

# Допустимая частота вращения ротора коловратного насоса при транспортировании плавленых сыров

**Владимир Аркадьевич Наумов**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры

E-mail: van-old@mail.ru

**Оксана Игоревна Левичева**, аспирант

E-mail: o\_levicheva@bk.ru

Калининградский государственный технический университет, г. Калининград

В статье предложен метод определения допустимой частоты вращения ротора коловратных насосов при межоперационном транспортировании пищевых сред с большой вязкостью, в том числе пастообразных плавленых сыров. Производительность коловратных насосов увеличивается с ростом частоты вращения ротора. Фирмы-производители в своей технической документации, как правило, приводят допустимые значения динамической вязкости для коловратных насосов при различных частотах вращения ротора. Если динамическая вязкость превышает допустимые значения, производитель не гарантирует надежную работу коловратных насосов при указанных значениях частоты вращения ротора. Однако непосредственно воспользоваться такими ограничениями можно только для ньютоновских жидкостей. Большинство пищевых сред, в том числе плавленые сыры, имеет реологические свойства неньютоновских жидкостей, у которых эффективная динамическая вязкость зависит от градиента скорости (следовательно, и от частоты вращения ротора). Разработан метод определения допустимой частоты вращения ротора некоторого коловратного насоса при известной зависимости эффективной динамической вязкости перекачиваемой жидкости от градиента скорости. Приведены примеры использования предложенного метода для определения допустимой частоты вращения ротора коловратных насосов Vitalube при транспортировании двух образцов плавленого сыра при нескольких температурах.

**Ключевые слова:** плавленые сыры, межоперационное транспортирование, коловратный насос, производительность, допустимая частота вращения ротора, вязкость, температура

**Для цитирования:** Наумов, В. А. Допустимая частота вращения ротора коловратного насоса при транспортировании плавленых сыров / В. А. Наумов, О. И. Левичева // Сыроделие и маслоделие. 2025. № 3. С. 98–103. <https://doi.org/10.21603/2073-4018-2025-3-27>

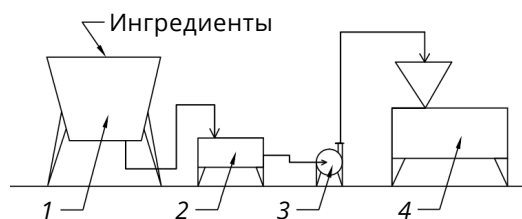
## Введение

Коловратные насосы обладают высокой производительностью и эффективностью, что позволяет оптимизировать процессы приготовления пастообразных плавленых сыров и снижать затраты на их обслуживание. Это означает, что использование таких насосов может привести к экономии энергии и снижению эксплуатационных расходов. Вязкость перекачиваемого продукта (плавленого сыра) напрямую влияет на производительность насосов и потребляемую мощность.

Насосы для вязких пищевых жидкостей широко используются в межоперационном транспортировании пастообразных плавленых сыров. На рисунке 1 показана типовая схема технологического процесса производства плавленого сыра на основе творога, где плавленный сыр с помощью насоса подается из емкости для промежуточного хранения смеси (2) в автомат для расфасовки плавленого сыра (4). Однако никаких рекомендаций по выбору параметров насоса в источнике<sup>1</sup> не приведено.

В практическом руководстве<sup>2</sup> подробно рассмотрены технологические схемы производства разных типов плавленых сыров, но насосы для транспортирования плавленого сыра даже не упомянуты.

В [1, 2] после этапа «Плавление сырной массы в котле-плавителе» следует этап «Фасовка расплавленного продукта», но нет информации о межоперационном транспортировании.



**Рисунок 1. Схема технологического процесса производства плавленого сыра: 1 – оборудование для термической обработки смеси (котел типа «Штефан»); 2 – емкость для промежуточного хранения смеси; 3 – насос для вязких продуктов; 4 – автомат для расфасовки плавленого сыра<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Шингарева, Т. И. Производство сыра: учебное пособие для студентов вузов по специальности «Технология хранения и переработки животного сырья» / Т. И. Шингарева, Р. И. Раманаскас. – Минск: ИВЦ Минфина, 2008. – 384 с.

<sup>2</sup>Оноприйко, А. В. Сыроделие на мини-заводах и специализированных модулях / А. В. Оноприйко, В. А. Оноприйко. – СПб.: ГИОГД, 2004. – 163 с.

<sup>3</sup>Оноприйко, А. В. Производство сыра: учебное пособие...

Последнее десятилетие для межоперационного транспортирования плавленных сыров все больше используют коловратные насосы. Часто их называют кулачковыми. Широкое применение связано с конструктивными особенностями коловратных насосов. Принцип действия коловратного насоса сходен с шестеренным насосом с внешним зацеплением. Но, в отличие от шестеренного насоса, в коловратном насосе замыкание лопастей (кулачков) геометрическое, а не силовое. Опорные подшипники вала расположены вне зоны контакта с перекачиваемой жидкостью, что придает коловратному насосу высокую надежность и низкий уровень износа. Коловратные насосы способны перекачивать густые пастообразные материалы с высокой вязкостью. Главный недостаток коловратных насосов – высокая стоимость, обусловленная требованием высокой точности при их изготовлении. Основное преимущество коловратных насосов заключается в аккуратном транспортировании продуктов питания без нарушения их структуры, что весьма важно для плавленных сыров. Благодаря тому, что ингредиенты плавленных сыров не подвергаются интенсивному механическому воздействию при транспортировании, сохраняются их натуральные свойства, что, в свою очередь, улучшает вкус конечного продукта.

Коловратные насосы обладают высокой производительностью и показателями энергетической эффективности, что позволяет оптимизировать производственные процессы приготовления плавленных сыров и снизить затраты на обслуживание оборудования. Их использование в производстве плавленных сыров позволяет добиться снижения энергозатрат. Чтобы достичь таких результатов, необходимо учесть влияние вязкости перекачиваемого продукта на производительность и затраченную мощность коловратных насосов [3–5].

Наиболее подходящей моделью для плавленного сыра считается модель степенной жидкости<sup>4</sup> [6]. Формула Оствальда для эффективной динамической вязкости ( $\mu$ , Па·с) имеет следующий вид:

$$\mu = K \cdot \omega^{m-1} \quad (1)$$

где  $m$  – показатель неньютоновского поведения жидкости;  $K$  – коэффициент Оствальда (коэффициент консистенции жидкости), Па·с <sup>$m$</sup> ;  $\omega$  – градиент скорости, с<sup>–1</sup>.

<sup>4</sup>Арет, В. А. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов: учебное пособие / В. А. Арет [и др.]. – СПб.: СПбГУНИПТ, 2006. – 435 с.



Реологические параметры плавленных сыров  $m$  и  $K$  зависят в наибольшей степени от состава, структуры продукта и его температуры. Установлено увеличение эффективной динамической вязкости плавленного сыра в процессе его приготовления / перемешивания [7, 8].

**Цель исследования** – разработка метода определения допустимой частоты вращения ротора коловратных насосов при перекачивании неньютоновских пищевых сред (включая плавленные сыры), у которых вязкость зависит от скорости сдвига (частоты вращения).

## Объекты и методы исследования

**Исходные данные.** При производстве пастообразных плавленных сыров используют соли-плавители, которые позволяют получить продукт с мягкой, пластичной консистенцией (Янтарь, Дружба, Волна, Лето) [1]. Плавление смеси проводят при температуре 80–85 °С (для некоторых сортов плавленных сыров – до 95 °С). После плавления смесь охлаждают до 60–65 °С для обеспечения оптимальных характеристик при фасовании.

В ходе определения допустимой частоты вращения ротора коловратных насосов при транспортировании плавленных сыров использовались два образца: ПС-1 и ПС-2, состав и характеристики которых были аналогичны образцам плавленных сыров из исследования G. Dimitreli и A. S. Thomareis [6].

В данном исследовании представлены реологические параметры семи образцов плавленых сыров разного состава для температур от 55 до 95 °С. В качестве сырья выступали: сыр Гауда (влажность 43,1 %, м. д. ж. 25,5 %), сливочное масло (влажность 16,4 %; м. д. ж. 81,9 %), сухое обезжиренное молоко (влажность 6,5 %, м. д. ж. 0,8 %, м. д. б. 37,7 %), цитрат натрия в качестве эмульгирующей соли. Точный состав образцов указан в таблице 1.

В настоящей работе использованы данные об реологических параметрах образцов плавленых сыров из исследования [6], т. к. состав образцов ПС-1 и ПС-2 аналогичен Sample 1 и Sample 5, рассматриваемых в вышеупомянутом исследовании, соответственно. В таблице 2 представлены реологические параметры образцов для температур от 55 до 95 °С. Видно, что эффективная динамическая вязкость для ПС-1 на порядок выше, чем эффективная динамическая вязкость для ПС-2.

Выпуск пищевых коловратных насосов осуществляется многими российскими и зарубежными компаниями<sup>5-11</sup>. Есть компании, например KSB, Pomac Pumps, SPX FLOW, которые размещают в открытом доступе результаты испытаний

своих коловратных насосов по перекачиванию пищевых жидкостей различной вязкости. Здесь воспользуемся наиболее полными результатами испытаний, проведенными в широком диапазоне значений динамической вязкости жидкостей<sup>12</sup>. В таблице 3 приведены допустимые значения динамической вязкости при заданной частоте вращения ротора ( $n$ , об/мин), коловратных насосов серии Vitalobe. При большей вязкости производителем не гарантируется надежная работа коловратных насосов.

Прочерк в таблице 3 означает, что компания не рекомендует использовать коловратные насосы при такой частоте вращения ротора.

Таблицей 3 можно непосредственно воспользоваться лишь для ньютоновских жидкостей. У неньютоновских сред, в т. ч. плавленых сыров, эффективная динамическая вязкость зависит от градиента скорости. В коловратном насосе связь между частотой вращения ротора и  $\omega$  можно приближенно оценить по формуле:

$$\omega \approx 2\pi \cdot n \quad (2)$$

где  $n$  – частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>.

**Таблица 1. Содержание сырьевых компонентов в анализируемых образцах плавленых сыров, %**

Образец	Сыр Гауда	Вода	Сливочное масло	Молоко сухое обезжиренное	Цитрат натрия
ПС-1 (Sample 1)	50,5	37,5	0	9,0	3,0
ПС-2 (Sample 5)	81,3	14,0	1,7	0	3,0

Примечание: составлено по данным [6].

**Таблица 2. Реологические параметры образцов плавленых сыров**

Образец	Температура, °С							
	65		75		85		95	
	$m$	$K$	$m$	$K$	$m$	$K$	$m$	$K$
ПС-1	0,833	2,175	0,844	0,944	0,863	0,412	0,877	0,221
ПС-2	0,717	29,406	0,710	17,978	0,733	7,455	0,732	4,413

Примечание: составлено по данным [6].

<sup>5</sup>АО «Некрасовский машиностроительный завод». Каталог пищевых роторных насосов ОРА [Электронный ресурс]. URL: [http://nmz-yaroslavl.ru/product/pumps/shesterennye\\_nasosy/rotornye\\_nasosy\\_ora/](http://nmz-yaroslavl.ru/product/pumps/shesterennye_nasosy/rotornye_nasosy_ora/) (дата обращения: 05.05.2024).

<sup>6</sup>ООО «ПК Константа». Роторные насосы ОНР [Электронный ресурс]. URL: <http://pkkonstanta.ru/catalog/nasosy-pishevye/nasosy-rotornye-onr-ora-pishevye.html> (дата обращения: 05.05.2024).

<sup>7</sup>ООО «Технология». Каталог пищевых кулачковых насосов [Электронный ресурс]. URL: <https://newhomogenizer.ru/catalog/kulachkovii-nasos/> (дата обращения: 05.05.2025).

<sup>8</sup>KSB Aktiengesellschaft. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet [Электронный ресурс]. URL: <https://ksb.com/en-se/lc/products/pump/dry-installed-pump/vitalobe/V06A> (дата обращения 02.02.2025).

<sup>9</sup>Pomac Industries Group. Food Beverages Lobe Pump PLP [Электронный ресурс]. URL: <https://pomacpumps.com/en/food-beverages/lobe-pump-plp/> (дата обращения 08.03.2025).

<sup>10</sup>Waukesha Cherry-Burrell. Rectangular flange positive displacement pumps [Электронный ресурс]. URL: <https://spxflo.com/waukesha-cherry-burrell/products/universal-1-series-rectangular-flange-positive-displacement-pumps/> (дата обращения 08.03.2025).

<sup>11</sup>Lobe Pump Donjoy [Электронный ресурс].

URL: [https://promnasos.com/documents/instructions/donjoy/catalog\\_lobe.pdf](https://promnasos.com/documents/instructions/donjoy/catalog_lobe.pdf) (дата обращения 08.03.2025).

<sup>12</sup>KSB Aktiengesellschaft. Rotary Lobe Pumps. Characteristic Curves Booklet...

**Таблица 3. Допустимые значения динамической вязкости (сПз) при заданной частоте вращения ротора коловратных насосов серии Vitalobe**

Модель	n, об/мин								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
215	30 000	10 000	6000	4000	2000	800	400	200	100
220	50 000	20 000	13 000	9000	5000	2500	1000	500	250
330	100 000	50 000	30 000	20 000	15 000	10 000	5000	–	–

Примечание: по данным с сайта производителя.

На рисунке 2 линии 1–3 построены по значениям в таблице 1, а линии 4–7 для каждого значения температуры рассчитаны по формуле (1), в которую подставлена (2). Точки пересечения графиков позволяют определить допустимую частоту вращения ротора коловратных насосов для образцов плавленых сыров при определенной температуре.

**Аналитические выражения для нагрузочных характеристик.** При производстве плавленых сыров важно подобрать коловратный насос, который обеспечит достаточную подачу продукта. Если эффективная динамическая вязкость сравнительно невелика, то ее увеличение (при прочих равных условиях) приводит к возрастанию подачи коловратного насоса [4, 5]. Анализ, проведенный в [9], показал целесообразность представления зависимости подачи коловратного насоса от частоты вращения ротора, перепада давления и эффективной динамической вязкости в следующем виде:

$$Q \equiv F(n, p, \eta) = V_1 \cdot (n - n_{\eta 0}), n_{\eta 0} = B \cdot p^a \quad (3)$$

где  $V_1$  – объем плавленого сыра, перекачиваемый коловратным насосом за один оборот при перепаде давления равном нулю;  $n_{\eta 0}$  – минимальное значение частоты вращения ротора начала перекачивания для произвольной жидкости;  $\eta = \mu/\mu_0$  – безразмерная динамическая вязкость

плавленого сыра,  $\mu, \mu_0$  – динамическая вязкость перекачиваемого образца плавленого сыра и воды при 20 °С, соответственно;  $p = \Delta P/P_A$ ,  $\Delta P$  – перепад давления,  $P_A$  – атмосферное давление. Обратим внимание, что  $Q \rightarrow Q_T = V_1 \cdot n$ , при росте  $\eta > 500$ .

Для определенности воспользуемся данными испытаний коловратных насосов Vitalobe. Было проведено сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по формуле (3) минимального значения частоты вращения ротора, при котором начинается перекачивание жидкости. Оказалось, что величину  $a$  можно считать константой лишь при  $\eta > 10$ ; до этого  $a$  является возрастающей линейной функцией от логарифма  $\eta$ :

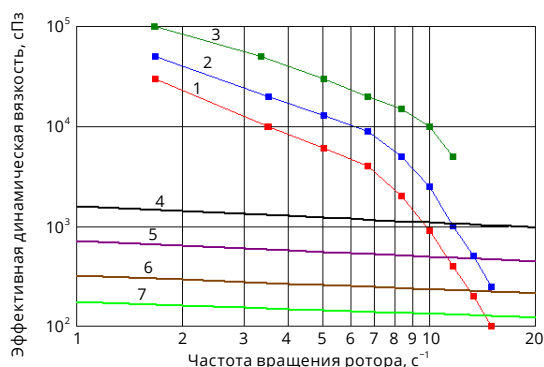
$$a \equiv \varphi(\eta) = \begin{cases} \alpha_0 + \alpha_1 - \lg \eta, & \text{при } \leq 10 \\ C, & \text{при } > 10 \end{cases} \quad (4)$$

где эмпирические константы равны:  $\alpha_0 = 0,413$ ;  $\alpha_1 = 0,157$ ;  $C = 0,57$ .

Величина  $B$  хорошо аппроксимируется убывающей функцией  $\lg \eta$  в исследованном диапазоне условий:

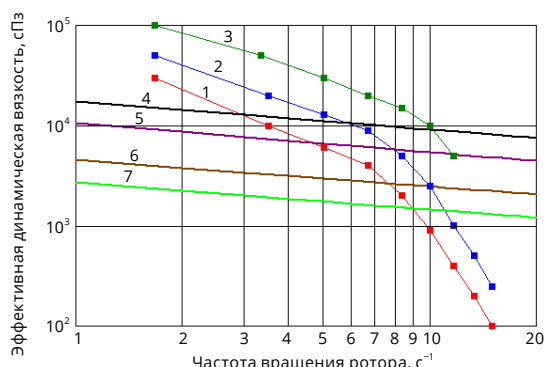
$$B \equiv \psi(\eta) = B_0 - B_1 \cdot \lg \eta \quad (5)$$

где эмпирические константы для коловратных насосов Vitalobe равны:  $B_0 = 12,364 \text{ с}^{-1}$ ;  $B_1 = 4,538 \text{ с}^{-1}$ .



1, 2, 3 – ограничения частоты вращения ротора коловратных насосов Vitalobe-215, 220 и 330 соответственно;  
4, 5, 6, 7 – результат расчета коэффициента динамической вязкости при 65, 75, 85 и 95 °С соответственно.

а



б

**Рисунок 2. Графики для определения допустимой частоты вращения ротора коловратных насосов при изменении температуры: а) ПС-1; б) ПС-2**

Тогда формула (3) с учетом (4), (5) примет следующий вид:

$$Q = V_1 \cdot [n - \psi(\eta) \cdot p^{\varphi(\eta)}] \quad (6)$$

## Результаты и их обсуждение

Допустимые частоты вращения ротора, определенные по рисунку 2а внесены в таблицу 4, по ним рассчитана величина безразмерной эффективной динамической вязкости  $\eta$ , теоретической подачи  $Q_T$  и  $Q_p$  по формуле (6) при двух значениях безразмерного перепада давления  $p$ . При температуре 95 °С ПС-1 имеет сравнительно небольшую эффективную динамическую вязкость  $\eta = 125$ , потому  $Q_p$  тем меньше  $Q_T$ , чем больше перепад давления. С уменьшением температуры частота  $n_{\text{доп}}$  уменьшается, а  $\eta$  увеличивается. В результате разница между  $Q_p$  и  $Q_T$  уменьшается. При температуре 65 °С эффективная динамическая вязкость ПС-1 выросла так ( $\eta > 1000$ ), что  $Q_p = Q_T$  вне зависимости от перепада давления.

По рисунку 2б эффективная динамическая вязкость ПС-2 больше 1000 сПз в рабочем диапазоне частоты вращения ротора при всех исследованных температурах вплоть до 95 °С. Поэтому во всех случаях  $Q_p = Q_T$ , что учтено в таблицах 5 и 6.

По рассчитанным таблицам 5 и 6 можно подобрать коловратный насос с необходимой подачей. Пусть для транспортирования ПС-2 при 75 °С необходимо подобрать коловратный насос, обеспечивающий подачу  $Q = 2 \text{ дм}^3/\text{с}$ . Согласно таблице 5, наибольшая подача, которую может обеспечить в этих условиях коловратный насос Vitalobe-215 ( $V_1 = 0,24 \text{ дм}^3$ ) всего  $1,13 \text{ дм}^3/\text{с}$ . Поэтому придется обратиться к следующему в линейке коловратному насосу Vitalobe-220, у которого большая величина  $V_1 = 0,39 \text{ дм}^3$ , но и большие энергозатраты.

**Таблица 4. Допустимые частоты вращения ротора и соответствующие им подачи коловратных насосов Vitalobe-220 для ПС-1**

t, °С	$n_{\text{доп}}$ , об/мин	$\eta$	$Q_T$ , $\text{дм}^3/\text{с}$	$Q_p$ , $\text{дм}^3/\text{с}$	
				при $p = 1$	при $p = 5$
65	696	1063	4,52	4,52	4,52
75	811	472	5,27	5,18	4,93
85	912	220	5,93	5,25	3,56
95	950	125	6,17	5,07	2,51

Коловратный насос Vitalobe-220, согласно таблице 6, может в рассматриваемых условиях обеспечить подачу до  $3,12 \text{ дм}^3/\text{с}$ . Современные коловратные насосы позволяют устанавливать необходимую частоту вращения ротора. В данном случае она будет равна  $Q/V_1 = 2/0,39 = 5,128 \text{ с}^{-1}$ , или 308 об/мин.

Заметим, что для ПС-1 при температуре 75 °С и выше такой расчет будет более сложным. В соответствии с формулой (6), необходимо определить перепад давления, для чего сначала требуется найти параметры насосной системы в рабочей точки. Эта задача выходит за рамки данной статьи.

## Выводы

При перекачивании пищевых сред (в том числе плавленных сыров) с динамической вязкостью более 500 сПз производительность коловратных насосов прямо пропорциональна частоте вращения ротора. Поэтому производители стремятся эксплуатировать коловратный насос на межоперационном транспортировании плавленного сыра с высокой частотой вращения ротора. Фирмы-производители в своей технической документации, как правило, приводят допустимые значения динамической вязкости для коловратных насосов при различных частотах вращения ротора. Если динамическая вязкость превышает допустимые значения, производитель не гарантирует надежную работу коловратного насоса при указанных значениях частоты вращения ротора.

**Таблица 5. Допустимые частоты вращения ротора и соответствующие им подачи коловратных насосов Vitalobe-215 для ПС-2**

t, °С	$n_{\text{доп}}$ , об/мин	$\eta$	$Q_p = Q_T$ , $\text{дм}^3/\text{с}$
65	196	12 503	0,785
75	284	6723	1,13
85	468	2637	1,87
95	546	1492	2,18

**Таблица 6. Допустимые частоты вращения ротора и соответствующие им подачи коловратных насосов Vitalobe-220 для ПС-2**

t, °С	$n_{\text{доп}}$ , об/мин	$\eta$	$Q_p = Q_T$ , $\text{дм}^3/\text{с}$
65	362	10 511	2,35
75	481	5770	3,12
85	502	2465	3,91
95	673	1411	4,37



Однако такими ограничениями можно непосредственно воспользоваться лишь для ньютоновских жидкостей. Большинство пищевых сред, в том числе плавленый сыр, имеет реологические свойства неньютоновских жидкостей. Для плавленого сыра справедлива степенная реологическая модель, рост градиента скорости  $\omega$  (значит, и частота вращения ротора) приводит к уменьшению эффективной динамической вязкости. Предложенный метод позволяет определить допустимую частоту вращения ротора некоторого коловратного насоса при известной зависимости эффективной динамической вязкости перемещаемой жидкости от  $\omega$ . Были использованы данные технической документации коловратных насосов Vitalobe и реологические характеристики двух образцов плавленых сыров при нескольких

температурах. Если Vitalobe-220 подает ПС-1 при температуре 85 °С, то допустимая частота вращения ротора 912 об/мин. Если температура ПС-1 снизится до 75 °С, то эффективная динамическая вязкость возрастет, а допустимая частота вращения ротора станет меньше (811 об/мин).

Для плавленых сыров с эффективной динамической вязкостью выше 500 сПз метод позволяет выбрать коловратный насос и частоту вращения ротора, обеспечивающие необходимую подачу, при любом допустимом перепаде давления. Для плавленых сыров со сравнительно невысокой эффективной динамической вязкостью (100–200 сПз) требуется дальнейшее развитие метода, включающее определение перепада давления в рабочей точке насосной установки. ■

Поступила в редакцию: 21.03.2025  
Принята в печать: 12.08.2025

## Inter-Operational Conveying of Processed Cheese Spreads: Permissible Rotation Speed of Rotary Lobe Pump

Vladimir A. Naumov, Oksana I. Levicheva

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad

The article proposes a method for determining the permissible speed of rotary lobe pumps for inter-operational conveying of processed cheese spreads. The performance of rotary lobe pumps increases together with the rotor speed. Technical documentation usually provides the permissible dynamic viscosity values for rotary lobe pumps at different rotor speeds. If the dynamic viscosity exceeds the permissible values, the manufacturer cannot guarantee reliable operation of the rotary lobe pumps. However, only Newtonian liquids can benefit from such limitations. Most food media, including cheese spreads, have rheological properties of non-Newtonian liquids, in which the effective dynamic viscosity depends on the velocity gradient  $\omega$  and hence on the rotor speed. The new method makes it possible to determine the permissible rotation speed of the lobe pump if the dependance of the effective dynamic viscosity on the velocity gradient is known. The article provides a set of examples for Vitalobe rotary pumps and two different cheese spreads at several temperature modes.

**Keywords:** processed cheese spread, inter-operational conveying, rotary lobe pump, capacity, permissible rotor speed, viscosity, temperature

### Список литературы

1. Павлова, Я. С. Технология производства плавленых сыров / Я. С. Павлова, В. В. Закиров // Молодежь и наука. 2022. № 5. 48. <https://elibrary.ru/naigww>
2. Перевалова, В. А. Разработка технологии производства плавленого сыра с добавлением растительного компонента / В. А. Перевалова, А. В. Степанов // Молодежь и наука. 2024. № 8. 23. <https://elibrary.ru/colrhv>
3. Li, Y. B. Numerical research on viscous oil flow characteristics inside the rotor cavity of rotary lobe pump / Li, Y. B. [et al.] // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2019. Vol. 41. 274. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1781-0>
4. Ахмедова, Н. Р. Влияние вязкости жидких пищевых продуктов на энергетическую эффективность кулачковых насосов / Н. Р. Ахмедова, О. И. Левичева, В. А. Наумов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. № 5-6(394). С. 88-93. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2023.5-6.14>; <https://elibrary.ru/mjjydc>
5. Ахмедова, Н. Р. Гидравлический расчет системы подачи плавленого сыра кулачковым насосом / Н. Р. Ахмедова, О. И. Левичева, В. А. Наумов // Вестник КрасГАУ. 2024. № 6(207). С. 146-156. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2024-6-146-156>; <https://elibrary.ru/wkcjbm>
6. Dimitreli, G. Effect of temperature and chemical composition on processed cheese apparent viscosity / G. Dimitreli, A. S. Thomareis // Journal of Food Engineering. 2004. Vol. 64. P. 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.10.008>
7. Kapoor, R. Comparison of pilot-scale and rapid visco analyzer process cheese manufacture / R. Kapoor, P. Lehtola, L. E. Metzger // Journal of Dairy Science. 2004. Vol. 87(9). P. 2813-2821/ [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(04\)73409-8](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(04)73409-8)
8. Левичева, О. И. Изменение вязкости плавленого сыра при лабораторном моделировании условий производственного процесса / О. И. Левичева // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т. 9, № 1. С. 18-26. <https://elibrary.ru/pcnzmw>
9. 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. <https://elibrary.ru/edhrin>