

МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ В ТОПЛИВНЫЕ ГРАНУЛЫ

Стородубцева Т.Н., Яцыута Р.Д.

Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф.

Морозова, Воронеж

Ключевые слова: пресс-гранулятор, топливные гранулы, пеллеты, износ, матрица, энергоэффективность, модернизация.

Аннотация. В работе рассмотрена проблема повышения эффективности оборудования для глубокой переработки древесины в топливные гранулы. Выполнен анализ технологического процесса производства пеллет, выявлены требования к его основным этапам. Проведён обзор конструкций пресс-грануляторов по данным открытых источников. Показано, что доминируют роликовые грануляторы с кольцевой матрицей. Выявлены основные эксплуатационные проблемы: абразивный износ рабочих органов, высокая энергоёмкость и сложность обслуживания. Также мы рассмотрели инженерные решения, направленные на повышение надёжности и энергоэффективности оборудования. Нами был сделан вывод, что приоритетными являются следующие направления модернизации: оптимизация геометрии рабочих органов, внедрение систем быстрой смены матриц и совершенствование кинематики.

MACHINES AND EQUIPMENT FOR DEEP PROCESSING OF WOOD INTO FUEL PELLETS

Storodubtseva T.N., Yatsyuta R.D.

Voronezh State University of Forestry and Technologies n.a. G.F. Morozov, Voronezh

Keywords: press granulator, fuel pellets, pellets, wear, matrix, energy efficiency, modernization.

Abstract. The paper considers the problem of improving the efficiency of equipment for deep processing of wood into fuel pellets. The technological process of pellet production is analyzed, and the requirements for its main stages are identified. A review of press granulator designs is carried out based on open-source data. It is shown that roller granulators with a ring matrix dominate. The main operational problems are identified: abrasive wear of working parts, high energy consumption and maintenance complexity. We also considered engineering solutions aimed at improving the reliability and energy efficiency of the equipment. We concluded that the following modernization directions are a priority: optimization of the geometry of working parts, introduction of quick die change systems and improvement of kinematics.

Введение

В последние годы про возобновляемую энергетику говорят всё чаще. Растёт и интерес к отходам лесопромышленного комплекса. Их накапливаются миллионы тонн. Один из способов утилизации – производство топливных гранул, или пеллет. Это биотопливо удобно хранить и перевозить. По теплотворной способности оно не уступает традиционным видам топлива.

Но экономика пеллетного производства – это, прежде всего, оборудование. Главное звено здесь – пресс-гранулятор. От его конструкции зависят энергоёмкость процесса, свойства готового продукта и долговечность узлов линии. Мы изучили научные публикации и патенты [1]. Оказалось, что у современных

грануляторов хватает проблем: сложные в изготовлении, металлоёмкие, а рабочие органы быстро изнашиваются.

Цель работы – исследовать оборудование для переработки древесины в топливные гранулы и найти пути модернизации.

Сначала мы изучили этапы производства пеллет. Затем провели обзор гранулирующего оборудования. Отдельно остановились на эксплуатационных проблемах. В конце предложили направления совершенствования.

Объект исследования – процесс производства топливных гранул. Предмет – технические средства, которые его обеспечивают. В работе мы опирались на анализ литературы и патентов, а также сравнивали технические параметры разных конструкций грануляторов.

Технологическая цепочка производства топливных гранул

Мы рассмотрели, как устроено производство пеллет на современных предприятиях. Это не одна операция, а целая цепочка из пяти последовательных этапов. И если на каком-то из них допустить ошибку, пострадает либо качество гранул, либо себестоимость.

Начинается всё с подготовки сырья. Опилки, щепу и кору нужно очистить от посторонних включений – камней, металлических фрагментов, песка. Крупные куски при этом измельчают до фракции 25×25×2 мм. Если этот этап пропустить или сделать небрежно, оборудование на следующих стадиях будет работать с перегрузкой [2].

Дальше идёт сушка. Сырьё поступает с влажностью до 50%, а для качественного прессования нужно 8-12%. Сушат обычно в барабанных или ленточных установках при температуре 500-600°C. Однако сушка твердых пород древесины имеет свои особенности. Так как в них крайне мало природного клея – лигнина, такое сырьё нуждается в дополнительной операции пропаривания. Исследования показывают, что для лиственных пород предварительная обработка паром является обязательным этапом, иначе гранулы получаются недостаточно прочными [2]. Значит, для дуба и бука в линии нужен парогенератор.

После сушки следует тонкое измельчение. Обработанная масса подвергается дроблению до мелких частиц (около 1,5 мм). На этом этапе крайне важна однородность фракции. В противном случае работа гранулятора будет нестабильной, а гранулы получатся разной плотности. Тут, по сути, и формируется качество будущих гранул.

Самым значимым этапом всего процесса является гранулирование. Под высоким давлением сырьё продавливается через матрицу. Вследствие трения и давления происходит размягчение лигнина, а после – скрепление частиц. В результате гранулы получаются прочные, с гладкой поверхностью [1]. Здесь же формируются свойства гранул. И здесь же быстрее всего изнашиваются рабочие органы.

И последнее – гранулы нужно охладить и отсортировать. Гранулы выходят из матрицы с температурой около 90 °C. Если их не охладить, при контакте с воздухом на поверхности появятся микротрещины. Поэтому продукт направляют в охладительные колонны, где он обдувается противотоком воздуха [3]. После

охлаждения гранулы просеивают: кондиционная фракция идёт на упаковку, а крошка возвращается в гранулятор.

Таким образом, производство пеллет – это строго выверенная цепочка, где каждый этап влияет на итоговый результат. Но если подготовка, сушка и измельчение – это в основном вопросы технологии, то гранулирование – это уже задача для машиностроителя. Именно конструкция пресс-гранулятора определяет, насколько эффективно будет работать вся линия.

Обзор конструкций пресс-грануляторов

В процессе исследования было установлено, что именно от пресс-гранулятора зависит качество готовых гранул. Его особенности строения, технические и эксплуатационные качества определяют общую эффективность процесса производства [4]. Первый этап технологического процесса – продавливание сырья через отверстия матрицы с помощью прижимных роликов [1]. Связующим компонентом в этой операции является нагретый под высоким давлением и, как следствие, размягченный, лигнин.

Грануляторы могут классифицироваться по двум конструктивным особенностям. Первая – пространственное расположение вала, оно может быть вертикальным или горизонтальным. Также оборудование может различаться по геометрии матрицы, в частности плоской или кольцевой. Было установлено, что наибольшую производительность имеют грануляторы с кольцевой матрицей, что является причиной их широкого распространения в промышленности [4].

Однако, у исследуемых моделей была выявлена проблема износа рабочих узлов. Например, в конструкции [4] применяются конические ролики и неразъемная матрица. Это повышает надежность, но взамен, затрудняет замену изношенных элементов, а как следствие обслуживания гранулятора в целом.

В свою очередь, сегментные конструкции, несмотря на облегчение замены деталей, невозможны к применению без усложненных опорных механизмов [5]. Была выявлена альтернатива – поршневые прессы. Они хоть и уступают роликовым грануляторам по производительности, но обеспечивают высокую плотность гранул.

Подводя итоги, можно сказать, что данное направление оптимизации является приоритетным. С помощью дальнейшего изучения данной темы можно добиться повышения эффективности производства пеллет. Сравнение основных типов пресс-грануляторов приведено в таблице 1.

Табл. 1. Сравнение типов пресс-грануляторов

Параметр	Плоская матрица	Кольцевая матрица	Поршневой пресс
Производительность	Средняя	Высокая	Низкая
Качество гранул	Среднее	Высокое	Высокое
Энергозатраты	Средние	Низкие	Высокие
Сложность обслуживания	Низкая	Высокая	Средняя
Распространение	Ограниченное	Широкое	Специальное

Проблемы эксплуатации и направления совершенствования оборудования

Проведя обзор конструкций пресс-грануляторов, мы можем выделить следующие основные проблемы: интенсивный абразивный износ, высокие затраты энергии, а также сложность и трудоёмкость технического обслуживания.

Наибольшую значимость здесь имеет износ матриц и роликов. Было установлено, что решить эту проблему можно путём оптимизации геометрии рабочих органов. Этого можно добиться, внедрив конические контактные поверхности с регулируемым углом наклона роликов [4].

Также можно использовать комбинированные, в частности каналово-конические или тороидальные, предкамеры [4] – это позволит значительно увеличить ресурс деталей.

Следующая проблема – эксплуатационная эффективность – решается путём использования специализированных держателей и пневматических механизмов. Система быстрой смены матриц [6] позволяет сократить время простоя на 80%. Также она обеспечивает высокую точность центровки и возможность обслуживания одним оператором.

Снизить энергоёмкость процесса можно с помощью улучшения кинематического взаимодействия рабочих органов. Например, было установлено, что применение зубчатой передачи ведёт к увеличению производительности. Также улучшить качество гранул можно путём создания закрытого пространства между матрицей и ограничительными кольцами [1]. В свою очередь, надёжность грануляторов повышается с помощью внедрения демпфирующих элементов, например, пружинных амортизаторов. Защитные кольца помогают снизить вибрационные нагрузки и способствуют предотвращению износа торцевых поверхностей [5].

Подытожив, можно сказать, что оборудование для производства пеллет всё ещё нуждается в совершенствовании. В частности, доработки требуют такие характеристики пресс-грануляторов, как надёжность и эффективность. Этого, как мы установили, можно добиться следующими способами: оптимизацией геометрии рабочих органов, использованием систем быстрой переналадки, улучшением кинематических связей и повышением устойчивости к вибрациям. Основные проблемы и инженерные решения приведены в таблице 2.

Табл. 2. Проблемы эксплуатации пресс-грануляторов и их решения

Проблема	Инженерное решение	Источник
Абразивный износ матриц	Конические поверхности, регулировка угла наклона роликов	[4]
Износ роликов и вибрации	Демпфирующие элементы, защитные кольца	[5]
Трудоёмкость обслуживания	Система быстрой смены матриц (Quick Die Change)	[6]
Высокая энергоёмкость	Оптимизация кинематики, зубчатое зацепление	[1]

Заключение

В ходе данного исследования была изучена схема технологии изготовления древесных гранул, а также выполнен анализ оборудования для переработки сырья. Были выявлены следующие ключевые стадии производства пеллет: подготовка, сушка, измельчение, прессование, охлаждение и классификация. Каждая из названных стадий требует своего специализированного оборудования.

Проанализировав конструкцию, можно сказать, что ключевым элементом линии является пресс-гранулятор. Изучение классификации оборудования говорит о том, что роликовые грануляторы с кольцевой матрицей занимают доминирующее положение на рынке и в производстве. Это обусловлено их крайне высокой производительностью, несмотря на все недостатки (абразивный износ, энергопотребление, сложность обслуживания).

Также были рассмотрены основные методы модернизации этого оборудования: оптимизация геометрии рабочих узлов [4], совершенствование кинематики [1] и внедрение систем быстрой замены матриц [6]. Сделан вывод, что повышение надёжности и энергоэффективности грануляторов является ключевым условием снижения себестоимости продукции и повышения конкурентоспособности пеллетного производства.

Список литературы

1. Куницкая О.А., Макуев В.А., Стородубцева Т.Н., Калита О.Н., Михайленко Е.В., Задраускяйте Н.О. Оптимизация производства топливных брикетов из измельченной древесины // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – №3(55). – С. 85-91.
2. Chervotkina O., Prokopenko O., Palyanychka N. Features of technology of fuel pellets made from hardwood // Proceedings of Tavria State Agrotechnological University. 2025, vol. 25, no. 2, pp. 228-231. DOI: 10.32782/2078-0877-2025-25-2-27.
3. Koido K., Konno D., Sato M. Life Cycle CO2 Emissions and Techno-Economic Analysis of Wood Pellet Production and CHP with Different Plant Scales and Sawdust Drying Processes // Sustainability. 2025, vol. 17, no. 1, p. 140. DOI: 10.3390/su17010140.
4. Патент №2740649 РФ. Пресс-гранулятор / С.М. Дотсенко, П.Н. Школьников, Л.А. Ковалева, И.Н. Кузьмин, М.А. Школьников, А.В. Чубенко. – Заявка №2020110926 от 03.06.2020; опубл. 19.01.2021, Бюл. № 2.
5. Granado M.P.P., Conti A.C.D., Nanda S. Advances in Torrefaction and Densification of Biomass to Produce Biofuel Pellets and Briquettes: A Review // BioEnergy Research. 2026, vol. 19, no. 1, p. 1. DOI: 10.1007/s12155-026-10980-x.
6. Патент №2685943 C1 РФ. Pressing device / С.М. Дотсенко, Л.А. Ковалева, С.А. Винокуров, А.В. Якименко, С.П. Волков. – Заявка №2018128103 от 03.08.2018; опубл. 23.04.2019, Бюл. № 12.

Сведения об авторах:

Стородубцева Тамара Никаноровна – д.т.н., доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии;

Яцюта Ростислав Дмитриевич – студент.