

Научная статья

УДК 664.3.032+621.66

DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-67-80

Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред

Владимир Аркадьевич Наумов¹✉, Оксана Игоревна Левичева²

^{1,2} Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹vladimir.naumov@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

²o_levicheva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5922-9123>

Аннотация. Коловратные насосы (КН) используются для транспортирования пищевых сред с большой вязкостью, когда необходимо сохранить структуру продукта. В статье выполнен сравнительный анализ производительности КН, изготовленных тремя компаниями. Исходными данными послужили находящиеся в открытом доступе результаты испытаний КН этих трех компаний. Для моделирования подачи коловратными насосами плавленых сыров (ПС), сгущенного молока и др. следует использовать подход, базирующийся на нагрузочных характеристиках при перекачивании сред с наибольшими значениями эффективной динамической вязкости (ЭДВ). Производительность КН рассчитывается как произведение рабочего объема на разность между текущей частотой вращения ротора (ЧВР) и ее минимально необходимым значением (МНЗ) для начала подачи жидкости. МНЗ ЧВР у всех изученных КН снижается с увеличением ЭДВ и уменьшением перепада давления. Но абсолютные МНЗ ЧВР могут существенно различаться у разных КН при ЭДВ менее 200 сПз. Для корректного сравнения производительности КН с небольшим различием рабочего объема предложен метод приведения нагрузочной характеристики к безразмерной форме (зависимость безразмерной подачи от безразмерных величин перепада давления и ЧВР). Из трех исследованных агрегатов безразмерная подача КН 034-WCB оказалась наибольшей, однако разница между величинами безразмерной подачи разных КН была существенной лишь при перепаде давления около 1 МПа и ЭДВ менее 300 сПз. ПС, как правило, транспортируются при меньших давлениях. В таких условиях разница безразмерной производительности исследованных КН становится малозначимой. Результаты данного исследования могут быть использованы для подбора КН с необходимыми параметрами.

Ключевые слова: коловратные насосы, производительность, вязкость, давление, безразмерная форма, моделирование.

Финансирование: исследование выполнено в рамках государственного задания НИОКР «Разработка и совершенствование продукционных систем пищевой отрасли».

Для цитирования: Наумов В. А., Левичева О. И. Сравнительный анализ производительности пищевых коловратных насосов при подаче высоковязких сред // Известия КГТУ. 2025. № 78. С. 67–80. DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-67-80.

Original article

Comparative analysis of the performance of food rotary lobe pumps when delivering highly viscous media

Vladimir. A. Naumov¹✉, Oksana. I. Levicheva²

^{1,2}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹vladimir.naumov@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

²o_levicheva@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5922-9123>

Abstract. Lobe pumps (LP) are used for transporting food media with high viscosity when it is necessary to preserve a product structure. The article presents a comparative analysis of the LP performance manufactured by three companies. The publicly available test results of these three companies are served as the initial data. The approach based on the load characteristics when pumping media with the highest values of effective dynamic viscosity (EDV) has been used to simulate the performance of processed cheese (PC) by the lobe pumps. LP performance is calculated as the product of the working volume by the difference between the current rotor speed (RS) and its minimum required value (MRV) to start the liquid flow. The MRV RS decreases with an increase in EDV and a decrease in pressure drop in all studied LP. However, the absolute MRV RS may differ significantly for different LP with an EDV of less than 200 sP. The method is proposed for reducing the load characteristic to a dimensionless form (the dependence of the dimensionless performance on the dimensionless values of the pressure drop, EDV and the RS for a correct comparison of the LP performance with a small difference in the working volume. The dimensionless feed of LP 034-WCB turned out to be the largest of the three studied aggregates. However, the difference between the values of the dimensionless performance of different LP turned out to be significant only at a pressure drop of about 1 MPa and an EDV of less than 300 sP. PS, as a rule, are transported at lower pressures. Under such conditions, the difference in the dimensionless performance of the studied LP becomes insignificant. The results of this study can be used to select LP with the necessary parameters.

Keywords: lobe pumps, performance, viscosity, dimensionless shape, modeling.

Funding: the research was carried out within the framework of the state assignment of research and development work "Development and improvement of food industry production systems".

For citation: Naumov V. A., Levicheva O. I. Comparative analysis of the performance of food rotary lobe pumps when delivering highly viscous media. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025; (78):67–80. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-78-67-80.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих технологических процессах необходимо межоперационное транспортирование пищевых сред по трубопроводу. Для осуществления такого транспортирования применяются объемные насосы разных типов [1–3]. В последние десятилетия, наряду с традиционными типами насосов (винтовые, шестеренные), все шире используются коловратные насосы (КН), которые часто называют кулачковыми. Главное достоинство КН – бережное, без повреждения структуры, перемещение пищевых масс (таких как ПС, мед, паштеты, мороженое и др.). Достигается это с помощью особой конструкции КН – разделением рабочего объема и силовой камеры. Силовая камера КН имеет такое же принципиальное устройство, как у шестеренного насоса, а в рабочей камере замыкание, осуществляемое с помощью лопастей (кулачков), не силовое, а геометрическое. Для изготовления КН необходимо высокое качество материалов, тщательная обработка поверхностей, профессиональная сборка. В результате стоимость КН заметно выше стоимости насосов других типов. Поэтому актуальными являются исследования, связанные с улучшением конструкции КН, повышением производительности и снижением энергетических затрат.

Все исследования КН можно разделить на два направления. Первое направление – это исследование возможностей улучшения показателей работы КН на стадии, предшествующей проектированию. Второе направление связано с повышением эффективности использования серийно выпускаемых КН. По первому направлению исследования проводятся многими научными группами по всему миру, опубликовано большое количество результатов исследований [4–11]. Как правило, они опираются на теоретическое исследование трехмерных течений в рабочем объеме КН с помощью системы уравнений Навье-Стокса (СУНС), а также на результаты лабораторных экспериментов. Так, в [4] предложен новый эллиптический тип профиля ротора. Для оценки влияния такого профиля на производительность КН на основе СУНС разработана специальная трехмерная модель течения жидкости. С помощью этой модели были протестированы шесть профилей ротора с разными параметрами эллипса при одинаковых значениях рабочего объема и зазоров. Результаты [4] показали, что конструкция с меньшим эллиптическим осевым отношением обеспечивает большую производительность КН.

В [5] 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. Решения СУНС 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 механизме снижения радиальной возбуждающей силы. Установлено, что по мере увеличения изменяемого значения зазора интенсивность вращающегося вихря уменьшается, а пульсации расхода жидкости в выходном сечении заметно снижаются.

Исследование [6] посвящено КН со спиральной формой кулачков. В качестве математического описания течения жидкости в рабочей полости была ис-

пользована система уравнений Рейнольдса (осредненных СУНС) с моделью турбулентности k-ε. Решение трехмерной задачи получено численным методом на динамической сетке FLUENT. Экспериментальная проверка результатов численного прогнозирования показала, что относительная погрешность находится в диапазоне 2,5–5,7 %. Спиральная форма кулачка позволяет эффективно подавлять вторичные течения, возникновение вихревых структур. Авторы [6] утверждают, что КН имеет наилучшую производительность при угле наклона спирали 45°–60°.

Математическое моделирование для определения производительности КН выполнено в [7]. Анализ проведен с использованием программного обеспечения Ansys CFX для CFD. СУНС, описывающая течение жидкости через КН, решена численным методом с моделью турбулентности SST. Программное обеспечение TwinMesh было использовано для создания структурированных сеток для различных положений ротора. Рассмотрены два случая, когда менялось давление нагнетания. В первом случае абсолютное давление на выходе составляло 1,5 бара, во втором – 1,7 бара. Были рассчитаны изменения массового расхода жидкости на выходе КН.

Результаты одного из первых систематических исследований влияния вязкости перекачиваемой жидкости на производительность КН представлены в [8]. СУНС, описывающая течение в рабочей полости, была решена численным методом на динамической сетке. Верификация модели выполнена с помощью лабораторных экспериментов, изучены течения пяти сред с кинематической вязкостью от 1 до 110 сСт. Расход жидкости с большей вязкостью (110 сСт) на выходе КН оказался на 40 % выше, чем у воды (1 сСт). При снижении частоты вращения ротора (ЧВР) с 400 до 100 об./мин расход на выходе уменьшился на 95 % при кинематической вязкости 11 сСт и на 80 % – при вязкости 72 сСт.

В [9] выполнено теоретическое и экспериментальное исследование влияния количества кулачков на структуру течения в полости КН. В качестве математического описания течения жидкости были использованы уравнения Рейнольдса (осредненная СУНС) и модели турбулентности k-ε. С увеличением числа кулачков средний расход и амплитуда пульсаций расхода на выходе из КН уменьшаются, что эффективно подавляет вторичные течения и образование вихрей. Максимальная радиальная сила при шести кулачках на 36 % меньше, чем при четырех. При количестве лопастей 5 и 6 образуется многоступенчатая последовательная переходная область между областями высокого и низкого давления, которая заметно снижает разность давлений между двумя сторонами радиальных зазоров и уменьшает радиальную утечку жидкости в КН.

В [10] предложен метод снижения колебаний расхода КН, основанный на использовании некруглого зубчатого привода с регулируемой ЧВР. На основе численного моделирования СУНС было исследовано влияние конструктивных параметров некруглого зубчатого колеса, углового отклонения, зазора между кулачками и ЧВР на пульсацию расхода жидкости. Результаты исследования показали, что колебания расхода на выходе КН уменьшились на 84 % после установки некруглого редуктора Фурье. Уменьшение зазора между кулачками с 0,4 до 0,2 мм привело к снижению амплитуды колебаний расхода примерно на 54 %. При увеличении ЧВР с 200 до 600 об./мин амплитуда пульсаций расхода жидкости уменьшилась более чем на 60 %. Лабораторный эксперимент на прототипе КН подтвердил такую возможность снижения колебаний расхода жидкости.

Чтобы исследовать влияние входного D и выходного d диаметров на производительность КН, в [11] выполнен анализ течений в рабочей камере одиннадцати КН (шесть с $D=d$ и пять с различным соотношением D/d при сохранении других условий постоянными). Для математического описания трехмерного нестационарного течения в рабочей камере были использованы уравнения Рейнольдса (осредненная СУНС) и модель турбулентности $k-\varepsilon$. Краевая задача решалась численным методом с учетом кавитации. Авторы [11] полагают, что выбор подходящего соотношения диаметров может снизить колебания расхода жидкости на выходе и, таким образом, повысить его надежность и стабильность.

Заметим, за исключением [8], в перечисленных публикациях практически не заострено внимание на вязкость перекачиваемой жидкости, ее влияние на величину и колебания производительности КН.

Гораздо меньше научных публикаций по второму направлению исследований КН. В открытых публикациях удалось обнаружить результаты систематических исследований по повышению эффективности использования серийно выпускаемых КН только двух научных групп – Нижегородского государственного агро-технологического университета [12, 13] и Калининградского государственного технического университета [14–16]. Кроме того, многие компании, изготовители КН, проводят серьезные испытания, изучают влияние свойств перекачиваемых жидкостей и технических параметров своих агрегатов на их производительность и энергетическую эффективность. Часть компаний размещают результаты испытаний на своих интернет-ресурсах в открытом доступе. Наиболее полные результаты с указанием всех условий испытаний приведены на ресурсах ^{1,2,3}.

Заметим, что в [12, 13] главное внимание уделено влиянию КН на свойства транспортируемой пищевой среды, в частности мороженого. Собственно КН лишь упоминаются, например, в [13] КН фирмы «Альфа Лаваль». Очень мало говорится о технических характеристиках КН, так, в [13] указано, что увеличение динамической вязкости мороженого с 3,17 до 9,79 мПа·с привело к росту потребляемой энергии КН примерно на 4,3 %.

В [14–16] на основании анализа результатов испытаний КН предложены модели, описывающие влияние перепада давления, ЧВР и вязкости перекачиваемой среды на подачу пищевых сред (в частности ПС) при их межоперационном транспортировании. Однако в каждой из публикаций исследованы агрегаты только одной из названных выше компаний. До сих пор не проводилось сравнительного анализа производительности КН, изготовленных разными компаниями. Целью данной статьи является сравнительный анализ производительности КН, выпу-

¹ Waukesha Cherry-Burrell. Rectangular flange positive displacement pumps. URL: <https://www.spxflow.com/waukesha-cherry-burrell/products/universal-1-series-rectangular-flange-positive-displacement-pumps/> (accessed 08.03.2025).

² Pomac Industries Group. Food Beverages Lobe Pump PLP. URL: <https://www.pomacpumps.com/en/food-beverages/lobe-pump-plp/> (accessed 08.03.2025).

³ KSB Aktiengesellschaft. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet. URL: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (accessed 02.02.2025).

ценных разными компаниями, при межоперационном транспортировании пищевых сред с большой вязкостью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для сравнения подачи КН, произведенных разными компаниями, были выбраны двухкулачковые (bi-wing rotor) агрегаты с близким рабочим объемом V_1 (объем воды, который КН перекачивает за один оборот ротора при отсутствии перепада давления). В табл. 1 представлены технические параметры КН трех компаний, по которым в открытом доступе имеются наиболее полные результаты испытаний, проведенных в широком диапазоне вязкостей транспортируемых жидкостей (ΔP_{max} – максимальный допустимый перепад давления, D – входной и выходной диаметр). У указанных насосов одинаковая максимальная допустимая величина ЧВР (на воде) $n_{max} = 1000$ об./мин ($16,67 \text{ с}^{-1}$).

Таблица 1. Технические параметры КН трех компаний

Table 1. Technical parameters of LP manufactured by the three companies

Марка КН	Компания	V_1 , дм^3	D , мм	ΔP_{max} , МПа
034-WCB	Waukesha Cherry-Burrell ¹	0,227	38	0,75
PLP 2-1.5	Pomac Industries Group ²	0,220	38	1,5
Vitalobe-215	KSB Aktiengesellschaft ³	0,240	38	2,2

В [14–16] использовано два подхода к моделированию производительности КН. В первом подходе [14, 15] исходной является нагрузочная характеристика, полученная по данным испытаний КН при перекачивании воды ($\text{дм}^3/\text{с}$):

$$Q_W \equiv f_W(n, p) = V_1 \cdot [n - n_{W0}(p)], \quad (1)$$

где V_1 – объем воды, перекачиваемой за один оборот при нулевом перепаде давления, дм^3 ; n – ЧВР, с^{-1} ; n_{W0} – минимально необходимая (МН) ЧВР для начала перекачивания воды, с^{-1} ; $p = \Delta P/P_A$ – безразмерный перепад давления; P_A – атмосферное давление, причем по данным испытаний^{1,2} $n_{W0}(0)=0$ и $f_W(n, 0) = V_1 \cdot n$.

В [14] было предложено МН ЧВР для воды рассчитывать по формуле

$$n_{W0} = A \cdot p^\alpha, \quad (2)$$

где α , A – эмпирические константы. Их значения, подобранные методом наименьших квадратов, позволили с высокой точностью рассчитывать нагрузочную характеристику КН на воде с помощью формул (1), (2).

Далее в [14] на основе анализа данных испытаний КН WCB была получена зависимость подачи КН от перепада давления, ЧВР и вязкости перекачиваемой жидкости, опирающаяся на (1):

$$Q \equiv f(n, p, \eta) = f_W(n, 0) - [f_W(n, 0) - f_W(n, p)]/\eta^\gamma, \quad (3)$$

где η – безразмерный коэффициент динамической вязкости (БКДВ) исследуемой жидкости, отнесенный к соответствующему значению у воды при 20°C ; γ – эмпирический показатель влияния вязкости жидкости на производительность КН.

Идея (3) заключается в следующем: с одной стороны, при $\eta = 1$ после раскрытия скобок получим $Q = f_w(n, p)$; с другой стороны, при очень большой величине БКДВ ($\eta \rightarrow \infty$) $f(n, p, \eta) = V_1 \cdot n$. Результаты расчетов по формуле (3) хорошо согласуются с данными испытаний для жидкостей со сравнительно небольшими величинами БКДВ (примерно до $\eta = 30$). Относительная погрешность составляет менее 1 %. Если же формулу (3) применить к расчету подачи пищевых сред с высокой вязкостью, как у ПС, погрешность расчетов может превысить 15 %.

Формулу (3) преобразуем к следующему виду

$$f(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - A \cdot p^\alpha / \eta^\gamma). \quad (4)$$

Из сравнения (4) с (1) следует, что второй член в скобках (4) представляет собой n_0 – МН ЧВР начала перекачивания для произвольной жидкости, а не n_{w0} для воды, как в формуле (1). При альтернативном подходе в качестве основы для моделирования принимается нагрузочная характеристика высоковязких сред:

$$Q \equiv F(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - n_0), \quad n_0 \equiv \Psi(p, \eta) = B \cdot p^\alpha. \quad (5)$$

Данные измерения МН ЧВР при подаче высоковязких сред имеются на ресурсах^{1,2,3}. Для определенности воспользуемся данными испытаний КН Vitalobe-215. Было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по формуле (5) МН ЧВР, при котором начинается перекачивание жидкости. Оказалось, что величину α можно считать константой C_1 только при $\eta > 10$; до этого α является возрастающей линейной функцией от логарифма η (рис. 1а):

$$\alpha \equiv \varphi(\eta) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln \eta, & \text{при } \eta \leq 10 \\ C_1, & \text{при } \eta > 10. \end{cases} \quad (6)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-215 равны: $\alpha_0 = 0,625$; $\alpha_1 = 0,077$; $C_1 = 0,80$.

Величина B во всем исследованном диапазоне КДВ оказалась убывающей линейной функцией от логарифма η (рис. 1 б):

$$B \equiv \psi(\eta) = B_0 - B_1 \ln \eta, \quad (7)$$

где эмпирические константы для Vitalobe-215 равны: $B_0 = 1,674 \text{ с}^{-1}$; $B_1 = 0,264 \text{ с}^{-1}$.

По рис. 1 согласие результатов расчетов по формулам (6), (7) с экспериментальными точками вполне удовлетворительное. Формула для МН ЧВР будет следующей:

$$\Psi(p, \eta) = \psi(\eta) \cdot p^{\varphi(\eta)}. \quad (8)$$

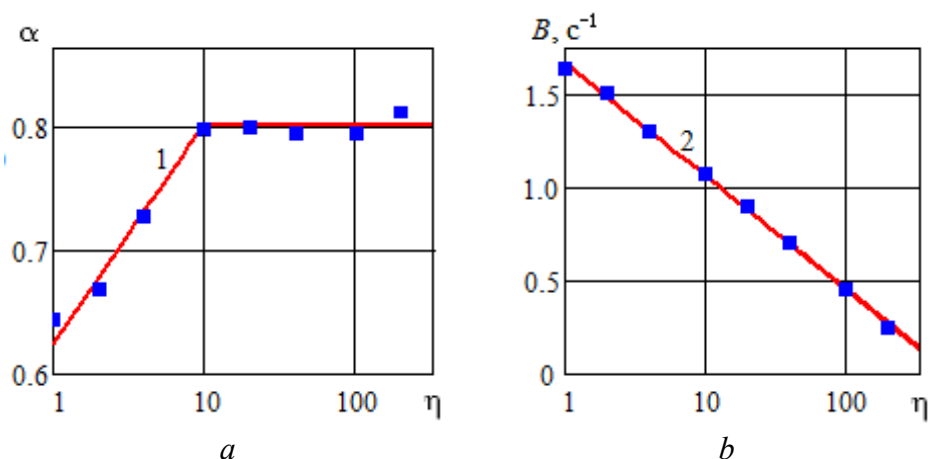


Рис. 1. Зависимость параметров КН Vitalobe-215 в формуле (5) от БКДВ: a – показатель степени; b – размерный коэффициент.

Точки – экспериментальные данные³,

линии: 1 – расчет по формуле (6), 2 – расчет по формуле (7)

Fig. 1. The dependence of the Vitalobe-215 LP parameters in formula (5) on the NEDV: a – an indicator of the degree; b – the dimensional coefficient. Points are experimental data³, lines: 1 – calculation according to formula (6), 2 – calculation according to formula (7)

Для сравнения производительности разных КН перейдем к безразмерной подаче:

$$q = Q/(V_1 \cdot n_{\max}). \quad (9)$$

Подставляя (8) в (9) и вводя безразмерную величину ЧВР (БЧВР), получим:

$$q = \bar{n} - b \cdot p^{\phi(\eta)}, \quad \bar{n} = n / n_{\max}, \quad b = \psi(\eta) / n_{\max}. \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета производительности КН Vitalobe-215 по формулам (5)–(8) хорошо согласуются с опытными данными, причем погрешность снижается с ростом БКДВ (рис. 2). Некоторое отклонение экспериментальных точек от расчетной линии наблюдается лишь в наименьшем (из рассмотренных) значении БКДВ (линия 1), однако ЭДВ рассматриваемых пищевых сред (например, плавленых сыров) в диапазоне используемых ЧВР и температур заведомо больше 100. С увеличением БКДВ производительность КН растет, линии на рис. 5 смещаются вправо-вверх, что связано с уменьшением утечек через зазоры. При $\eta=600$ (линия 4) и выше производительность достигает наибольших значений $Q = V_1 n$.

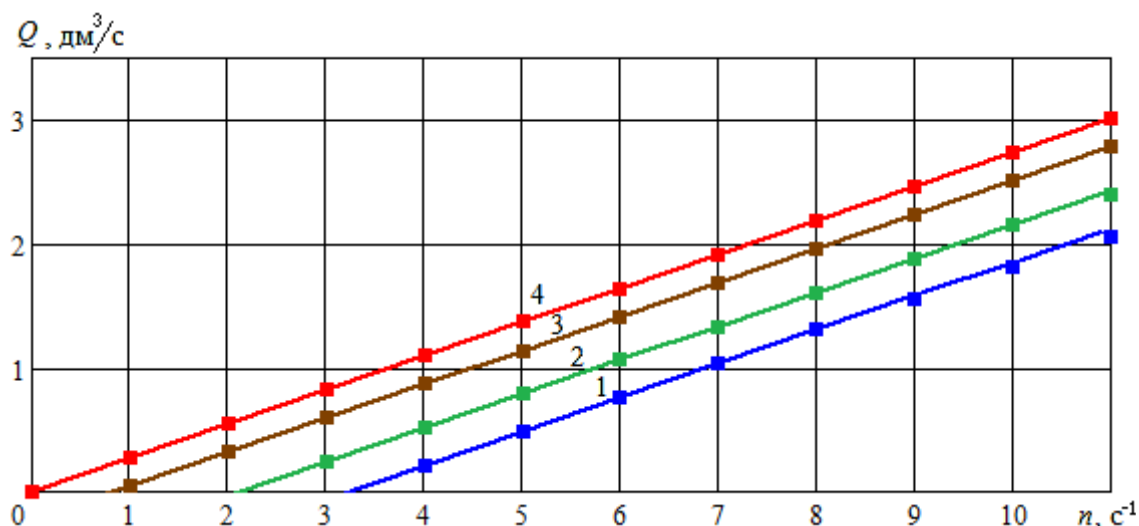
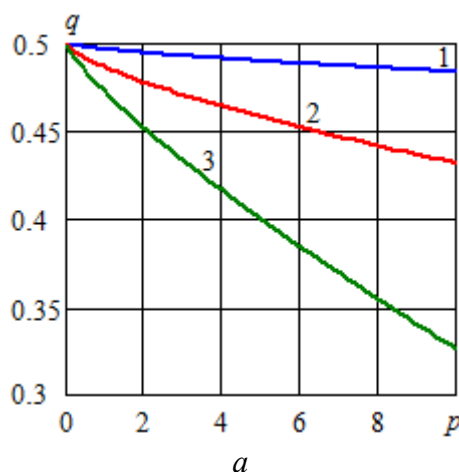


Рис. 2. Зависимость подачи КН Vitalobe-215 от ЧВР при $p=4$ и разных значениях БКДВ: 1 – $\eta=10$; 2 – $\eta=40$; 3 – $\eta=200$; 4 – $\eta=600$. Точки – экспериментальные данные³, линии – расчет по формуле (5)

Fig. 2. The dependence of the LP Vitalobe-215 performance on the speed rotor at $p=4$ and different NEDV: 1 – $\eta=10$; 2 – $\eta=40$; 3 – $\eta=200$; 4 – $\eta=600$. Points are experimental data³, lines are calculated using formula (5)

На рис. 3 представлены результаты расчета по формуле (10) зависимости безразмерной производительности КН трех компаний от перепада давления при различных значениях БКДВ перекачиваемой жидкости при разных перепадах давления. Видно, что безразмерная производительность всех КН снижается с увеличением перепада давления и уменьшением БКДВ. Однако имеется существенное количественное различие, наибольшее значение безразмерной производительности у КН 034-WCB. Так, при $p=8$, $\eta=100$ (рис. 3 а) у КН PLP 2-1.5 она меньше на 9,1 %, у КН Vitalobe-215 – на 27 %; при $p=8$, $\eta=200$ (рис. 3 б) – меньше на 7,1 % и 15,9 % соответственно; при $p=8$, $\eta=380$ (рис. 3 с) – меньше на 4,1 % и 6,5 % соответственно. Однако при $\eta=600$ и более разница между значениями безразмерной производительности исследованных КН становится менее 1 %.



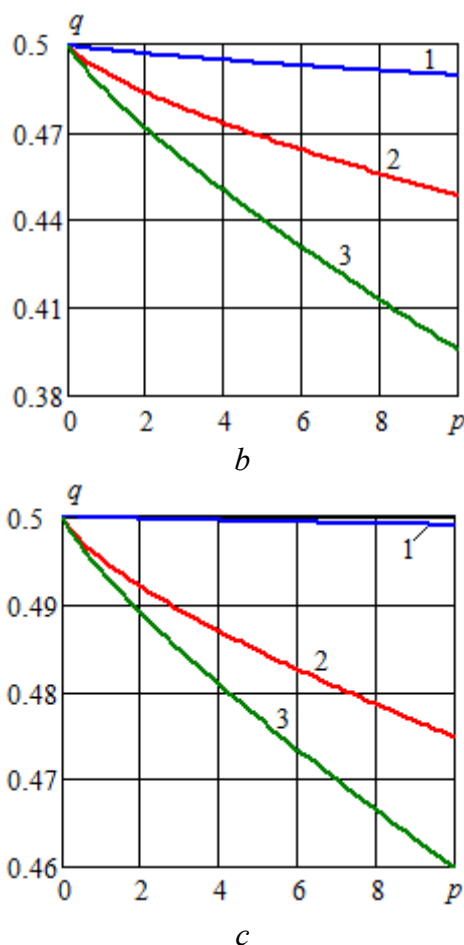


Рис. 3. Зависимость безразмерной производительности КН трех компаний от БКДВ перекачиваемой жидкости при $\bar{n} = 0,5$ и разных БКДВ: 1 – 034-WCB, 2 – PLP 2-1.5, 3 – Vitalobe-215; а – $\eta=100$; б – $\eta=200$; в – $\eta=380$

Fig. 3. The dependence of the minimum required rotational speed of the three companies LP on pressure drops at $\bar{n} = 0,5$ and different NCDV: 1 – 034-WCB, 2 – PLP 2-1.5, 3 – Vitalobe-215; а – $\eta=100$; б – $\eta=200$; в – $\eta=380$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнен сравнительный анализ производительности коловратных насосов, изготовленных тремя компаниями, при транспортировании пищевых сред с большой вязкостью. В ходе исследования показано, что для моделирования подачи коловратными насосами пищевых сред с большой вязкостью (например, ПС) следует использовать подход, базирующийся на нагрузочной характеристике с наибольшими значениями БКДВ. Подход, основанный на модификации нагрузочной характеристики КН, перекачивающего воду, пригоден лишь для сравнительно маловязких пищевых жидкостей (например, сливок). Выполнено исследование зависимости минимально необходимой ЧВР КН от перепада давления и БКДВ. Установлено, что МН ЧВР у всех изученных КН снижается с увеличением БКДВ и уменьшением перепада давления, однако абсолютные значения МН ЧВР могут существенно различаться при $\eta < 200$.

Для корректного сравнения производительности КН с небольшим различием рабочего объема предложен метод приведения нагрузочной характеристики к безразмерной форме (зависимость безразмерной подачи от безразмерных величин перепада давления и ЧВР). Установлено, что при БКДВ более 600 разница между значениями безразмерной производительности исследованных КН становится менее 1 % и может не учитываться.

В данной работе все расчеты были выполнены на основе находящихся в открытом доступе результатов испытаний КН трех компаний^{1,2,3}. Полученные результаты могут быть использованы для подбора параметров КН, необходимых в производственном процессе. В дальнейшем целесообразно выполнить сравнительный анализ энергетической эффективности КН разных производителей.

Список источников

1. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов: монография / А. В. Горбатов. – Москва: Пищевая промышленность, 1979. – 384 с.
2. Подрезов, А. Насосы для пищевой промышленности / А. Подрезов // Переработка молока. – 2016. – № 9 (203). – С. 26–27.
3. Луговая, И. С. Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей / И. С. Луговая // Наука и техника. – 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 422–426.
4. Hsieh, C.-F. A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps / C.-F. Hsieh // Mechanism and Machine Theory. – 2015. – V. 87. – P. 70–81.
5. Li, Y. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap / Y. Li., D. Guo, X. B. Li. // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2018. – V. 12. – N 1. – P. 711–723.
6. Numerical analysis and verification of flow characteristics of rotor cavity of spiral rotary lobe pump / Y. Li, X. Zhang, D. Guo, X. Wang // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. – 2018. – V. 34. – N 10. – P. 62–67.
7. Malael, I., Costea, F., Draghici, M. Flow evaluation of the lobe pump using numerical methods // Applied Physics, System Science and Computers III. – 2019. – V. 574. – P. 301–309.
8. Li, Y., Du, J., Guo, D. 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.
9. Amer, M., Vaca, A., Bowden, M. Effects of different blade numbers on radial exciting force of lobe pump rotor. Bioprocess and Biosystems Engineering. – 2022. – V. 45. – N 9. – P. 1477–1488.
10. Flow fluctuation abatement method and flow characteristics of lobe pump by external non circular gear drive / D. Liu, C. Xu, L. Shi [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2024. – V. 38. – P. 271–284.
11. Numerical analysis of the inlet and outlet diameter effects on pulsation dynamics and cavitation in the lobe pump / H. Zhou, P. Zhou, L. Meng [et al.] // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2025. – V. 18. – N 5. – P. 1189–1204.
12. Гинойн, Р. В., Кулаткова, А. С. Применение кулачковых насосов в технологической линии производства мороженого с целью стабилизации подачи смеси / Р. В. Гинойн, А. С. Кулаткова // Современные аспекты производства и пе-

переработки сельскохозяйственной продукции: материалы VI Международной научно-практ. конференции (Краснодар, 31 марта 2020). – Краснодар: Изд-во КубГАУ, 2020. – С.88–92.

13. Гиноян, Р. В., Пасин, А. В., Кулаткова, А. С. Влияние содержания различных доз сухого обезжиренного молока на структурно-механические свойства смесей мороженого и энергопотребление технологического оборудования при производстве мороженого «Пломбир» / Р. В. Гиноян, А. В. Пасин, А. С. Кулаткова // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2 (81). – С. 18–25.

14. Ахмедова, Н. Р., Левичева, О. И., Наумов, В. А. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на производительность кулачковых насосов (на примере перекачивания рыбного жира) / Н. Р. Ахмедова, О. И. Левичева, В. А. Наумов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2022. – № 3. – С.74–81.

15. Akhmedova, N. R., Levicheva, O. I., Naumov, V. A. Performance characteristics of rotary lobe pumps for high viscosity food medium / N. R. Akhmedova, O. I. Levicheva, V. A. Naumov // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. – 2024. – V. 1420. – N 1. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1420/1/012013> (дата обращения: 08.03.2025).

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

References

1. Gorbatov A. V. *Reologiya myasnykh i molochnykh produktov: monografiya* [Rheology of meat and dairy products: monograph]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1979. 384 p.
2. Podrezov A. Nasosy dlya pishchevoy promyshlennosti [Pumps for the food industry]. *Pererabotka moloka*. 2016, no. 9 (203), pp. 26–27.
3. Lugovaya I. S. Klassifikatsiya gidravlicheskich sistem dlya perekachivaniya vysokovyazkikh zhidkostey [Classification of hydraulic systems for pumping highly viscous liquids]. *Nauka i tekhnika*. 2019, vol. 18, no. 5, pp. 422–426.
4. Hsieh C.-F. A new curve for application to the rotor profile of rotary lobe pumps. *Mechanism and Machine Theory*. 2015. V. 87. P. 70–81.
5. Li Y., Guo D., Li X. B. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2018. V. 12. N 1. P 711–723.
6. Li Y., Zhang X., Guo X. D. Wang Numerical analysis and verification of flow characteristics of rotor cavity of spiral rotary lobe pump. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2018. V. 34. N 10. P. 62–67.

7. Malael I., Costea F., Draghici M. Flow evaluation of the lobe pump using numerical methods. *Applied Physics, System Science and Computers III*. 2019. V. 574. P. 301–309.
8. Li Y., Du J., Guo D. 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.
9. Amer M., Vaca A., Bowden M. Effects of different blade numbers on radial exciting force of lobe pump rotor. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2022. V. 45. N 9. P. 1477–1488.
10. Liu D., Xu C., Shi L., Tian B., Jin X. Flow fluctuation abatement method and flow characteristics of lobe pump by external non circular gear drive. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2024. V. 38. P. 271–284.
11. Zhou H., Zhou P., Meng L., Li J., Xiang C., Qian H. Numerical analysis of the inlet and outlet diameter effects on pulsation dynamics and cavitation in the lobe pump. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2025. V. 18. N 5. P 1189–1204.
12. Ginoyan R. V., Kulatkova A. S. Primenenie kulachkovykh nasosov v tekhnologicheskoy linii proizvodstva morozhenogo s tsel'yu stabilizatsii 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'skokhozyaystvennoy produktsii. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakt. konferentsii* (Krasnodar, 31.03.2020). Krasnodar, Izd-vo KubGAU, 2020, pp.88–92.
13. Ginoyan R. V., Pasin A. V., Kulatkova A. S. Vliyanie sodержaniya razlichnykh doz sukhogo obezzhirennogo moloka na strukturno-mekhanicheskie svoystva smesey morozhenogo i energopotrebleniye tekhnologicheskogo oborudovaniya pri proizvodstve morozhenogo [The effect of the content of various doses of skimmed milk powder on the structural and mechanical properties of ice cream mixtures and energy consumption of technological equipment in the production of ice cream "Plombir"]. *Vestnik VSGU-TU*. 2021, no. 2 (81), pp. 18–25.
14. Akhmedova N. R., Levicheva O. I., Naumov V. A. Vliyanie vyazkosti zhidkikh pishchevykh produktov na proizvoditel'nost' kulachkovykh nasosov (na primere perekachivaniya rybnogo zhira) [The effect of viscosity of liquid foodstuffs on the performance of lobe pumps (using the example of pumping fish oil)]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo*. 2022, no. 3, pp.74–81.
15. Akhmedova N. R., 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, no. 1. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1420/1/012013> (accessed 08 March 2025).
16. Levicheva O. I. Uovershenstvovanie analiticheskoy modeli nagruzochnykh kharakteristik pishchevykh kolovratnykh nasosov [Improvement of the analytical model

of the load characteristics of food lobe pumps]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2025, vol. 11, no. 1, pp. 18–27.

Информация об авторах

В. А. Наумов – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности и природообустройства

О. И. Левичева – аспирант

Information about the authors

V. A. Naumov – Doctor of Engineering, Professor of the Department of Technosphere Safety and Environmental Engineering

O. I. Levicheva – postgraduate student

Статья поступила в редакцию 07.04.2025; одобрена после рецензирования 16.04.2025; принята к публикации 17.04.2025.

The article was submitted 07.04.2025; approved after reviewing 16.04.2025; accepted for publication 17.04.2025.