Научная статья
УДК 637.358+621.66

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ КОЛОВРАТНЫХ НАСОСОВ

О.И. Левичева[1,*]

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

Аннотация. Анализ результатов испытаний пищевых коловратных насосов (КН) серии Vitalobe позволил усовершенствовать аналитическую модель нагрузочных характеристик. Впервые получена формула расчета минимально необходимых значений частоты вращения ротора КН для пищевой среды в широком диапазоне значений коэффициента динамической вязкости (КДВ). Показано, что коэффициент и показатель степени в этой формуле являются функциями от логарифма КДВ во всем диапазоне исследованных значений. Подача КН остается меньше теоретического значения при перекачивании пищевых жидкостей вплоть до КДВ 600 сПз. Такой результат соответствует данным испытаний КН серии Vitalobe. Если пищевая среда имеет КДВ более 600 сПз, то подача КН равна теоретическому значению.

Ключевые слова: *коловратные насосы; пищевые жидкости; нагрузочная характеристика; испытания; аналитическая модель.*

Для цитирования: Левичева О.И. Усовершенствование аналитической модели нагрузочных характеристик пищевых коловратных насосов // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 1. С. 18–27.

Original article

THE ANALYTICAL MODEL IMPROVEMENT OF THE FOOD LOBE PUMPS LOAD CHARACTERISTICS

O.I. Levicheva[1,*]

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

Abstract. The analysis of the test results of Vitalove series food lobe pumps (LP) has allowed us to improve the analytical model of load characteristics. For the first time, a formula has been obtained for calculating the minimum required values of the rotor speed LP for a food medium in a wide range of values of the dynamic viscosity coefficient (DVC). It is shown that the coefficient and exponent in this formula are functions of the logarithm of the DVC over the entire range of values studied. The LP performance remains less than the theoretical value when pumping food liquids up to DVC 600 cPs. This result corresponds to the test data of the Vitalobe LP series. If the food medium has a DVC of more than 600 cPs, then the PL performance is equal to the theoretical value.

Keywords: *rotary lobe pump; food liquids; load characteristics; tests; analytical model.*

For citation: Levicheva O.I. The analytical model improvement of the food lobe pumps load characteristics. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol.11, No. 1, pp. 18–27.

© Левичева О.И. 2025

Введение

Коловратные насосы (КН) последние десятилетия стали широко использоваться в различных отраслях промышленности: пищевой, фармацевтической, химической, нефтеперерабатывающей и других [1]. Поэтому многие научные коллективы в России и за рубежом проводят исследования по улучшению конструкции и повышению эффективности работы КН в пищевой отрасли [2-5]. Особо следует подчеркнуть важность исследования [5] влияние вязкости жидкости на работу КН.

Одной из главных характеристик КН является подача Q (объемный расход), которую в технической документации, называют производительностью КН, выражают в л/с, л/мин. или м^3/час. Подача КН зависит от частоты вращения ротора (ЧВР) n, коэффициента динамической вязкости (КДВ) μ перекачиваемой жидкости и перепада давления (ПД) P. Первоначально выпускались КН с фиксированной ЧВР. Компании, производители КН, указывали в технической документации Q при указанной величине ЧВР, одном-двух значениях КДВ и, либо предельно допустимом давлении, либо так называемом, «рабочем давлении». Это приводило к большим погрешностям при проектных расчетах систем подачи вязких жидкостей с помощью КН. В дальнейшем была внедрена возможность изменения ЧВР КН, что положительно сказалось на расширении диапазона условий применения КН. Тем не менее, недостаточность данных о производительности КН в технической документации остается актуальной проблемой. Например, ОАО «Брестмаш»[1] сообщает лишь номинальные параметры производимых КН: ПД предельный 0,25 МПа, ПД номинальный 0,2 МПа; подача при номинальном режиме; номинальная мощность и ЧВР. Правда, предлагает оснастить КН частотным преобразователем. В Руководстве по эксплуатации[2] для насоса КВ-0,7/18 приведен экспериментальный график зависимости подачи от ЧВР, но лишь при максимально допустимом ПД P = 1,8 МПа, полученный на одной высоковязкой жидкости – патоки с коэффициентом кинематической вязкости (КВК) 20 тыс. сСт.

Для гидравлического расчета системы транспортирования высоковязкой жидкости и определения параметров в рабочей точке насосной установки необходима нагрузочная характеристика КН – зависимость подачи от ПД при различных значениях ЧВР и КДВ [6, 7]:

$$Q = f(P, n, \mu). \quad (1)$$

Текущее десятилетие ряд компаний для продвижения своей продукции выполнили полный комплекс испытаний работы КН в широком диапазоне значений КДВ, ЧВР, ПД. Некоторые из них разместили результаты испытаний в графической форме в открытом доступе[3],[4],[5]. В [8] было получено аналитическое выражение (1) по результатам испытания КН WCB[3]; в [9, 10] – по результатам испытаний КН серии PLP[4]. Полученные аналитические выражения имеют различия. Заметим, что графики[3,4] были построены по результатам испытаний с ограниченным числом параметров. Например, на рис. 1 представлены лишь

[1] ОАО «БрестМаш». Роторный насос НМ [Электронный ресурс]. URL: http://www.bmz.by/produktsiya/vz-or2 (accessed 22.01.2025).

[2] АО «ГМС Ливгидромаш». Насосы коловратные высокого давления КВ [Электронный ресурс] URL: https://www.hms-livgidromash.ru/catalog/ (дата обращения: 20.01.2025).

[3] Waukesha Cherry-Burrell. Rectangular flange positive displacement pumps [Electronic Resource]. URL: https://nasos-ru.ru/sites/default/files/docs/pumps/2014/95-07085_220-ul.pdf (accessed 05.01.2025).

[4] Pomac Pumps Co. Lobe Pumps PLP Series. [Electronic Resource]. URL: https://www.pomacpumps.com/en/pharma/lobe-pump-plp/ (accessed 05.01.2025).

[5] KSB Aktiengesellschaft. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet [Electronic Resource]. URL: https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A (accessed 05.01.2025).

пять жидкостей с различными КДВ от 1 до 300 сПз; испытания КН WCB[3] были проведены на жидкостях с КДВ от 1 до 100 сПз. Гораздо больше жидкостей с КДВ в интервале 1-500 сПз было использовано в испытаниях КН Vitalobe[5], но анализ результатов этих испытаний в открытых публикациях отсутствует. Цель данной статьи – усовершенствовать на базе результатов испытаний Vitalobe[5] ранее предложенную аналитическую модель нагрузочных характеристик КН.

1 Материалы и методы

1.1 Исходные данные

Исходными данными послужили графические формы зависимости (1), размещенные в открытом доступе на Интернет-ресурсах компаниями, производящими КН. Примеры таких графиков представлены на рис. 1, 2.

Подачу КН серии PLP компания-производитель предлагает рассчитывать так:

$$Q = Q_T - Q_L, \quad Q_T = V_1 \cdot n, \tag{2}$$

где Q_T – теоретическая подача при ЧВР n; V_1 – объем жидкости, перекачиваемой за один оборот при P = 0; Q_L – уменьшение подачи, зависящее от ПД и КДВ; величина этого уменьшения определяется по результатам испытаний, представленным на графике (рис. 1).

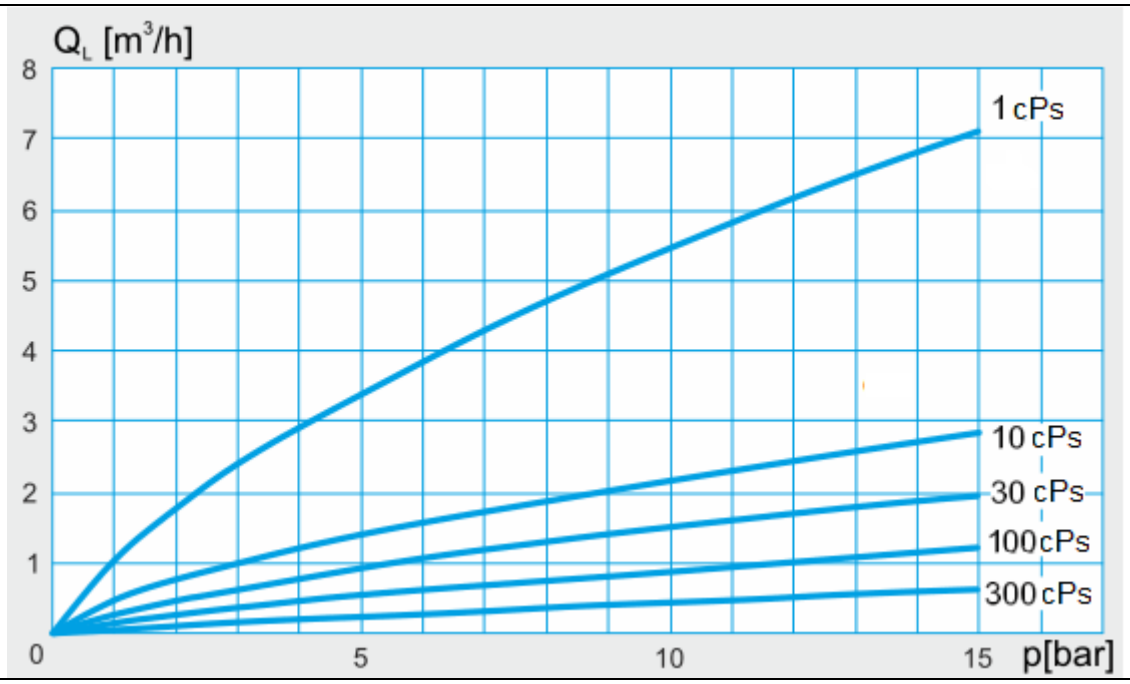


Рисунок 1 – Зависимость уменьшения теоретической подачи коловратного насоса PLP 2-1.5 от ПД при различных значениях КДВ. Рисунок взят с Интернет-ресурса[4].
Единицы измерения: m^3/h – куб. метр в час, cPs – сантипуаз, bar – бар или 10^5 Па

Иначе представлены результаты испытаний пищевых КН Vitalobe[5] (рис. 2). Левая часть рис. 2 соответствует перекачиванию воды. Линии в этой части рисунков параллельны. Значит, что объем воды V_1, перекачиваемой за один оборот, не зависит от ПД. Увеличение ПД приводит к уменьшению подачи (линии 1-10). Но возрастание вязкости жидкости влечет возрастание подачи КН. Этот эффект на рис. 2 учитывается корректировкой в правой верхней части. Например, на воде при P = 6 бар зависимость Q от n на рис. 2 описывается прямой линией 6. Пусть КН перекачивает жидкость с КДВ равным 30 сантипуаз. Тогда найдем пересечение соответствующей ломаной линии (6 бар) и отрезка (μ=30 сПз) в правой

верхней части рис. 2 – точка А. Стрелка показывает, что в данном случае графиком зависимости *Q* от *n* будет прямая линия 3.

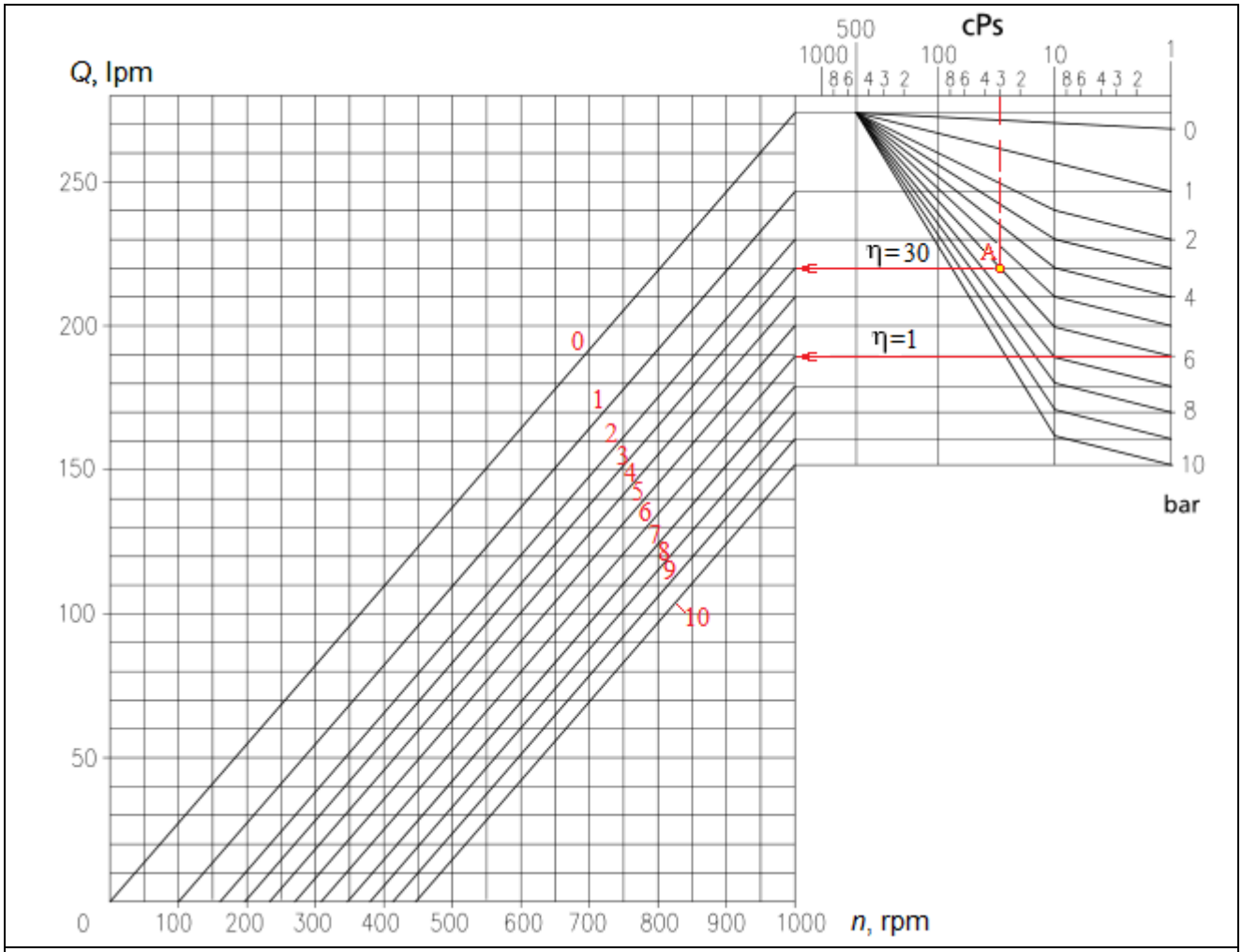


Рисунок 2 – Зависимость подачи коловратного насоса Vitalobe-215 от ЧВР при различных значениях ПД и КДВ. Основа рисунка взята с Интернет-ресурса[5].
0 – *P*=0; 1 – *P*=1 бар; 2 – *P*=2 бар; 3 – *P*=3 бар; 4 – *P*=4 бар; … 10 – *P*=10 бар;
Единицы измерения: lpm – литры в минуту, rpm – обороты в минуту

Рис. 2 был построен по результатам испытаний при одиннадцати значениях ПД и большом количестве значений КДВ, что позволяет проверить и уточнить ранее разработанную аналитическую модель нагрузочной характеристики КН.

1.2 Аналитические выражения для нагрузочных характеристик

Было установлено [8], что в общем случае минимальное значение ЧВР n_0 ($с^{-1}$), при котором начинается перекачивание пищевой жидкости, зависит от ПД нелинейно. Сравнение с результатами испытаний по перекачиванию воды позволили аппроксимировать указанную зависимость показательной функцией:

$$n_0 = B \cdot p^{\alpha}, \qquad (3)$$

где $p = P/P_A$ – безразмерный перепад давлений; P_A – атмосферное давление; B, α – эмпирические коэффициенты, например, для КН WCB-024 они равны α=0.62; B=1.246 $с^{-1}$.

Формула [8] для расчета подачи КН, перекачивающего воду:

$$Q_W \equiv f_W(n, p) = V_1 \cdot [n - n_0(p)], \quad (4)$$

где V_1 – объем жидкости, перекачиваемой за один оборот при $p = 0$.

По формуле (4) при перекачивании воды подача наибольшая, если отсутствует ПД, она равна теоретической подаче КН: $Q_T = V_1 \cdot n$ (прямая линия 0 на рис. 2)

Очень важно, что $Q \to Q_T$ при росте $\eta = \mu/\mu_0$. где μ, μ_0 – КДВ перекачиваемой пищевой жидкости и воды при 20°С, соответственно. Для описания указанного эффекта в [8] была предложена формула:

$$Q = f_W(n,0) - (f_W(n,0) - f_W(n,p)) \cdot \Theta(\eta), \quad (4)$$

где $\Theta(\eta)$ – убывающая функция, обладающая следующими свойствами:

$$\Theta(1) = 1; \ \eta \to \infty \Rightarrow \Theta(\eta) \to 0.$$

Такими свойствами обладают функции $\Theta(\eta) = \eta^{-\beta}$. Наибольший индекс детерминации для КН WCB-024 был получен в [8] при β=0,50. Подстановка $\Theta(\eta)$ в (4) дает

$$Q \equiv f(n, p, \eta) = f_W(n,0) - [f_W(n,0) - f_W(n,p)] \cdot \eta^{-\beta}, \quad (5)$$

Если подставить (2), (3) в (5), то после упрощения получим формулу:

$$f(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - B \cdot p^{\alpha} \cdot \eta^{-\beta}), \quad (6)$$

Проверка показала возможность применения формулы (6) и для КН серии PLP[4]. Но эмпирические коэффициенты отличаются от КН WCB-024. В [6] для КН PLP 2-1.5 было получено α=0,707, β=0,40; в [7] для КН PLP 2-1.5 – α=1,0, β=0,37.

2 Результаты и обсуждение

Анализ формулы (6) с помощью методов [11, 12] показал целесообразность ее представления в следующем виде:

$$Q \equiv F(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - n_{\eta 0}), \ \ n_{\eta 0} \equiv \Psi(p, \eta), \quad (7)$$

где $n_{\eta 0}$ – минимальное значение ЧВР начала перекачивания для произвольной жидкости, а не n_0 для воды, как в формуле (4).

Для определенности воспользуемся данными испытаний КН Vitalobe-100[5]. Было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по формуле (3) минимального значения ЧВР, при котором начинается перекачивание жидкости. Оказалось, что величину α можно считаться константой C при η>10 0,57; до этого α является возрастающей линейной функцией от логарифма η (рис. 3*a*):

$$\alpha \equiv \varphi(\eta) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 \cdot lg\, \eta, & при\ \eta \le 10 \\ C, & при\ \eta > 10. \end{cases} \quad (8)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-100 равны: α_0 = 0,413; α_1 = 0,157; C = 0,57.

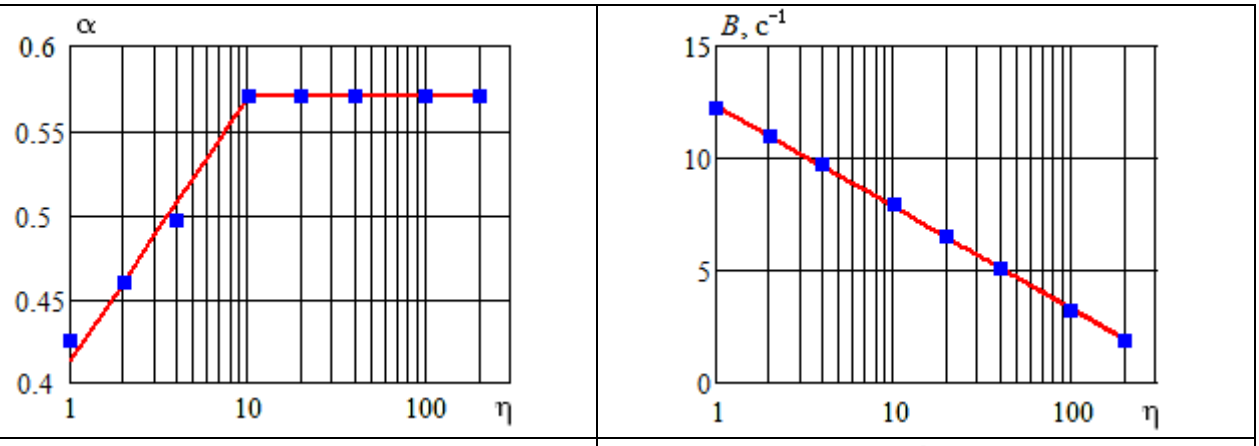
Величина B во всем диапазоне КДВ оказалась убывающей линейной функцией от логарифма η (рис. 3*b*):

$$B \equiv \psi(\eta) = B_0 - B_1\, lg\, \eta, \quad (9)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-100 равны: B_0 = 12,364 c^{-1}; B_1 = 4,538 c^{-1}.

По рис. 3 согласие результатов расчетов по формулам (8), (9) с экспериментальными точками вполне удовлетворительное. Формула для минимальной ЧВР будет следующая:

$$n_{\eta 0} \equiv \Psi(p, \eta) = \psi(\eta) \cdot p^{\varphi(\eta)}. \quad (10)$$



a *b*

Рисунок 3 – Эмпирические функции к формуле (10) для Vitalobe-100: *a* – показатель степени; *b* – размерный коэффициент. Точки получены на основе экспериментальных данных[5], линии – результаты расчета по формулам (8) и (9)

На рис. 4 представлено сравнение результатов расчета по формуле (10) с данными испытаний Vitalobe-100[5]. Индекс детерминации получился очень высоким R^2 = 0,998. Если же полагать α и *B* константами, то индекс детерминации будет менее 0,8.

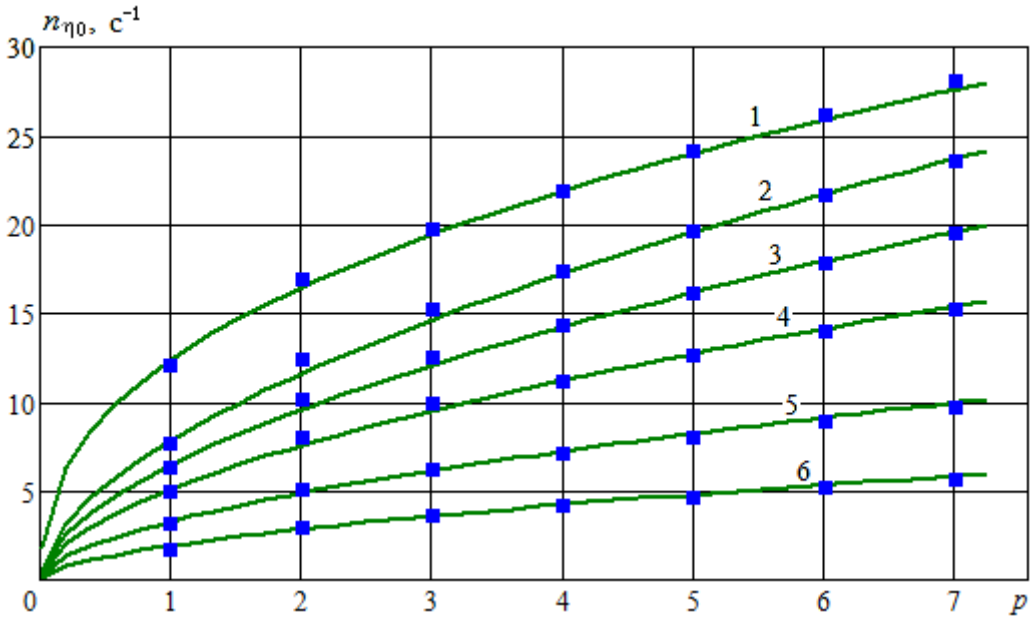


Рисунок 4 – Зависимость минимального значения ЧВР Vitalobe-100, при котором начинается перекачивание жидкости, от ПД при различных значениях безразмерного КДВ:
1 – η=1, 2 – η=10, 3 – η=20, 4 – η=40, 5 – η=100, 6 – η=200.
Точки – данные испытаний Vitalobe-100[5], линии – расчет по формуле (10)

Формула (7) с учетом (10) примет следующий вид

$$Q = V_1 \cdot [n - \psi(\eta) \cdot p^{\varphi(\eta)}], \quad (11)$$

На рис. 5 и 6 представлено сравнение результатов расчета подачи КН Vitalobe-100 с экспериментальными данными. Заметное отклонение экспериментальных точек от расчетных линий наблюдается лишь при сравнительно небольших значениях КДВ (линии 1 на рис. 5 и 6).

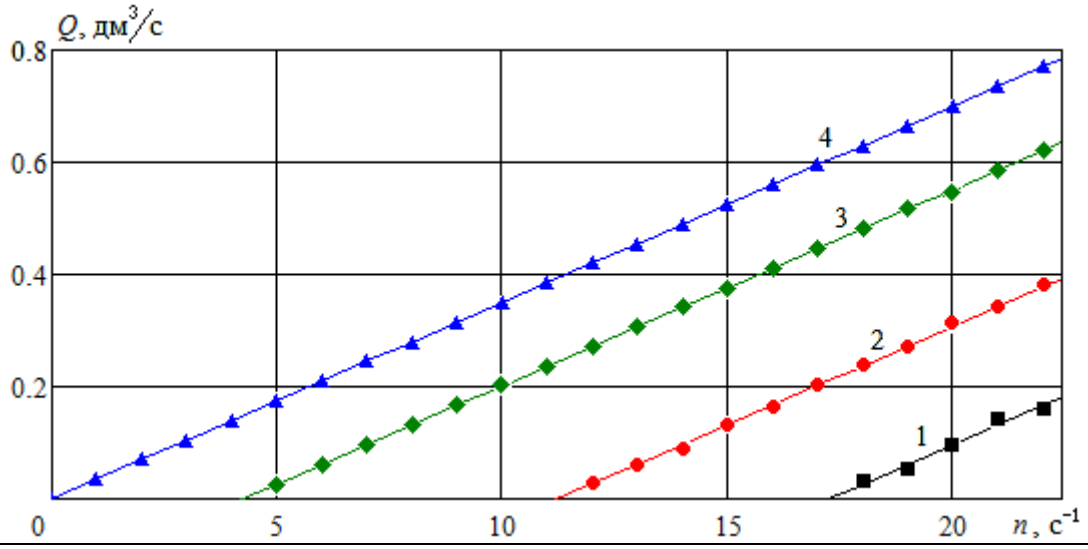


Рисунок 5 – Зависимость подачи КН Vitalobe-100 от ЧВР при p=4 и различных значениях КВД: 1 – η=10, 2 – η=40, 3 – η=200, 4 – η=600.
Точки – экспериментальные данные[5], линии – расчет по формуле (11)

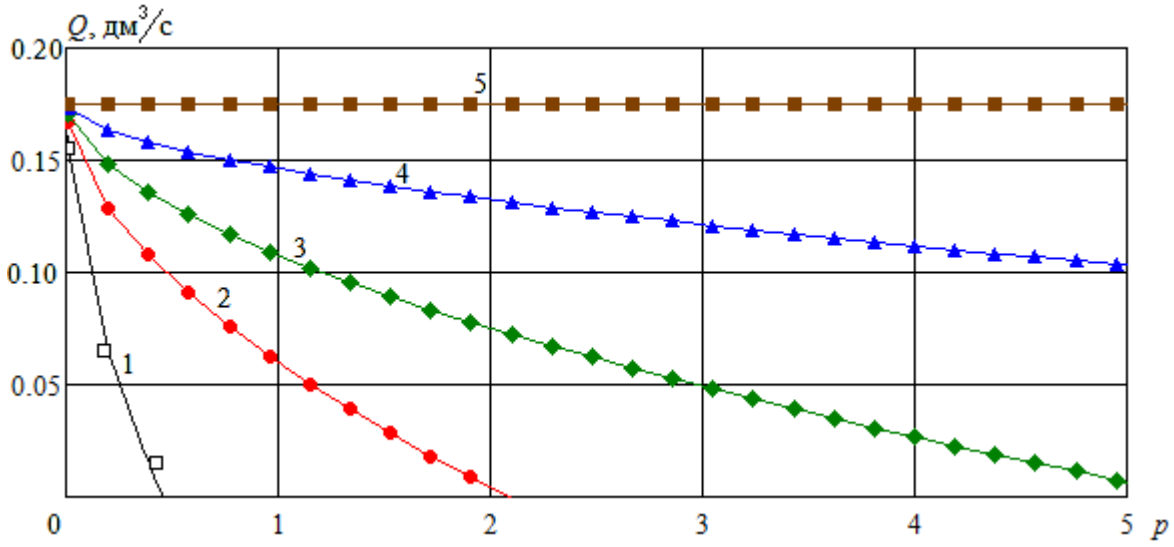


Рисунок 6 – Зависимость подачи КН Vitalobe-100 от ПД при n=5 с$^{-1}$ и различных значениях КВД: 1 – η=10, 2 – η=40, 3 – η=200, 4 – η=350, 5 – η=600
Точки – экспериментальные данные[5], линии – расчет по формуле (11)

Согласно усовершенствованной аналитической модели, отклонение подачи КН от теоретического значения Q_T будет лишь при η ≤ 600 (линия 4 на рис. 5, линия 5 на рис. 6). По модели [8] такой эффект наблюдался уже при η ≥ 200. Результаты испытаний[4] ограничиваются КДВ η=300 (см. рис. 1).

Заключение

Таким образом, впервые получена формула расчета минимально необходимых значений ЧВР КН для пищевой среды с произвольной величиной КДВ, а не только для перекачивания воды. Показано, что коэффициент *B* в этой формуле является убывающей линейной функцией от логарифма η во всем диапазоне исследованных значений КДВ. Показатель степени α является возрастающей линейной функцией от логарифма η при η≤10; α=const, если η>10. Усовершенствованная аналитическая модель нагрузочной характеристики КН, во-первых, более точно описывает зависимость подачи пищевой жидкости от ПД и КДВ, во-вторых, предназначена для проведения расчетов в более широком диапазоне КДВ. По предложенной модели подача КН остается меньше теоретического значения при перекачивании пищевых жидкостей вплоть до КДВ 600 сантипуаз. Такой результат соответствует данным испытаний КН серии Vitalobe. Если КДВ более 600 сантипуаз, то подача КН такой жидкости равна теоретическому значению (произведение рабочего объема V_1 на ЧВР).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Karassik I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Displacement Pumps // Pump Handbook. Ed. I.J. Karassik. New York: McGraw-Hill, 2001. P. 609–640.

2. Jung S.Y., Han S.M., Cho H.Y., Kim C. Automated design system for a rotor with an ellipse lobe profile // Journal of Mechanical Science and Technology Mechanical Science and Technology. 2009. V. 23. No. 1. P. 2928–2937.

3. Kang Y.H., Vu H.H. A newly developed rotor profile for lobe pumps: Generation and numerical performance assessment // Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. V. 28. No, 3. P. 915-926.

4. Гиноян Р.В., Кулаткова А.С. Применение кулачковых насосов в технологической линии производства мороженного с целью стабилизации подачи смеси // Современные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции: VI Международная научно-практическая конференция (31.03.2020): материалы. Краснодар: КубГАУ, 2020. С. 88-92.

5. 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. V. 41. P. 1-11.

6. Ахмедова Н.Р., Левичева О.И., Наумов В.А. Гидравлический расчет системы подачи плавленого сыра кулачковым насосом // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6. С. 146–156.

7. Наумов В.А. Расчет трубопроводного транспортирования мясного фарша в зависимости от рабочих характеристик коловратного насоса // Все о мясе. 2024. № 6. С. 29-32.

8. Ahmedova 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.

9. 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. V. 1420. Iss. 1. ID 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/1420/1/012013.

10. Наумов В.А. Производительность и энергетическая эффективность коловратного насоса при перекачивании мясного фарша // Все о мясе. 2024. № 4. С. 27-32.

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

12. Наумов В.А. Оценка влияния вязкости жидких пищевых продуктов на нагрузочные характеристики одновинтовых насосов // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51, № 2. С. 290–300.

REFERENCES

1. Karassik I. J., Messina J. P., Cooper P., Heald C. C. Displacement Pumps // Pump Handbook. Ed. I.J. Karassik. New York: McGraw-Hill, 2001, pp. 609–640.
2. Jung S.Y., Han S.M., Cho H.Y., Kim C. Automated design system for a rotor with an ellipse lobe profile. Journal of Mechanical Science and Technology Mechanical Science and Technology. 2009. V. 23. No. 1, pp. 2928–2937.
3. Kang Y.H., Vu H.H. A newly developed rotor profile for lobe pumps: Generation and numerical performance assessment. Journal of Mechanical Science and Technology. 2014. V.28. No, 3, p. 915-926.
4. Ginoyan R.V., Kulatkova A.S. *Primenenie kulachkovyh nasosov v tekhnologicheskoj linii proizvodstva morozhennogo s cel'yu stabilizacii podachi smesi* [The use of cam pumps in the technological ice cream production line in order to stabilize the supply of the mixture]. Sovremennye aspekty proizvodstva i pererabotki sel'skohozyajstvennoj produkcii: VI Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya (31.03.2020): materialy. Krasnodar: KubGAU, 2020, pp. 88-92.
5. 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. V. 41, p. 1-11.
6. Ahmedova N.R., Levicheva O.I., Naumov V.A. *Gidravlicheskij raschet sistemy podachi plavlenogo syra kulachkovym nasosom* [Hydraulic calculation of the processed cheese feeding system by a cam pump]. *Vestnik KrasGAU*. 2024. No. 6, pp. 146–156.
7. Naumov V.A. *Raschet truboprovodnogo transportirovaniya myasnogo farsha s uchetom rabochih harakteristik kolovratnogo nasosa* [Calculation of pipeline transportation of minced meat depending of the lobe pump performance characteristics]. *Vse o myase*. 2024. No. 6, pp. 29-32.
8. Ahmedova 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.
9. 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. V. 1420. Iss. 1. ID 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/1420/1/012013.
10. Naumov V.A. *Proizvoditel'nost' i energeticheskaya effektivnost' kolovratnogo nasosa pri perekachivanii myasnogo farsha* [Productivity and energy efficiency of the lobe pump for minced meat pumping]. *Vse o myase*. 2024. No. 4, pp. 27-32.
11. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Modelirovanie harakteristik vodokol'cevyh vakuumnyh nasosov* [Modeling the characteristics of water ring vacuum pumps]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2019. No. 10, pp. 70-77.
12. Naumov V.A. *Ocenka vliyaniya vyazkosti zhidkih pishchevyh produktov na nagruzochnye harakteristiki odnovintovyh nasosov* [Effect of liquid food viscosity on the load characteristics of single-screw pumps]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevyh proizvodstv*. 2021. V.51, No.2, pp. 290–300.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Левичева Оксана Игоревна – аспирант, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: o_levicheva@bk.ru)	*Levicheva Oksana Igorevna* – postgraduate student, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: o_levicheva@bk.ru)

ISSN 2413–9858

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 20.01.2025, принята к публикации 27.01.2025.
The article was submitted 09.01.2025; approved after reviewing 20.01.2025; accepted for publication 27.01.2025.