

Леса России и хозяйство в них. 2026. № 2 (97). С. 173–185.

Forests of Russia and economy in them. 2026. № 2 (97). P. 173–185.

Научная статья

УДК 674.81; 621.822

DOI: 10.51318/FRET.2026.97.2.018

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПЕЛЛЕТНОГО ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРА ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ РЕСУРСА ОПОР КАЧЕНИЯ ПРЕССУЮЩИХ РОЛИКОВ

Владислав Олегович Цубикс<sup>1</sup>, Анастасия Александровна Цубикс<sup>2</sup>,  
Сергей Николаевич Долматов<sup>3</sup>

<sup>1–3</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнева,  
Красноярск, Россия

<sup>1</sup> vladsubix@yandex.ru\_ <https://orcid.org/0009-0008-8912-8006>

<sup>2</sup> ansob\_1209@mail.ru\_ <https://orcid.org/0009-0008-7756-1793>

<sup>3</sup> pipinaskus@mail.ru\_ <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

**Аннотация.** В статье рассматриваются перспективы импортозамещения лесозаготовительной техники и оборудования, а также запасных частей к ним в условиях международных санкций на примере критического узла пеллетного пресс-гранулятора. Предметом исследования выступает долговечность опор качения (подшипников) прессующих роликов, а целью является повышение эффективности работы пеллетного пресс-гранулятора. В условиях, когда свыше 90 % поставок лесозаготовительной техники в России импортные, обеспечение надежности отечественных аналогов ключевых компонентов становится стратегической задачей. Методология работы включает стандартизированный расчет опор качения на долговечность, анализ параметров процесса гранулирования и прогнозирование срока службы через мониторинг нагрузки на главный двигатель. Результаты расчетов показали, что при учете только радиальных нагрузок ресурс подшипника составляет 2722,5 ч, что коррелирует с опытом эксплуатации оригинальных импортных узлов. Однако комплексный учет осевых нагрузок, характерных для реальной работы, приводит к значительному снижению расчетной долговечности – до 1377 ч, что объясняет быстрый выход из строя некоторых аналогов. На основе анализа сырьевых и производственных факторов обоснованы оптимальные режимы эксплуатации пресса. Практическая значимость работы заключается в предложенной методике прогнозного мониторинга остаточного ресурса подшипников в реальном времени через нагрузку на главный двигатель. Внедрение этого подхода позволит перейти к планово-предупредительному обслуживанию, сократив издержки на внеплановые ремонты и простои. Выводы исследования подчеркивают необходимость полного учета всех видов эксплуатационных нагрузок при проектировании, выборе и эксплуатации отечественных комплектующих для достижения требуемой надежности.

**Ключевые слова:** радиальная нагрузка, долговечность подшипника, древесные пеллеты, импортозамещение

**Для цитирования:** Цубикс В. О., Цубикс А. А., Долматов С. Н. Повышение эффективности работы пеллетного пресс-гранулятора за счет увеличения ресурса опор качения прессующих роликов // Леса России и хозяйство в них. 2026. № 2 (97). С. 173–185.

Original article

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PELLET PRESS GRANULATOR BY EXTENSION OF LIFETIME OF THE ROLLING BEARINGS OF THE PRESSING ROLLERS

Vladislav O. Tsubix<sup>1</sup>, Anastasia A. Tsubix<sup>2</sup>, Sergey N. Dolmatov<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian

<sup>1</sup> vladtsubix@yandex.ru\_ <https://orcid.org/0009-0008-8912-8006>

<sup>2</sup> ansob\_1209@mail.ru\_ <https://orcid.org/0009-0008-7756-1793>

<sup>3</sup> pipinaskus@mail.ru\_ <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

**Abstract.** The article discusses the prospects for import substitution of logging machinery and equipment, as well as spare parts for them in the context of international sanctions using the example of a critical node of a pellet press granulator. The subject of the research is the durability of the rolling bearings (bearings) of the pressing rollers, and the goal is to improve the efficiency of the pellet press granulator. In an environment where over 90 % of logging equipment in Russia is imported, ensuring the reliability of domestic analogues of key components is becoming a strategic task. The methodology of the work includes a standardized calculation of rolling bearings for durability, analysis of the parameters of the pelletizing process and forecasting the service life through monitoring the load on the main engine. The calculation results showed that, taking into account only radial loads, the bearing life is 2722,5 hours, which correlates with the operating experience of the original imported components. However, a comprehensive accounting of axial loads typical of real work leads to a significant decrease in the estimated durability – up to 1377 hours, which explains the rapid failure of some analogues. Based on the analysis of raw materials and production factors, optimal operating modes of the press are substantiated. The practical significance of the research lies in the proposed methodology for predictive monitoring of the remaining life of bearings in real time through the load on the main engine. The implementation of this approach will make it possible to switch to scheduled preventive maintenance, reducing the cost of unscheduled repairs and downtime. The conclusions of the research emphasize the need for full consideration of all types of operational loads in the design, selection and operation of domestic components to achieve the required reliability.

**Keywords:** radial load, bearing durability, wood pellets, import substitution

**For citation:** Tsubix V. O., Tsubix A. A., Dolmatov S. N. Improving the efficiency of the pellet press granulator by extension of lifetime of the rolling bearings of the pressing rollers // Forests of Russia and economy in them. 2026. № 2 (97). P. 173–185.

### Введение

Лесные ресурсы являются универсальным источником сырьевой базы для специализированных производств. В первую очередь лесозаготовительные предприятия осуществляют коммерческую деятельность, направленную на получение максимальной прибыли с заготовливаемого кубометра леса в условиях жесткой конкуренции. Объемная номенклатура готовой продукции позволяет гибко выстраивать стратегию работы про-

изводства. Готовой продукцией может быть как круглый лес, так и полуфабрикаты, подлежащие дальнейшей переработке. Ввиду локальной ограниченности сырьевой базы, связанной с логистикой, предприятия заинтересованы в комплексной переработке леса. Каждая отдельная операция приводит к образованию отходов, из этого следует поиск оптимальной технологии, направленной на их утилизацию с потенциалом получения высоколиквидной продукции. Актуальным решением

является производство биотоплива из измельченной древесины, получаемого путем экструзии (пеллеты, брикеты).

На основании данных FAO (2024) с 2012 по 2022 гг. мировой объем производства древесных пеллет увеличился на 100 % с 25 до 50 млн т. В Российской Федерации с 2012 по 2021 гг. наблюдалась положительная тенденция производства древесных пеллет, а именно увеличение объема на 380 % (рис. 1). При этом, как показано на рис. 2, 83,84 % объема готовой продукции выделялось на экспорт. Введение международных санкций против России заметно повлияло на внутренний и внешний бизнес страны. Лесная промышленность не стала исключением, показатели производимого объема и экспорта топливных пеллет начиная с 2021 и по 2023 гг. сократились на 46,3 и 62,6 % соответственно. Можно предположить, что показатели бизнеса откатились на 8,5 лет назад.

Россия, будучи заинтересованной в сохранении объемов производства, рабочих мест, вынуждена предпринимать меры по поиску доступных рынков сбыта готовой продукции. Например, в работе С. Н. Долматова и К. А. Гуляевой (2024) был проанализирован вариант развития экспорта в Южную

Корею и Японию. Проанализированный вариант является реализуемым, но при этом необходима разработка качественной стратегии, поскольку негативное влияние на сбыт может оказать прямая конкуренция с Вьетнамом и в перспективе с Китаем. Помимо стратегии, необходима конкурентоспособная производственная база, а именно постепенный переход от зарубежного оборудования к отечественному. Доля импортного лесозаготовительного оборудования и техники в производственной инфраструктуре ЛПК Российской Федерации на 2020 г. составляла более 90 %, в том числе при проведении хлыстовой заготовки – около 70, а при проведении сортиментной заготовки – более 98 % (Саханов, Зозуля, 2020). Растущий спрос на запасные части к технике и оборудованию зарубежных поставщиков, санкционное давление, а также стратегия развития комплексной программы промышленной независимости страны побудили к активному развитию в сфере машиностроения. Так, в 2022 г. на территории г. Вельска открылся «Устьянский машиностроительный завод», который специализируется на производстве и ремонте комплектующих лесозаготовительной техники и оборудования, произведенных в Канаде, Финляндии, Германии и т. д.

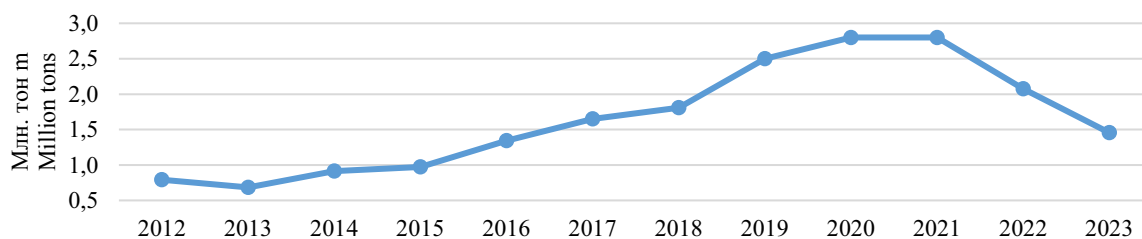


Рис. 1. Показатели объема производства пеллет с 2012 по 2023 гг.

Fig. 1. Pellet production volumes from 2012 to 2023

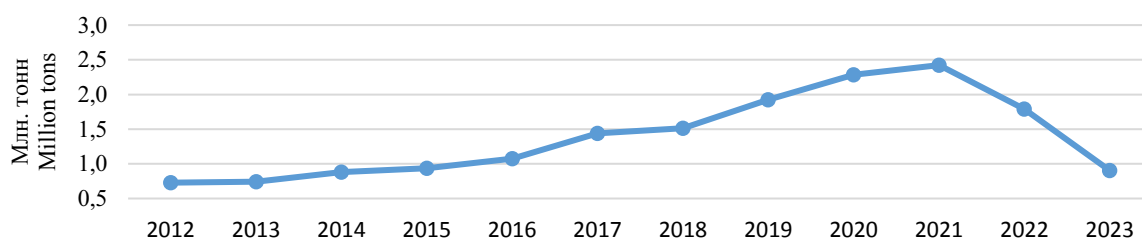


Рис. 2. Показатели объема экспорта пеллет с 2012 по 2023 гг.

Fig. 2. Pellet export volumes from 2012 to 2023

Помимо ремонта, предприятие работает в сфере конструирования собственных технологических и агрегатно-узловых решений. Продукция завода может быть востребована не только на внутреннем рынке, но и в странах ЕАЭС и СНГ.

Зависимость от технологического оборудования зарубежного производства является общей проблемой для предприятий всего лесопромышленного сектора. Одним из примеров является деревообрабатывающая компания ДоК «Енисей» (г. Красноярск), которая занимается комплексной переработкой древесины, заканчивая технологический процесс производством топливных гранул (пеллет).

ДоК «Енисей» является одним из ведущих производителей Красноярского края (Медведев и др., 2023). Ежегодные объемы производства и отгрузки пеллет достигают более 100 тыс. т. Одной из основных единиц промышленного парка предприятия, предназначенного для выработки древесного биотоплива, является кольцевой гранулятор РМ30, произведенный международным машиностроительным концерном ANDRITZ, который с 2022 г. временно прекратил деятельность на территории РФ.

Логично, что для поддержания бесперебойной работы импортного оборудования необходимы поставки оригинальных или аналоговых запчастей, что в настоящее время стало проблемой. Ряд узлов и агрегатов требует постоянного обслуживания и смены быстро изнашиваемых компонентов. Одним из основных технологических узлов кольцевого гранулятора, требующего постоянного обслуживания, являются прессующие ролики (рис. 3).

Прессующий ролик необходим для создания давления прессования и продавливания опилок через фильтры кольцевой матрицы пресс-гранулятора. Пристального внимания требуют опоры ролика, а именно подшипники, которые установлены в прессующий ролик. Проблема заключается в том, что при использовании оригинальных шведских подшипников SKF, рекомендованных поставщиком оборудования, фактический срок их службы составлял не менее 3000 ч рабочего времени. При ограничении поставок подшипников из-за введенных санкций предприятие вынуждено искать альтернативы оригинальным подшипникам, которые стали недоступны. Одним из вариантов, применяемых на данный момент, являются немецкие подшипники FAG, производимые в Китае. При использовании аналоговых подшипников ресурс работы прессующих роликов снизился на 50 %. С учетом меньшего эксплуатационного ресурса аналогового подшипника прессующие ролики требуют более частой замены опор качения. Этот процесс сопровождается остановкой пресса, его охлаждением, демонтажом роликов и их разборкой. Только дополнительная финансовая нагрузка относительно технического обслуживания роликов на предприятии возрастает на 76,47 %. Это если не учитывать времени простоя оборудования и того объема пеллет, который мог бы быть получен за это время. Остановка пресса даже на три часа не позволяет получить около 10 т готовой продукции. С учетом этих потерь издержки будут еще больше. Необходимость снижения времени вынужденных простоев, связанных с ремонтом прессующих роликов пресса, является



Рис. 3 Кольцевая матрица и прессующий ролик  
Fig. 3 Ring matrix and pressing roller

убедительным фактом актуальности исследований в области анализа режимов работы как самого пресс-гранулятора, так и прессующих роликов в частности и подбора наиболее подходящих комплектующих. Исходя из вышесказанного, сформулируем цель и задачи исследования.

### Цель, задачи, методика и объекты исследования

Целью исследования является повышение эффективности работы пеллетного пресс-гранулятора.

Задачи исследования следующие.

1. Расчет долговечности опор качения ролика в условиях минимального и максимального воздействия нагрузки.

2. Анализ сырьевых и производственных факторов, оказывающих прямое влияние на ресурс работы опор качения прессующих роликов.

3. Обоснование режимов работы пресса, обеспечивающих минимизацию износа и продление ресурса подшипников прессующего ролика.

Методика исследования предусматривает стандартизированный расчет опор качения на долговечность, анализ параметров процесса гранулирования, прогнозирование срока службы опор качения прессующего ролика через мониторинг нагрузки на главный двигатель.

Объект исследования – опоры качения прессующих роликов пеллетного гранулятора.

Предмет исследования – долговечность работы опор качения, испытываемые нагрузки.

### Результаты и их обсуждение

В соответствии с данными технологической документации, а также по результатам разборки узла в прессующих роликах гранулятора РМ30 используются радиально-упорные двухрядные роликовые подшипники, маркируемые 23230СС/С3. Согласно рис. 4 в грануляторе на подшипник одновременно действуют радиальные нагрузки (от давления сырья) и осевые нагрузки (от перекосов, неравномерной подачи и движения ролика вдоль кольцевой матрицы).

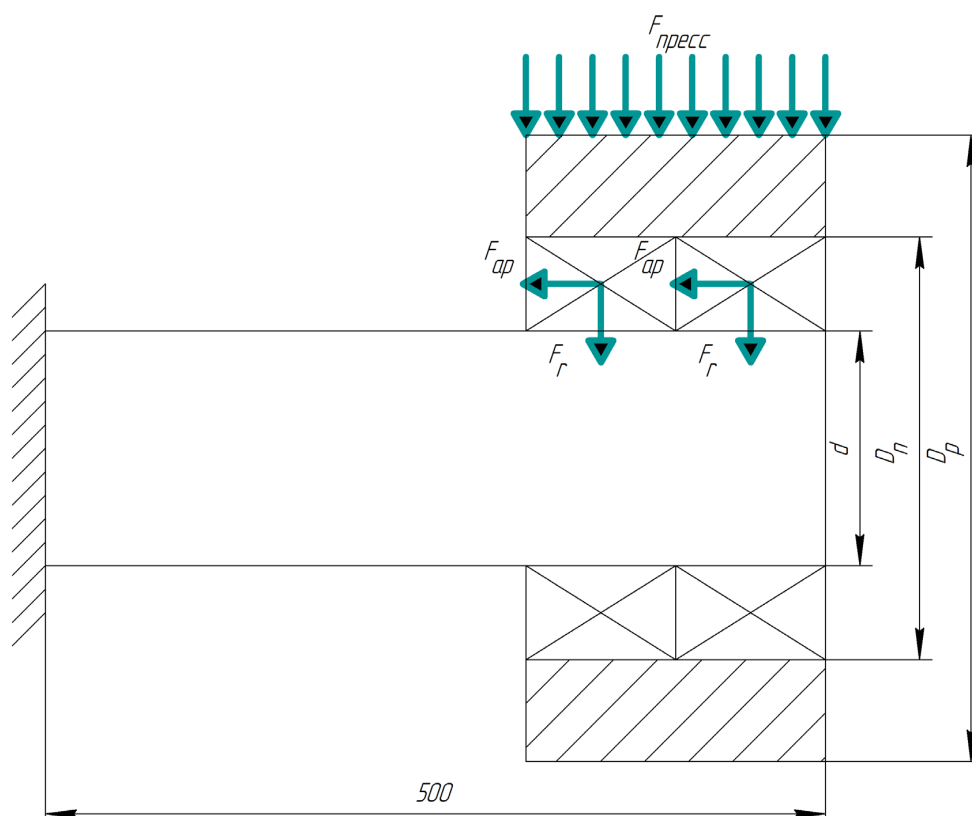


Рис. 4. Нагрузки, воспринимаемые подшипниками  
Fig. 4. Loads perceived by bearings

Радиально-упорный подшипник может одновременно воспринимать радиальные и осевые нагрузки, причем осевые – в одном направлении. Два ряда роликов позволяют увеличить допустимую нагрузку почти в два раза по сравнению с однорядным вариантом. Роликовые тела качения обеспечивают большую площадь контакта с дорожками качения. Это значит, что подшипник выдерживает значительные нагрузки без разрушения, что критично при прессовании твердых древесных гранул под расчетным давлением. Двухрядные роликовые подшипники обладают высокой осевой и радиальной жесткостью. Это помогает роликам поддерживать стабильную рабочую позицию при высоких нагрузках без паразитических смещений, снижая износ матрицы и ролика. По сравнению с вариантом отдельный радиальный + отдельный упорный подшипник двухрядный радиально-упорный роликовый подшипник занимает меньше места в корпусе ролика. Это позволяет уменьшить габариты и вес прессующего узла, улучшая динамику машины.

Несмотря на последовательное расположение подшипников, их нагруженность отличается из-за влияния изгибающего момента, возникающего от консольного расположения участка оси ролика и приложения внешней силы. Подшипник, расположенный ближе к жесткой заделке, воспринимает большую часть радиальной нагрузки. Это связано с необходимостью компенсировать не только вертикальную составляющую силы, но и момент, создаваемый нагрузкой, приложенной на удаленном консольном участке оси. Даже при малом межосевом расстоянии между подшипниками влияние момента приводит к неравномерному распределению усилий. При неисправности одного подшипника из строя выходит весь рабочий узел (прессующий ролик).

Деревообрабатывающей компанией «Енисей» были представлены численные данные, описывающие режимы работы пресс-гранулятора, позволяющие осуществить стандартизированный расчет долговечности конкретного подшипника (ГОСТ 18855–94). Исходные данные и результаты расчетов были отражены в сводной таблице.

Исходные данные и результат расчетов  
The initial data and the result of calculations

Обозначения Designations	Определения Definitions	Значения Values
$L_{10}$	Номинальная долговечность или долговечность по каталогу (прогнозируемая долговечность соответствует 90 % надежности), ч/обороты Nominal or catalog life (predicted life corresponds to 90 % reliability), hours	–
$P_r$	Эквивалентная динамическая радиальная нагрузка, кН Equivalent dynamic radial load, kN	$F_r$
$C_1$	Базовая динамическая номинальная радиальная грузоподъемность, соответствующая долговечности, равной 1 млн оборотов, кН Basic dynamic rated radial load rating corresponding to a lifespan of $L_{10}$ equal to 1 million revolutions, kN	1129
$F_r$	Радиальная нагрузка на подшипник или радиальная составляющая фактической нагрузки, действующей на подшипник, кН Radial load on a bearing or the radial component of the actual load acting on the bearing, kN	361,73
$F_{ap}$	Осевая нагрузка на подшипник или осевая составляющая фактической нагрузки, действующей на подшипник. Предельно допустимая осевая нагрузка, кН Axial load on a bearing or axial component of the actual load acting on a bearing. Maximum permissible axial load, kN	43,2
$F_{\text{прес}}$	Давление прессования, Н/см <sup>2</sup> Pressing pressure, N/cm <sup>2</sup>	800
$X$	Коэффициент динамической радиальной нагрузки Dynamic radial load coefficient	$e$

Окончание таблицы  
The end of the table

Обозначения Designations	Определения Definitions	Значения Values
$Y$	Коэффициент динамической осевой нагрузки Dynamic axial load coefficient	$e$
$e$	Коэффициент влияния осевой нагрузки = 0,35 (необходим для выбора коэффициента $Y$ и $X$ , если отношение: $\frac{F_a}{F_r} > e$ , то $X = 0,67$ ; $Y = 2,9$ , $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ , то $X = 1$ ; $Y = 1,9$ Axial load influence coefficient = 0,35 (necessary for selecting the $Y$ and $X$ coefficient if the ratio is: $\frac{F_a}{F_r} > e$ , hence $X = 0,67$ ; $Y = 2,9$ , $\frac{F_a}{F_r} \leq e$ , hence $X = 1$ ; $Y = 1,9$	–
$D_{\text{п}}$	Диаметр внешнего кольца подшипника, мм Bearing outer ring diameter, mm	270
$d$	Диаметр внутреннего кольца подшипника, мм Bearing inner ring diameter, mm	150
$B$	Ширина подшипника, мм Bearing width, mm	96
$D_p$	Диаметр прессующего ролика, мм Diameter of the pressing roller, mm	400
$V_m$	Линейная скорость вращения матрицы (из мануала гранулятора РМ30), м/с Linear speed of rotation of the matrix (from the RM30 granulator manual), m/s	5,7
$n_p$	Частота вращения прессующего ролика, об/мин Rotational speed of the pressing roller, turn/min	272
$S_{\text{п}}$	Площадь поверхности внутреннего кольца подшипника, мм <sup>2</sup> Surface area of the inner ring of the bearing, mm <sup>2</sup>	45216

Для определения номинальной долговечности подшипника необходимо найти число оборотов прессующих роликов по формуле

$$n_p = \frac{V_m}{\pi D_p}$$

$$n_p = \frac{5,7}{3,14 \times 0,4} = \frac{5,7}{1,256} = 4,54 \text{ об/с}, \quad (1)$$

$$n_p = 4,54 \times 60 = 272 \text{ об/мин.}$$

Далее необходимо определить величину сил, действующих на подшипник. По данным ГОСТ 18855–94 предельно допустимую осевую нагрузку можно рассчитать по формуле

$$F_{ap} = 0,003 B d, \quad (2)$$

$$F_{ap} = 0,003 \times 96 \times 150 = 43,2 \text{ кН.}$$

Для нахождения радиальной нагрузки на подшипник необходимо найти площадь поверхности внутреннего кольца подшипника:

$$S_n = \pi D B, \quad (3)$$

$$S_n = 3,14 \times 150 \times 96 = 45216 \text{ мм}^2,$$

$$S_n = \frac{45216}{100} = 452,16 \text{ см}^2,$$

$$F_r = 800 \times 452,16 = 361728 \text{ Н} = 361,73 \text{ кН.}$$

Проверим соотношение

$$\frac{F_{ap}}{F_r} = \frac{43,2}{361,73} = 0,12. \quad (4)$$

Поскольку соотношение  $\frac{F_{ap}}{F_r} \leq e$ , то применяется формула при условии, что воздействует только радиальная нагрузка:

$$P_r = F_r, \quad (5)$$

$$P_r = 361,73 \text{ кН.}$$

Далее определяем номинальную долговечность подшипника:

$$L_{10} = \left( \frac{C_1}{P_r} \right)^{\frac{10}{3}} (1 \times 10^6), \quad (6)$$

$$L_{10} = \left( \frac{1129}{361,73} \right)^{\frac{10}{3}} (1 \times 10^6) = 44000000 \text{ об.}$$

$$L_{10} = \left( \frac{C_1}{P_r} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{1 \times 10^6}{60n_p} \right), \quad (7)$$

$$L_{10} = \left( \frac{1129}{361,73} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{1 \times 10^6}{60 \times 272} \right) = 2722,5 \text{ ч.}$$

При воздействии радиальной и осевой нагрузки применяется формула с коэффициентами  $X = 1$ ;  $Y = 1,9$ , полученными из условия

$$P_r = 1 \times 361,73 + 1,9 \times 43,2 = 443,81 \text{ кН,}$$

$$L_{10} = \left( \frac{1129}{443,81} \right)^{\frac{10}{3}} (1 \times 10^6) = 22400000 \text{ об,}$$

$$L_{10} = \left( \frac{1129}{361,73} \right)^{\frac{10}{3}} \left( \frac{1 \times 10^6}{60 \times 272} \right) = 1377 \text{ ч.}$$

Помимо параметров, принимаемых в стандартизованном расчете подшипника, необходимо учитывать ряд параметров и факторов, оказывающих влияние на процесс работы гранулятора, а именно:

1) скорость вращения кольцевой матрицы. При увеличении скорости вращения матрицы увеличивается тепловая нагрузка, что влечет за собой дополнительный износ подшипников;

2) технологический зазор между роликом и матрицей. Оптимальный зазор составляет 0,05–0,3 мм. Слишком маленький зазор способствует увеличению трения и тепловой нагрузки. А увеличенный зазор снижает качество гранул и может привести к неравномерному распределению нагрузки;

3) влажность сырья. Если сырье слишком сухое, оно хуже прессуется, требует большего давления на матрицу. Если сырье слишком влажное, оно становится вязким, плохо проходит через матрицу, вызывает пробуксовку роликов и неравномерные нагрузки на подшипники. Необходимо дополнительно отслеживать параметры влажности сырья и обеспечивать равномерные показатели. Показатель влажности прессуемого сырья на Док «Енисей» равен 9 %;

4) размер частиц (фракция). Крупная или неоднородная фракция (щепа, грубая стружка) может создавать удары и вибрации в прессующем узле,

что приводит к ускоренному разрушению подшипников. Для стабильной работы желательна однородная мелкая фракция 1–3 мм. Использование молотковых дробилок и различных измельчителей способствует получению необходимой фракции. Уменьшение размеров сырья до отметки меньше 1 мм способствует снижению скорости технологической линии, что может значительно повлиять на ценообразование готовой продукции;

5) содержание абразивных примесей. Минеральные включения (песок, глина) в сырье действуют как абразив, вызывая износ не только матрицы и роликов, но и попадание мелких частиц в подшипники. Установка магнитных сепараторов и вибросит для очистки сырья перед гранулированием способствует минимизации нежелательных примесей;

6) смолистость древесины. Высокое содержание смол (например, у сосны) может привести к налипанию материала на ролики, увеличению сопротивления вращению и перегреву подшипников. Применение антипригарных добавок в сырье или периодическая очистка матрицы и роликов поможет уменьшить влияние этого фактора;

7) температура сырья. Слишком холодное сырье зимой прессуется хуже, увеличивает пиковые нагрузки на оборудование. Необходимо подогреть сырье до 20–40 °С перед подачей в гранулятор в холодное время года (например, через тепловые камеры);

8) форма поверхности прессующего ролика может быть разнообразна. Для наилучшего сцепления с сырьем могут поменяться различные варианты «рисунка», что также влияет на силы, воспринимаемые подшипником;

9) содержание лигнина напрямую влияет на производительность гранулятора и нагрузки, испытываемые прессующими роликами (Сергеев, 2020).

Сложное взаимодействие между многочисленными физическими процессами, происходящими одновременно в пресс-грануляторе, усложняет интерпретацию влияния каждого параметра на процесс гранулирования, необходима разработка методики, позволяющая эффективно оценивать различные режимы работы гранулятора (ГОСТ 5721–2022).

При работе пресс-гранулятора важно соблюдать необходимые условия для оптимальной и бесперебойной работы оборудования. Процесс формирования гранулы можно описать следующим образом: предварительно измельченная древесина подается в камеру прессования с плоской или кольцевой матрицей, под давлением сырье проходит через фильеры матрицы, тем самым формируя необходимые физико-геометрические характеристики продукта. Более наглядно процесс гранулирования описан в работе С. Н. Долматова и соавторов (Increasing the efficiency..., 2025), где рассматривается технология гранулирования измельченной древесины с точки зрения компьютерного имитационного моделирования. Существующее оборудование отличается друг от друга мощностными характеристиками и, соответственно, производительностью. В кольцевом пресс-грануляторе РМ30 используется электродвигатель мощностью 250 кВт. По характеристике нагружения главного привода можно отслеживать нагрузки, испытываемые главными опорами качения прессующих роликов. Важно контролировать нагрузку на главный электродвигатель в процессе работы. Оптимальная влажность сырья должна находиться в пределах 10–12 %. При повышенной влажности, например 15 %, внутри сформированных пеллет может образоваться излишнее давление пара, которое будет стремиться разрушить гранулу на выходе из матрицы (Брагинцев и др., 2023). Пониженная влажность измельченной древесины менее

8 % также окажет негативный эффект. Пересушка сырья в каналах матрицы приводит к образованию хрупких гранул, которые не будут соответствовать качеству готового продукта. Гранулирование пеллет с повышенной или пониженной влажностью исходного сырья способствует формированию дополнительных нагрузок на электродвигатель, которые могут привести к его аварийной остановке. При смене исходного состава сырья необходимы пусконаладочные работы для подбора оптимального режима работы, которые сопровождаются динамичными нагрузками на главные опоры качения. Например, А. Н. Попов и соавторы (Тензометрические исследования..., 2015) провели экспериментальную отладку режимов работы оборудования, а именно пресс-гранулятора с плоской матрицей. Были получены данные по мощности двигателя во время работы пресса в течение 43 мин (рис. 5). Среднее значение мощности находится в диапазоне 50 %. Рост нагрузки от 0 до 83 % демонстрирует притирку сырья и нагрев матрицы и неравномерное распределение нагрузки по ее поверхности.

Также были получены данные, отражающие отношение времени к процентной нагрузке двигателя пресс-гранулятора (рис. 6, 7). Характер графиков идентичный. Фиксация данных позволяет отслеживать нагрузки, которые испытывают прессующие ролики во время работы, с частотой фиксации данных в 1 с. Минимальное полученное значение равно 49 %, а максимальное – 90 %.

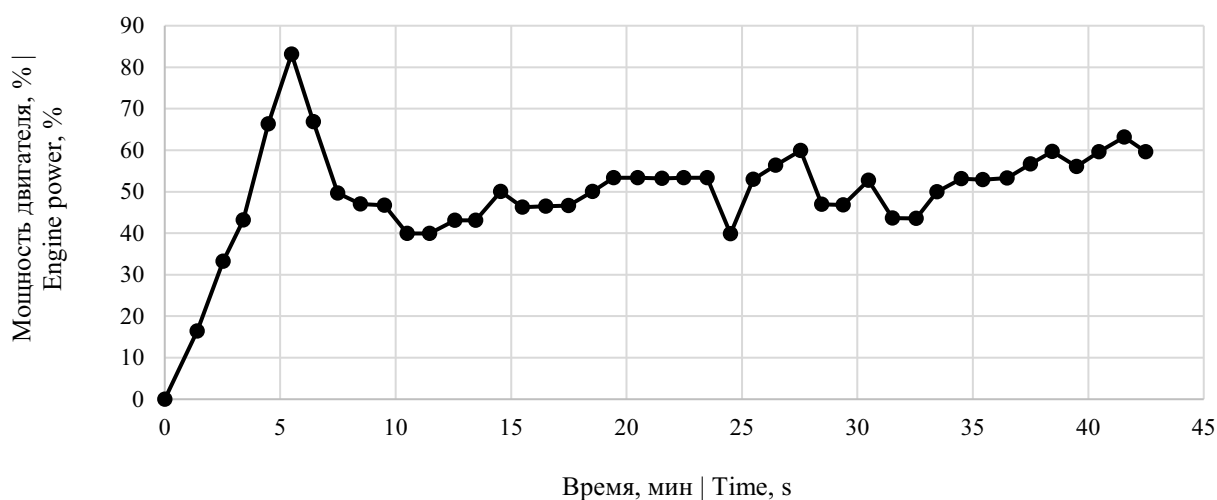


Рис. 5. Изменения нагрузки главного приводного двигателя, %, в течение времени смены, с  
Fig. 5. Changes in the load of the main drive engine, %, during the shift time, sec

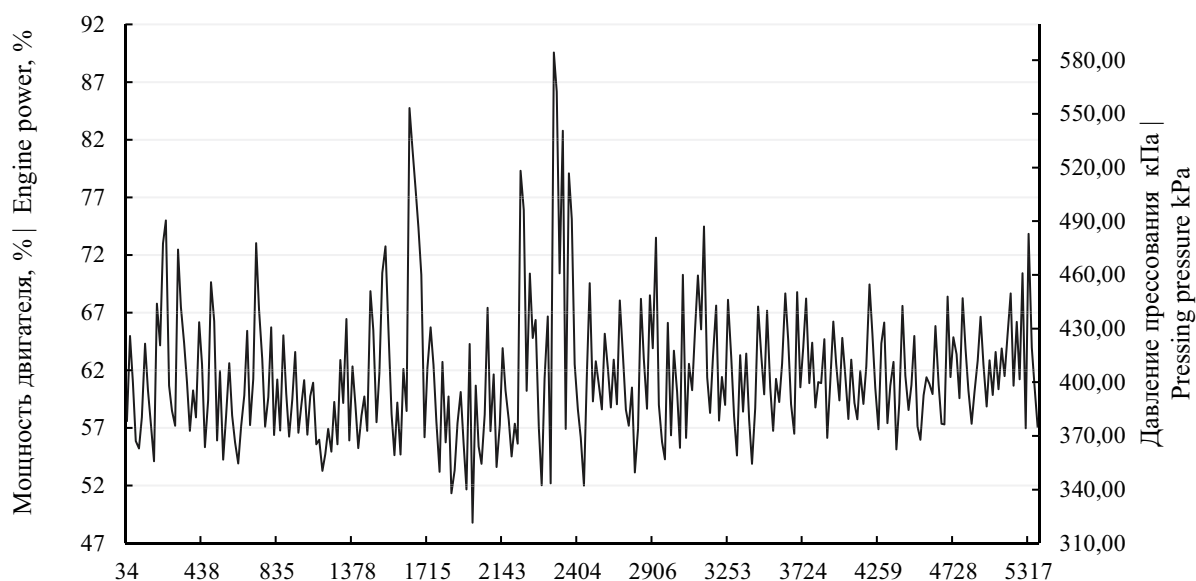


Рис. 6. Изменения нагрузки главного приводного двигателя, %, и давления прессования, кПа, в течение времени, с  
 Fig. 6. Changes in the load of the main drive engine, %, and pressing pressure, kPa, over time, sec

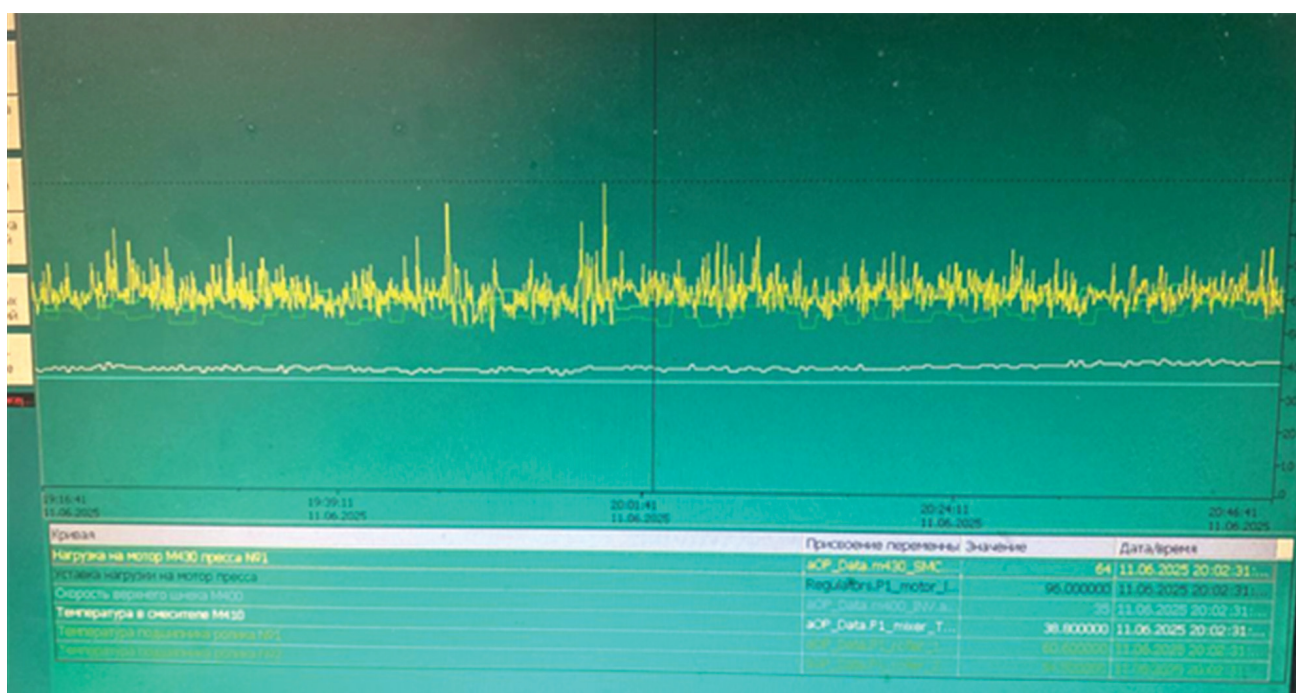


Рис. 7. Данные изменения нагрузки главного приводного двигателя, полученные с производственной линии гранулирования ДоК «Енисей»  
 Fig. 7. Data on changes in the load on the main drive engine obtained from the production line of the DoK Enisey granulation plant

Разница составляет 41 %, что говорит о нестабильности прессуемой фракции и процессов, происходящих во время работы. Причем пиковые нагрузки отчетливо прослеживаются на графике, они имеют локальный характер. Нагрузки, стремящиеся

с 100 %, могут быть вызваны различными причинами, которые возможно спрогнозировать заранее путем модернизации технологической цепочки.

Для прогнозирования срока службы опор качения прессующего ролика через мониторинг

нагрузки на главный двигатель используем следующую методику.

Для начала необходимо определить фактическую мощность главного двигателя за единицу времени по формуле

$$F_{\phi} = \frac{EF_n}{100}, \quad (9)$$

где  $E$  – нагрузка, %;

$F_n$  – номинальная мощность двигателя, кВт.

Далее необходимо определить момент на приводе  $G$ :

$$G = \frac{9550F_{\phi}}{n_p}, \quad (10)$$

где 9550 – коэффициент пересчета при выражении мощности в кВт и частоты вращения;

$n_p$  – частота вращения прессующего ролика, об/мин.

Также необходимо определить дугу контакта ролика и сырья, поскольку матрица имеет цилиндрическую форму, то допустимо принять 1/6 длину окружности цилиндра  $H_{\text{дуга}}$ .

$$H_{\text{дуга}} = \frac{\pi D_p}{6}, \quad (11)$$

где  $D_p$  – диаметр прессующего ролика, мм.

Для нахождения давления прессования в определенный момент времени воспользуемся формулой

$$J = \frac{G}{r_m H_{\text{дуга}} B_p K_{\text{тр}} \times 1000}, \quad (12)$$

где  $r_m$  – радиус матрицы, м;

$B_p$  – ширина ролика, м;

$K_{\text{тр}}$  – коэффициент трения,  $K_{\text{тр}} = 0,8$ .

Расчетные данные для каждой секунды работы пресс-гранулятора представлены на рис. 6 в правой части графика. При интеграции представленного метода в систему мониторинга производственной линии можно спрогнозировать ресурс работы подшипников во время работы оборудования, что впоследствии позволит сократить издержки на незапланированные технические работы по замене подшипников.

## Выводы

1. В рамках проведенного исследования был осуществлен расчет долговечности радиально-упорного двухрядного роликового подшипника, используемого в прессующем ролике кольцевого гранулятора РМ30.

2. Анализ показал, что при воздействии исключительно радиальных нагрузок расчетная долговечность подшипника составляет 2722,5 ч, что соответствует практическому опыту эксплуатации оригинальных комплектующих. Однако учет осевых нагрузок приводит к существенному снижению расчетной долговечности до 1377 ч, что подтверждается наблюдаемым сокращением срока службы при использовании аналоговых подшипников.

3. Полученные результаты подчеркивают важность комплексного учета всех эксплуатационных факторов при выборе и эксплуатации подшипников в прессующих узлах. Особое внимание следует уделить правильной регулировке зазора между роликом и матрицей, обеспечению оптимальных влажности и фракционного состава сырья, а также предотвращению попадания абразивных примесей в технологическую зону.

4. В условиях актуальной задачи импортозамещения выявлена необходимость в разработке отечественных или локализованных аналогов подшипников, обладающих высоким уровнем надежности и устойчивости к сложным эксплуатационным условиям.

5. Для дальнейшего повышения надежности оборудования рекомендуется провести дополнительные исследования по оптимизации режимов работы гранулятора, совершенствованию систем смазки и охлаждения подшипникового узла, а также внедрению автоматизированных систем мониторинга состояния. Развитие данных направлений позволит повысить эффективность лесопромышленных предприятий, сократить затраты на техническое обслуживание оборудования и обеспечить устойчивую конкурентоспособность отечественной продукции на внутреннем и внешнем рынках.

**Список источников**

- Брагинец С. В., Бахчевников О. Н., Деев К. А.* Влияние различных параметров на процесс гранулирования растительного сырья и качество гранул (обзор) // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023. № 24 (1). С. 30–45. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45
- ГОСТ 18855–94. Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность). Дата введения 1997-01-01. М. : Стандартинформ, 2005. 26 с.
- ГОСТ 5721–2022. Подшипники качения. Подшипники роликовые сферические двухрядные с асимметричными роликами. Общие технические требования. Дата введения 2023-04-01. М. : Стандартинформ, 2022. 26 с.
- Долматов С. Н., Гуляева К. А.* Перспективы экспорта древесных пеллет из России в Японию и Южную Корею в условиях международных санкций // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. № 9. С. 447–453. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-447-448
- Медведев С. О., Саханов В. В., Фитчин А. А.* Эффективность предприятий лесной промышленности Красноярского края // *Креативная экономика*. 2023. Т. 17, № 1. С. 183–204. DOI: 10.18334/ce.17.1.116922
- Саханов В. В., Зозуля И. В.* Инновационное развитие как основа повышения производительности труда в лесопромышленном комплексе // *Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество*. 2020. № 3-1. С. 541–544.
- Сергеев А. Г.* Результаты исследований рабочего процесса гранулятора ООО «Доза-агро» в составе линий производства топливных пеллет // *Лесотехнический журнал*. 2020. Т. 10, № 1 (37). С. 116–123. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/12
- Тензометрические исследования процесса прессования древесных гранул на грануляторе с плоской матрицей / *А. Н. Попов, В. К. Любов, О. Д. Мюллер, Е. И. Попова* // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2015. № 8 (69). С. 14–18.
- FAO. 2024. Statistical Yearbook 2024. Rome // *World Food and Agriculture* : [website]. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd2971en> (дата обращения: 02.12.2025).
- Increasing the efficiency of the granulation process of crushed wood based on CAE simulation technologies / *V. Tsubiks, S. Dolmatov, V. Malikov* [et al.] // *E3S Web of Conferences*. 2025. Vol. 627. URL: [https://www.researchgate.net/publication/391828198\\_Increasing\\_the\\_efficiency\\_of\\_the\\_granulation\\_process\\_of\\_crushed\\_wood\\_based\\_on\\_CAE\\_simulation\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/391828198_Increasing_the_efficiency_of_the_granulation_process_of_crushed_wood_based_on_CAE_simulation_technologies) (accessed 02.12.2025). DOI: 10.1051/e3sconf/202562705020

**References**

- Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Deev K. A.* Influence of Various Parameters on the Granulation Process of Plant Raw Materials and Granule Quality (Review) // *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2023. № 24 (1). P. 30–45. DOI:10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45 (In Russ.)
- Dolmatov S. N., Gulyaeva K. A.* Prospects for the Export of Wood Pellets from Russia to Japan and South Korea under International Sanctions // *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024. № 9. P. 447–453. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-9-447-448 (In Russ.)
- FAO. 2024. Statistical Yearbook 2024. Rome // *World Food and Agriculture* : [website]. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd2971en> (accessed 02.12.2025).
- GOST 18855–94. Rolling Bearings. Dynamic Calculated Load Capacity and Calculated Service Life (Durability). Effective date : 01.01.1997. Moscow : Standartinform, 2005. 26 p.
- GOST 5721–2022. Rolling bearings. Doublerow spherical roller bearings with asymmetric rollers. General technical requirements. Effective date : 01.04.2023. Moscow : Standartinform, 2022. 26 p.

- Increasing the efficiency of the granulation process of crushed wood based on CAE simulation technologies / *V. Tsubiks, S. Dolmatov, V. Malikov* [et al.] // E3S Web of Conferences. 2025. Vol. 627. URL: [https://www.researchgate.net/publication/391828198\\_Increasing\\_the\\_efficiency\\_of\\_the\\_granulation\\_process\\_of\\_crushed\\_wood\\_based\\_on\\_CAE\\_simulation\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/391828198_Increasing_the_efficiency_of_the_granulation_process_of_crushed_wood_based_on_CAE_simulation_technologies) (accessed 02.12.2025). DOI: 10.1051/e3sconf/202562705020
- Medvedev S. O., Sakhanov V. V., Fitchin A. A.* Efficiency of forestry enterprises in Krasnoyarsk Krai // Creative Economy. 2023. Vol. 17, № 1. P. 183–204. DOI: 10.18334/ce.17.1.116922 (In Russ.)
- Sakhanov V. V., Zozulya I. V.* Innovative Development as a Basis for Improving Labor Productivity in the Forestry Complex // Greater Eurasia : Development, Security, Cooperation. 2020. № 3-1. P. 541–544. (In Russ.)
- Sergeev A. G.* Results of a Study of the Operating Process of the Doza-Agro LLC Granulator in Fuel Pellet Production Lines // Forestry Engineering Magazine. 2020. Vol. 10, № 1 (37). P. 116–123. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/12 (In Russ.)
- Strain measurement studies of the wood pellet pressing process on a flat die granulator / *A. N. Popov, V. K. Lyubov, O. D. Müller, E. I. Popova* // Bulletin of Cherepovets State University. 2015. № 8 (69). P. 14–18. (In Russ.)

#### ***Информация об авторах***

- В. О. Цубикс – аспирант;*  
*А. А. Цубикс – магистрант;*  
*С. Н. Долматов – кандидат технических наук, доцент.*

#### ***Information about the authors***

- V. O. Tsubix – postgraduate student;*  
*A. A. Tsubix – master's student;*  
*S. N. Dolmatov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.*

*Статья поступила в редакцию 10.12.2025; принята к публикации 25.01.2026.*

*The article was submitted 10.12.2025; accepted for publication 26.01.2026.*

---

---