Д.А. Критерии рациональной организации перекачки, подвоза воды для нужд пожаротушения //Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2020. – № 1. – С. 83-93.
7. Самохвалов, Ю.П. Перекачка. Расчет параметров / Ю.П. Самохвалов, А.В. Ермилов // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 4(53). – С. 28-38. – EDN OQJDDR.
8. Куртов, С.О. Расчетно-экспериментальное определение фактических значений максимальной пропускной способности напорных пожарных рукавов 20-метровой длины с различными диаметрами условного прохода / С.О. Куртов, В.П. Малый, Ю.Н. Коваль // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2024. – № 3(34). – С. 190-200. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.52.74.019. – EDN CDBDHW.
9. Куртов, С.О. Метод экспериментального исследования гидравлического сопротивления напорных пожарных рукавов, выполненных из современных материалов / С.О. Куртов, В.П. Малый // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 4(53). – С. 22-27. – EDN BFKQFL.
10. Кузовлев А.В., Николаев А.Н. Расчет сил и средств для перекачки огнетушащих веществ к месту пожара на местности с подъемом //Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2016. – Т. 1. – № 1 (7). – С. 125-129.

References

1. Kurtov, S.O. Critical Analysis of Methods for Uninterrupted Water Supply to a Fire Site / S.O. Kurtov, A.Yu. Troyak, and V.P. Maly // Current Issues in Fire Safety and Emergency Protection: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference, Krasnoyarsk, April 21, 2023. – Zheleznogorsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian Fire and Rescue Academy" of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies, and Disaster Relief of the Russian Federation, 2023. – Pp. 97-101. – EDN PBNWVS.

2. Tarasov, S.V. Organization of the supply (transportation) of fire-extinguishing substances for fire extinguishing by pumping / S.V. Tarasov, D.Yu. Pigusov, N.S. Pustovalova // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2024. – No. 2. – Pp. 62-72. – DOI 10.25257/FE.2024.2.62-72. – EDN SRMTJD.
3. Tarasov S.V., Pigusov D.Yu., Pustovalova N. S. Organization and calculation of the number of fire trucks for the delivery of water to the fire site in rural and urban settlements // Fires and emergencies: prevention, elimination. – 2025. – No. 2. – Pp. 43-54.
4. Kurtov, S.O. Empirical Aspects of Existing Methods for Organizing Uninterrupted Supply of Fire-Extinguishing Substances at a Fire Scene / S.O. Kurtov, V.P. Maly, and V. M. Makarov // Actual Problems of Safety in the Technosphere. – 2025. – No. 1(17). – Pp. 50-55. – DOI 10.34987/2712-9233.2025.42.50.007. – EDN OJMPSJ.
5. Barakovskikh S.A., Karama E.A. Improvement of fire extinguishing methods in conditions of unsatisfactory fire water supply // Technosphere Safety. – 2018. – Vol. 4. – No. 21. – Pp. 26-29.
6. Duplyakov G.S., Malyutin O.S., Laptev D.A. Criteria for the rational organization of pumping and water delivery for firefighting needs // Scientific and Analytical Journal "Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia". – 2020. – No. 1. – Pp. 83-93.
7. Samokhvalov, Yu.P. Pumping. Calculation of Parameters / Yu.P. Samokhvalov, A.V. Yermilov // Modern Problems of Civil Protection. – 2024. – No. 4(53). – Pp. 28-38. – EDN OJDDR.
8. Kurtov, S.O. Computational and experimental determination of the actual values of the maximum throughput of pressure fire hoses of 20-meter length with different diameters of the conditional passage / S.O. Kurtov, V.P. Maly, Yu. N. Koval // Siberian Fire and Rescue Bulletin. – 2024. – № 3(34). – С. 190-200. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.52.74.019. – EDN CDBDHW.
9. Kurtov, S.O. The method of experimental research of the hydraulic resistance of pressure fire hoses made of modern materials / S.O. Kurtov, V. P. Maly // Modern problems of civil protection. – 2024. – No. 4(53). – Pp. 22-27. – EDN BFKQFL.
10. Kuzovlev A.V., Nikolaev A.N. Calculation of forces and means for pumping fire extinguishing agents to the fire site on terrain with an ascent // Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response. – 2016. – Vol. 1. – No. 1 (7). – Pp. 125-129.

Информация об авторах

Я.В. Гребнев – кандидат технических наук

Information about the author

Ya.V. Grebnev – candidate of technical sciences

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.10.2025, одобрена после рецензирования 01.12.2025, принята к публикации 15.12.2025.

The article was submitted 01.10.2025, approved after reviewing 01.12.2025, accepted for publication 15.12.2025.