Научная статья
УДК 621.664:532.5:519.876.5

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛОВРАТНЫХ НАСОСОВ ПРИ СТАНДАРТНЫХ И УВЕЛИЧЕННЫХ ЗАЗОРАХ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ

В.А. Наумов[1,*]

[1] Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия
[*] E-mail: van-old@mail.ru

Аннотация. Анализ результатов испытаний коловратных насосов (КН) серии Vitalobe выполнен в статье. Он позволил скорректировать ранее предложенную математическую модель с учетом влияния величины зазоров в рабочей камере. Минимально необходимая частота вращения ротора (ЧВР) начала перекачивания уменьшается линейно с ростом логарифма динамической вязкости жидкости, начиная с 0,01 Па·с. Эта частота обращается в нуль у КН с зазорами стандартных размеров (ЗСР) при 0,5 Па·с, у КН с зазорами увеличенных размеров (ЗУР) – при 1,0 Па·с. Производительность КН равна теоретической величине выше указанных значений вязкости. Экспериментальные данные по затраченной мощности КН Vitalobe с ЗСР и ЗУР, практически, не различаются при одинаковых условиях испытаний. Показатели энергетической эффективности у КН с ЗУР хуже, чем у КН с ЗСР для жидкостей с вязкостью меньшей 1,0 Па·с.

Ключевые слова: *коловратный насос; зазоры в рабочей камере; производительность; затраченная мощность; энергетическая эффективность; математическая модель.*

Для цитирования: Наумов В.А. Сравнение характеристик коловратных насосов при стандартных и увеличенных зазорах в рабочей камере // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2026. Т. 12. № 2. С. 61–76.

Original article

COMPARISON OF THE LOBE PUMPS CHARACTERISTICS WITH STANDARD AND ENLARGED CLEARANCES IN THE WORKING CHAMBER

V.A. Naumov[1,*]

[1] Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
[*] E-mail: van-old@mail.ru

Abstract. The analysis of the test results of Vitalobe series lobe pumps (LP) is performed in the article. It allowed us to adjust the previously proposed mathematical model, taking into account the influence of the size of the clearances in the working chamber. The minimum required rotational speed of the rotor (RSR) of the pumping start decreases linearly with an increase in the logarithm of the dynamic viscosity of the liquid, starting from 0.01 Pa·s. This speed goes to zero for LP with standard size clearances (SSC) at 0.5 Pa·s, for LP with larger size clearances (LSC) at 1.0 Pa·s. The LP performance is equal to the theoretical value above the specified viscosity values. Experimental data on the power consumption of Vitalobe LP with SSC and LSC practically do not differ under the same test conditions. The LP energy efficiency indicators with LSC are worse than those of LP with SSC for liquids with a viscosity of less than 1.0 Pa·s.

Keywords: *lobe pump; clearances in the working chamber; performance; power*

© Наумов В.А. 2026

consumption; energy efficiency; mathematical model.

For citation: Naumov V.A. Comparison of the lobe pumps characteristics with standard and enlarged clearances in the working chamber. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2026. Vol. 12, No. 2, pp. 61–76.

Введение

Коловратные насосы (КН) получают все большее применение пищевой, фармацевтической, косметической и других отраслях, где требуется бережное перекачивание вязких сред с сохранением их структуры. В отличие от шестеренных насосов, также относящихся к зубчатым насосам, КН имеет две камеры. Крутящий момент передается в силовой камере с помощью зубчатых колес. Подача жидкости осуществляется в рабочей камере с помощью кулачков, не имеющих силового контакта, только геометрическое замыкание (рис. 1).

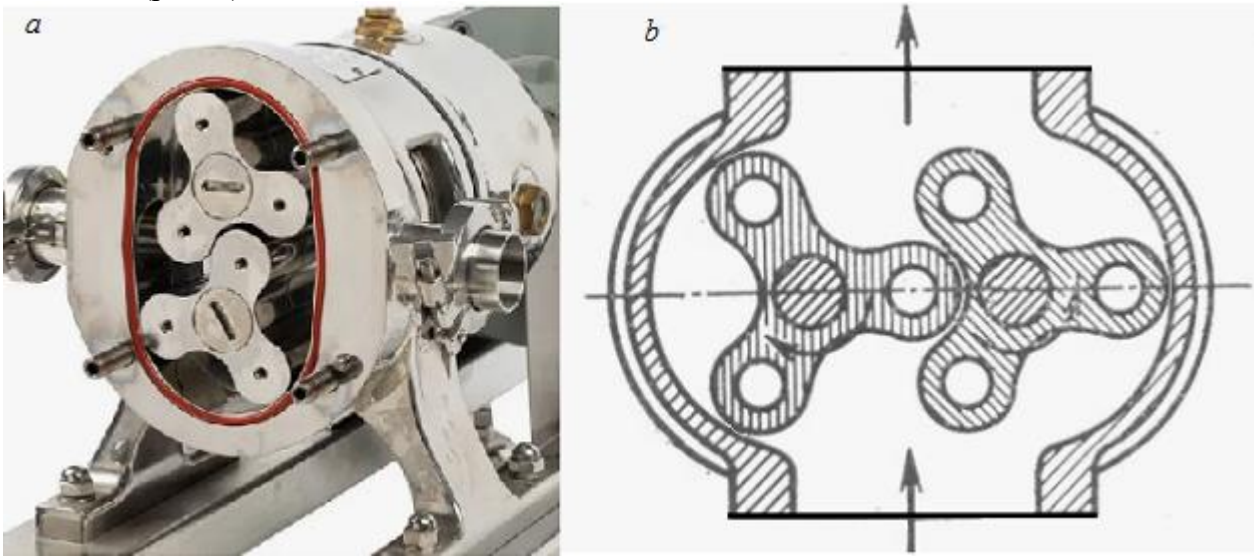


Рисунок 1 – Рабочая камера КН Vitalobe[1] с трехкулачковыми роторами: *a* – вид, *b* – схема

В технической документации КН[2] указывается, что во время работы необходимо соблюдать зазоры между роторами, корпусом ротора и передней крышкой для предотвращения контакта между ними. Если во время работы происходит контакт деталей, это может привести к их повреждению, снижению эффективности работы и даже выходу из строя КН. С другой стороны, увеличение зазоров может привести к снижению производительности КН.

Проблема влияния зазоров на работу КН была теоретически исследована в нескольких публикациях [1-3]. Так в [1] было выполнено компьютерное моделирование течения жидкости в рабочей камере КН. Для чего была использована система уравнений Навье-Стокса на динамической сетке. Частота вращения ротора (ЧВР) варьировалась от 1000 до 5000 об/мин. Результаты численного исследования подтвердили значительное влияние размера зазора между ротором и стенкой корпуса на работу КН. Уменьшение этого зазора с 1,25 мм до 0,5 мм привело к увеличению напора примерно в пять раз. Зазор между двумя

[1] Hygienic Pumps Vitalobe. Characteristic Curves Booklet. KSB Aktiengesellschaft, Frankenthal. 2018. 88 p. URL: https://www.ksb.com/en-kz/lc/Products/Pump/Dry-installed-pump/c/DRY/V06A (дата обращения: 09.03.2026).

[2] Operating & Maintenance Manual for JRZL-100 Series Rotary Lobe Pumps. URL: https://dixonvalve.com/sites/default/files/documents/Rotary-Lobe-Pumps-JRZL-100-Series_0.pdf (access date: 04.04.2026).

роторами варьировался при моделировании от 0,12 мм до 0,15 мм; заметного влияния на производительность КН в теоретическом исследовании не было установлено.

В [2, 3] была предложена новая конструкция полости КН с постепенно изменяющимся зазором для уменьшения величины и колебаний радиальной возбуждающей силы, действующей на ротор. Геометрия рабочей камеры КН была разработана таким образом, чтобы зазор между кулачками и стенкой камеры постепенно изменялся во время зацепления. Решение системы уравнений Навье-Стокса численным методом на динамической сетке позволило изучить особенности течения в камере с предложенной геометрией. Было исследовано влияние пульсации давления на радиальную возбуждающую силу. Приведены некоторые предположения о механизм снижения радиальной возбуждающей силы. Было установлено, что по мере увеличения изменяемого значения зазора интенсивность обратного вращающегося вихря на выходе уменьшается, а пульсации расхода жидкости в выходном сечении заметно снижаются.

Обратим внимание, что столь большие значения ЧВР допустимы лишь для маловязких жидкостей (вода, спирт, молоко). Тогда как применение КН целесообразно для высоковязких сред [4, 5]. В [6] рассмотрена работа КН с большими зазорами китайского производства при высокой вязкости перекачиваемой среды. Путем сравнения с КН других производителей был сделан качественный вывод о снижении подачи с увеличением зазоров в рабочей камере. Но количественного сравнения провести не удалось.

Компания KSB Aktiengesellschaft разместила в открытом доступе на своем Интернет-ресурсе[1] результаты испытаний КН Vitalobe отдельно для агрегатов, которые имеют зазоры стандартного размера (ЗСР) и зазоры увеличенного размера (ЗУР). Причем испытания были проведены в широком диапазоне перепада давления, ЧВР, вязкости перекачиваемой жидкости.

Цель данной статьи – выполнить анализ результатов испытаний[1,2] и скорректировать ранее предложенную математическую модель характеристик КН с учетом ЗСР и ЗУР.

Материалы и методы

Существуют две области зазоров между роторами: зазор между наконечниками роторов (не регулируется), зазор между передней и задней гранями регулируется прокладкой (рис. 2). Толщина ротора и глубина корпуса установлены производителем. При выборе правильного размера ротора единственная корректировка, которую можно выполнить при техническом обслуживании – это соотношение переднего и заднего зазоров.

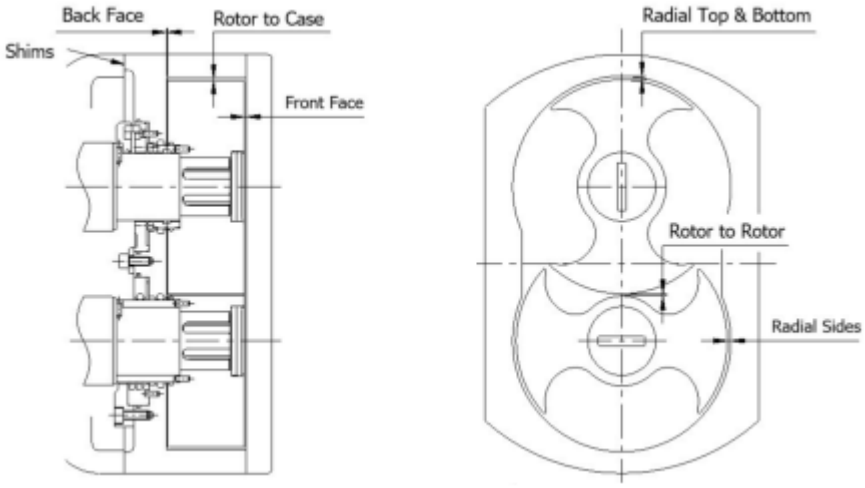


Рисунок 2 – Схема зазоров рабочей камеры КН серии JRZL[1]

В таблице 1 представлены стандартные размеры зазоров рабочей камеры КН серии JRZL. Обозначения в таблице 1: V – рабочий объем КН (объем жидкости, перекачиваемой за один оборот ротора при отсутствии перепада давления), δ_1 – зазор между ротором и задней

поверхностью рабочей камеры (Back Face), δ_2 – зазор между ротором и передней крышкой рабочей камеры (Front Face), δ_3 – зазор между кулачком и боковой поверхностью рабочей камеры (Radial Sides), δ_4 – зазор между кулачком и верхней/нижней поверхностью рабочей камеры (Radial Top & Botton), δ_5 – зазор между кулачками двух роторов (Rotor to Rotor).

Таблица 1 – Стандартные размеры зазоров рабочей камеры КН серии JRZL[2]

Марка КН	V, дм^3	Размеры зазоров, мм				
		δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
JRZL105	0,02	0,07	0,07	0,07	0,07	0,1
JRZL120	0,21	0,15	0,15	0,3	0,13	0,13
JRZL220	0,40	0,2	0,2	0,3	0,15	0,2
JRZL225	0,62	0,2	0,2	0,4	0,2	0,2
JRZL330	1,02	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3
JRZL340	1,44	0,3	0,3	0,45	0,25	0,3
JRZL440	2,27	0,35	0,35	0,55	0,3	0,4
JRZL450	3,34	0,45	0,45	0,7	0,45	0,4

Для анализа данных в табл. 1 рассчитаем характерные размеры рабочей камеры x и зазоров y (последнюю величину, как среднее геометрическое значение зазоров из табл. 1):

$$x = V^{1/3},\ y = (\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3 \cdot \delta_4 \cdot \delta_5)^{1/5}. \quad (1)$$

В статьях [7, 8] было показано, что подачу КН можно рассчитать по формуле:

$$Q \equiv F(n, p, \bar{\mu}) = V \cdot (n - n_0), \quad (2)$$

где n – ЧВР, с$^{-1}$; n_0 – минимально необходимая величина ЧВР для начала перекачивания жидкости (МН ЧВР), с$^{-1}$; $\bar{\mu} = \mu/\mu_0$ – безразмерная динамическая вязкость (БДВ), μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; μ_0 – динамическая вязкость воды при 20°С, Па·с; $p = \Delta P/P_A$ – безразмерный перепад давления (БПД); P_A – атмосферное давление, Па.

Было установлено [7, 8], в общем случае, МН ЧВР является функцией:

$$n_0 \equiv f(\bar{\mu}, p), \quad (3)$$

Результаты испытаний КН Vitalobe[1] позволяют найти указанную функцию f, причем как для ЗСР, так и для ЗУР. Для примера, представлены полученные в результате испытаний[1] зависимости подачи КН Vitalobe 550 с трехкулачковым ротором (как на рис. 1) от ЧВР, БПД и БДВ при ЗСР (рис. 3) и ЗУР (рис. 4).

В графиках на рис. 3 и 4 имеется заметная разница. Во-первых, при ЗУР допускается перепад давления до 0,7 МПа, а при ЗСР – только до 0,5 МПа. Во-вторых, на рис. 4 графики в верхней правой части сходятся на $\bar{\mu} = 1000$, а на рис. 3 уже на $\bar{\mu} = 500$. Это означает, что при ЗУР и любых допустимых перепадах давления у КН будет теоретическая производительность для жидкостей с БДВ более 1000, а при ЗСР – уже более 500.

В [4, 10] было показано, что затраченную мощность КН можно рассчитать так:

$$N = \Phi \cdot N_W,\ N_W = A(p) + B(p) \cdot n, \quad (4)$$

где N_W – затраченная мощность КН при подаче воды, кВт; Ф – безразмерный поправочный множитель, зависящий только от БДВ перекачиваемой жидкости; A, B – эмпирические функции БПД, кВт.

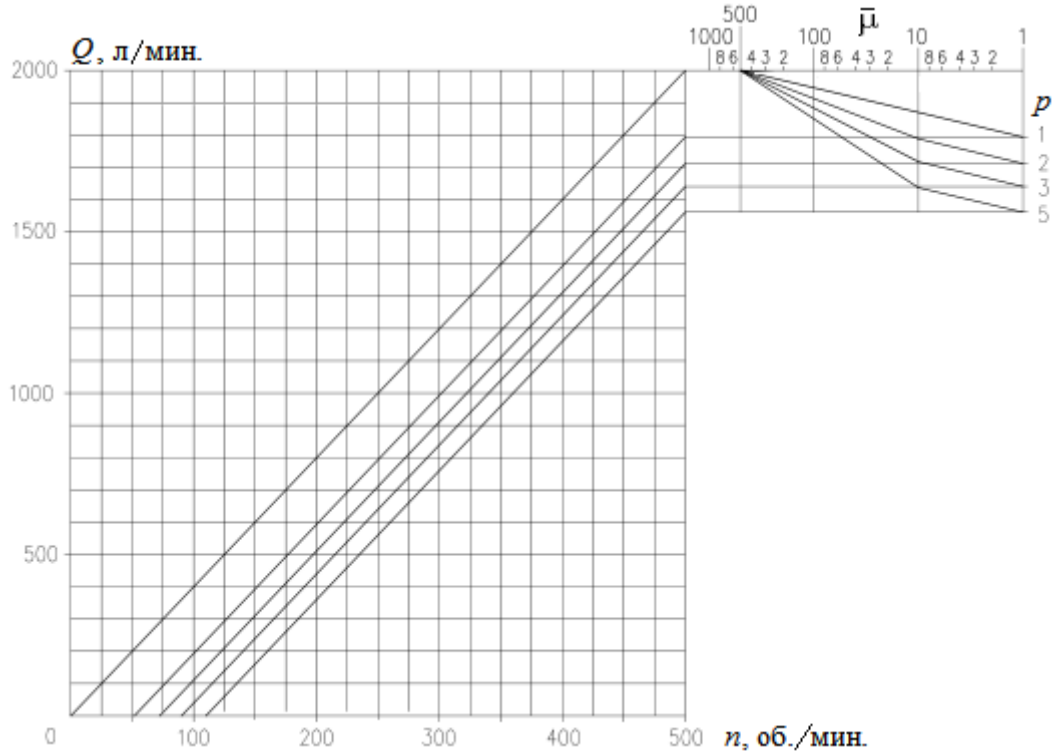


Рисунок 3 – Зависимость подачи КН Vitalobe 550[1] от ЧВР, БПД и БДВ при ЗСР

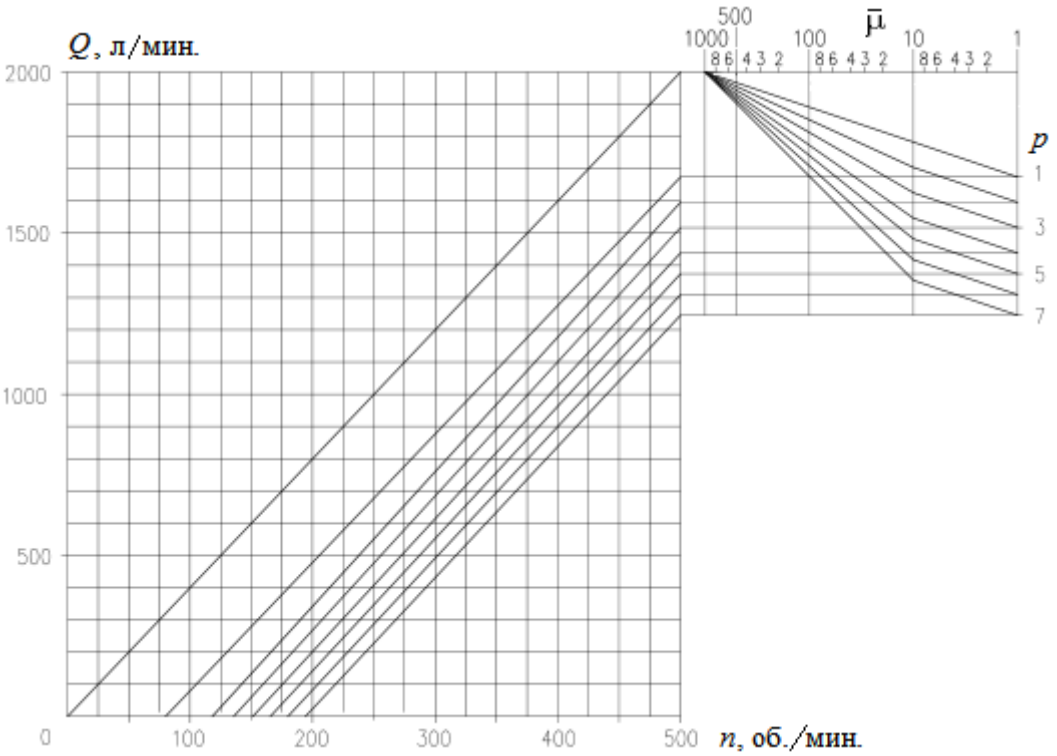


Рисунок 4 – Зависимость подачи КН Vitalobe 550[1] от ЧВР, БПД и БДВ при ЗУР

В отличие от производительности, в испытаниях[1] не было обнаружено разницы в величинах затраченной мощности КН с ЗСР и ЗУР. Выводы теоретического исследования [1] о заметном увеличении напора (значит, и затраченной мощности) с уменьшением зазоров

противоречат этому экспериментальному результату. На рис. 5 и 6 точки (ЗСР), практически, лежат на линиях (ЗУР).

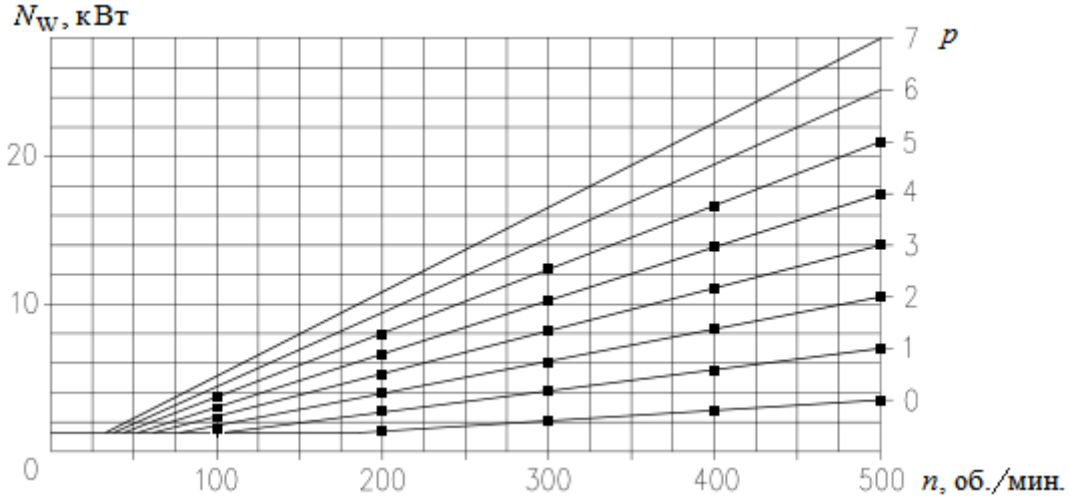


Рисунок 5 – Зависимость затраченной мощности КН Vitalobe 550[1] от ЧВР и БПД при перекачивании воды. Линии – ЗУР, точки – ЗСР

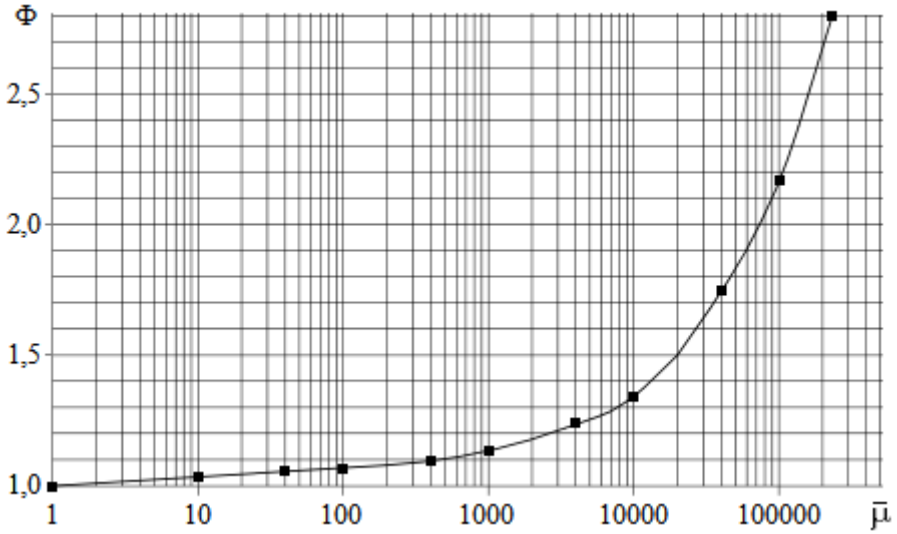


Рисунок 6 – Поправочный множитель в формуле затраченной мощности (4) КН Vitalobe в зависимости от БДВ. Линия – ЗУР, точки – ЗСР

Для оценки энергетической эффективности КН необходимо рассчитать гидравлический коэффициент полезного действия η (ГКПД, %) и показатель удельных энергетических затрат E (ПУЭЗ, кДж/дм^3) по известным формулам:

$$\eta = 100 \cdot P \cdot Q/N, \quad E = N/Q. \tag{5}$$

Результаты и обсуждение

Вначале установим связь между характерными размерами зазоров и рабочей камеры. Для аппроксимации этой связи были использованы многочлены первой и второй степени:

$$y = \varphi_1(x) = a_0 + a_1 x, \quad y = \varphi_2(x) = b_0 + b_1 x + b_2 x^2, \tag{6}$$

где значения эмпирических коэффициентов, найденные методом наименьших квадратов: a_0 = -0,0279; a_1 = 0,319; b_0 = 0,0282; b_1 = 0,168; b_2 =0,0850.

При линейной аппроксимации индекс детерминации получился R^2 = 0,983, а при параболической – R^2 = 0,994. Так что вполне достаточно пользоваться линейной аппроксимацией искомой зависимости.

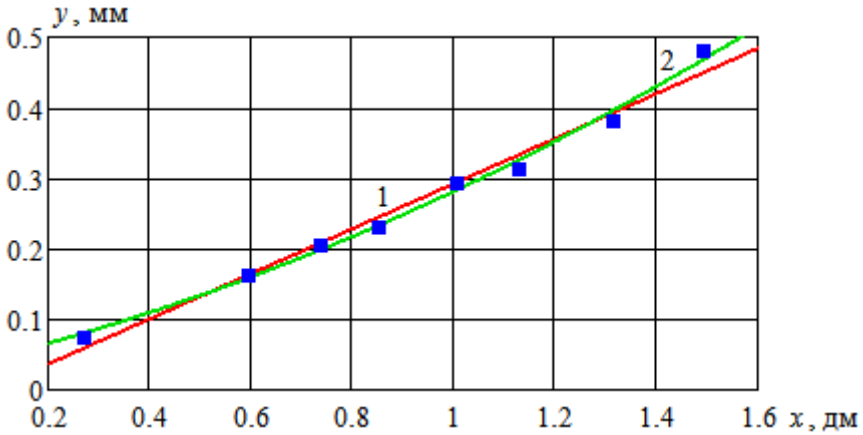


Рисунок 7 – Связь между характерными размерами зазоров и рабочей камеры. Точки – экспериментальные данные, 1 – линейная аппроксимация, 2 – параболическая

Далее будем рассматривать жидкости с БДВ более 10. Тогда на рис. 3 и 4 (верхняя правая часть) зависимости от БДВ будут отрезками прямых линий (в полулогарифмических координатах). По ним, аналогично [11, 12], были найдены зависимости МН ЧВР начала подачи КН Vitalobe-550 (ЗСР и ЗУР) от БДВ при различных значениях БПД.

Уравнение прямых линий на рис. 8 (ЗСР):

$$[f_c(\bar{\mu}, p_k) - f_c(10, p_k)]/[0 - f_c(10, p_k)] = (\log(\bar{\mu}) - \log 10)/(\log 500 - \log 10), \quad (7)$$

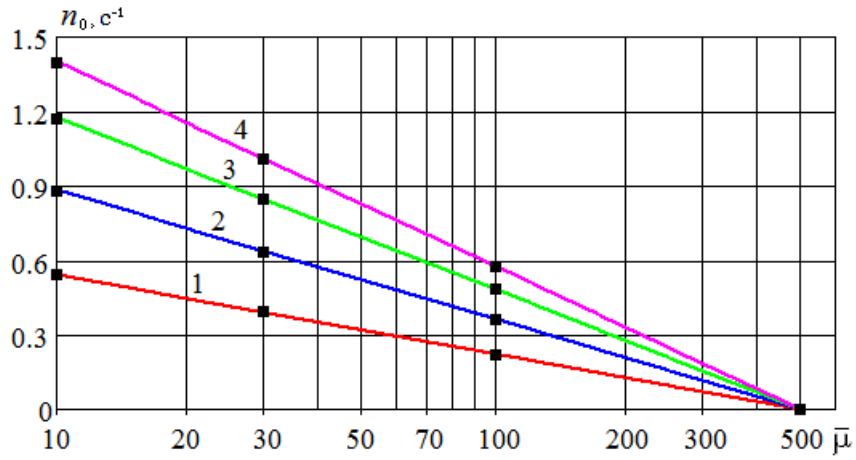


Рисунок 8 – Зависимость МН ЧВР начала подачи КН Vitalobe-550 (ЗСР) от БДВ: 1 – p = 1, 2 – p = 2, 3 – p = 3, 4 – p = 5. Точки – экспериментальные данные[1]

Уравнение прямых линий на рис. 9 (ЗУР):

$$[f_y(\bar{\mu}, p_k) - f_y(10, p_k)]/[0 - f_y(10, p_k)] = (\log(\bar{\mu}) - \log 10)/(\log 1000 - \log 10), \quad (8)$$

Чтобы получить пригодные для расчетов формулы из (7), (8), необходимо знать, как зависят $f_c(10, p)$ и $f_y(10, p)$ от БПД. На рис. 10 показано сравнение экспериментальных точек n_0 при $\bar{\mu}$ = 10 и аппроксимации с помощью показательных функций:

$$f_c(10, p) = 0{,}546 \cdot p^{0{,}606}, \quad f_y(10, p_k) = 0{,}871 \cdot p^{0{,}562}. \tag{9}$$

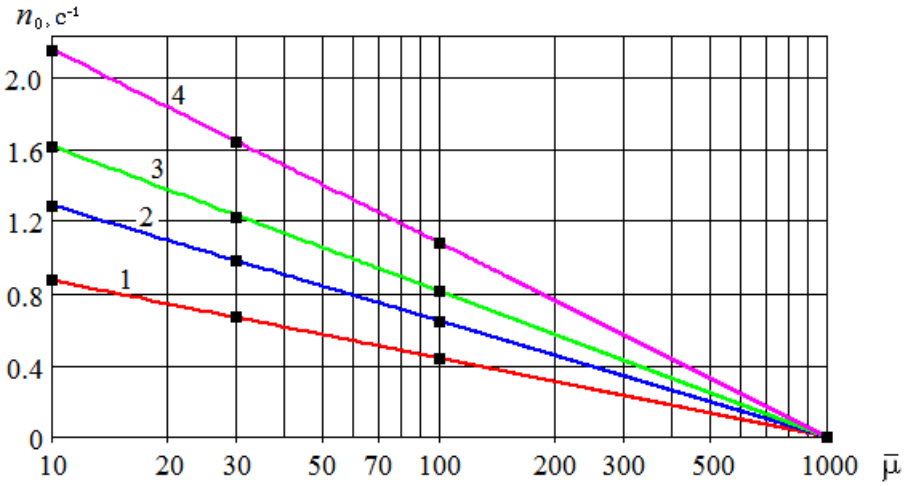


Рисунок 9 – Зависимость МН ЧВР начала подачи КН Vitalobe-550 (ЗУР) от БДВ: 1 – p = 1, 2 – p = 2, 3 – p = 3, 4 – p = 5. Точки – экспериментальные данные[1]

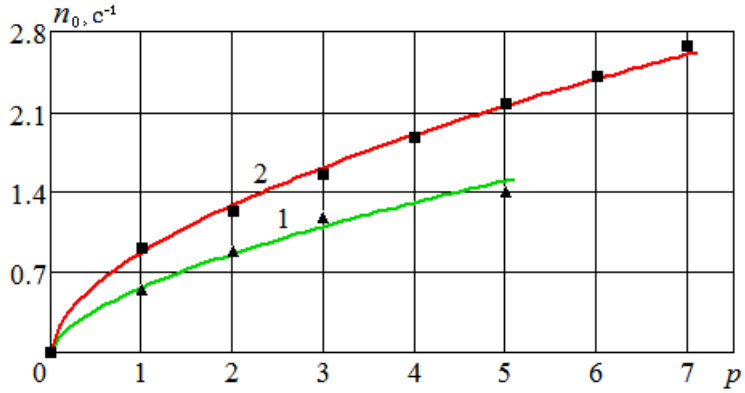


Рисунок 10 – Зависимость МН ЧВР начала подачи КН Vitalobe-550 от БПД при $\bar{\mu}$ =10: 1 – ЗСР, 2 – ЗУР. Точки – по экспериментальным данным, линии – по формулам (9)

Подставляя (9) в (7) и (8), получим зависимости, позволяющие рассчитывать производительность КН по формуле (2), как при ЗСР, так и при ЗУР:

$$f_c(\bar{\mu}, p) = 0{,}546 \cdot [1{,}589 - 0{,}589 \cdot \log(\bar{\mu})] \cdot p^{0{,}606}, \tag{10}$$

$$f_y(\bar{\mu}, p) = 0{,}871 \cdot [1{,}5 - 0{,}5 \cdot \log(\bar{\mu})] \cdot p^{0{,}562}. \tag{11}$$

На рис. 11 и 12 показаны результаты расчета по формуле (2) с учетом (10) и (11) для разных значений БДВ, БПД и ЧВР. Во всех рассмотренных случаях производительность при ЗУР ниже, чем при ЗСР. Однако с увеличением БДМ эта разница уменьшается, а при БДМ, больших 1000, производительность КН равна теоретическому значению: $Q_T = V \cdot n$.

Перейдем к анализу результатов измерения затраченной мощности КН Vitalobe 550. По экспериментальным данным (рис. 5) методом наименьших квадратов были подобраны эмпирические функции в формуле (4), представленные на рис. 13:

$$A = 0{,}0439 - 0{,}502 \cdot p + 0{,}115 \cdot p^2 - 0{,}00894 \cdot p^3, \; B = 0{,}427 + 0{,}435 \cdot p. \tag{12}$$

По рис. 13 экспериментальные точки *B* близки к линейной зависимости (R^2 = 0,99). Тогда как разброс точек *A* заметно больше (R^2 = 0,86). Но в целом, аппроксимация вполне удовлетворительная.

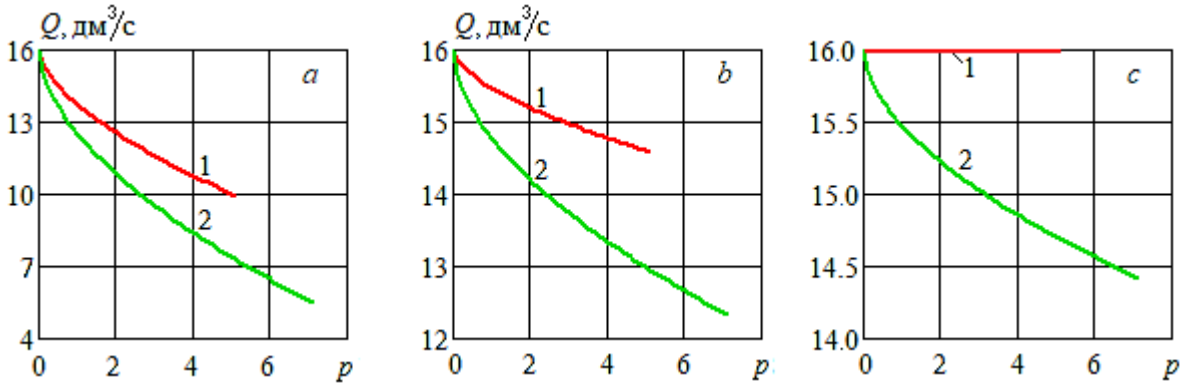


Рисунок 11 – Зависимость производительности КН Vitalobe-550 от БПД при n = 4 $с^{-1}$ и разных значениях БДВ: *a* – $\bar{\mu}$ = 10, *b* – $\bar{\mu}$ = 200, *c* – $\bar{\mu}$ = 500; 1 – ЗСР, 2 – ЗУР

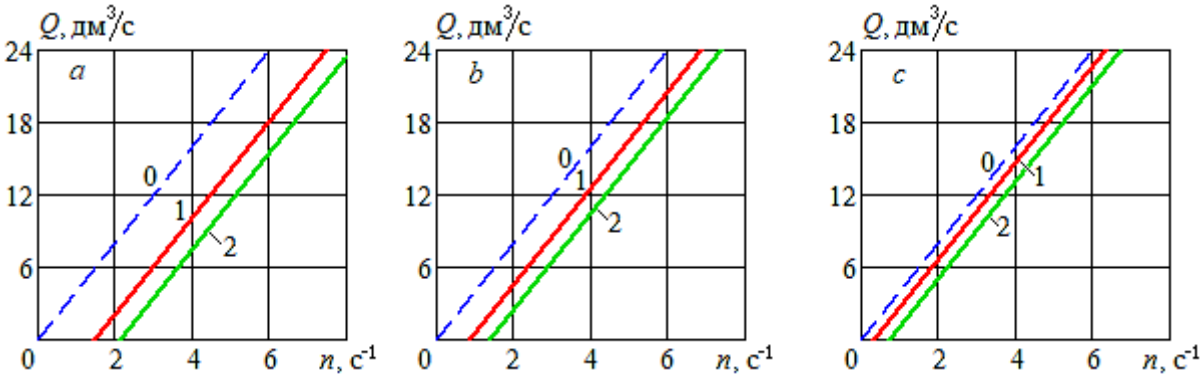


Рисунок 12 – Зависимость производительности КН Vitalobe-550 от ЧВР при p = 5 и разных значениях БДВ: *a* – $\bar{\mu}$ =10, *b* – $\bar{\mu}$ = 50, *c* – $\bar{\mu}$ = 200; 0 – теоретическая подача, 1 – ЗСР, 2 – ЗУР

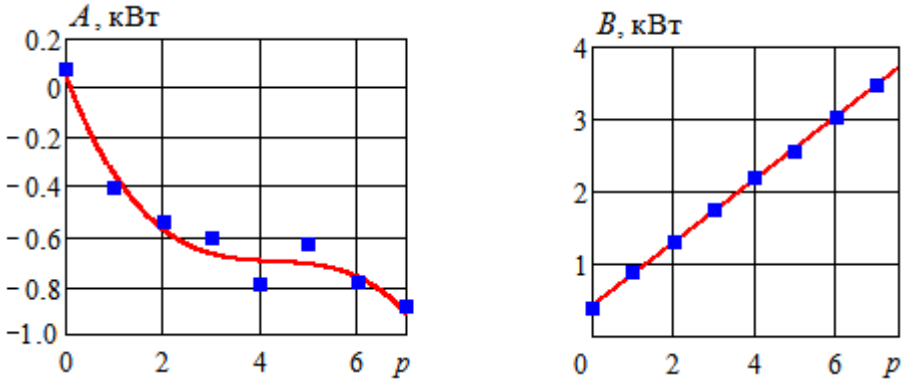


Рисунок 13 – Эмпирические функции в формуле (4) для КН Vitalobe-550. Точки – по экспериментальным данным, линии – расчет по формулам (12)

На рис. 14 представлены результаты расчета затраченной мощности по формулам (4), (12) при перекачивании воды. Видно, что результаты расчета очень хорошо согласуются с экспериментальными точками. Однако, имеющиеся экспериментальные данные[1] были получены для значений мощности выше 1,5 кВт. Очевидно, при ЧВР $n \to 0$ должно выполняться условие $N_W \to 0$. Поэтому на рис. 15 примерный вид функций затраченной

мощности КН Vitalobe 550 при малых ЧВР показан отрезками штриховых прямых линий, стремящихся к началу координат.

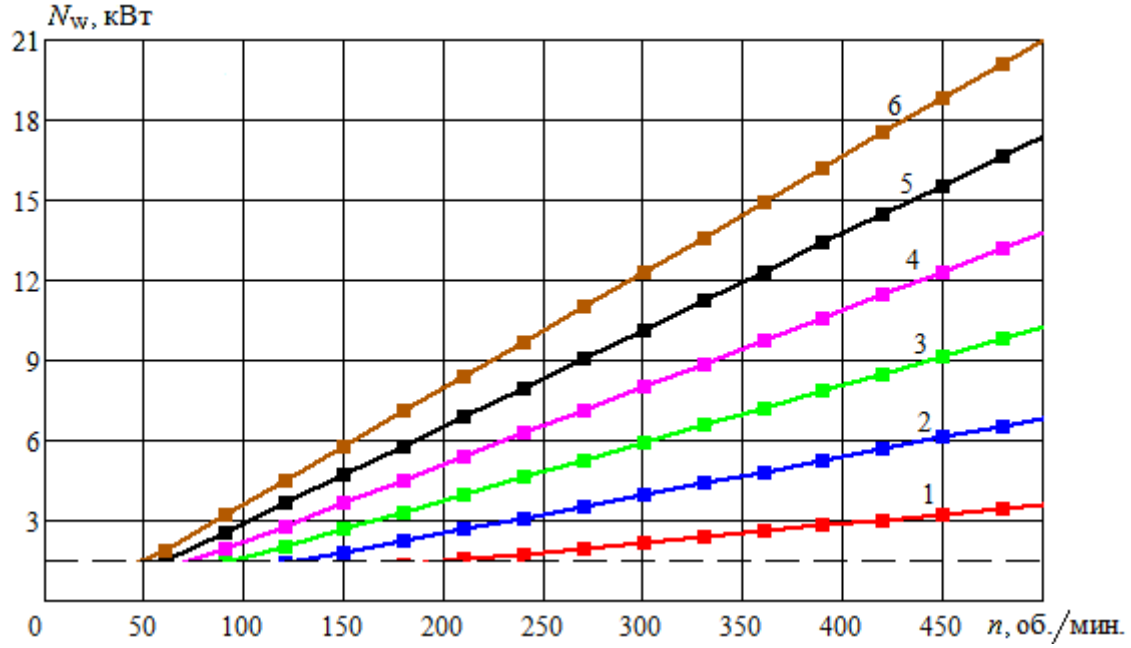


Рисунок 14 – Зависимость затраченной мощности КН Vitalobe 550 от ЧВР для воды при различных БПД: 1 – p = 0, 2 – p = 1, 3 – p = 2, 4 – p = 3, 5 – p = 4, 6 – p = 6. Точки – экспериментальные данные[1], линии – расчет по формулам (4), (12)

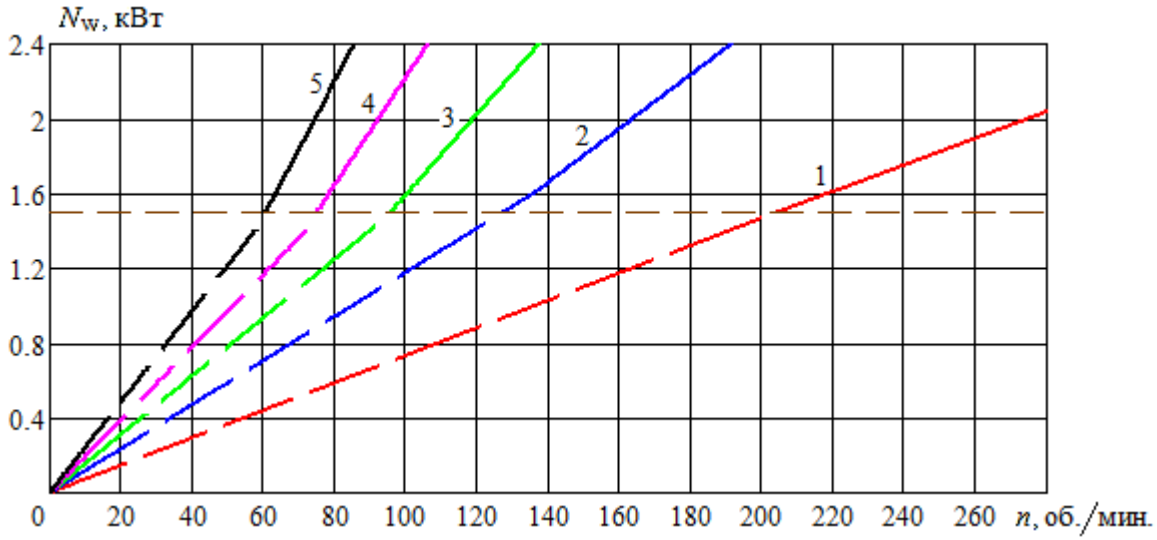


Рисунок 15 – Примерный вид затраченной мощности КН Vitalobe 550 при малых ЧВР для воды при различных БПД: 1 – p = 0, 2 – p = 1, 3 – p = 2, 4 – p = 3, 5 – p = 4, 6 – p = 6

Как было показано в предыдущих работах [4, 10, 13] поправочная функция Ф в формуле (4) является универсальной для КН серии Vitalobe (см. рис. 6). В данной статье была использована сплайн-аппроксимация в полулогарифмических координатах [14, 15].

На рис. 16, 17 приведены результаты расчета зависимости затраченной мощности КН Vitalobe-550 от ЧВР и БПД при различных значениях БДВ. С увеличением ЧВР, БПД и БДВ затраченная мощность растет. Причем различий для КН с ЗСР и ЗУР не установлено. Однако показатели энергетической эффективности будут разными. Это связано с тем, что формулы (5), кроме N, содержат и Q. Как установлено выше, производительность у КН с ЗСР выше, чем у КН с ЗУР, вплоть до значений БДВ $\overline{\mu} = 1000$.

На рис. 18-21 представлены результаты расчета ГКПД и ПУЭЗ по формулам (5). На указанных рисунках результаты расчетов для КН с ЗСР показаны сплошными линиями, а для КН с ЗУР – штриховыми.

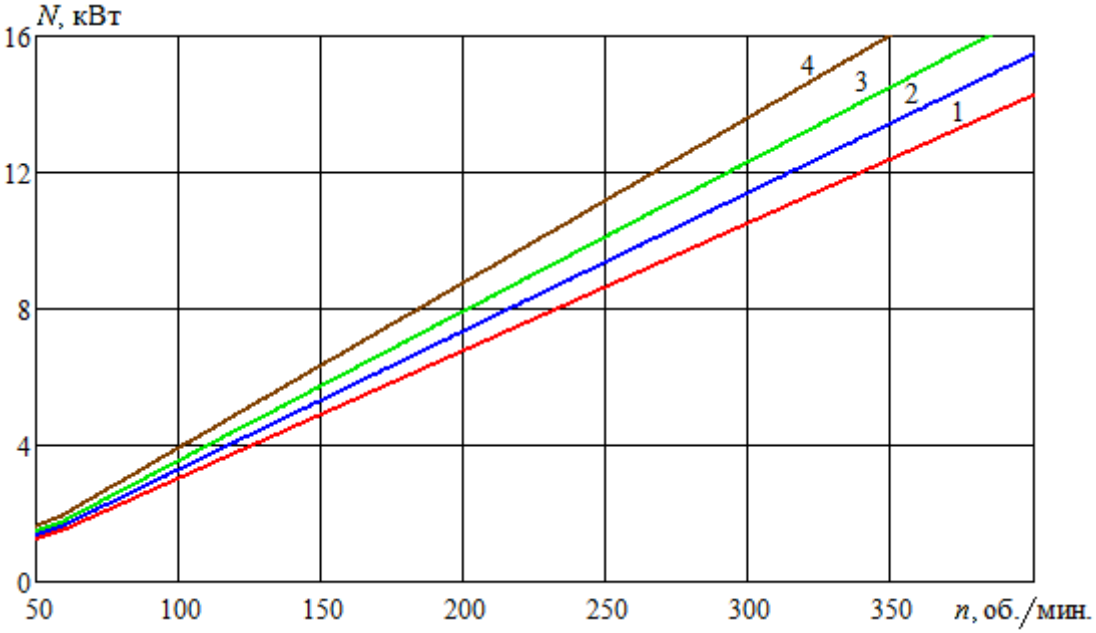


Рисунок 16 – Зависимость затраченной мощности КН Vitalobe-550 от ЧВР при p = 4 и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu}$ =10, 2 – $\bar{\mu}$ =800, 3 – $\bar{\mu}$ =3000, 4 – $\bar{\mu}$ =10000

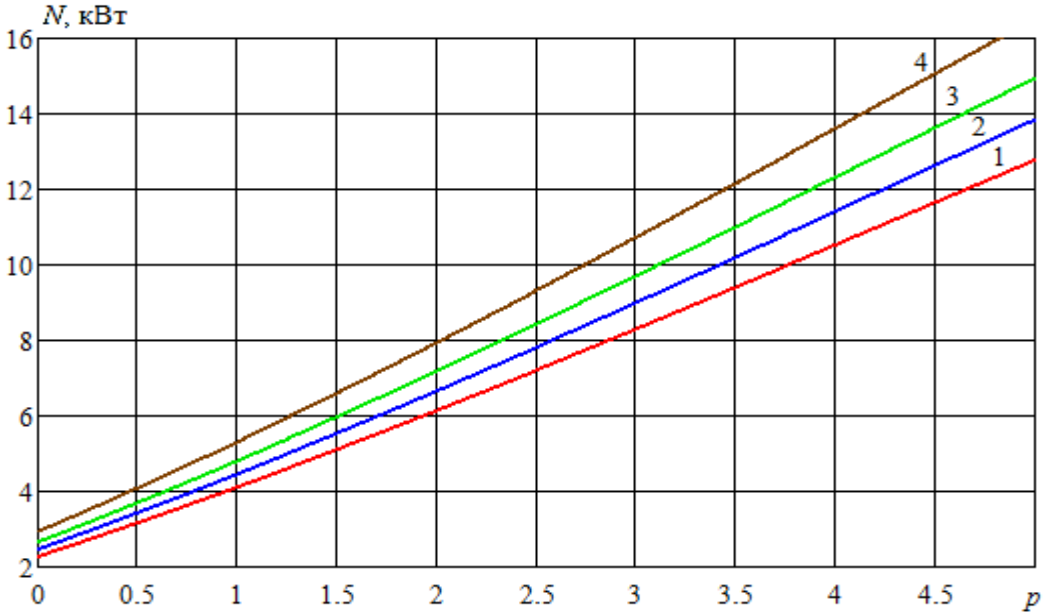


Рисунок 17 – Зависимость затраченной мощности КН Vitalobe-550 от БПД при n = 5 с$^{-1}$ и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu}$ =10, 2 – $\bar{\mu}$ =800, 3 – $\bar{\mu}$ =3000, 4 – $\bar{\mu}$ =10000

На рис. 18, 19 показана зависимость ГКПД и ПУЭЗ от БПД при фиксированной величине ЧВР и трех значениях БДВ. Видно, при сравнительно небольшой вязкости с увеличением БДВ величина ГКПД вначале растет, достигает максимума, а затем начинает снижаться. При БДВ $\bar{\mu}$ =500 и выше ГКПД является возрастающей функцией давления в исследованном диапазоне БПД. Что должно говорить об улучшении энергетической эффективности КН. Однако ПУЭЗ во всех исследованных случаях возрастает с увеличением БПД. Здесь важно уточнить, за счет чего увеличился БПД: статического перепада давления

или гидравлических потерь. Что согласуется с аналогичным явлением, исследованным на центробежных насосах [16, 17].

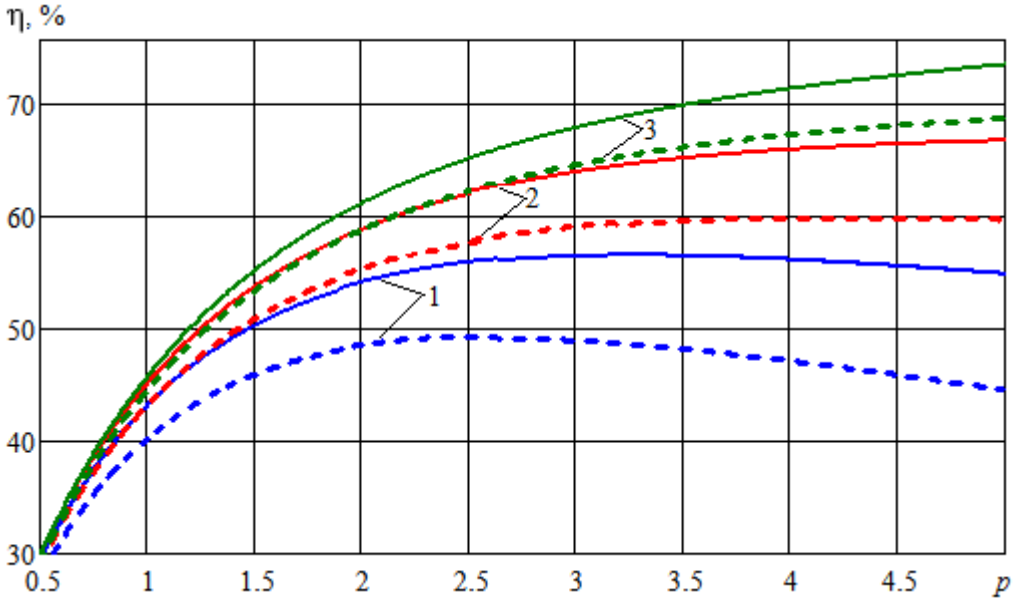


Рисунок 18 – Зависимость ГКПД КН Vitalobe-550 от БПД при n = 5 с$^{-1}$ и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu}$=10, 2 – $\bar{\mu}$=100, 3 – $\bar{\mu}$=500. Сплошные линии – ЗСР, штриховые – ЗУР

На рис. 18 штриховые линии лежат ниже сплошных линий, а на рис. 19 – выше. В обоих случаях это говорит об ухудшении энергетической эффективности КН с увеличением зазоров в рабочей камере. Чем выше БДВ перекачиваемой жидкости, тем меньше указанная разница. Так на рис. 18 при p = 5: если $\bar{\mu}$=10, то η=54,9 % для ЗСР, η=44,6 % для ЗУР (разница 10,3 %); если $\bar{\mu}$=100, то η=66,8 % для ЗСР, η=59,8 % для ЗУР (разница 7,0 %); если $\bar{\mu}$=500, то η=73,5 % для ЗСР, η=68,8 % для ЗУР (разница 4,7 %).

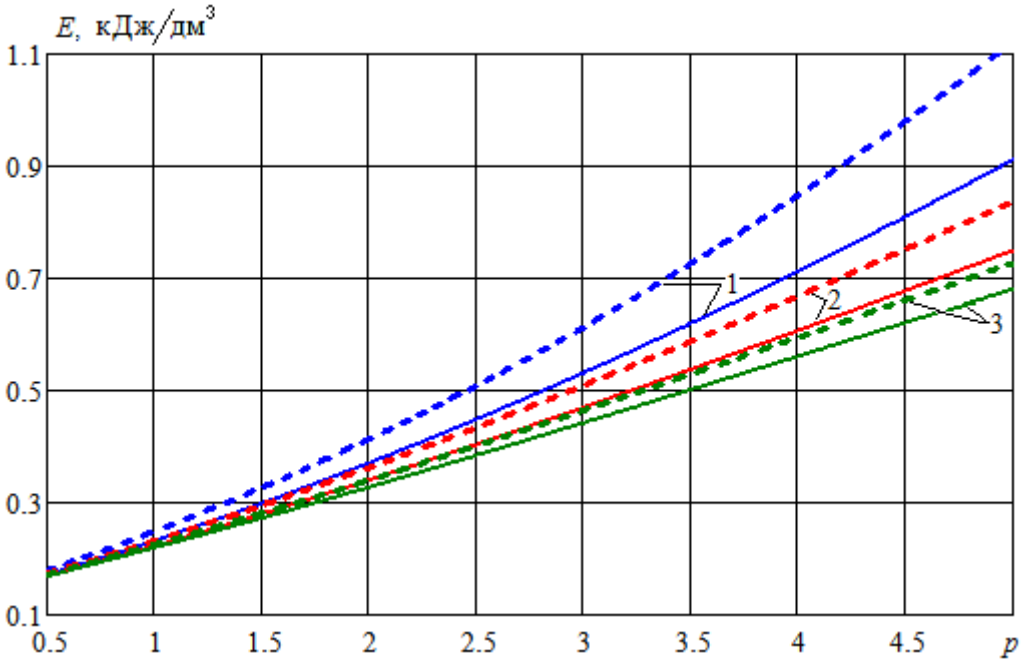


Рисунок 19 – Зависимость ПУЭЗ КН Vitalobe-550 от БПД при n = 5 с$^{-1}$ и различных значениях БДВ: 1 – $\bar{\mu}$=10, 2 – $\bar{\mu}$=100, 3 – $\bar{\mu}$=500. Сплошные линии – ЗСР, штриховые – ЗУР

На рис. 20 и 21 показано, как изменяются ГКПД и ПУЭЗ с увеличением БДВ.

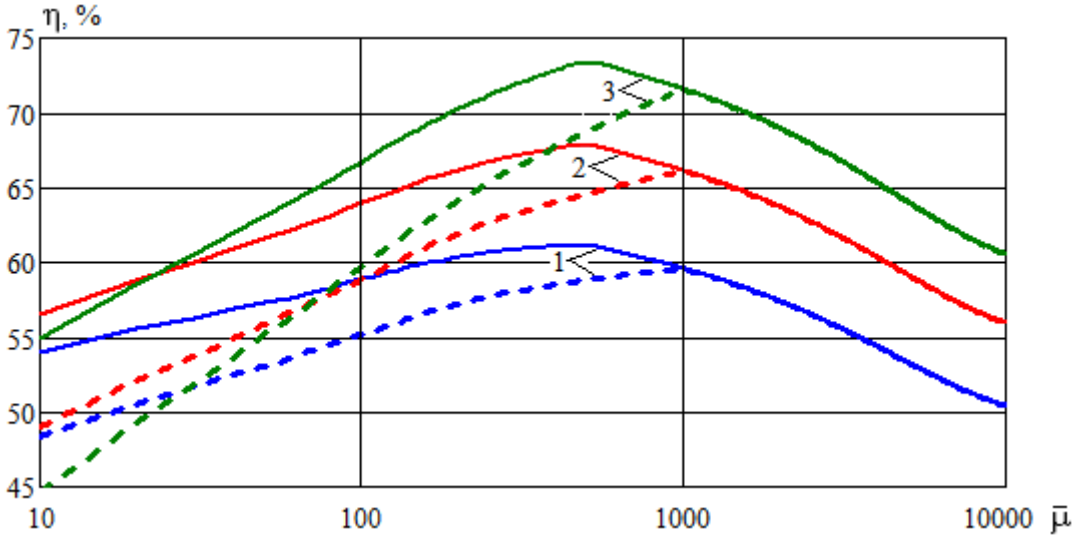


Рисунок 20 – Зависимость ГКПД КН Vitalobe-550 от БДВ при n = 5 с$^{-1}$ и различных значениях БПД: 1 – p = 2, 2 – p = 3, 3 – p = 5. Сплошные линии – ЗСР, штриховые – ЗУР

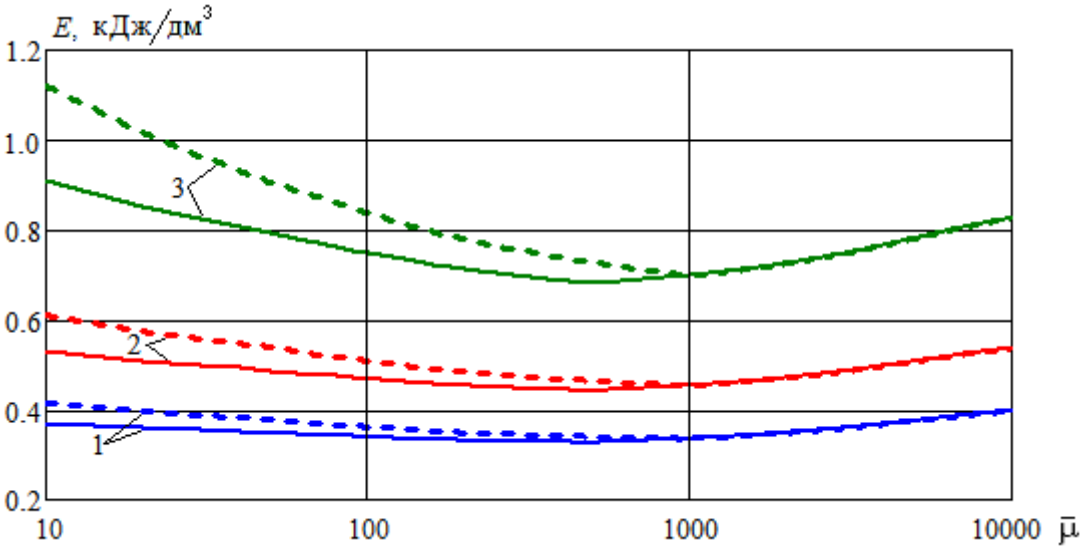


Рисунок 21 – Зависимость ПУЭЗ КН Vitalobe-550 от БДВ при n = 5 с$^{-1}$ и различных значениях БПД: 1 – p = 2, 2 – p = 3, 3 – p = 5. Сплошные линии – ЗСР, штриховые – ЗУР

Зависимость ГКПД КН от БДВ имеет максимум (рис. 20), ПУЭЗ КН – минимум (рис. 21). Величина экстремумов сильно зависит от БПД и ЧВР, положение – незначительно. Так на рис. 21 если p = 2 (линия 1), то E_{min} = 0,327 кДж/дм^3, если p = 3 (линия 2), то E_{min} = 0,442 кДж/дм^3, если p = 5 (линия 3), то E_{min} = 0,668 кДж/дм^3.

Заключение

Таким образом, выполненный анализ результатов испытаний позволил скорректировать ранее предложенную математическую модель характеристик КН с учетом влияния величины зазоров в рабочей камере. Установлено, что связь между характерными размерами зазоров (средним геометрическим) и рабочей камеры (корень кубический из рабочего объема) близка к линейной функции.

У КН серии Vitalobe для жидкостей с $\bar{\mu}$ =10 и более минимально необходимая частота вращения ротора начала перекачивания уменьшается линейно с ростом логарифма БДВ. Эта

частота обращается в нуль при $\bar{\mu}$=500 у КН с ЗСР и при $\bar{\mu}$=1000 с ЗУР. Выше указанных значений БДВ производительность КН равна теоретической величине (произведение рабочего объема на ЧВР) и не зависит от перепада давления. Если БДВ меньше указанных значений, то производительность КН с ЗУР ниже, чем у КН с ЗСР.

Экспериментальные данные по затраченной мощности КН Vitalobe с ЗСР и ЗУР, практически, не различаются при одинаковых условиях испытаний. Затраченная мощность КН Vitalobe является линейной функцией ЧВР, коэффициенты которой представляют собой многочлены БПД. Поправочный коэффициент зависит только от БДВ, для его расчета была использована сплайн-аппроксимация.

Зависимость ГКПД от БДВ имеет максимум, а ПУЭЗ – минимум. Величина экстремумов определяется ЧВР и БПД. У КН с ЗУР показатели энергетической эффективности хуже, чем у КН с ЗСР для перекачиваемых сред с БДВ меньшей 1000; при $\bar{\mu}$ = 1000 и выше они не различаются.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kang Y.H., Vu H.H., Hsu C. Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluation // Journal of mechanics. 2012. Vol. 28, No. 2. P. 229-238.
2. Li Y., Guo D., Li X. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap // Engineering applications of computational fluid mechanics. 2018. Vol. 12. P. 711-723.
3. Li Y.B., Du J., Guo D.S. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump // Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering. 2019. Vol. 41. Paper ID: 195242059. DOI: 10.1007/s40430-019-1781-0.
4. Наумов В.А. Производительность и энергетическая эффективность коловратного насоса при перекачивании мясного фарша // Все о мясе. 2024. № 4. С. 27-32.
5. Наумов В.А., Левичева О.И. Допустимая частота вращения ротора коловратного насоса при транспортировании плавленых сыров // Сыроделие и маслоделие. 2025. № 3. С. 98-103.
6. Левичева О.И., Наумов В.А. Влияние вязкости пищевых масс на подачу коловратных насосов китайского производства // Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов. Материалы IX Международной научно-практической конф. (Сочи, 4-8 января 2025 г.). Керчь: Изд-во КГМТУ, 2025. С. 255-260.
7. Akhmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. Influence of liquid food products viscosity on lobe pump performance (case of pumping fish oil) // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2022. No.3. P. 74-81.
8. Akhmedova N.A., Levicheva O.I., Naumov V.A. Performance characteristics of rotary lobe pumps for high viscosity food medium. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1420. Iss. 1. ID 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/1420/1/012013.
9. Наумов В.А., Левичева О.И. Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 67-80.
10. Ахмедова Н.Р., Левичева О.И., Наумов В.А. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на энергетическую эффективность кулачковых насосов // Известия вузов. Пищевая технология. 2023. № 5-6 (394). С. 88-93.
11. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В. Обобщенные характеристики канализационных насосов высокой производительности // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 10. С. 32-36.

12. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Моделирование характеристик водокольцевых вакуумных насосов // Известия вузов. Машиностроение. 2019. № 10. С. 70-77.

13. Ахмедова Н. Р., Наумов В. А. Показатели энергетической эффективности коловратного насоса при подаче полуфабрикатов из рыбного фарша // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2026. № 1. С. 119–128.

14. Ezhov N., Neitzel F., Petrovic S. Spline Approximation. Part 1: Basic Methodology // Journal of Applied Geodesy. 2018. Vol. 12, No. 2. 12(2). DOI: 10.1515/jag-2017-0029.

15. Ala'yed Q., Qazza A.M., Saadeh R., Alkhazaleh O. A quintic B-spline technique for a system of Lane-Emden equations arising in theoretical physical applications // AIMS Mathematics. 2024. Vol. 9, No. 2. P.4665-4683.

16. Фисенко В.Н. О системе показателей энергетической эффективности насосов в системах водоснабжения и водоотведения // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2018. № 6. С. 54–60.

17. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Энергетическая эффективность гидравлической системы с центробежным насосом // Известия вузов. Машиностроение. 2024. № 10(775). С.54-60.

REFERENCES

1. Kang Y.H., Vu H.H., Hsu C. Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluationю. Journal of Mechanics. 2012. Vol. 28, No. 2, pp. 229-238.

2. Li Y., Guo D., Li X. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 2018. Vol. 12, pp.711-723.

3. Li Y.B., Du J., Guo D.S. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019. Vol. 41. Paper ID: 195242059. DOI: 10.1007/s40430-019-1781-0.

4. Naumov V.A. *Proizvoditel'nost' i energeticheskaya effektivnost' kolovratnogo nasosa pri perekachivanii myasnogo farsha* [Productivity and energy efficiency of the lobe pump when pumping minced meat]. *Vse o myase*. 2024. No. 4, pp. 27-32.

5. Naumov V.A., Levicheva O.I. *Dopustimaya chastota vrashcheniya rotora kolovratnogo nasosa pri transportirovanii plavlenykh syrov* [Permissible rotational speed of the rotary pump rotor during transportation of processed cheeses]. *Syrodelie i maslodelie.* 2025. No. 3, pp. 98-103.

6. Levicheva O.I., Naumov V.A. *Vliyanie vyazkosti pishchevykh mass na podachu kolovratnykh nasosov kitaiskogo proizvodstva* [The effect of the viscosity of food masses on the supply of rotifers made in China]. *Sovremennye protsessy v pishchevykh proizvodstvakh i innovatsionnye tekhnologii obespecheniya kachestva pishchevykh produktov. Materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konf.* (Sochi, 4-8 yanvarya 2025 g.). Kerch': Izd-vo KGMTU, 2025. S. 255-260.

7. Akhmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. Influence of liquid food products viscosity on lobe pump performance (case of pumping fish oil). Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. 2022. No.3, pp. 74-81.

8. Akhmedova N.A., Levicheva O.I., Naumov V.A. Performance characteristics of rotary lobe pumps for high viscosity food medium. IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1420. Iss. 1. ID 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/1420/1/012013.

9. Naumov V.A., Levicheva O.I. *Sravnitel'nyi analiz proizvoditel'nosti pishchevykh kolovratnykh nasosov pri podache vysokovyazkikh sred* [Comparative analysis of the performance of food rotifers when feeding highly viscous media]. *Izvestiya KSTU*. 2025. No. 78, pp. 67-80.

10. Akhmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. *Vliyanie vyazkosti zhidkikh pishchevykh produktov na energeticheskuyu effektivnost' kulachkovykh nasosov* [Influence of viscosity of liquid food products on the energy efficiency of cam pumps]. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya*. 2023. No. 5-6 (394), pp. 88-93.

11. Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V. *Obobshchennye kharakteristiki kanalizatsionnykh nasosov vysokoi proizvoditel'nosti* [Generalized characteristics of high-performance sewage pumps]. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2017. Vol. 78, No. 10, pp. 32-36.

12. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Modelirovanie harakteristik vodokol'cevyh vakuumnyh nasosov* [Modeling of characteristics of water-ring vacuum pumps]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2019. No. 10, pp. 70-77.

13. Akhmedova N.R., Naumov V.A. *Pokazateli energeticheskoi effektivnosti kolovratnogo nasosa pri podache polufabrikatov iz rybnogo farsha* [Energy efficiency indicators of a rotifer pump when feeding semi-finished products from minced fish]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaistvo*. 2026. No. 1, pp. 119-128.

14. Ezhov N., Neitzel F., Petrovic S. Spline Approximation. Part 1: Basic Methodology. Journal of Applied Geodesy. 2018. Vol. 12, No. 2. 12(2). DOI: 10.1515/jag-2017-0029.

15. Ala'yed Q., Qazza A.M., Saadeh R., Alkhazaleh O. A quintic B-spline technique for a system of Lane-Emden equations arising in theoretical physical applications. AIMS Mathematics. 2024. Vol. 9, No. 2, pp. 4665-4683.

16. Fisenko V.N. *O sisteme pokazatelei energeticheskoi effektivnosti nasosov v sistemakh vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [About the system of indicators of energy efficiency of pumps in water supply and sanitation systems]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2018. No. 6, pp. 54-60.

17. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Energeticheskaya effektivnost' gidravlicheskoi sistemy s tsentrobezhnym nasosom* [Energy efficiency of a hydraulic system with a centrifugal pump]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2024. No. 10(775), pp.54-60.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Наумов Владимир Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: van-old@mail.ru)	*Naumov Vladimir Arkad'evich* – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: van-old@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15.03.2026; одобрена после рецензирования 03.04.2026, принята к публикации 17.04.2026.
The article was submitted 15.03.2026; approved after reviewing 03.04.2026; accepted for publication 17.04.2026.