

Научная статья

УДК 621.66:637.358

DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-43-56

Метод определения допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании рыбного фарша с учетом его реологических свойств

Наталья Равиловна Ахмедова^{1✉}, Владимир Аркадьевич Наумов²

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

¹ isfendi@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3483-3580>

² van-old@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью сохранения структуры и качества фаршевых систем из рыбного сырья при их межоперационном транспортировании коловратными насосами в технологических линиях пищевых производств. Существующие рекомендации производителей по ограничению частоты вращения ротора применимы преимущественно к ньютоновским жидкостям и не учитывают сложное реологическое поведение рыбного фарша, характеризующееся наличием предельного напряжения сдвига, псевдопластичностью и тиксотропным разрушением волокнистой структуры под действием сдвиговых деформаций. Цель работы – усовершенствование метода определения наибольшей допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании фаршевых систем из минтая с различными наполнителями (пшено, гречневая крупа, геркулес, ржаная мука). На основе реологической модели, описывающей касательное напряжение как сумму компонентов мгновенно-упругой деформации, пластического сдвига и вязкоупругого течения, получена аналитическая зависимость эффективной динамической вязкости от частоты вращения ротора. Для насосов серии JRZL выведена обобщенная формула связи допустимой частоты с рабочим объемом и безразмерной вязкостью перекачиваемой среды, где показатель степени $\beta = 0,181$ оказался постоянным для всей линейки. Разработан алгоритм решения нелинейного уравнения для расчета предельных режимов работы насоса. Установлено, что для RZL-120 переход от фарша без добавок к фаршу с ржаной мукой снижает допустимую частоту вращения с 232 до 68,7 об./мин. Предложенная методика позволяет обоснованно выбирать тип насоса и режим его работы, обеспечивая сохранение качества продукта и оптимизацию энергетических показателей.

Ключевые слова: коловратный насос, рыбный фарш, допустимая частота вращения ротора, эффективная динамическая вязкость, энергетическая эффективность.

Благодарности: Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания НИОКР «Разработка и совершенствование инновационных процессов пищевой инженерии».

Для цитирования: Ахмедова Н. Р., Наумов В. А. Метод определения допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании рыбного фарша с учетом его реологических свойств // Известия КГТУ. 2026. № 81. С. 43–56. DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-43-56.

Original article

Method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping fish mince based on its rheological properties

Natal'ya R. Akhmedova^{1✉}, Vladimir A. Naumov²

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

¹ isfendi@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0003-3483-3580>

² van-old@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0560-5933>

Abstract. The relevance of the study is determined by the need to preserve the structure and quality of fish mince systems during their inter-operational transportation by rotary lobe pumps in food production lines. Existing manufacturers' recommendations on limiting rotor speed are primarily applicable to Newtonian fluids and do not account for the complex rheological behaviour of fish minces, which is characterized by yield stress, pseudoplasticity, and thixotropic destruction of the fibrous structure under shear deformation. The aim of this work is to improve the method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping pollock mince with various fillers (millet, buckwheat, oat flakes, rye flour). Based on a rheological model describing shear stress as a sum of instantaneous-elastic deformation, plastic shear, and viscoelastic flow components, an analytical dependence of effective dynamic viscosity on rotor speed has been derived. For JRZL-series pumps, a generalized formula relating permissible speed to pump working volume and dimensionless viscosity of the pumped medium has been obtained, with the exponent $\beta = 0.181$ remaining constant across the entire pump line. An algorithm for solving the nonlinear equation to calculate limiting pump operating modes has been developed. It has been found that for the RZL-120 pump, transitioning from mince without additives to mince with rye flour reduces the permissible rotor speed from 232 to 68.7 rpm. The proposed methodology enables a scientific election of pump type and operating mode, ensuring product quality preservation and optimization of energy efficiency indicators in food processing technologies.

Keywords: rotary lobe pump, fish mince, maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, energy efficiency.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment for R&D "Development and improvement of innovative processes in food engineering".

For citation: Akhmedova N. R., Naumov V. A. Method for determining the maximum permissible rotor speed of rotary lobe pumps when pumping fish mince based on its rheological properties. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2026;(81):43–56. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2026-81-43-56.

ВВЕДЕНИЕ

В известной монографии А. В. Горбатова [1] приведены результаты сравнения разных типов объемных насосов, используемых для межоперационного транспортирования фаршевых систем (ФС) по технологическому трубопроводу. Было установлено, что особая конструкция коловратного насоса (КН) обеспечивает неизменность реологических свойств ФС при довольно высоком давлении нагнетания и наибольший КПД по сравнению с другими типами насосов (винтовыми, шестеренными). В статье [2] показано, что эти утверждения справедливы и для подачи ФС современными КН, которые к тому же позволяют регулировать подачу с помощью изменения частоты вращения ротора (ЧВР).

Главным недостатком КН является высокая стоимость, обусловленная сложностью конструкции и повышенными требованиями к материалам и качеству сборки, поэтому длительное время использование КН в пищевой промышленности было весьма ограничено. Последние десятилетия КН все больше применяются для подачи ФС и других пищевых сред, так как это позволяет сохранить структуру продукта, не допустить снижения его качества при межоперационном транспортировании. Возросло внимание исследователей к проблемам проектирования, изготовления и эксплуатации КН [3–7]. Так, в [3, 4] были разработаны методы моделирования нагрузочных характеристик КН с помощью численного решения системы уравнений Навье-Стокса для проточной части КН. Такие методы весьма трудоемкие, они целесообразны при проектных расчетах КН. В лабораторных условиях [5] была установлена зависимость производительности КН от динамической вязкости μ перекачиваемых сред. В [6, 7] предложен метод моделирования рабочих характеристик КН по данным заводских испытаний, содержащимся в технической документации. Было показано, что при сравнительно небольшой вязкости производительность КН возрастает с увеличением μ , однако при $\mu > \mu_p$ (где предельное значение $\mu_p = 0,5\text{--}1,0$ Па·с в зависимости от конструкции КН) производительность уже не возрастает, а остается равной теоретическому значению:

$$Q_T = V \cdot n, \quad (1)$$

где V – рабочий объем КН (наибольший объем жидкости, перекачиваемый за один оборот ротора), n – ЧВР.

Заметим, что для ФС условие $\mu > 1,0$ Па·с практически всегда выполняется.

По формуле (1) производительность КН прямо пропорциональна ЧВР, но в [1] и других публикациях указывается, что чрезмерное увеличение ЧВР может привести не только к разрушению структуры транспортируемого продукта, а значит, к ухудшению его качества, но и к нестабильной работе насосного оборудования. Последние годы некоторые компании, выпускающие КН (например, [8, 9]), в технической документации стали приводить рекомендации по ограничению ЧВР в зависимости от вязкости перекачиваемого продукта. Однако непосредственно воспользоваться этими рекомендациями можно лишь для ньютоновских жидкостей, так как в них не учитывается зависимость эффективной динамической вязкости пищевых продуктов от сдвига скорости.

В статье [10] выполнен анализ зависимости наибольшей допустимой частоты вращения ротора (НД ЧВР) n_m от рабочего объема коловратных насосов (РОКН) и эффективной динамической вязкости (ЭДВ) перекачиваемой пищевой

жидкости. Результаты испытаний КН линейки Vitalobe компании KSB Aktien-gesellschaft были использованы в качестве исходных данных. Проведенный анализ показал, что при любых условиях величина НД ЧВР снижается с ростом ЭДВ перекачиваемой среды. Однозначной зависимости НД ЧВР от РОКН в [10] установить не удалось. При значениях ЭДВ более 1000 сПз просматривалась тенденция некоторого роста НД ЧВР с увеличением РОКН (при низком коэффициенте парной корреляции). В [11] был разработан метод определения НД ЧВР КН при подаче вязкой среды, если известна зависимость ЭДВ от градиента скорости. Приведены примеры использования предложенного метода для определения НД ЧВР КН Vitalobe при транспортировании двух образцов плавленого сыра. Непосредственно этот метод не может быть использован для фаршевых рыбных систем (ФРС), так как у ФРС гораздо более сложное реологическое поведение. Реологические свойства ФРС исследовались в целом ряде трудов [12–16]. В [16] была предложена реологическая модель ФРС, описывающая напряжение сдвига с учетом мгновенно-упругой деформации, пластического сдвига, вязкоупругого течения и тиксотропного разрушения волокнистой структуры, что создает основу для последующего математического моделирования процесса экструдирования.

Цель статьи – усовершенствовать метод определения наибольшей допустимой частоты вращения ротора коловратного насоса при перекачивании ФРС с учетом их специфических реологических свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является процесс подачи ФРС насосами линейки КН JRZL компании JEC pumps [9], предметом исследования – НД ЧВР. Технические параметры этих насосов представлены в табл. 1, а НД ЧВР – в табл. 2.

Производительность КН при подаче фарша из минтая будем рассчитывать по (1), а затраченную мощность по формуле из [7, 8]:

$$N = n \cdot V \cdot (b_0 + b_1 \cdot p + b_2 \cdot \mu b^\chi), \quad (2)$$

где n – ЧВР, с^{-1} ; b_0, b_1, b_2, χ – эмпирические константы; $p = P/P_A$ – безразмерный перепад давления; P – перепад давления, Па; P_A – атмосферное давление; $\mu b = \mu/\mu_0$ – безразмерная эффективная динамическая вязкость (БЭДВ); μ – эффективная динамическая вязкость, Па·с; μ_0 – динамическая вязкость воды при 20 °С, Па·с.

Значения эмпирических констант в (2) были найдены методом наименьших квадратов. Например, для КН марки RZL-120 они следующие: $b_0=0,104$; $b_1=0,120$; $b_2=0,01621$; $\chi=0,348$.

Гидравлический коэффициент полезного действия (ГКПД) КН η и показатель удельных энергетических затрат (ПУЭЗ) E будем рассчитывать по известным формулам:

$$\eta = 100 \cdot Q \cdot P / N, E = N / Q, \quad (3)$$

где Q – объемный расход (подача КН), $\text{м}^3/\text{с}$; P – перепад давления, кПа; N – затраченная мощность, кВт.

Таблица 1. Технические параметры КН линейки JRZL с двухкулачковыми серповидными роторами [9]

Table 1. Technical parameters of rotary lobe pumps of the JRZL series with two-lobe crescent-shaped rotors [9]

№№ пп	Марка КН	n_m , об./мин	P_m , МПа	V , дм ³	d , мм
1	RZL-110	1000	2,0	0,05	25
2	RZL-120	800	0,8	0,21	50
3	RZL-220	700	1,2	0,40	50
4	RZL-330	600	1,2	1,02	76
5	RZL-440	500	1,2	2,27	100

Примечание: n_m – предельное значение ЧВР КН для воды и маловязких жидкостей, P_m – наибольшее допустимое давления нагнетания, V – рабочий объем КН, d – стандартный присоединительный размер (внутренний диаметр).

Таблица 2. Наибольшие допустимые значения ЧВР КН JRZL, об./мин [9]

Table 2. Maximum permissible rotor speeds of JRZL series rotary lobe pumps, rpm [9]

μ , сПз	Номер КН серии JRZL				
	110	120	220	330	440
1–100	1000	800	700	600	500
100–1000	667	533	467	400	333
1000–5000	417	333	292	250	208
5000–10000	250	200	175	150	125
10000–20000	167	133	117	100	83
20000–50000	117	93	82	70	58
50000–100000	83	67	58	50	42

В экспериментах [16] были исследованы фаршевые системы из минтая (ФСМ) следующего состава: ФСМ-1 – без добавок; в остальные фаршевые системы были добавлены сухое обезжиренное молоко, костная минеральная мука и еще один компонент: в ФСМ-2 – пшено, в ФСМ-3 – гречневая крупа, в ФСМ-4 – геркулес, в ФСМ-5 – ржаная мука. На рис. 1 представлена зависимость касательных напряжений от сдвига различных образцов ФСМ [16].

В [16] было показано, что экспериментальные зависимости, представленные на рис. 1, могут быть описаны формулой:

$$\tau = T_1 \cdot (-\omega \cdot t_1) + T_2 \cdot (-\omega \cdot t_2) + \mu_n \cdot \omega, \quad (4)$$

где τ – касательное напряжение, Па; T_1 – напряжение внешнего трения о стенки канала в момент начала движения волокнистой структуры, Па; T_2 – напряжение внутренней прочности в тот же момент, Па; ω – сдвиг (градиент) скорости, с⁻¹; μ_n – коэффициент псевдопластической вязкости диспергированной фазы фаршевой системы, Па·с; t_1, t_2 – временные факторы, характеризующие разрушение волокнистой структуры фаршевой системы, с; причем $t_1 > 0$; $t_2 > 0$; $T_1 + T_2 = \tau_0$ – предельное напряжение сдвига.

Сдвиг скорости в рабочей камере КН приблизительно оценивают как $\omega \approx 2\pi \cdot n$, ($\pi=3,14$; n – ЧВР, с^{-1}). Поэтому зависимость ЭДВ от ЧВР, используя (4), можно рассчитать по такой формуле:

$$\mu = \varphi(n) = [T_1 \cdot (-2\pi \cdot n \cdot t_1) + T_2 \cdot (-2\pi \cdot n \cdot t_2)] / (2\pi \cdot n) + \mu_n. \quad (5)$$

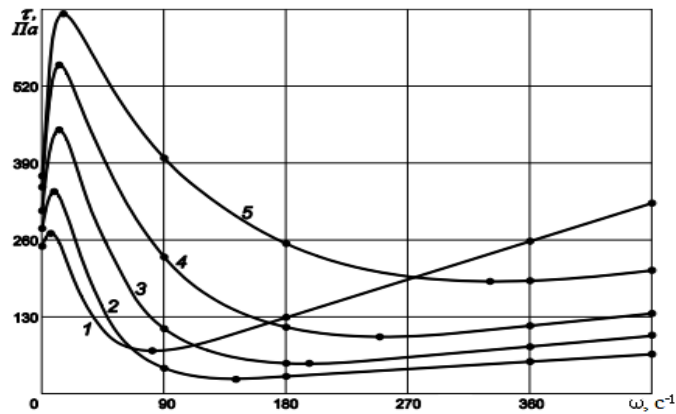


Рис. 1. Касательные напряжения в фаршевой системе из минтая с различными наполнителями: 1 – ФСМ-1; 2 – ФСМ-2; 3 – ФСМ-3; 4 – ФСМ-4; 5 – ФСМ-5.

Результаты экспериментального исследования из [16]

Fig. 1. Shear stress in pollock mince systems (PMS) with various fillers: 1 – PMS-1; 2 – PMS-2; 3 – PMS-3; 4 – PMS-4; 5 – PMS-5. Experimental results from [16]

На рис. 2 представлены результаты расчета по формуле (5). Видно, что при небольших значениях ЧВР наименьшая величина ЭДВ у ФСМ-1 (фарш минтая без добавок). При больших значениях ЧВР у ФСМ-1 величина ЭДВ наибольшая из всех исследованных образцов.

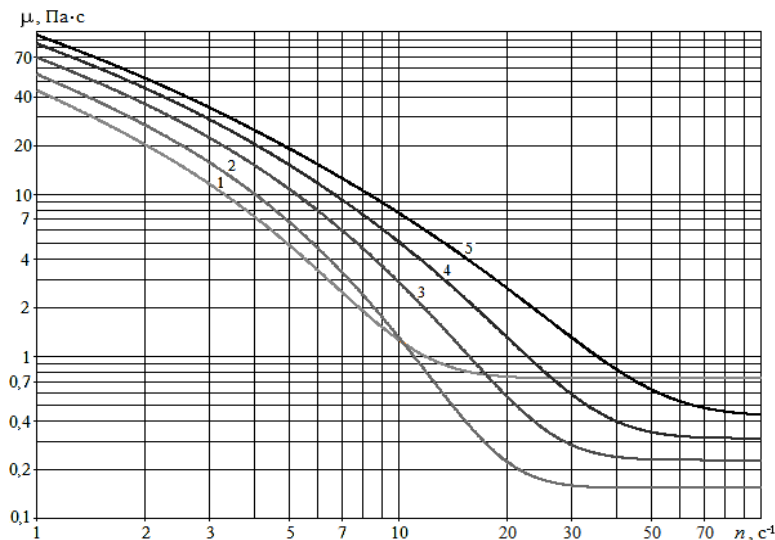


Рис. 2. Зависимость ЭДВ в фаршевой системе из минтая с различными наполнителями от ЧВР: 1 – ФСМ-1; 2 – ФСМ-2; 3 – ФСМ-3; 4 – ФСМ-4; 5 – ФСМ-5

Fig. 2. Dependence of effective dynamic viscosity on rotor speed in pollock mince systems (PMS) with various fillers: 1 – PMS-1; 2 – PMS-2; 3 – PMS-3; 4 – PMS-4; 5 – PMS-5

Если, как в [11], найти зависимость НД ЧВР от ЭДВ $n_M = f(\mu)$ для разных КН, то это позволит определить НД ЧВР в заданных условиях по точке указанного графика и $\mu = \varphi(n)$. То есть для расчета n_M необходимо решить алгебраическое уравнение (6):

$$n_M - f[\varphi(n_M)] = 0. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В [10] была выдвинута гипотеза, что зависимость НД ЧВР от БЭДВ и рабочего объема КН можно рассчитать по формуле:

$$n_M = B(\mu b) / \nu^{\beta(\mu b)}, \quad \nu = V/V_0, \quad V_0 = 1 \text{ дм}^3, \quad (7)$$

где ν – безразмерный рабочий объем КН; β , B – эмпирические функции аргумента БЭДВ.

Как указано выше, для КН серии Vitalobe функция $B(\mu b)$ оказалась убывающей. Зависимость $\beta(\mu b)$ в [10] установить не удалось. Статистический анализ данных табл. 2 показал, что для КН серии JRZL $\beta=0,181$ и не зависит от БЭДВ (относительное среднее квадратичное отклонение менее 0,1 %). Для аппроксимации зависимости B от БЭДВ была получена формула (8), результаты расчета по которой хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 3):

$$B = \begin{cases} 1685 / \mu b^{0,221} & \text{при } \mu b \leq 3170, \\ 18900 / \mu b^{0,520} & \text{при } \mu b > 3170. \end{cases} \quad (8)$$

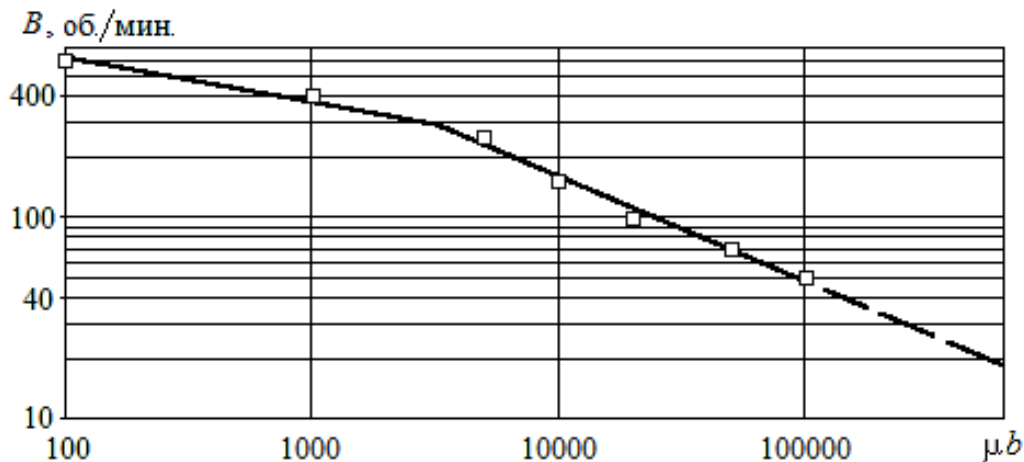


Рис. 3. Зависимость величины B в формуле (7) для КН серии JRZL от динамической вязкости перекачиваемой среды. Точки – по опытным данным, линия – по формуле (8)

Fig. 3. Dependence of parameter B in equation (7) for JRZL-series rotary lobe pumps on the dynamic viscosity of the pumped medium. Symbols – experimental data, line – calculated by equation (8)

Был рассчитан индекс детерминации R^2 для зависимости (8), скорректированный с учетом малого количества экспериментальных точек ($s=7$):

$$1 - (1 - R^2) \cdot (s - 1) / (s - r - 1) = 0,956,$$

где r – количество эмпирических коэффициентов, определяемых по выборке.

При значениях индекса детерминации, близких к единице, строить границы доверительных интервалов нецелесообразно, так как они расположены близко от основной линии графика.

На рис. 4 (а, б) представлены зависимости НД ЧВР КН JRZL от БЭДВ и РОКН соответственно. Видно, что результаты расчета вполне удовлетворительно согласуются с данными табл. 2; значение индекса детерминации также весьма высоко – $R^2 = 0,983$.

Графическая интерпретация определения НД ЧВР КН показана на рис. 5.

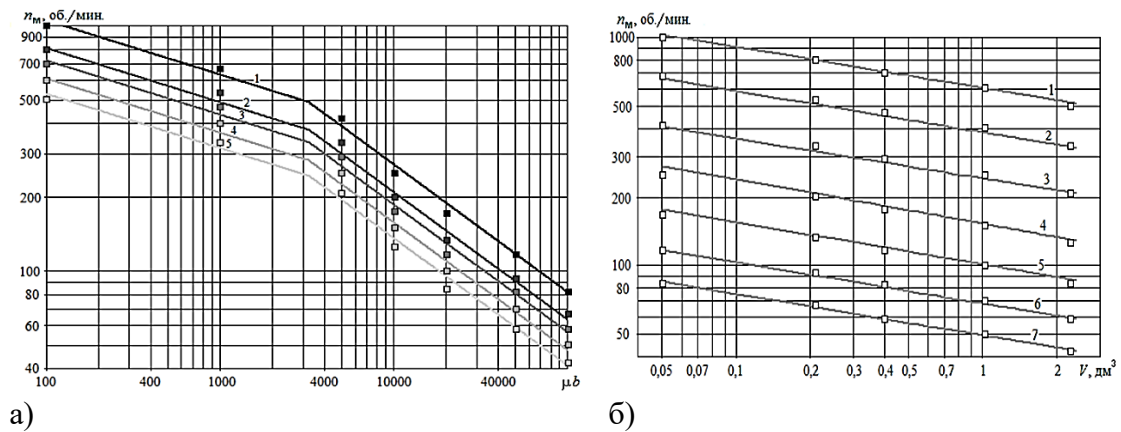


Рис. 4. Зависимость НД ЧВР КН линейки JRZL:

- а) от БЭДВ: 1 – RZL-110; 2 – RZL-120; 3 – RZL-220; 4 – RZL-330; 5 – RZL-440;
б) от рабочего объема: 1 – $\mu b=100$; 2 – $\mu b=1000$; 3 – $\mu b=5000$; 4 – $\mu b=10000$;
5 – $\mu b=20000$; 6 – $\mu b=40000$; 7 – $\mu b=100000$. Точки – экспериментальные данные из табл. 2, линии – расчет по (7)

Fig. 4. Dependence of the maximum permissible rotor speed of JRZL series rotary lobe pumps: а) on dimensionless effective dynamic viscosity: 1 – RZL-110; 2 – RZL-120; 3 – RZL-220; 4 – RZL-330; 5 – RZL-440;
b) on working volume: 1 – $\mu b=100$; 2 – $\mu b=1000$; 3 – $\mu b=5000$; 4 – $\mu b=10000$;
5 – $\mu b=20000$; 6 – $\mu b=40000$; 7 – $\mu b=100000$. Symbols – experimental data from Table 2, lines – calculated by equation (7)

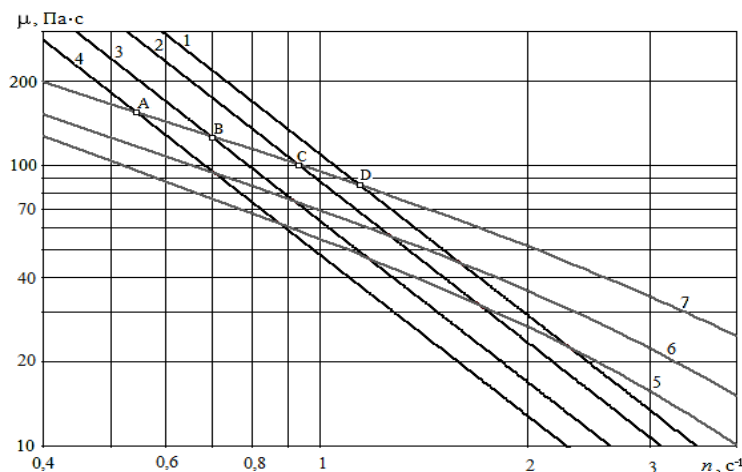


Рис. 5. Определение НД ЧВР КН серии JRZL при подаче различных ФСМ:

1 – связь μ и n_M RZL-120; 2 – RZL-220; 3 – RZL-330; 4 – RZL-440;

5 – зависимость ЭДВ от ЧВР ФСМ-2; 6 – ФСМ-3; 7 – ФСМ-5

Fig. 5. Determination of the maximum permissible rotor speed of JRZL series rotary lobe pumps when pumping various pollock mince systems (PMS):

1 – μ vs. n_M relationship for RZL-120; 2 – RZL-220; 3 – RZL-330; 4 – RZL-440;

5 – effective dynamic viscosity vs. rotor speed dependence for PMS-2; 6 – PMS-3;

7 – PMS-5

Рассмотрим подробнее определение НД ЧВР при подаче ФСМ-5. Точки обозначают пересечение графика зависимости $\mu=f(n)$ указанной фаршевой системы с линиями $n_M = f(\mu)$ четырех КН серии JRZL: А – RZL-440, $n_M = 0,544 \text{ с}^{-1}$ или 32,6 об./мин, В – RZL-330, $n_M = 0,696 \text{ с}^{-1}$ или 41,8 об./мин, С – RZL-220, $n_M = 0,932 \text{ с}^{-1}$ или 55,9 об./мин, D – RZL-120, $n_M = 1,145 \text{ с}^{-1}$ или 68,7 об./мин. Аналогичным образом с помощью решения уравнения (6) численным методом находятся значения n_M в других точках пересечения на рис. 6. Зная n_M , можно рассчитать подачу КН по формуле (1), затраченную мощность – по формуле (2), показатели энергетической эффективности – по формуле (3). Часть таких результатов приведена в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Результаты расчета НД ЧВР четырех КН серии JRZL, ЭДВ, подачи, затраченной мощности и показателей энергетической эффективности для ФСМ-1 ($p=1$)

Table 3. Calculated values of maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, flow rate, power consumption and energy efficiency parameters for pollock mince system PMS-1 ($p=1$)

Марка КН серии JRZL	n_M		μ	Q	N	η	E
	с^{-1}	об./мин	$\text{Па}\cdot\text{с}$	$\text{дм}^3/\text{с}$	кВт	%	$\text{кДж}/\text{дм}^3$
120	4,03	232	7,11	0,846	0,490	17,3	0,579
220	2,55	153	14,46	1,02	1,236	14,7	1,211
330	1,57	94,1	26,65	1,60	1,257	12,7	0,786
440	1,12	67,3	38,39	2,55	2,196	11,6	0,862

Таблица 4. Результаты расчета НД ЧВР четырех КН серии JRZL, ЭДВ, подачи, затраченной мощности и показателей энергетической эффективности для ФСМ-2 ($p=1$)

Table 4. Calculated values of maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, flow rate, power consumption and energy efficiency parameters for pollock mince system PMS-2 ($p=1$)

Марка КН серии JRZL	n_M		μ	Q	N	η	E
	c^{-1}	об./мин	Па·с	дм ³ /с	кВт	%	кДж/дм ³
120	2,28	137	22,39	0,480	0,361	13,3	0,753
220	1,70	102	31,77	0,678	0,688	12,2	1,015
330	1,17	70,3	46,64	1,20	1,084	11,0	0,907
440	0,877	52,6	61,63	1,99	1,944	10,2	0,976

На основании данных, представленных в табл. 3 и 4, можно проследить уменьшение величины НД ЧВР с увеличением рабочего объема насоса. При этом ЭДВ, подача и затраченная мощность увеличиваются, а ГКПД снижается. Монотонное возрастание ПУЭЗ нарушается наибольшим значением этого показателя у КН RZL-220. Покажем, как воспользоваться результатами расчетов табл. 3 и 4 для выбора насоса. Пусть необходимо подобрать КН для ФСМ-2 с подачей $Q_0 = 0,9$ дм³/с. По табл. 4 у RZL-220 подача меньше Q_0 , а у RZL-330 – больше. Получить заданную подачу можно либо увеличением ЧВР у RZL-220, либо уменьшением у RZL-330, но увеличивать ЧВР у первого насоса нельзя (так будет превышено значение n_M), поэтому следует уменьшить ЧВР у RZL-330 до значения $n_1 = n_M \cdot Q_0 / 1,2 = 70,3 \cdot 0,9 / 1,2 = 52,7$ об./мин.

Интересно проследить, как изменяются показатели работы насоса для разных образцов ФСМ. В табл. 5 представлены результаты такого расчета для КН RZL-120.

Таблица 5. Результаты расчета НД ЧВР КН RZL-120, ЭДВ, подачи, затраченной мощности и показателей энергетической эффективности для образцов ФСМ (при $p=1$)

Table 5. Calculated values of maximum permissible rotor speed, effective dynamic viscosity, flow rate, power consumption and energy efficiency parameters for pollock mince system samples using RZL-120 pump ($p=1$)

Образец ФСМ	n_M		μ	Q	N	η	E
	c^{-1}	об./мин	Па·с	дм ³ /с	кВт	%	кДж/дм ³
ФСМ-1	4,03	232	7,11	0,846	0,490	17,3	0,579
ФСМ-2	2,28	137	22,39	0,480	0,361	13,3	0,753
ФСМ-3	1,60	95,7	44,67	0,335	0,301	11,2	0,897
ФСМ-4	1,29	77,5	67,15	0,271	0,271	10,0	0,999
ФСМ-5	1,14	68,7	84,64	0,240	0,256	9,4	1,064

Согласно данным табл. 5, используя указанный насос, наибольшую величину ЧВР можно установить при транспортировании ФСМ-1 (232 об./мин), наименьшую – при транспортировании ФСМ-5 (68,7 об./мин). При этом в первом случае подача будет 0,846 дм³/с, затраченная мощность – 0,49 кВт, ПУЭЗ –

0,579 кДж/дм³. Во втором случае все показатели уменьшились и составили 0,24 дм³/с, 0,256 кВт, 1,064 кДж/дм³ соответственно.

Как было указано выше, подача КН не зависит от перепада давления для сред с такой большой вязкостью. Значит, все результаты расчета Q останутся справедливыми и для иных значений перепада давления. Другие показатели работы КН (N , η , E) зависят от величины p , причем сам перепад давления будет меняться с изменением подачи. Поэтому для уточнения значений указанных показателей их следует рассчитывать в рабочей точке насосной установки, для чего необходимо иметь рабочую характеристику трубопровода.

ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный метод позволяет определять наибольшую допустимую частоту вращения ротора коловратного насоса при перекачивании фаршевых систем из рыбного сырья с учетом их специфических реологических свойств. Чтобы рассчитать НД ЧВР, необходимо знать параметры реологической модели фарша и эмпирические зависимости допустимой частоты от вязкости для конкретной серии насосов.

Для коловратных насосов серии JRZL получена обобщенная формула $n_M = B(\mu b)/\nu^{\beta(\mu b)}$, где показатель степени β оказался постоянным ($\beta=0,181$), а функция $B(\mu b)$ аппроксимирована с высокой степенью согласия с экспериментальными данными.

Разработанный алгоритм решения нелинейного уравнения $n_M - f[\varphi(n_M)] = 0$ позволяет определить предельные режимы работы насоса для конкретных фаршевых систем из минтая с различными наполнителями. Установлено, что НД ЧВР снижается как с увеличением рабочего объема насоса, так и с усложнением состава фаршевой системы: для насоса RZL-120 при переходе от фарша без добавок (ФСМ-1) к фаршу с ржаной мукой (ФСМ-5) НД ЧВР уменьшается с 232 до 68,7 об./мин, а удельные энергетические затраты возрастают в 1,8 раз. Это связано с тем, что добавление наполнителей повышает эффективную динамическую вязкость фарша при высоких градиентах скорости и усиливает эффект разрушения структуры, что требует снижения частоты вращения для сохранения качества продукта.

Полученные результаты позволяют обоснованно выбирать тип коловратного насоса и режим его работы при заданной подаче, обеспечивая сохранение структуры рыбного фарша и оптимизацию энергетических показателей насосной установки в технологических линиях производства экструдированной продукции.

Список источников

1. Горбатов, А. В. Реология мясных и молочных продуктов: моногр. / А. В. Горбатов. – Москва: Пищ. пром-сть, 1979. – 384 с.
2. Наумов, В. А. Производительность и энергетическая эффективность коловратного насоса при перекачивании мясного фарша / В. А. Наумов. – DOI: 10.21323/2071-2499-2024-4-44-48 // Все о мясе. – 2024. – № 4. – С. 27–32.
3. Kang, Y. H. Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluation / Y. H. Kang, Y. H. Vu, C. Hsu. – DOI: 10.1017/jmech.2012.26 // Journal of Mechanics. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 229–238.

4. Li, Y. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap / Y. Li, D. Guo, X. Li. – DOI: 10.1080/19942060.2018.1517053 // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2018. – Vol. 12. – P. 711–723.
5. Li, Y. B. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump / Y. B. Li, J. Du, D. S. Guo. – DOI: 10.1007/s40430-019-1781-0 // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41. – P. 1–11.
6. Ахмедова, Н. Р. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на энергетическую эффективность кулачковых насосов / Н. Р. Ахмедова, О. И. Левичева, В. А. Наумов. – DOI: 10.26297/0579-3009.2023.5-6.14 // Известия вузов. Пищевая технология. – 2023. – № 5–6 (394). – С. 88–93.
7. 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.
8. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet. – Текст: электронный // KSB Aktiengesellschaft: сайт. – URL: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (дата обращения: 02.12.2025).
9. Operating & Maintenance Manual for JRZL-100 Series Rotary Lobe Pumps. – Текст: электронный // Dixon: сайт. – URL: https://dixonvalve.com/sites/default/files/documents/Rotary-Lobe-Pumps-JRZL-100-Series_0.pdf (дата обращения: 31.12.2025).
10. Наумов, В. А. Зависимость наибольшей допустимой частоты вращения ротора от рабочего объема коловратных насосов и вязкости пищевой жидкости / В. А. Наумов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 26–35.
11. Наумов, В. А. Допустимая частота вращения ротора коловратного насоса при транспортировании плавленых сыров / В. А. Наумов, О. И. Левичева. – DOI: 10.21603/2073-4018-2025-3-27 // Сыроделие и маслоделие. – 2025. – № 3. – С. 98–103.
12. Исследование влияния структурорегулирующих добавок на свойства рыбных фаршевых систем / В. Д. Богданов, А. А. Симдянкин, А. В. Панкина, В. Д. Мостовой. – DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-3-219-230 // Вестник МГТУ. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 219–230.
13. Исследование реологических характеристик рыбного фарша из объектов аквакультуры / Ю. А. Фатыхов, Д. Л. Альшевский, В. И. Устич [и др.]. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-3-119-128 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2023. – № 3. – С. 119–128.
14. Совершенствование технологии рыбного фарша из прудовых рыб и оценка качества кулинарных изделий из него / Н. В. Ярцева, Н. В. Долганова, И. Ю. Алексанян, А. Х.-Х. Нугманов. – DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-2-7 // Индустрия питания. – 2022. – Т. 7, № 2. – С. 61–71.
15. Gorbatovskiy, A. A. Minced products from undersized sea fish: new industrial technology / A. A. Gorbatovskiy, I. L. Rakityanskaya, M. V. Kaledina. – DOI: 10.21603/2308-4057-2021-1-87-94 // Foods and Raw Materials. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 87–94.
16. Агеев, О. В. Обоснование реологической модели фаршевой системы из рыбного сырья при производстве экструдированной продукции / О. В. Агеев // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 6–25.

References

1. Gorbatov, A. V. Rheology of meat and dairy products: monogr. / A. V. Gorbatov. – Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1979. – 384 p.
2. Naumov, V. A. Productivity and energy efficiency of the lobe pump for minced meat pumping / V. A. Naumov. – DOI: 10.21323/2071-2499-2024-4-44-48 // All about meat. – 2024. – № 4. – P. 27–32.
3. Kang, Y. H. Factors impacting on performance of lobe pumps: a numerical evaluation / Y. H. Kang, Y. H. Vu, C. Hsu. – DOI: 10.1017/jmech.2012.26 // Journal of Mechanics. – 2012. – Vol. 28, № 2. – P. 229–238.
4. Li, Y. Mitigation of radial exciting force of rotary lobe pump by gradually varied gap / Y. Li, D. Guo, X. Li. – DOI: 10.1080/19942060.2018.1517053 // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2018. – Vol. 12. – P. 711–723.
5. Li, Y. B. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump / Y. B. Li, J. Du, D. S. Guo. – DOI: 10.1007/s40430-019-1781-0 // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 41. – P. 1–11.
6. Akhmedova, N. R. Influence of liquid food products viscosity on the lobe pumps energy efficiency / N. R. Akhmedova, O. I. Levicheva, V. A. Naumov. – DOI: 10.26297/0579-3009.2023.5-6.14 // Proceedings of Higher Education Institutions. Food Technology. – 2023. – № 5–6 (394). – P. 88–93.
7. Levicheva, O. I. Improvement of the analytical model of the food lobe pumps load characteristics / O. I. Levicheva // Bulletin of Science and Education of North-West Russia. – 2025. – Vol. 11, № 1. – P. 18–27.
8. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet. – Text: electronic // KSB Aktiengesellschaft: site. – URL: <https://www.ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (date of treatment: 02.12.2025).
9. Operating & Maintenance Manual for JRZL-100 Series Rotary Lobe Pumps. – Text: electronic // Dixon: website. – URL: https://dixonvalve.com/sites/default/files/documents/Rotary-Lobe-Pumps-JRZL-100-Series_0.pdf (date of treatment: 31.12.2025).
10. Naumov, V. A. Dependence of the maximum allowable rotor speed on the lobe pumps working volume and the viscosity of the food liquid / V. A. Naumov // Bulletin of Science and Education of North-West Russia. – 2025. – Vol. 11, № 3. – P. 26–35.
11. Naumov, V. A. Inter-Operational Conveying of Processed Cheese Spreads: Permissible Rotation Speed of Rotary Lobe Pump. / V. A. Naumov, O. I. Levicheva. – DOI: 10.21603/2073-4018-2025-3-27 // Cheese and Butter Making. – 2025. – № 3. – P. 98–103.
12. Investigation of the effect of structure-regulating additives on the properties of minced fish systems / V. D. Bogdanov, A. A. Simdyankin, A. V. Pankina, V. D. Mostovoy. – DOI: 10.21443/1560-9278-2022-25-3-219-230 // Bulletin of MSTU. – 2022. – Vol. 25, № 3. – P. 219–230.
13. Study of the rheological properties of minced fish from aquaculture objects / Yu. A. Fatykhov, D. L. Alshevsky, V. I. Ustich [et al.]. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-3-119-128 // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry. – 2023. – № 3. – P. 119–128.

14. Technology Improvement of Minced Fish from Pond Fish and Quality Assessment of Culinary Products / N. V. Yartseva, N. V. Dolganova, I. Yu. Aleksanyan, A. Kh.-Kh. Nugmanov. – DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-2-7 // Food Industry. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 61–71.

15. Gorbatovskiy, A. A. Minced products from undersized sea fish: new industrial technology / A. A. Gorbatovskiy, I. L. Rakityanskaya, M. V. Kaledina. – DOI: 10.21603/2308-4057-2021-1-87-94 // Foods and Raw Materials. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 87–94.

16. Ageev, O. V. Substantiation of a rheological model for a fish-based mince system in the production of extruded products / O. V. Ageev // Bulletin of Science and Education of North-West Russia. – 2025. – Vol. 11, № 3. – P. 6–25.

Информация об авторах

Н. Р. Ахмедова – кандидат биологических наук, заведующая кафедрой техносферной безопасности и природообустройства

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

Information about the authors

N. R. Akhmedova – Candidate of Biological Sciences, Head of the Department of Technosphere Safety and Environmental Engineering

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

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 02.03.2026; одобрена после рецензирования 12.03.2026; принята к публикации 16.04.2026.

The article was submitted 02.03.2026; approved after reviewing 12.03.2026; accepted for publication 16.04.2026.