

УДК 662.818, 620.952

Мадина Фаридовна Набиуллина

Казанский государственный энергетический университет, преподаватель кафедры энергетического машиностроения, Россия, Казань, e-mail: madinanabiullina@yandex.ru

Гузель Рашидовна Мингалева

Казанский государственный энергетический университет, доктор технических наук, заведующий кафедрой энергетического машиностроения, Россия, Казань, e-mail: mingaleeva-gr@mail.ru

Ольга Владимировна Клейдман

Казанский государственный энергетический университет, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры энергетического машиностроения, Россия, Казань, e-mail: olgakdpm@mail.ru

Андрей Александрович Саченков

Казанский федеральный университет, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической механики, Россия, Казань, e-mail: sarga1507@mail.ru

Оценка физических и механических свойств топливных гранул для систем автономного энергоснабжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Комплексная оценка биоэнергетического потенциала растительных отходов агропромышленного комплекса позволит разработать рекомендации по размещению малых автономных электростанций на растительных отходах и оптимизировать логистику сбора и переработки биомассы. Экспериментальное определение теплофизических характеристик топливных гранул из различных видов биомассы с добавлением связующих веществ и исследование их механических свойств позволяет обосновать технологическую возможность их эффективного использования в качестве топлива для систем автономного энергоснабжения жилых объектов и сельскохозяйственных предприятий.

Материалы и методы. Для оценки биоэнергетического потенциала использована стандартизированная последовательность расчетов: определение массы отходов по видам культур, расчет валового энергетического потенциала и суммирование по всем видам отходов. Определение теплофизических характеристик осуществлено по ГОСТу, исследование механических свойств проведено на испытательной машине УТС-110М при продольном и поперечном нагружении топливных гранул.

Результаты. Путем сочетания расчетных, экспериментальных и стандартизированных методов дана комплексная оценка потенциала растительных отходов Республики Татарстан и обоснована возможность их эффективного использования в биоэнергетике преимущественно в качестве топлива для автономного энергоснабжения.

Выводы. Полученные количественные данные создают основу для обоснованного выбора площадок для размещения малых автономных электростанций, работающих на растительном сырье, и оптимизации логистических схем по сбору и переработке биомассы. Анализ теплофизических свойств подтвердил, что переработка растительной биомассы в топливные гранулы является перспективным решением для энергоиспользования низкоплотных растительных отходов. Исследование механических свойств топливных гранул показало, что прочностные характеристики полностью отвечают требованиям эксплуатации в системах топливоподачи.

Ключевые слова: биоэнергетика, биоэнергетический потенциал, топливные гранулы, топливоподготовка, теплофизические характеристики, системы автономного энергоснабжения

Madina Faridovna Nabiullina

Kazan State Power Engineering University, Lecturer of Power Machine Building Department, Russia, Kazan, e-mail: madinanabiullina@yandex.ru

Guzel Rashidovna Mingaleeva

Kazan State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of Power Machine Building Department, Russia, Kazan, e-mail: mingaleeva-gr@mail.ru

Olga Vladimirovna Kleidman

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Machine Building Department, Russia, Kazan, e-mail: olgakdpm@mail.ru

Andrey Alexandrovich Sachenkov

Kazan Federal University, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, (PhD), Associate Professor of Theoretical Mechanics Department, Russia, Kazan, e-mail: sarga1507@mail.ru

Evaluation of physical and mechanical properties of fuel pellets for autonomous power supply systems

Abstract

Background. A comprehensive assessment of the bioenergy potential of plant waste of agro-industrial complex will make it possible to develop recommendations for placement of small autonomous power plants on plant waste and optimize the logistics of collecting and processing biomass. The experimental determination of the thermophysical characteristics of fuel pellets of various types of biomass with the addition of binders and the study of their mechanical properties makes it possible to substantiate the technological possibility of their effective use as fuel for autonomous power supply systems for residential facilities and agricultural enterprises.

Materials and methods. To assess the bioenergy potential a standardized calculation sequence has been used: determining the mass of waste by crop type, calculating the gross energy potential, and summing up all types of waste. The thermophysical characteristics have been determined according to GOST. Mechanical properties have been studied on a UTS-110M testing machine under longitudinal and transverse loading of fuel pellets.

Results. The combination of computational, experimental and standardized methods made it possible to comprehensively assess the potential of plant waste of the Republic of Tatarstan and substantiate the possibility of their effective use in bioenergy, mainly as a local fuel for autonomous energy supply.

Conclusions. The obtained quantitative data provide the basis for a reasonable choice of sites to place small autonomous power plants powered by plant raw materials and optimization of logistics schemes to collect and process biomass. The results of the analysis of the thermophysical properties have confirmed that the processing of plant biomass into fuel pellets is a promising solution for the energy use of low-density plant waste. The study of the mechanical properties of fuel pellets has shown that the strength characteristics fully meet the requirements of operation in fuel supply systems.

Key words: bioenergy, bioenergy potential, fuel pellets, fuel preparation, thermophysical characteristics, autonomous power supply systems

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.017-024

Введение. Биомасса – возобновляемый ресурс, преобразуемый в твердое, жидкое или газообразное топливо для выработки тепла и электроэнергии. Твердая биомасса включает растительные (стебли, солома, пожнивные остатки, корзинки подсолнечника, льняная ко-стра, стержни кукурузы, ботва и др.), животно-водческие (навоз крупного рогатого скота, сви-ней, помет птиц) и древесные отходы (лесоза-готовка и деревообработка).

В мире ежегодно образуется огромное количество органических отходов, природная ассимиляция которых невозможна без челове-ческого вмешательства. Развитие технологий позволяет использовать переработанные органические отходы для производства энергии преимущественно в системах автономного энергоснабжения как жилых объектов, так и пе-рерабатывающих предприятий и животновод-ческих комплексов.

Целью исследования является обоснова-ние эффективного использования топливных гранул в системах автономного энергоснабже-ния сельскохозяйственных предприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- оценка биоэнергетического потенциала растительных отходов агропромышленного комплекса на примере Республики Татарстан;

- экспериментальное определение теп-лофизических характеристик биотоплива в чи-стом виде и биотопливных гранул с добавлени-ем связующего вещества;

- определение механических свойств топливных гранул на испытательной машине УТС-110М при продольном и поперечном нагружении;

- определение механических напряжений и энергии удара при транспортировке и подаче гранул в системах топливоподачи.

В качестве ресурсов для биоэнергетики рассматривались отходы агропромышленного комплекса, а именно растениеводства, – фак-тические объемы твердой биомассы, доступные для переработки с получением энергии. Вало-вым и техническим потенциалом биомассы при-нято считать полное количество энергии, заклю-ченное в биомассе, и количество энергии, кото-рую можно произвести из доступной биомассы с применением современных технологий.

Использование растительного биотоплива в чистом виде затруднено его большим объемом при малом весе. Наиболее эффективным спосо-бом подготовки растительной биомассы к исполь-зованию в качестве топлива в котлах является создание искусственных структурированных ком-плексов блоков, брикетов, гранул (пеллет) для последующего сжигания. Топливные гранулы мо-гут изготавливаться как на самой малой автоном-ной электростанции [1], так и централизованно силами малых инновационных предприятий, ра-ботающих в рамках региона [2].

Перед утилизацией растительной био-массы необходимо отрегулировать ее влаж-ность и размер фракций. Для создания топлив-ных гранул с заданными свойствами в сырье добавляют специальные горючие компоненты.

Они должны обеспечивать нужную прочность и влагостойкость при минимальных затратах, сохранять способность смеси к эффективному формированию.

Топливные гранулы – экологически чистое топливо, полученное из растительных отходов. Гранулы не включают в себя никаких вредных веществ и примесей. Переработанное в гранулы сырье значительно уменьшается в объеме, что позволяет в несколько раз снизить расходы на хранение и транспортировку, при этом калорийность его сопоставима с бурым углем. Технология производства топливных гранул основана на процессе прессования растительного биотоплива (растительных отходов сельского хозяйства, опилок) под высоким давлением при нагревании с добавлением связующего вещества.

Одним из самых распространенных связующих веществ является лигнин, содержащийся в клетках растений. В качестве связующего вещества также могут быть использованы отходы сахаропроизводства в виде свекловичной мелассы.

Благодаря высокой вязкости, меласса обладает сильным связывающим действием, поэтому ее можно использовать в качестве связующего вещества. При этом нет необходимости в предварительном высокотемпературном разогреве мелассы, нет выделений вредных веществ, нет проблем с дозированием или транспортированием. При содержании мелассы 10–20 % от гранулируемой массы получают механически прочные, водостойкие и термостойкие гранулы [3].

Увеличение содержания связующего вещества значительно влияет на механические характеристики получаемых гранул. Увеличение содержания связующего вещества в шихте с 10 до 20 мас. % способствует резкому увеличению прочности гранул, полученных при оптимальных технологических режимах. При расходе связующего вещества более 20 % прочность при сжатии начинает падать [4].

Для расчета биоэнергетического потенциала (валового, технического, ресурсного) применяется стандартизированная последовательность действий, не зависящая от типа биомассы [5]:

1. Выявляются источники биомассы и количественные показатели ее генерации, которые могут быть задействованы в энергетике.

2. На основе физико-географических и социально-экономических критериев определяется доля биомассы, пригодная для энергопроизводства.

3. Для выбранной категории отходов рассчитывается ее энергетический потенциал – количество энергии, доступное для извлечения.

4. С учетом технологических, экологических и иных ограничений прогнозируется выход конечной энергопродукции (тепло, электричество, топливо).

Масса ежегодно образующихся органических растительных сельскохозяйственных отходов M_i , т, рассчитывается следующим образом:

$$M_i = N_i L_i, \quad (1)$$

где N_i – статистические данные годового урожая растительных культур, т; L_i – экспериментально определенные нормы образования отходов (например, соотношения отходов и полезной части растения); i – вид растительных культур.

Валовый энергетический потенциал растительных сельскохозяйственных отходов Q_i , ГДж, рассчитывается по формуле

$$Q_i = M_i K_i, \quad (2)$$

где K_i – удельное энергосодержание отходов.

Тогда суммарный валовый биоэнергетический потенциал рассматриваемой территории, учитывающий все виды органических отходов сельскохозяйственного производства, определяется как

$$Q = \sum_{i=1}^n M_i K_i. \quad (3)$$

Коэффициенты, определяющие соотношение полезной части растения и отходов для каждой культуры, а также удельное энергосодержание отходов установлены по литературным данным и представлены в табл. 1 [6].

Таблица 1. Коэффициенты для расчета массы отходов растениеводства и их энергосодержания

Вид исходной биомассы	Соотношение отходов и полезной части растения, кг/кг	Удельное энергосодержание отходов, ккал/кг
Зерновые культуры:		
– солома	1	3500 (для сухой соломы)
– шелуха	0,1	3250
Подсолнечник на зерно:		
– стебли	3,5	3200
– лузга	0,18	3750

Алгоритм расчетов оценки объемов отходов сельскохозяйственной продукции и их энергосодержания включает последовательное определение следующих основных величин [7]:

– объемов производства основных сельскохозяйственных культур региона и их урожайности;

– отношения остатков (лузги, шелухи, соломы и др.), образующихся при переработке сельскохозяйственных культур, к их урожайности;

– теплоты сгорания образующихся отходов для различных сельскохозяйственных культур;

– периодичности удаления отходов в соответствии с экологическими ограничениями и требованиями сохранения плодородия почвы;

– доли отходов сельскохозяйственных культур, используемых в животноводстве, пищевой и других отраслях промышленности.

При оценке потенциала биоэнергетики в качестве ресурсов рассматривались органические отходы однолетних пропашных культур (соломы, лузги подсолнечника и шелухи овса), образующиеся на территории Республики Татарстан [8, 9]. Численные результаты исследования суммарного валового биоэнергетического потенциала муниципальных районов Республики Татарстан представлены на рис. 1 и 2.

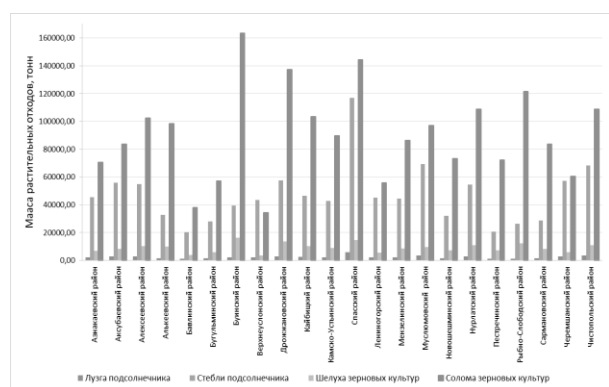


Рис. 1. Масса растительных отходов, образующихся в течение года в сельских хозяйствах всех категорий

Для определения перспектив размещения малых автономных электростанций, работающих на растительных отходах, в Республике Татарстан необходимо определить потенциал образования отходов по каждому району. Включение растительных отходов в топливно-энергетический баланс любого региона будет способствовать повышению эффективности работы всей энергетической системы.

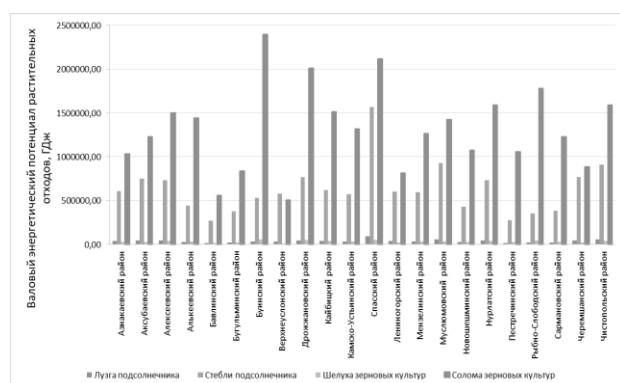


Рис. 2. Валовый энергетический потенциал растительных отходов, образующихся в течение года в сельских хозяйствах всех категорий

Методы исследования. Исследование теплофизических характеристик гранул из рас-

тительных отходов сельского хозяйства проводилось по известным методикам, описанным в ГОСТ 32975.3-2014, ГОСТ 32988-2014, ГОСТ 32990-2014 для определения влажности, зольности и выхода летучих соответственно [10].

Эффективное использование растительных отходов в качестве топлива требует их предварительной переработки в удобные для транспортировки и хранения формы. Производство топливных гранул и брикетов представляет собой оптимальное решение данной проблемы, однако их широкое применение ограничено недостаточной изученностью механических характеристик [11].

На рис. 3 представлен участок схемы топливоподготовки, где готовые биотопливные гранулы подвергаются максимальным механическим воздействиям, таким как вертикальные напряжения при хранении гранул в бункере, удары при падении гранулы из бункера на регулятор дальности заброса на колосниковую решетку, вибрационные нагрузки от привода, неровности пути и стыков колосников [12].

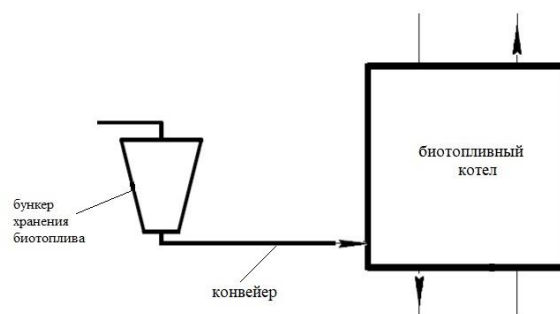


Рис. 3. Схема участка топливоподготовки

Рассмотрим главные факторы, влияющие на прочность гранулы:

1. Влажность сырья: высокая влажность делает гранулу мягкой и снижает ее прочность. Перед прессованием лузгу часто подсушивают до определенного уровня влажности (8–12 %).

2. Давление и температура прессования: чем выше давление в грануляторе (экструдере), тем плотнее и прочнее получается гранула. Температура также влияет на плавление легкоплавких компонентов и спекание.

3. Размер частиц лузги: более мелкий помол позволяет получить более плотную и однородную структуру гранулы, что повышает ее прочность.

4. Время хранения (созревания): после производства гранула может немного набирать прочность за счет окончательного формирования связей и высыхания.

Результаты исследования. Растительное биотопливо в естественном виде малоприспособлено для эффективного сжигания из-за большого объема при малой насыпной плотности, неоднородности фракционного состава и повышенной влажности.

Преобразование биомассы в структурированные формы (брикеты, гранулы) позволяеткратно сократить объемы хранения и транспортировки, стабилизировать влажность и фракционный состав, а также обеспечить равномерное горение в котлах.

Анализ влаги в твердом биотопливе проводят для оценки его качественных и энергетических характеристик, а также для корректного учета и расчетов при хранении, транспортировке и сжигании.

Результаты определения аналитической влаги твердого биотоплива в чистом виде и в виде гранул с добавлением связующего вещества представлены в табл. 2. В качестве связующего использовалась свекловичная меласса в концентрации 1:3.

Таблица 2. Аналитическая влага твердого биотоплива

Вид твердого биотоплива	W^a , %
Солома	9,0
Шелуха овса	9,2
Лузга подсолнечника	8,6
Гранула из соломы	14,47
Гранула из шелухи овса	14,64
Гранула из лузги подсолнечника	17,42

На рис. 4–6 представлены топливные гранулы из разных сортов твердого биотоплива после высушивания.

Полученные результаты показывают, что рабочая влажность топливных гранул возросла по сравнению с исходным сырьем в связи с добавлением связующего вещества.



Рис. 4. Гранула из соломы

Рис. 5. Гранула из шелухи овса

Рис. 6. Гранула из лузги подсолнечника

Зольность служит приблизительной мерой содержания минеральных компонентов и других неорганических материалов в биомассе. Зольность, наряду с другими количественными показателями, используют для характеристики полного вещественного состава проб биомассы.

Результаты определения зольности твердого биотоплива представлены в табл. 3.

Для всех исследованных видов биомассы зольность гранул возросла по сравнению с зольностью исходных веществ, что объясняется наличием минеральной негорючей части в связующем веществе.

Таблица 3. Зольность твердого биотоплива

Вид твердого биотоплива	A^d , %
Солома	3,83
Шелуха овса	5,56
Лузга подсолнечника	3,83
Гранула из соломы	4,62
Гранула из шелухи овса	6,64
Гранула из лузги подсолнечника	7,11

На рис. 7–9 представлены образцы золы, образовавшаяся после сжигания топливных гранул из разных сортов твердого биотоплива.



Рис. 7. Зольный остаток гранулы из соломы

Рис. 8. Зольный остаток гранулы из шелухи овса

Рис. 9. Зольный остаток гранулы из лузги подсолнечника

Выход летучих веществ определяют как потерю массы навески биотоплива при нагревании без доступа воздуха в стандартных условиях за вычетом потери массы, обусловленной содержанием влаги в топливе.

Результаты определения выхода летучих твердого биотоплива представлены в табл. 4.

Таблица 4. Выход летучих твердого биотоплива

Вид твердого биотоплива	V^d , %
Солома	77,5
Шелуха овса	78,4
Лузга подсолнечника	73,5
Гранула из соломы	76,17
Гранула из шелухи овса	70,89
Гранула из лузги подсолнечника	67,46

Выход летучих для всех исследованных видов гранул биотоплива ниже, чем для исходного вещества, что можно объяснить воздействием связующего, имеющего меньший выход летучих.

Для обеспечения целостности гранул на всем пути от контейнера до котла необходимо провести последовательную оценку всех механических воздействий.

Оценка вертикальных напряжений $\sigma_v(z)$, Па, при хранении гранул важна для предотвращения их разрушения, так как именно они вызывают уплотнение и деформацию нижних слоев. Методология расчета, основанная на теории сыпучих сред и формуле Янссена,

была разработана для расчета давлений в контейнерах с учетом трения о стенки [13]:

$$\sigma_v(z) = \frac{\rho_{\text{насыпн}} g D}{(4\mu K)} \left[1 - \exp\left(\frac{-4\mu K z}{D}\right) \right], \quad (4)$$

где D – эквивалентный диаметр контейнера, м; μ – коэффициент трения по стенке; K – коэффициент бокового давления; z – глубина контейнера, м; $\rho_{\text{насыпн}}$ – насыпная плотность с учетом пустот, кг/м³; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

Для более точного определения предельного напряжения проведены испытания на сжатие на испытательной машине УТС-110М при продольном и поперечном нагружении гранул со скоростью нагружения 2 мм/мин.

При нагружении вдоль оси цилиндра длиной 0,03 м и диаметром 0,015 м (рис. 10) максимальное значение силы составляет $F_{\text{max}} = 87$ Н при перемещении 10,2 мм = 0,01 м. Следовательно, предел прочности гранулы составляет $\sigma_{\text{crush}} = 492638$ Па $\approx 0,5$ МПа (площадь поперечного сечения $S = 0,0001766$ м²).

При поперечном нагружении по боковой поверхности цилиндра длиной 0,016 м и диаметром 0,016 м (рис. 11) максимальное значение силы составляет $F_{\text{max}} = 74$ Н при перемещении 2 мм = 0,02 м. Следовательно, предел прочности гранулы составляет $\sigma_{\text{crush}} = 437869$ Па $\approx 0,43$ МПа (площадь поперечного сечения $S = 0,000169$ м²).

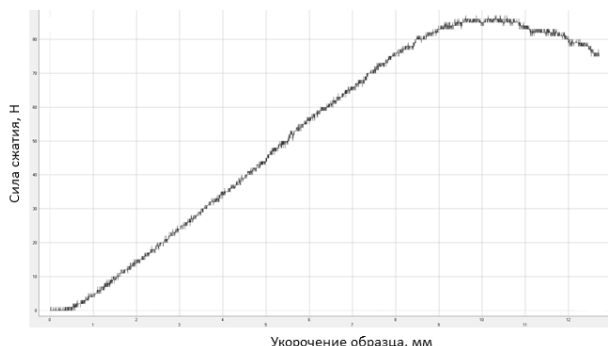


Рис. 10. Диаграмма сжатия при продольном нагружении цилиндрической гранулы из лузги подсолнечника

Условия хранения гранул в контейнерах безопасны с точки зрения вертикальной нагрузки. Расчетные напряжения в слоях топлива существенно ниже допустимых значений даже при максимальном заполнении бункеров топливозахоронения.

Чтобы гарантировать целостность гранул на всем пути от контейнера до котла, необходимо провести последовательную оценку всех механических воздействий.

В типовых схемах топливоподачи топливные гранулы из бункера хранения поступают в топку путем свободного падения на колосниковую решетку. В момент удара о решетку возник

ает риск разрушения гранул, приводящий к образованию мелкой фракции и пыли.

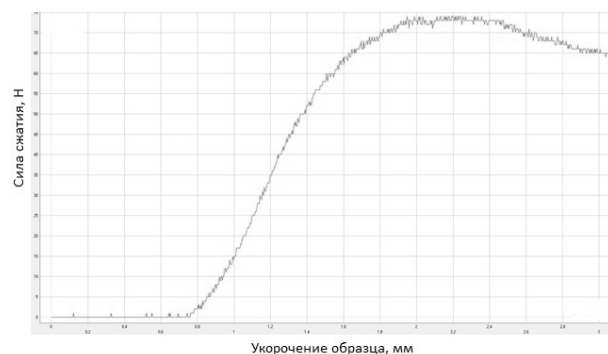


Рис. 11. Диаграмма сжатия при поперечном нагружении цилиндрической гранулы из лузги подсолнечника

Расчет энергии удара при падении с высоты позволяет определить, превышает ли кинетическая энергия, приобретаемая гранулой при падении, энергию, необходимую для ее разрушения, Дж [14, 15]:

$$E_{\text{kin}} \leq E_{\text{crush}}. \quad (5)$$

Условие прочности для гранул должно выполняться для наихудшего сочетания нагрузок. Суммарное нормальное напряжение σ , Па, в теле гранулы (от веса вышележащих слоев и вибраций) не должно превышать предела прочности σ_{crush} , Па, с запасом:

$$\sigma = \sigma_{\text{weigh}} + \sigma_{\text{vib}} \leq \frac{\sigma_{\text{crush}}}{k}, \quad (6)$$

где σ_{weigh} – напряжение от веса вышележащих гранул, Па; σ_{vib} – дополнительное напряжение от вибраций, Па; k – коэффициент запаса прочности.

Результаты исследования механических характеристик топливных гранул представлены для гранул из лузги подсолнечника. Установлено, что топливные гранулы из соломы и шелухи овса обладают аналогичным запасом прочности при воздействии вертикальных напряжений, динамических нагрузок и вибраций в системе топливоподачи.

Основная нагрузка на гранулы возникает при падении из бункера на конвейер. Она на порядок превышает нагрузки от вибраций и трения на конвейере.

Динамические нагрузки при транспортировке и подаче топлива не представляют угрозы целостности гранул. Энергия удара при падении с рабочих высот значительно меньше энергии, необходимой для разрушения гранул.

Трение и вибрация в системе топливоподачи оказывают минимальное влияние на целостность гранул. Возникающие при этом напряжения существенно ниже предельных значений прочности материала.

Для обеспечения целостности гранул необходимо минимизировать высоту падения и использовать амортизирующие элементы в местах пересыпов, контролировать вибрационные нагрузки и оптимизировать параметры хранения топливных гранул.

Выводы. Проведенный анализ массового и энергетического потенциала образования сельскохозяйственных отходов подтверждает значительный потенциал биомассы как возобновляемого источника энергии.

Результаты исследования показали, что для Республики Татарстан лидирующим ресурсом по массе (1 989,21 тыс. тонн) и энергетическому потенциалу (29 149,54 ГДж) является солома, второй по значимости ресурс (1 029,93 тыс. тонн; 137 798,8 ГДж) – стебли подсолнечника, меньшим потенциалом обладают шелуха зерновых и лузга подсолнечника (198,92 тыс. тонн и 699,41 ГДж; 52,97 тонн и 831,62 ГДж соответственно), но они также пригодны для энергоиспользования.

Полученные данные позволяют обоснованно планировать размещение малых автономных гибридных электростанций, работающих на растительных отходах, и оптимизировать логистику сбора и переработки биомассы.

Прочностные характеристики гранул полностью соответствуют требованиям эксплуатации в системах топливоподдачи, так как предел прочности гранул при сжатии обеспечивает необходимый запас надежности при всех видах механических воздействий.

Исследование технических и механических свойств топливных гранул из растительной биомассы подтверждает перспективность их использования в качестве альтернативного источника энергии. Полученные данные свидетельствуют о надежности их использования в энергетических установках: гранулы обладают необходимыми характеристиками для бесперебойной работы систем топливоподдачи и эффективного энергопотребления.

Список литературы

1. **Использование** растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалева, О.В. Афанасьева, С.С. Тимофеева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 120–131.
2. **Анисимова Т.Д., Зарипова Р.С., Нуриев М.Г.** Роль стартапов в трансформации экономики и решении социальных проблем // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2025. – Т. 4, № 4(157). – С. 87–93.
3. **Никишанин М.С., Сеначин П.К.** Углеродосодержащие брикеты на разных связующих веществах, их теплофизические характеристики и использование в газогенераторах // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1–2. – С. 305–311.
4. **Петрова Л.А., Латышев В.Г., Буренина О.Н.** Получение бытовых топливных брикетов с использова-

нием нефтяных связующих // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2007. – № 1. – С. 49.

5. **Панцхава Е.С.** Электростанции на биотопливе (биомассе). – М.: Русайнс, 2016. – 338 с.

6. **Клюс С.В., Забарный Г.Н.** Оценка и прогноз потенциала твердого биотоплива Украины // Коллекторное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2(24). – С. 8–13.

7. **Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю.** Энергетический потенциал агробиомассы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. – 2023. – Т. 78, № 6. – С. 50–63.

8. **База данных** показателей муниципальных образований [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.gks.ru/dbscripts/munst>.

9. **Бюллетени** о состоянии сельского хозяйства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy.

10. **Набиуллина М.Ф.** Исследование теплофизических характеристик растительных отходов сельского хозяйства // XXVIII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный дню энергетика: материалы докладов: в 3 т., Казань, 05–06 декабря 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 408–411.

11. **Анализ** влияния теплотехнических характеристик сырья на физико-механические свойства комбинированного брикета / В.А. Рыжиков, О.А. Ерохина, Э.Л. Аким, П.В. Луканин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 197–210.

12. **Набиуллина М.Ф., Клейдман О.В, Мингалева Г.Р.** Исследование механических характеристик топливных гранул из растительных отходов сельского хозяйства // Проблемы и перспективы развития энергетики: сб. материалов VII Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. конф., Казань, 22–23 октября 2025 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2025. – С. 772–775.

13. **Янссен И.** Теория давления сыпучих тел в силосных ячейках // Классические труды по механике сыпучих сред. – 1895. – С. 123–145.

14. **Петров В.А., Козлов Н.И.** Методика расчета энергии удара при падении гранул биотоплива // Энергетическое машиностроение. – 2020. – № 2. – С. 63–70.

15. **Михайлов Е.А., Смирнов Д.В.** Экспериментальное определение энергии разрушения гранул при ударных нагрузках // Механическая обработка материалов. – 2020. – № 4. – С. 112–119.

References

1. Nabiullina, M.F., Mingaleeva, G.R., Afanasyeva, O.V., Timofeeva, S.S. Ispol'zovanie rastitel'nykh otkhodov dlya obespecheniya funktsionirovaniya sel'skokhozyaystvennykh energokompleksov [The use of plant waste to ensure the functioning of agricultural energy complexes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 120–131.
2. Anisimova, T.D., Zaripova, R.S., Nuriev, M.G. Rol' startapov v transformatsii ekonomiki i reshenii sotsial'nykh problem [The role of startups in economic transformation and solving social problems]. *Ekonomi-*

ka i upravlenie: problemy, resheniya, 2025, vol. 4, no. 4(157), pp. 87–93.

3. Nikishanin, M.S., Senachin, P.K. Uglerodosoderzhashchie brikety na raznykh svyazuyushchikh veshchestvakh, ikh teplofizicheskie kharakteristiki i ispol'zovanie v gazogeneratorakh [Carbon-containing briquettes based on various binders, their thermophysical characteristics and use in gas generators]. *Polzunovskiy vestnik*, 2009, no. 1–2, pp. 305–311.

4. Petrova, L.A., Latyshev, V.G., Burenina, O.N. Poluchenie bytovykh toplivnykh briketov s ispol'zovaniem neftyanykh svyazuyushchikh [Production of household fuel briquettes using petroleum binders]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2007, no. 1, p. 49.

5. Pantskhava, E.S. *Elektrostantsii na biotoplive (biomasse)* [Biofuel (biomass) power plants]. Moscow: Rusayns, 2016. 338 p.

6. Klyus, S.V., Zabarnyy, G.N. Otsenka i prognoz potentsiala tverdogo biotopliva Ukrainy [Assessment and forecast of the potential of solid biofuels in Ukraine]. *Kollektornoe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2011, no. 2(24), pp. 8–13.

7. Andreenko, T.I., Kiseleva, S.V., Rafikova, Yu.Y. Energeticheskiy potentsial agrobiomassy v Rostovskoy oblasti, Krasnodarskom i Stavropol'skom krayakh [The energy potential of agrobiomass in the Rostov region, Krasnodar and Stavropol territories]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2023, vol. 78, no. 6, pp. 50–63.

8. *Baza dannykh pokazateley munitsipal'nykh obrazovaniy* [Database of indicators of municipalities]. Available at: <http://www.gks.ru/dbscripts/munst>

9. *Byulleteni o sostoyanii sel'skogo khozyaystva* [Bulletins on the state of rural economy]. Available at: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/economy

10. Nabiullina, M.F. Issledovanie teplofizicheskikh kharakteristik rastitel'nykh otkhodov sel'skogo khozyaystva [Investigation of thermal and physical characteristics of plant waste from agriculture]. *Materialy dokladov XXVIII Vserossiyskogo aspirantsko-magisterskogo nauchnogo seminar, posvyashchenogo dnyu energetika: v 3 t., Kazan', 05–06 dekabrya*

2024 goda [XXVIII All-Russian Postgraduate and Master's scientific seminar dedicated to the day of the power engineer: Materials of reports, in 3 vols., Kazan, December 05–06, 2024]. Kazan: Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet, 2024, pp. 408–411.

11. Ryzhikov, V.A., Erokhina, O.A., Akim, E.L., Lukanin, P.V. Analiz vliyaniya teplotekhnicheskikh kharakteristik syr'ya na fiziko-mekhanicheskie svoystva kombinirovannogo briketa [Analysis of the influence of thermal engineering characteristics of raw materials on the physico-mechanical properties of a combined briquette]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 197–210.

12. Nabiullina, M.F., Kleydman, O.V., Mingaleeva, G.R. Issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik toplivnykh granul iz rastitel'nykh otkhodov sel'skogo khozyaystva [Investigation of the mechanical characteristics of fuel pellets from plant waste from agriculture]. *Sbornik materialov VII Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya energetiki»*, Kazan', 22–23 oktyabrya 2025 goda [Collection of materials of the VII All-Russian (with international participation) scientific and practical conference “Problems and prospects of energy development”, Kazan, October 22–23, 2025]. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet, 2025, pp. 772–775.

13. Yanssen, I. Teoriya davleniya sypuchikh tel v silosnykh yacheykakh [Theory of pressure of bulk materials in silo cells]. *Klassicheskie trudy po mekhanike sypuchikh sred*, 1895, pp. 123–145.

14. Petrov, V.A., Kozlov, N.I. Metodika rascheta energii udara pri padenii granul biotopliva [Methodology for calculating the impact energy when bio-fuel pellets fall]. *Energeticheskoe mashinostroenie*, 2020, no. 2, pp. 63–70.

15. Mikhaylov, E.A., Smirnov, D.V. Eksperimental'noe opredelenie energii razrusheniya granul pri udarnykh nagruzkakh [Experimental determination of the energy of destruction of granules under shock loads]. *Mekhanicheskaya obrabotka materialov*, 2020, no. 4, pp. 112–119.