

Влияние различных параметров на процесс гранулирования растительного сырья и качество гранул (обзор)

© 2023. С. В. Брагинец^{1, 2}, О. Н. Бахчевников¹✉, К. А. Деев¹

¹ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,

г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Актуальным является установление закономерностей процесса гранулирования растительного сырья для совершенствования технологий и технических средств с целью снижения энергоемкости и улучшения качества гранул. Целью исследования является обобщение результатов исследований, посвященных влиянию различных параметров на процесс гранулирования растительного сырья и качество кормовых и биотопливных гранул. Выполнен отбор и систематический обзор научной литературы по тематике исследования за период 2007-2022 гг. Анализ показал, что предварительная тепловая обработка и увлажнение растительного сырья, а также его состав и размеры частиц являются факторами, оказывающими наибольшее влияние на качество кормовых и биотопливных гранул. Повышение давления в диапазоне 20-200 МПа приводит к увеличению прочности гранул, а температура матрицы около 100 °С является оптимальной для получения плотных качественных гранул из растительного сырья. Важную роль в получении качественных гранул при обработке растительного сырья играют конструктивные параметры пресс-гранулятора. Исполнение входной части фильеры матрицы в форме сужающегося конуса способствует снижению энергоемкости и давления гранулирования, а увеличение отношения длины канала фильеры к его диаметру экспоненциально увеличивает давление гранулирования и его энергоемкость. Взаимодействие между физическими процессами, происходящими в пресс-грануляторе, усложняет интерпретацию влияния каждого параметра на процесс гранулирования, вследствие этого авторы по-разному оценивают вклад отдельных факторов в получение качественных гранул. Поэтому необходимо восполнить пробел в знаниях о взаимодействии между отдельными параметрами гранулирования и их влиянии на результаты процесса.

Ключевые слова: корма, биотопливо, пресс-гранулятор, фильера матрицы, плотность гранул, прочность гранул, энергоемкость гранулирования

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «АНЦ «Донской» (тема № 0505-2022-0007).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: 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):30-45. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45>

Поступила: 25.12.2022

Принята к публикации: 30.01.2023

Опубликована онлайн: 27.02.2023

Influence of various parameters on the vegetable raw material pelleting process and pellets quality (review)

© 2023. Sergey V. Braginetz^{1, 2}, Oleg N. Bakhchevnikov¹✉, Konstantin A. Deev¹

¹Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd, Russian Federation

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Determining the regularities of the process of pelleting vegetable raw materials is relevant for the improvement of technologies and technical equipment in order to reduce energy intensity and improve the quality of pellets. The generalization of the results of the research aimed at studying the influence of various parameters on the process of pelleting vegetable raw materials and the quality of feed and biofuel pellets is the purpose of the research. A selection and systematic review of the scientific literature on the subject of the study for the period of 2007-2022 has been carried out. The analysis has proved that heat pre-treatment and moistening of vegetable raw materials, as well as their composition and particle size are the factors that have the greatest impact on the quality of feed and biofuel pellets. Increasing the pressure in the range of 20...200 MPa results in increasing the pellets durability. A die temperature of around 100°C is optimum for obtaining dense pellets of high-quality from vegetable raw materials. The design parameters of the pelletizer play an important role in obtaining high-quality pellets when processing vegetable raw materials. The design of the inlet in the form of a tapering cone helps to reduce energy consumption and pelleting pressure. An increase in the ratio of the die channel length to its diameter exponentially increases the pelleting pressure and its energy intensity. The interplay between the physical processes occurring in the pelletizer makes it difficult to interpret the impact of each parameter on the pelleting process, so different authors have different assessments of the contribution of individual factors in producing high-quality pellets. Therefore, the interaction between the individual pelleting parameters and their influence on the results of the process should be examined more precisely.

Keywords: feeds, biofuel, pelletizer, die, pellet density, pellet durability, pelleting energy intensity

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Agricultural Research Centre Donskoy (theme No. 0505-2022-0007).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N., Deev K. A. Influence of various parameters on the vegetable raw materials pelleting process and pellets quality (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(1):30-45. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.30-45>

Received: 15.12.2022

Accepted for publication: 30.01.2023

Published online: 27.02.2023

В настоящее время гранулирование получаемого в результате смешивания предварительно измельченного сырья комбикормов стало стандартной технологической операцией для крупных и средних комбикормовых заводов и получает все большее применение в небольших внутрихозяйственных производствах сельхозпредприятий [1]. Применение гранулированных кормов, состоящих в основном из растительного сырья, стало в последние годы стандартом в птицеводстве и свиноводстве, тогда как другие отрасли животноводства охвачены им в меньшей степени. В то же время в аквакультуре гранулирование комбикормов, получив в XX веке широкое распространение, в наше время уступает место их экструдированию [2]. Тем не менее, гранулирование кормов остается актуальным для кормления всеядных рыб, в частности карповых, в пресноводной аквакультуре [3].

Целью гранулирования растительного сырья при производстве кормов является преобразование однородной смеси ингредиентов в прочные частицы (гранулы), обладающие физическими характеристиками, которые делают их пригодными для кормления конкретного вида и половозрастной группы животных [2, 4]. Гранулирование рассыпного корма уменьшает его потери при транспортировании и кормлении, увеличивает срок хранения, улучшает питательную ценность [4].

В настоящее время увеличивается использование биотоплива, изготавливаемого из растительного сырья, а именно отходов деревообрабатывающей промышленности (опилки, кора и др.) и отходов сельского хозяйства (лузга подсолнечника, солома и др.) в виде топливных гранул (пеллет) [5]. Целью гранулирования растительного сырья при производстве биотоплива является обеспечение возможности его эффективной транспортировки, хранения и использования в качестве топлива [6].

Процесс гранулирования, как известно, заключается в прессовании рассыпного сырья в гранулы путем его продавливания прессующими роликами через отверстия (фильеры)

матрицы [5]. Важное значение для успешного осуществления процесса имеет предварительная обработка рассыпного растительного сырья паром либо добавление в него воды, а при производстве кормов и мелассы – жиров или других связывающих веществ [4]. Операцию гранулирования осуществляют в специальных машинах-грануляторах (пресс-грануляторах), которые оснащены вертикальными кольцевыми либо горизонтальными плоскими матрицами с каналами (фильерами) [7].

Но, несмотря на широкое использование операции гранулирования в технологическом процессе производства комбикормов и биотоплива, продолжают научные исследования, направленные на установление закономерностей процесса получения гранул из растительного сырья с целью совершенствования соответствующих технологий и технических средств в направлении снижения энергоемкости процесса и улучшения качества гранул [8, 9].

Цель исследования – обобщение результатов исследований и анализ научных статей, посвященных влиянию различных параметров на процесс гранулирования растительного сырья и качество получаемых кормовых и биотопливных гранул, для выявления актуальных результатов и перспективных направлений исследований в этой области.

Материал и методы. Систематический обзор научных статей по тематике гранулирования растительного сырья выполняли по методике, приведенной в работах Р. Дж. Торрако (R. J. Torraso) [10] и Ч. Околи (C. Okoli) [11], излагающей последовательность отбора публикаций, их критического анализа и синтеза резюмирующих выводов.

Для выявления и отбора научных статей, опубликованных на английском языке, осуществили поиск по приведенным выше ключевым словам в библиографических информационных базах ResearchGate, ScienceDirect и Google Scholar. Также выполнили поиск по ключевым словам в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU и библиографической базе Google Scholar для нахождения и

отбора научных статей, опубликованных на русском языке. Дополнительно был сделан обзор содержания научных журналов, публикующих статьи по рассматриваемой теме. При выборе статей для настоящего обзора приоритет отдан публикациям с наибольшим количеством цитирований. Также изучили пристатейные списки литературы отобранных статей для дополнительного нахождения релевантных источников научной информации.

Кроме статей по гранулированию сельскохозяйственного сырья при приготовлении кормов, в обзоре рассмотрены и публикации, посвященные производству топливных гранул из растительного сырья, ввиду значительного сходства этих технологических процессов. В работу включены материалы исследований, рассматривающих процесс гранулирования в пресс-грануляторах с вертикальными кольцевыми или горизонтальными плоскими матрицами. Иные типы грануляторов не рассматривали.

В качестве временных рамок для настоящего обзора научных статей принят период 2007-2022 гг. Научные статьи, опубликованные ранее 2007 г., включали в данный обзор только при отсутствии более новых публикаций по конкретному аспекту исследуемой темы.

Основная часть.

Ключевыми параметрами, влияющими на протекание процесса гранулирования растительного сырья и качество гранул, являются состав сырья и размер его частиц, а также влажность [4, 9]. Значительное влияние на процесс гранулирования растительного сырья и его результаты оказывают температура и давление [8, 9]. Также протекание процесса зависит от типа гранулятора и технических характеристик его рабочих органов, в частности прессующих роликов, матрицы и ее фильер [12].

Влияние размера частиц сырья. Размер частиц растительного сырья оказывает влияние на производительность гранулирования и качество гранул [4, 13]. Исследования показали, что уменьшение размера частиц сырья увеличивает силу трения в канале фильеры [14], площадь их поверхности, тем самым увеличивая количество и площадь контактных площадок между частицами, в результате чего в частицах усиливается межмолекулярная адгезия, в частности действие силы Ван-дер-Ваальса [4]. Все это приводит к повышению плотности гранул, что положительно сказывается на их качестве [15, 16].

Уменьшение размера частиц сырья увеличивает капиллярность между их твердой и жидкой составляющими, способствуя лучшему и более равномерному проникновению влаги при предварительном увлажнении сырья [6, 9]. Кроме того, повышенное трение, которому подвергаются частицы, приводит к их большему нагреву, чему также способствуют их малый размер и повышенная капиллярность [4, 9]. Все это приводит к уменьшению влажности готовых гранул [5, 17].

Результаты экспериментов свидетельствуют, что уменьшение размера частиц растительного сырья повышает прочность готовых гранул [4]. Так, Д. Бергстрем и соавторы (D. Bergström et al.) установили, что гранулирование растительного сырья с размером частиц менее 1 мм требует меньше энергии и обеспечивает получение гранул с более высокой прочностью на сжатие, чем при использовании сырья с частицами размером 1-2 и 2-4 мм [18].

Различные исследователи считают оптимальным при гранулировании растительного сырья размер частиц от 1 до 3 мм. В частности, С. Мани (S. Mani) считает оптимальным размер частиц менее 3,2 мм [19], а В. Стелте (W. Stelte) – от 1 до 3 мм [20]. Но следует учитывать, что предварительное измельчение сырья до размера частиц менее 1 мм значительно увеличивает энергоемкость технологического процесса и снижает его производительность, что, соответственно, повышает себестоимость готовых гранул [5]. Кроме того, результаты исследований показали, что слишком мелкий размер частиц сырья (менее 0,5 мм) ухудшает прочность гранул [4, 12].

Производителям необходимо искать компромисс между увеличением прочности гранул при уменьшении размера частиц растительного сырья и повышением себестоимости готового гранулированного корма или биотоплива.

Влияние влажности сырья. Вода, содержащаяся в сырье, а также добавляемая в смеситель при его смешивании либо вводимая в виде пара во время кондиционирования, способствует связыванию частиц при гранулировании [4]. Эта агглютинирующая способность воды основана на капиллярном эффекте и поверхностном натяжении [4, 21].

Дж. С. Мориц и соавторы (J. S. Moritz et al.) исследовали влияние добавления воды в смеситель в количестве 0,25 и 50 г/кг и установили, что значение PDI (индекс долговечности гранул) в результате составило соответ-

ственно 75,6 и 79,6 % [22]. М. Р. Абдоллахи и соавторы (M. R. Abdollahi et al.) установили, что добавление воды в количестве 24 г/кг корма, кондиционированного при 60 °С, увеличило PDI с 56,5 до 67,2 % [23]. Таким образом, предварительное увлажнение растительного сырья увеличивает прочность получаемых гранул.

Однако при излишнем увлажнении вода может действовать как смазка, снижая трение в фильтре в процессе гранулирования, что отрицательно сказывается на долговечности и прочности гранул [24, 25]. Это явление подробно исследовал Р. Колович (R. Colovic), который установил, что повышение влажности сырья нивелирует положительное влияние увеличения длины канала матрицы на прочность гранул [26].

В целом, гранулы, изготовленные при недостаточном количестве влаги, являются сухими и рассыпчатыми, а избыток влаги приводит к получению недостаточно прочных гранул [3].

Влияние содержания жиров. Содержание жиров в сырье оказывает влияние на процесс и результаты гранулирования кормов. Давление, оказываемое на частицы растительного сырья при гранулировании, приводит к тому, что жиры и масла перемещаются на их поверхность [4]. Поверхностный слой липидов действует как смазка, уменьшая трение в фильтре и тем самым снижая давление гранулирования и уменьшая затраты энергии [20]. Жир уменьшает контакт сырья со стенками канала фильеры, облегчая прохождение корма через него и тем самым уменьшая его уплотнение [4, 27]. Поэтому гранулируемый корм должен содержать некоторое количество жиров – минимум 2 % [3, 27].

С. К. Гэринг (C. K. Gehring) установил, что введение в состав корма жиров в смеситель положительно влияет на питательную ценность гранул, так как образующийся на поверхности гранул жировой слой способствует снижению давления и температуры в процессе гранулирования, что способствует лучшей сохранности термолабильных веществ, таких как витамины [28].

Таким образом, увеличение содержания жиров в сырье, с одной стороны, действует положительно, уменьшая энергоемкость процесса гранулирования и повышая питательную ценность корма, а с другой стороны, отрицательно, снижая плотность и прочность гранул.

Поэтому в настоящее время большинство специалистов считает, что количество жиров в корме, подвергаемом гранулированию, должно быть не менее 2-3 % и не более 8-10 % [3]. В тех случаях, когда требуется включить в состав комбикорма большее количество жиров, рационально выполнять эту операцию уже после гранулирования посредством вакуумного напыления [29].

Влияние кондиционирования сырья. Предварительное кондиционирование сырья необходимо для получения гранулированного корма хорошего качества, что обеспечивается увлажнением сырья и изменением его структуры [6, 30]. Во время кондиционирования горячий пар разрушает структуру крахмала, что приводит к его желатинизации, и это позволяет связывать частицы корма, обеспечивая получение прочных гранул [4, 6]. При правильном процессе кондиционирования гранулы имеют высокую прочность, снижается потребление энергии, используемой для их производства, а также уменьшается износ фильер [6, 21].

Из научных статей по этой тематике можно отметить работу М. Сегерстром (M. Segerstrom), подтвердившую, что предварительный нагрев растительного сырья снижает потребление энергии пресс-гранулятором [31]. Если сырье не подвергается предварительному нагреву перед гранулированием, то гранулятор будет потреблять больше энергии для производства прочных гранул, что увеличивает износ матрицы и роликов [5].

М. Р. Абдоллахи и соавторы (M. R. Abdollahi et al.) оценили влияние температуры кондиционирования на качество гранул кормов на основе кукурузы и сорго и установили, что при повышении температуры с 75 °С до 90 °С PDI улучшался в обоих случаях, при 90 °С его увеличение было более значительным [32].

Р. Кулиг (R. Kulig) установил, что количество пара и тепла, которые расходуются в процессе кондиционирования кормов, в основном зависит от свойств и содержания в растительном сырье определенных ингредиентов [33]. Зерновые и бобовые культуры с низким содержанием клетчатки относительно легко поглощают влагу и тепло, в то время как богатое клетчаткой растительное сырье менее восприимчиво к кондиционированию. В ходе экспериментов Р. Кулиг (R. Kulig) определил, что наибольших затрат тепловой энергии при кондиционировании требует богатая клетчаткой люцерна, а самых низких – кукуруза с ее малым содержанием.

М. Т. Нетто (M. T. Netto) установил, что при гранулировании корма на основе кукурузы и сои повышение температуры кондиционирования с 60 до 90 °С приводило к линейному увеличению PDI и твердости гранул [34]. Р. Душ Сантуш (R. Dos Santos) также определил, что при более высокой температуре кондиционирования 85 °С физическое качество гранул корма (процент неповрежденных гранул, твердость гранул, индекс прочности гранул) выше, чем при температуре 65 °С [35].

Таким образом, кондиционирование при более высокой температуре позволяет улучшить качество гранул, но при гранулировании следует учитывать влияние на протекание процесса состава растительного сырья.

Влияние давления гранулирования. Давление является одним из важных переменных параметров процесса гранулирования [5, 36]. Оно обусловлено сопротивлением при продавливании сырья прессующими роликами через каналы в матрице [5, 37]. Давление гранулирования (прессования) также называют противодействием [5]. Оно обусловлено внутренним трением между частицами сырья в результате возникновения напряжения сдвига и внешним трением между сырьем и стенками канала матрицы.

Давление гранулирования зависит от сырья, типа гранулятора и прочих параметров процесса и не поддается прямому контролю. Давление гранулирования растительного сырья обычно имеет значения в диапазоне 20-200 МПа, причем более высокое давление характерно для производства биотопливных гранул [38]. В пресс-грануляторах давление непосредственно не измеряют, а оценивают по потребляемой ими в процессе работы электрической мощности [39].

В. Стелте и соавторы (W. Stelte et al.) при изучении гранулирования топливных гранул из древесины и соломы установили, что давление гранулирования активно снижается при повышении температуры сырья до 140 °С, после достижения которой скорость его снижения значительно уменьшается [14].

К. Уиттакер (C. Whittaker) и И. Шилд (I. Shield) установили, что более высокое давление гранулирования приводит к получению более прочных гранул [40]. При повышении давления гранулирования плотность получаемых гранул увеличивается, но лишь до определенного предела [5]. В. Стелте и соавторы

(W. Stelte et al.) установили, что увеличение давления гранулирования свыше 200 МПа уже не приводит к повышению плотности гранул [14]. Это согласуется с результатами более раннего исследования М. О. Фабороде (M. O. Faboroode), который разделил процесс сжатия волокнистых сельскохозяйственных материалов под давлением на дисперсную и плотную фазы [41]. В дисперсной фазе сжатия доминирует сила инерции отдельных частиц сырья, в то время как в плотной фазе преобладают упругие силы, так как уплотненное сырье действует как единое твердое тело. Таким образом, гранулы формируются в каналах матрицы под действием давления гранулирования [9].

С. Мани (S. Mani) исследовал и описал процесс формирования гранул из растительного сырья с точки зрения приложенного давления [42]. По его мнению, начальная стадия образования гранул, также называемая перегруппировкой частиц, происходит при низком давлении, когда частицы сырья перемещаются и перестраиваются, заполняя пустоты. На второй стадии, по мере увеличения давления, возрастает плотность гранул, внутри которых происходит сцепление частиц в результате межмолекулярной адгезии [42, 43].

Результаты исследований С. Мани (S. Mani) по гранулированию растительного сырья (измельченная солома и стебли) также показали, что при увеличении давления в диапазоне 30...160 МПа плотность гранул повышается (рис. 1) [42]. Но если в диапазоне давления 30...80 МПа плотность интенсивно повышается, то с увеличением давления свыше 90 МПа плотность гранул повышается незначительно.

Таким образом, увеличение давления гранулирования в диапазоне 20-150 МПа способствует повышению плотности гранул.

Влияние температуры. Температура процесса гранулирования зависит от трех параметров: температура сырья на входе; влажность сырья; трение и сопротивление в каналах матрицы гранулятора [5]. Температура и влажность сырья определяются параметрами процесса кондиционирования, тогда как нагрев в каналах матрицы зависит от их конструкции и состава сырья [9].

Д. А. Агар (D. A. Agar) установил, что температура гранул из растительного сырья снижается при увеличении влажности сырья, что он объясняет высокой теплоемкостью воды и скрытой теплотой испарения [38].

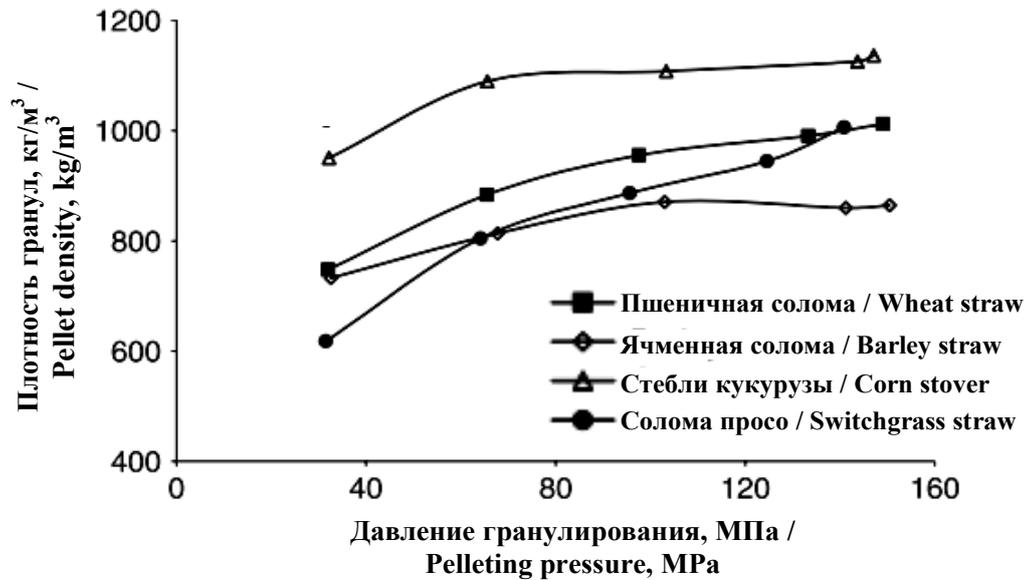


Рис. 1. Зависимость плотности гранул от давления гранулирования (С. Мани (S. Mani) [42]) / Fig. 1. Dependence of pellet density on pelleting pressure (S. Mani [42])

В ходе экспериментов ученые измеряли температуру матрицы в процессе гранулирования растительного сырья [9, 44, 45]. По их сообщениям, она составляет от 70 до 150 °С.

В статье С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) приведена термографическая фотография кольцевой вертикальной матрицы, сделанная сразу после остановки гранулятора, гранулировавшего измельченную древесину эвкалипта (рис. 2) [5].

Как видно из рисунка 2, температура различных участков матрицы изменяется в диапазоне 63-135 °С, причем температура вблизи внешнего ряда каналов матрицы ниже по сравнению с внутренними рядами. Это может быть объяснено потерей тепла с поверхности матрицы, что приводит к более высокой температуре в ее центральной части.

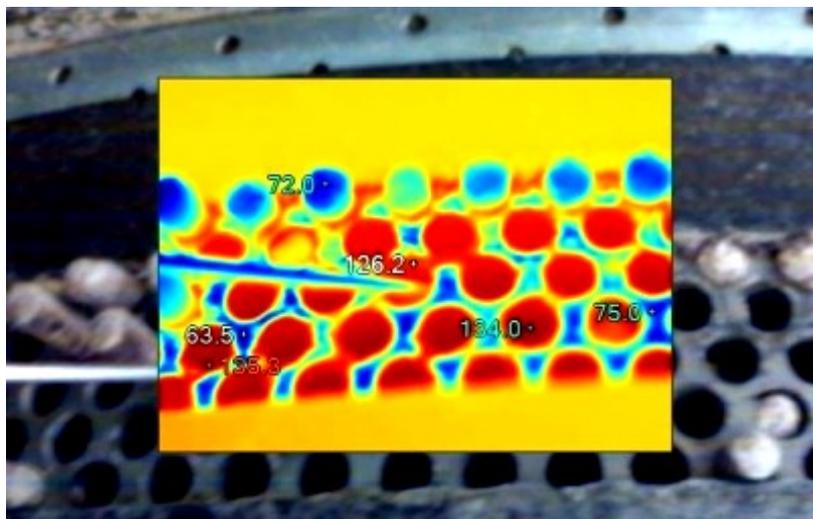


Рис. 2. Термографическая фотография кольцевой вертикальной матрицы, сделанная сразу после остановки пресс-гранулятора (С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) [5]) / Fig. 2. Thermographic photo of the vertical ring die, made immediately after stopping the pelletizer (S. K. Nielsen [5])

Температура процесса гранулирования влияет на связывание частиц в гранулах [9, 46]. К. Уиттакер (С. Whittaker) установил, что температура гранулирования оказывает большое влияние на трение и склеивание частиц, при

этом высокая температура приводила к лучшему склеиванию [40]. В. Стелте и соавторы (W. Stelte et al.) изучали механизмы склеивания частиц в топливных гранулах из древесины и соломы и установили, что гранулы,

произведенные при более высокой температуре, выдерживают большую силу сжатия до разрушения и имеют более плотную структуру [20].

Многие исследования посвящены вопросу оптимальной температуры гранулирования растительного сырья. По мнению В. В. Кувшинова, оптимальная температура гранулирования кормов – 100-140 °С [46]. К. Серрано (С. Serrano) считает, что оптимальная температура матрицы гранулятора для получения пеллет из ячменной соломы при работе в стабильных условиях составляет около 90 °С [47]. М. Е. Мостафа (М. Е. Mostafa) и Дж. С. Тумулуру (J. S. Tumuluru) установили, что оптимальная температура матрицы для гранулирования биотопливного растительного сырья близка к 100 °С [48, 49]. Но Б. Шафран (B. Safraan) обнаружил, что повышение температуры от 170 до 220 °С при гранулировании древесины может увеличить плотность гранул, что, в свою очередь, повышает теплотворную способность биотоплива [50].

На основе анализа научных работ можно сделать вывод, что оптимальную температуру гранулирования необходимо экспериментально определять для каждого вида растительного сырья.

Влияние состава сырья. Выше было показано влияние входящих в состав растительного сырья воды и жиров, а также размера его частиц на процесс гранулирования. Каждый вид сырья имеет свои особенности протекания процесса гранулирования в зависимости от перечисленных параметров.

При изготовлении биотопливных пеллет большую роль играет механическая прочность исходного сырья, поэтому в его состав помимо древесины твердых пород рационально включать древесину мягких пород и сельскохозяйственное сырье [9]. Исследования Н. Ю. Харун (N. Y. Harun) и М. Афзал (M. Afzal) показали, что смешивание сельскохозяйственной биомассы с древесной улучшает механические и физические свойства топливных гранул [13].

Ж. Кошак и А. Кошак подробно исследовали влияние состава комбикорма для птицы на удельную энергоёмкость процесса гранулирования [51]. Они установили, что увеличение содержания зерна в корме на 35,16 % приводит к повышению удельной энергоёмкости процесса на 60,13 %. Увеличение содержания шротов и масел в корме на 7,2 % вызывает снижение удельной энергоёмкости на 18,1 %.

Взаимодействие различных факторов. Несколько факторов могут совместно влиять на процесс гранулирования растительного сырья и качество гранул [4, 52]. При этом доля влияния каждого фактора на конечный результат различна.

По мнению К. Мурамацу (K. Muramatsu), вклад в воздействие различных факторов на PDI (индекс долговечности гранул) корма следующий: тепловая обработка (кондиционирование) – 44 %; влажность сырья – 16 %; содержание жиров – 9 %; размер частиц сырья – 1 %; прочие факторы – 31 % [4]. Результаты моделирования показали, что наиболее эффективным действием для улучшения качества гранул является кондиционирование сырья, за которым в порядке убывания следуют добавление влаги, уменьшение содержания жиров и, наконец, уменьшение размера частиц сырья.

По мнению К. П. Кумарагуру Васагам (K. P. Kumaraguru Vasagam), качество гранул примерно на 60 % зависит от предварительной обработки растительного сырья [3].

По мнению А. Клименко и А. Гущевой-Митропольской, вклад в воздействие различных факторов на качество гранул корма следующий: состав корма – 40 %; кондиционирование – 20 %; размер частиц – 20 %; технические параметры гранулятора – 15 %; охлаждение – 5 % [52].

По мнению специалиста фирмы «Vorre-gaard LignoTech» М. Иванов (M. Ivanov), соотношение влияния факторов при гранулировании кормов таково: состав сырья – 45 %; кондиционирование – 30 %; размер частиц сырья – 10 %; параметры матрицы – 10 %; влажность и температура – 5 % [53].

Мнения исследователей о соотношении влияния различных факторов на процесс гранулирования растительного сырья сведены в таблицу.

По мнению С. К. Нильсен и соавторов (S. K. Nielsen et. al.), сложное взаимодействие между многочисленными физическими процессами, происходящими одновременно в пресс-грануляторе, усложняет интерпретацию влияния каждого параметра на процесс получения биотопливных гранул [5]. Они считают, что в современной научной литературе существует пробел в понимании взаимодействия между некоторыми параметрами гранулирования и их влиянием на результаты процесса.

Таблица – Мнения исследователей о соотношении влияния различных факторов на процесс гранулирования растительного сырья и качество гранул /

Table – Researchers' opinions on the correlation between the influence of different factors on the pelleting process of plant raw materials and the quality of the pellets

Фактор / Factor	Доля влияния фактора на процесс гранулирования и качество гранул, % / Proportion of the influence of the factor on the pelleting process and pellet quality, %		
	К. Мурамацу (K. Muramatsu) [4]	А. Клименко и А. Гущева-Митропольская [52] / A. Klimenko & A. Gushcheva-Mitropolskaya	М. Иванов (M. Ivanov) [53]
Тепловая обработка (кондиционирование) / Heat treatment (conditioning)	44	20	30
Влажность сырья / Moisture content of raw materials	16	-	2
Содержание жиров / Fat content of the raw material	9	-	-
Размер частиц сырья / Particle size of the raw material	1	20	10
Состав сырья / Composition of raw material	-	40	45
Конструктивные параметры пресс-гранулятора / Design parameters of the pelletizer	-	15	10
Охлаждение / Cooling	-	5	-
Температура / Temperature	-	-	3
Прочие факторы / Other factors	31	-	-

Поэтому, несмотря на значительный объем знаний, накопленных за последние годы, необходимы дальнейшие исследования взаимодействия факторов, влияющих на качество гранул из растительного сырья.

Влияние конструкции матрицы гранулятора. Матрица является основным рабочим органом пресс-гранулятора. Ее основными конструктивными параметрами являются площадь, толщина, определяющая длину канала ее фильер, количество и расположение фильер [5].

Гранулирование корма по сравнению с биотопливом требует меньших усилий, поэтому прочность матрицы в грануляторе для производства топливных пеллет следует увеличивать за счет уменьшения ее ширины и соответственно площади, и увеличения толщины [5].

Большое значение для протекания процесса гранулирования имеют количество и схема распределения каналов прессования (фильер) в матрице. По мнению В. Стелте (W. Stelte), при проектировании необходимо добиваться максимального количества отверстий, насколько это возможно сделать, не

нарушая механической целостности самой матрицы [14].

Фильеры в кольцевой матрице распределяются в ряды, ориентированные по нормали к окружности. Внутреннюю поверхность матрицы разделяют на следующие зоны (рис. 3) [5, 54]:

- активная – суммарная площадь отверстий цилиндрических каналов прессования в фильерах на поверхности матрицы;
- переходная – суммарная площадь проекций конического входа в каналы фильер;
- неактивная – поверхность матрицы между фильерами.

По сообщениям разных авторов, площадь активной зоны кольцевой матрицы в пресс-грануляторах составляет от 30 до 60 % ее внутренней поверхности.

Результаты исследований Н. П. К. Нильсен (N. P. K. Nielsen) показали, что неактивная зона матрицы также влияет на давление гранулирования, так как на неактивных участках материал двигается в окружном направлении матрицы, пока не достигнет переходной зоны, при этом круговое движение сырья увеличивает напряжения, создаваемые в области между матрицей и роликами [45].

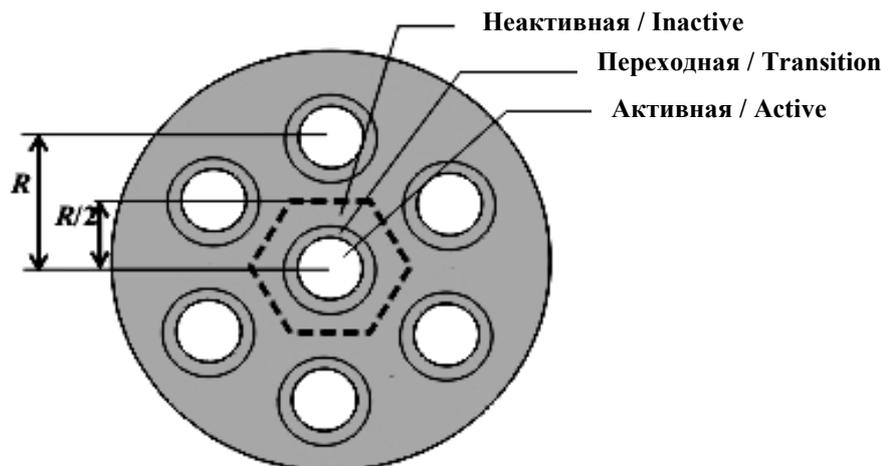


Рис. 3. Зоны поверхности матрицы пресс-гранулятора (С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) [5, 54]): R – расстояние между центрами входных отверстий фильер /

Fig. 3. Surface areas of the pelletizer die (S. K. Nielsen [5, 54]): R – distance between the centers of the inlet holes of the die

И. Медиавилла (I. Mediavilla) установил, что удельный массовый расход сырья через фильеры увеличился, а удельная энергоёмкость процесса гранулирования снизилась при уменьшении площади активной зоны матрицы [55].

В целом можно сделать вывод, что вопрос определения оптимального соотношения площади активной и неактивной зон матрицы

и расположения на ней входных отверстий фильер до сих пор недостаточно исследован, и при проектировании пресс-грануляторов решения зачастую принимаются исходя из производственного опыта, а не научных данных.

Влияние конструкции фильер матрицы гранулятора. На рисунке 4 представлена схема наиболее распространенной конструкции фильеры (канала) матрицы пресс-гранулятора.

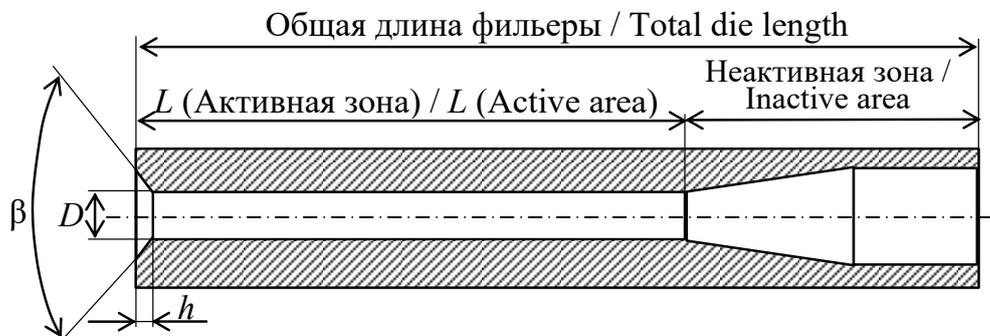


Рис. 4. Конструкция фильеры матрицы пресс-гранулятора: L – длина цилиндрического канала фильеры (активная зона); D – диаметр цилиндрического канала; h – глубина входной части канала; β – угол наклона конической входной части канала /

Fig. 4. Design of the pelletizer die: L – length of the cylindrical channel of the die (active zone); D – diameter of cylindrical channel; h – depth of inlet part of channel; β – angle of inclination of conical inlet part of channel

При производстве биотопливных гранул часто используют матрицы, входная часть каналов в которых выполнена в виде сужающегося конуса. При гранулировании кормов, особенно содержащих много клетчатки, часто применяют матрицы с каналами, входная часть которых выполнена в виде цилиндра с диаметром большим, чем диаметр активной зоны фильеры.

В результате исследований было показано, что конструкция входной части фильеры влияет на потребление энергии в процессе гранулирования и качество гранул [54].

С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) приводит результаты неопубликованных исследований Е. Винтер (E. Winter), который изучил гранулирование сырья для биотоплива в фильерах с углом наклона входной части канала β ,

равным 0, 4, 14 и 28° [5]. Гранулы, сформированные в фильере с наклоном входного канала 28°, имели самое низкое давление гранулирования и самое высокое качество, в том числе наилучшую прочность.

Н. Мисленович (N. Misljenovic) сравнил процесс гранулирования пшеничной соломы в фильере с входной конической частью и без таковой и установил, что в первом случае гранулы имели лучшее качество и были более прочными [56].

Дж. Ху (J. Hu) исследовал потребление энергии на гранулирование рисовой соломы при значениях угла β от 29,5 до 60,5° и установил, что минимальное значение энергопотребления было получено при $\beta = 60,5^\circ$ [57].

Следует учитывать, что коническая входная часть фильеры не должна быть слишком глубокой. С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) установил, что для фильер с глубокой входной частью давление гранулирования и расход энергии оказываются даже большими, чем для фильер без входной конической части [58]. Результаты исследований С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) показали, что глубина h конической входной части фильеры напрямую влияет на давление гранулирования и его энергоемкость.

К. Ву (K. Wu) исследовал влияние значения угла β на абразивный износ канала матрицы [59]. Он установил, что уменьшение значения угла β снижает давление гранулирования и, следовательно, истирание поверхности канала.

Н. Януков и соавторы для снижения износа каналов матрицы гранулятора предлагают придать входной части канала тороидальную форму, сходную с той, «которая образуется при износе во время продолжительной эксплуатации» [60].

Необходимо отметить, что имеются противоречивые данные о влиянии угла β на давление гранулирования и его энергоемкость. В частности, К. Ву (K. Wu) установил, что более низкое значение β снижает давление гранулирования [59], в то время как Дж. Ху (J. Hu) сообщает, что более высокие значения угла β снижают давление гранулирования [57]. При этом С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) не обнаружил прямой корреляции между значением угла β и давлением гранулирования [58]. Противоположные результаты этих исследований, по мнению С. К. Нильсен (S. K. Nielsen), могут быть связаны с тем, что не были

учтены данные о других конструктивных параметрах канала матрицы, таких как глубина канала, длина его активной и неактивной частей, которые не менее важны [5].

Основная часть процесса гранулирования сырья протекает в активной зоне фильеры, представляющей собой гладкий цилиндрический канал в матрице. Отношение длины этого канала к его диаметру L/D является конструктивным параметром, который используют для регулирования давления гранулирования различных видов сырья [4, 5]. При гранулировании сырья, создающего высокое трение в активной зоне канала, отношение L/D уменьшают, чтобы снизить сопротивление трению [5].

Древесную биомассу обычно гранулируют в фильерах с L/D в диапазоне от 3 до 5 [61]. Е. Мондеро (E. Monedero) исследовал гранулирование древесного сырья при соотношении L/D 2,83, 3,16 и 3,5 [62]. Он установил, что прочность гранул из древесины тополя увеличилась при переходе от $L/D = 2,83$ к $L/D = 3,16$, как и энергоемкость процесса. При соотношении $L/D = 3,5$ создаваемое сопротивление было слишком велико для стабильного производства этих гранул.

Для гранулирования сельскохозяйственной растительной биомассы обычно требуется более высокое соотношение L/D – от 5 до 9, что обусловлено низким трением такого сырья в канале матрицы [63]. П. Адапа (P. Adapa) успешно использовал для гранулирования сельскохозяйственной биомассы кольцевую матрицу с $L/D = 7,31$ [64]. К. Тхеерараттананоон (K. Theerarattananoon) сообщает, что в результате гранулирования стеблей и соломы при соотношении $L/D = 7$ были получены более прочные гранулы, чем при $L/D = 8$ [65].

В. Стелте (W. Stelte) установил, что давление гранулирования увеличивается экспоненциально при увеличении соотношения L/D [14]. Аналогичные результаты сообщает М. Пуч-Арнават (M. Puig-Arnabat) [66]. Результаты экспериментов, согласно которым давление гранулирования экспоненциально возрастает при увеличении соотношения L/D канала пресования, подтверждают выводы Дж. К. Холм (J. K. Holm) и соавторов, которые разработали уравнение для расчета давления гранулирования [67]. Данное уравнение основано на модели упругого напряжения-деформации, подчиняющегося закону Хукса, для расчета радиального давления в канале матрицы как функции

приложенного давления гранулирования, и использует постоянные анизотропные свойства материала гранулирования, выраженные через модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Н. К. Кроуфорд (N. C. Crawford) разработал уравнение, выведя его из уравнения Навье-Стокса, с помощью которого показал хорошую корреляцию между соотношением L/D , давлением гранулирования и потреблением электроэнергии пресс-гранулятором [39].

Таким образом, конструкция фильеры (канала) матрицы оказывает существенное влияние на процесс гранулирования растительного сырья. Исполнение входной части фильеры в форме сужающегося конуса способствует снижению энергоемкости процесса и необходимого давления гранулирования. Соотношение длины цилиндрического канала фильеры к его диаметру L/D является конструктивным параметром, который напрямую влияет на давление гранулирования и энергоемкость процесса.

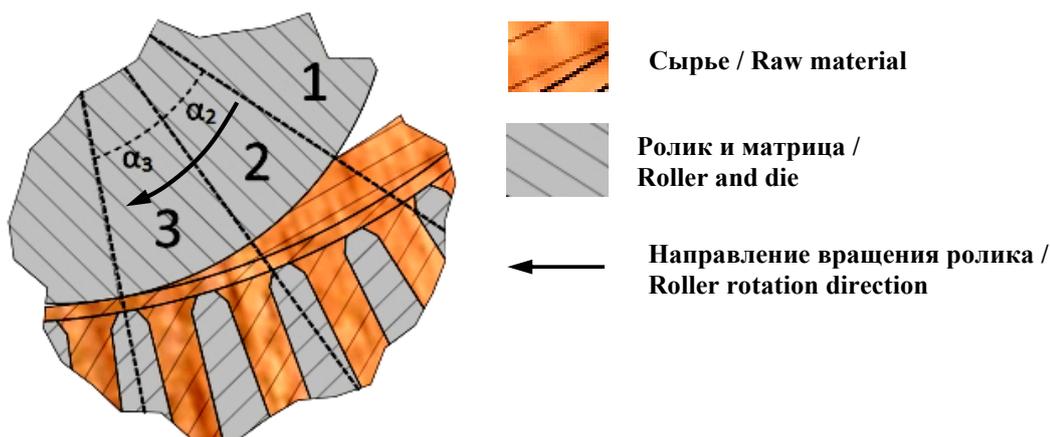


Рис. 5. Зоны области перед роликом на внутренней стороне кольцевой матрицы по степени воздействия на сырье (С. К. Нильсен (S. K. Nielsen) [5], С. Шуйцзюань (S. Shuijuan) [69]): 1 – подачи; 2 – деформации; 3 – формирования; α_2 , α_3 – углы зон деформации и формирования /

Fig. 5. Areas in front of the roller on the inside of the ring die by degree of impact on the raw material (S. K. Nielsen [5], S. Shuijuan [69]): 1 – supplying; 2 – deformation; 3 – formation; α_2 , α_3 – angles of deformation and formation areas

В зоне подачи частицы сырья прижимаются к внутренней поверхности матрицы под действием центробежной силы. В зоне деформации сырье подвергается воздействию сжимающих напряжений, меньших чем давление гранулирования P , определенное из уравнения, предложенного Дж. К. Холм (J. K. Holm) [70]. При переходе сырья в область формирования напряжение сжатия достигает значения давления гранулирования P , и сырье вдавливаются в каналы прессования [69]. Таким образом, С. Шуйцзюань (S. Shuijuan) считает, что напря-

Влияние конструкции прессующих роликов и их зазора с матрицей. Влияние зазора между прессующим роликом и матрицей, а также конструкции ролика являются одними из наименее изученных параметров процесса гранулирования.

Имеющиеся научные работы показывают, что зазор между роликом и матрицей влияет на механическую прочность гранул. Н. Калиян (N. Kaliyan) обнаружил, что при приготовлении гранулированных кормов увеличение зазора между роликом и кольцевой матрицей до 2,0-2,5 мм повысило прочность гранул, а дальнейшее увеличение зазора до 4-5 мм, напротив, снизило их прочность [68].

С. Шуйцзюань и соавторы (S. Shuijuan et al.) численно проанализировали напряжения, возникающие на внутренней стороне кольцевой матрицы, где сырье сжимается между ее поверхностью и роликом [69]. Они разделили область перед роликом на три зоны: подачи, деформации, формирования (рис. 5).

жение сжатия в области деформации линейно возрастает от нуля до P , а напряжение в зоне формирования равно P [69].

Х. Ся (X. Xia) разработал математическую модель для расчета сил, действующих на сырье между кольцевой матрицей и роликом, и определил, что уменьшение значения отношения радиусов матрицы и ролика приводит к повышению производительности гранулятора [71].

В. Ю. Полищук установил, что увеличение радиусов кольцевой матрицы и ролика

пресс-гранулятора на 20 % увеличивает производительность и снижает энергоемкость гранулирования [72].

На основе анализа научных работ можно сделать вывод, что влияние конструкции прессующих роликов и их зазора с матрицей является довольно существенным фактором, определяющим протекание процесса гранулирования, однако установление оптимальных значений этих параметров требует проведения дополнительных исследований.

Влияние скорости вращения кольцевой матрицы. Количество сырья, которое сжимается при каждом проходе роликов, зависит от величины его подачи в пресс-гранулятор и скорости вращения кольцевой матрицы [5]. Скорость вращения кольцевой матрицы также задает скорость сжатия сырья [8].

Дж. Ху (J. Hu) установил, что увеличение скорости сжатия с 44,5 до 75,5 мм/мин увеличило расход энергии на гранулирование [57]. К. Ву (K. Wu) также сделал вывод, что потребление энергии увеличивается при повышении скорости вращения матрицы, в то время как силы, действующие между матрицей и роликом, уменьшались, также снижался крутящий момент для вращения кольцевой матрицы [73].

Заключение. Повышение эффективности процесса гранулирования растительного сырья для производства биотопливных пеллет и гранулированных кормов находится в центре внимания инженеров и ученых.

Анализ результатов исследований показал, что предварительная тепловая обработка и увлажнение растительного сырья, а также его состав и размеры частиц, являются факторами, которые оказывают наибольшее влияние на качество кормовых и биотопливных гранул. На качество гранул комбикорма, помимо этого, большое влияние оказывает содержание жиров в исходном сырье.

Что касается значений этих параметров, то ученые считают оптимальным при гранулировании растительного сырья размер частиц от 1 до 3 мм. Растительное сырье для производства биотопливных гранул требует содержания влаги от 10 до 15 %, для кормовых

гранул – 15-20 %. Растительное сырье для производства кормовых гранул оптимально должно содержать от 2 до 10 % жира.

Регулирование в процессе гранулирования температуры и давления позволяет добиваться получения качественных гранул. Повышение давления в диапазоне 20-200 МПа приводит к увеличению прочности гранул, а температура матрицы около 100 °С является оптимальной для получения плотных качественных гранул из растительного сырья.

Проанализированные результаты показывают, что важную роль в получении качественных гранул при обработке растительного сырья играют конструктивные параметры пресс-гранулятора. Большинство ученых считает, что исполнение входной части фильеры матрицы в форме сужающегося конуса способствует снижению энергоемкости и давления гранулирования, а увеличение соотношения длины канала фильеры к его диаметру L/D экспоненциально увеличивает давление гранулирования и его энергоемкость. Влияние конструкции прессующих роликов и их зазора с матрицей является довольно существенным фактором, определяющим протекание процесса гранулирования, однако установление оптимальных значений этих параметров требует проведения дополнительных исследований.

Но, несмотря на значительный объем знаний, накопленных за последние годы, необходимы дальнейшие исследования взаимодействия факторов, влияющих на качество гранул, получаемых из растительного сырья. Сложное взаимодействие между многочисленными физическими процессами, происходящими одновременно в пресс-грануляторе, усложняет интерпретацию влияния каждого параметра на процесс гранулирования, в силу чего различные авторы по-разному оценивают вклад отдельных факторов в получение качественных гранул. Поэтому необходимо восполнить существующий пробел в знаниях о взаимодействии между отдельными параметрами гранулирования и их влиянии на результаты процесса.

References

1. Blagov D. A., Gizatov A. Y., Smakuyev D. R., Kosilov V. I., Pogodaev V. A., Tamaev S. A. Overview of feed granulation technology and technical means for its implementation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020;613(1):012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012018>
2. Regupathi E. R., Suriya A., Geethapriya R. S. On studying different types of pelletizing system for fish feed. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies. 2019;7(2):187-192. URL: <https://www.fisheriesjournal.com/archives/2019/vol7issue2/PartC/7-2-4-857.pdf>

3. Kumaraguru Vasagam K. P., Ambasankar K., Dayal J. S. An overview of aquafeed formulation and processing. In: Perumal S., Thirunavukkarasu A. R., Pachiappan P. (eds) *Advances in Marine and Brackishwater Aquaculture*. Springer, New Delhi, 2015. pp. 227-240. DOI: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2271-2_21
4. Muramatsu K., Massuquetto A., Dahlke F., Maiorka A. Factors that affect pellet quality: a review. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 2015;9(2):717-722. DOI: <https://doi.org/10.17265/2161-6256/2015.09.002>
5. Nielsen S. K., Mando M., Rosenorn A. B. Review of die design and process parameters in the biomass pelleting process. *Powder Technology*. 2020;364: 971-985. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.051>
6. Gageanu I., Cujbescu D., Persu C., Tudor P., Cardei P., Matache M., Vladut V., Biris S., Voicea I., Ungureanu N. Influence of input and control parameters on the process of pelleting powdered biomass. *Energies*. 2021;14(14):4104. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14144104>
7. Ольховик П. А., Шахов В. А., Хлопко Ю. А., Козловцев А. П., Межуева Л. В., Шахов В. В., Шахов Г. В. Основные тенденции совершенствования пресс-грануляторов. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2022;94(2):102-106. DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-102-106> EDN: IVVIGW
Olkhovik P. A., Shakhov V. A., Khlopko Yu. A., Kozlovtev A. P., Mezhueva L. V., Shakhov V. V., Shakhov G. V. The main trends in the improvement of press granulators. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2022;94(2):102-106. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2022-94-2-102-106>
8. Thomas M., Van der Poel A. F. B. Fundamental factors in feed manufacturing: Towards a unifying conditioning/pelleting framework. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;268:114612. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114612>
9. Dujmovic M., Safran B., Jug M., Radmanovic K., Antonovic A. Biomass Pelletizing Process: A Review. *Drvna Industrija*. 2022;73(1):99-106. DOI: <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2139>
10. Torraco R. J. Writing integrative literature reviews: Using the past and present to explore the future. *Human Resource Development Review*. 2016;15(4):404-428. DOI: <https://doi.org/10.1177/1534484316671606>
11. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Communications of the Association for Information Systems*. 2015;37:879-910. DOI: <https://doi.org/10.17705/1cais.03743>
12. Stelte W., Sanadi A. R., Shang L., Holm J. K., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. Recent developments in biomass pelletization – A review. *BioResources*. 2012;7(3):4451-4490. URL: https://orbit.dtu.dk/files/10266572/Recent_Development_Biomass_Pelletization_Review.pdf
13. Harun N. Y., Afzal M. Effect on particle size on mechanical properties of pellets made from biomass. *Procedia Engineering*. 2016;148:93-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.445>
14. Stelte W., Holm J. K., Sanadi A. R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*. 2011;90(11):3285-3290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>
15. Lyu F., Thomas M., Hendriks W. H., Van der Poel A. F. B. Size reduction in feed technology and methods for determining, expressing and predicting particle size: A review. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;261:114347. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2019.114347>
16. Рюле М. Как изменяется размер частиц при гранулировании. *Комбикорма*. 2020;(6):34-36. Режим доступа: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/06_20/2020_06_34-36.pdf EDN: CCZYPO
Ryule M. How particle size changes during pelleting. *Kombikorma*. 2020;(6):34-36. (In Russ.). URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/06_20/2020_06_34-36.pdf
17. Lisowski A., Matkowski P., Dąbrowska M., Piątek M., Świętochowski A., Klonowski J., Mieszkalski L., Reshietiuk V. Particle size distribution and physicochemical properties of pellets made of straw, hay, and their blends. *Waste and Biomass Valorization*. 2020;11:63-75. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0458-8>
18. Bergström D., Israelsson S., Ohman M., Dahlqvist S. A., Gref R., Boman C., Wasterlund I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Processing Technology*. 2008;89(12):1324-1329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.001>
19. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*. 2006;30(7):648-654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>
20. Stelte W., Holm J. K., Sanadi A. R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass Bioenergy*. 2011;35(2):910-918. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.003>
21. Froetschner J. Conditioning Controls Quality of Pellet. *Feed Tech*. 2006;10(6):12-5. URL: <https://vk.cc/chaXTz>
22. Moritz J. S., Cramer K. R., Wilson K. J., Beyer R. S. Feed manufacture and feeding of rations with graded levels of added moisture formulated to different energy densities. *Journal Applied of Poultry Research*. 2003;12(3):371-381. DOI: <https://doi.org/10.1093/japr/12.3.371>
23. Abdollahi M. R., Ravindran V., Wester T. J., Ravindran G., Thomas D. V. Effect of improved pellet quality from the addition of a pellet binder and/or moisture to a wheat-based diet conditioned at two different temperatures on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broilers. *Animal Feed Science and Technology*. 2012;175(3-4):150-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.05.001>
24. Cutlip S. E., Hott J. M., Buchanan N. P., Rack A. L., Latshaw J. D., Moritz J. S. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value. *Journal Applied of Poultry Research*. 2008;17(2):249-261. DOI: <https://doi.org/10.3382/japr.2007-00081>

25. Ungureanu N., Vladut V., Voicu G., Dinca M. N., Zabava B. S. Influence of biomass moisture content on pellet properties – review. *Engineering for Rural Development*. 2018;17:1876-1883. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N449>
26. Colovic R., Vukmirovic D., Matulaitis R., Bliznikas S., Uchockis V., Juskiene V., Levic J. Effect of die channel press way length on physical quality of pelleted cattle feed. *Food & Feed Research*. 2010;37(1):1-6. URL: http://foodandfeed.fins.uns.ac.rs/uploads/Magazines/magazine_37/effect-of-die-channel-press-way-length-on-physical-quality-of-pelleted-cattle-feed.pdf
27. Abadi M. H. M. G., Moravej H., Shivazad M., Torshizi M. A. K., Kim W. K. Effect of different types and levels of fat addition and pellet binders on physical pellet quality of broiler feeds. *Poultry Science*. 2019;98(10):4745-4754. DOI: <https://doi.org/10.3382/ps/pez190>
28. Gehring C. K., Lilly K. G. S., Shires L. K., Beaman K. R., Loop S. A., Moritz J. S. Increasing mixer-added fat reduces the electrical energy required for pelleting and improves exogenous enzyme efficacy for broilers. *Journal of Applied Poultry Research*. 2011;20(1):75-89. DOI: <https://doi.org/10.3382/japr.2009-00082>
29. Lamichhane S., Sahtout K., Smillie J., Scott T. A. Vacuum coating of pelleted feed for broilers: opportunities and challenges. *Animal Feed Science and Technology*. 2015;200:1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.11.015>
30. Massuquetto A., Durau J. F., Schramm V. G., Netto M. T., Krabbe E. L., Maiorka A. Influence of feed form and conditioning time on pellet quality, performance and ileal nutrient digestibility in broilers. *Journal of Applied Poultry Research*. 2018;27(1):51-58. DOI: <https://doi.org/10.3382/japr/pfx039>
31. Segerstrom M., Larsson S. H. Clarifying sub-processes in continuous ring die pelletizing through die temperature control. *Fuel Processing Technology*. 2014;123:122-126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.02.008>
32. Abdollahi M. R., Ravindran V., Wester T. J., Ravindran G., Thomas D. V. Influence of conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy, ileal digestibility of starch and nitrogen and the quality of pellets, in broiler starters fed corn and sorghum-based diets. *Animal Feed Science and Technology*. 2010;162(3-4):106-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2010.08.017>
33. Kulig R., Laskowski J. Effect of conditioning parameters on pellet temperature and energy consumption in the process of plant material pressing. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*. 2008;8a:105-111. URL: https://www.researchgate.net/publication/237283167_EFFECT_OF_CONDITIONING_PARAMETERS_ON_PELLET_TEMPERATURE_AND_ENERGY_CONSUMPTION_IN_THE_PROCESS_OF_PLANT_MATERIAL_PRESSING
34. Netto M. T., Massuquetto A., Krabbe E. L., Surek D., Oliveira S. G., Maiorka A. Effect of conditioning temperature on pellet quality, diet digestibility, and broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*. 2019;28(4):963-973. DOI: <https://doi.org/10.3382/japr/pfz056>
35. Dos Santos R. O. F., Bassi L. S., Schramm V. G., da Rocha C., Dahlke F., Krabbe E. L., Maiorka A. Effect of conditioning temperature and retention time on pellet quality, ileal digestibility, and growth performance of broiler chickens. *Livestock Science*. 2020;240:104110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104110>
36. Picchio R., Latterini F., Venanzi R., Stefanoni W., Suardi A., Tocci D., Pari L. Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. *Energies*. 2020;13(11):2937. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112937>
37. Благов Д. А., Митрофанов С. В., Панферов Н. С., Тетерин В. С., Пестряков Е. В. Пресс-грануляторы, технические особенности, влияние гранулирования на качественные показатели корма. Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2020;(9):57-66. DOI: <https://doi.org/10.33920/sel-05-2009-06> EDN: IPINKL
- Blagov D. A., Mitrofanov S. V., Panferov N. S., Teterin V. S., Pestryakov E. V. Press granulators, technical features, influence of granulation on qualitative characteristics of feed. *Kormlenie sel'skokhozyaystvennykh zhivotnykh i kormoproizvodstvo*. 2020;(9):57-66. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33920/sel-05-2009-06>
38. Agar D. A., Rudolfsson M., Kalen G., Campargue M., Perez D. D. S., Larsson S. H. A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass. *Fuel Processing Technology*. 2018;180:47-55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.006>
39. Crawford N. C., Ray A. E., Yancey N. A., Nagle N. Evaluating the pelletization of “pure” and blended lignocellulosic biomass feedstocks. *Fuel Processing Technology*. 2015;140:46-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.023>
40. Whittaker C., Shield I. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;71:1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>
41. Faborode M. O., O'Callaghan J. R. Theoretical analysis of the compression of fibrous agricultural materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1986;35(3):175-191. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8634\(86\)80055-5](https://doi.org/10.1016/S0021-8634(86)80055-5)
42. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. *Canadian Biosystems Engineering*. 2004;46(3):55-61. URL: <https://library.csbe-scgab.ca/docs/journal/46/c0404.pdf>
43. Alakangas E., Paju P. Wood pellets in Finland – technology, economy, and market. OPET Report 5. Jyväskylä: VTT Processes, 2002. 85 p. URL: https://cris.vtt.fi/ws/files/52184787/wood_pellet_in_finland_compress.pdf
44. Jackson J., Turner A., Mark T., Montross M. Densification of biomass using a pilot scale flat ring roller pellet mill. *Fuel Processing Technology*. 2016;148:43-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.024>
45. Nielsen N. P. K., Gardner D., Poulsen T., Felby C. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets. *Wood and Fiber Science*. 2009;41(4):414-425. URL: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/469/469>

46. Кувшинов В. В., Муханов Н. В., Телегин И. А., Марченко С. А. Поведение системы «канал матрицы-спрессованные монолиты» в процессе их нагрева. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2020;(4):85-90. DOI: <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2020-33-4-85-90> EDN: QLBRYG
- Kuvshinov V. V., Mukhanov N. V., Telegin I. A., Marchenko S. A. Behavior of the "matrix channel -pressed monoliths" system during their heating. *Agrarnyy vestnik Verkhnevolz'ya = Agrarian Journal of Upper Volga Region*. 2020;(4):85-90. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35523/2307-5872-2020-33-4-85-90>
47. Serrano C., Monedero E., Lapuerta M., Portero H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*. 2011;92(3):699-706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>
48. Mostafa M. E., Hu S., Wang Y., Su S., Fu X., Elsayed S. A., Xiang J. The significance of pelletization operating conditions: An analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;105:332-348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>
49. Tumuluru J. S. Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stover. *Biosystems Engineering*. 2014;119:44-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.11.012>
50. Safran B., Radmanovic K., Jug M., Lucic Beljo R., Lojen T., Risovic S. Influence of pressing temperature and additive on mechanical properties of wood pellets. *Natural Resources, Green Technology & Sustainable Development*. 2018;3:141-148. URL: <https://www.sumins.hr/wp-content/uploads/2019/07/green3-proceedings.pdf>
51. Кошак Ж., Кошак А. Влияние состава комбикормов на удельную энергоёмкость процесса гранулирования. *Комбикорма*. 2012;(2):63-64. Режим доступа: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/2_12/02_2012_063-064.pdf EDN: OSKGTH
- Koshak Zh., Koshak A. Influence of feed composition on the specific energy intensity of the pelleting process. *Kombikorma*. 2012;(2):63-64. (In Russ.). URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/2_12/02_2012_063-064.pdf
52. Клименко А., Гуцева-Митропольская А. Качество гранул: проблемы и предложения по их решению. *Комбикорма*. 2016;(7-8):40-42. Режим доступа: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/7-8_16/07-08_2016_40-42.pdf EDN: WHHOUT
- Klimenko A., Gushcheva-Mitropolskaya A. Pellet quality: problems and solutions. *Kombikorma*. 2016;(7-8):40-42. (In Russ.). URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/7-8_16/07-08_2016_40-42.pdf
53. Ivanov M. Feed pellet quality and productivity. *Borregaard LignoTech*, 2017. URL: <https://vk.cc/chs8F1>
54. Nielsen S. K., Mando M. Experimental and numerical investigation of die designs in biomass pelleting and the effect on layer formation in pellets. *Biosystems Engineering*. 2020;198:185-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.08.010>
55. Mediavilla I., Esteban L. S., Fernandez M. J. Optimisation of pelletisation conditions for poplar energy crop. *Fuel Processing Technology*. 2012;104:7-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.05.031>
56. Misljenovic N., Colovic R., Vukmirovic D., Brlek T., Bringas C. S. The effects of sugar beet molasses on wheat straw pelleting and pellet quality. A comparative study of pelleting by using a single pellet press and a pilot-scale pellet press. *Fuel Processing Technology*. 2016;144:220-229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.01.001>
57. Hu J., Lei T., Shen S., Zhang Q. Specific energy consumption regression and process parameters optimization in wet-briquetting of rice straws at normal temperature. *BioResources*. 2013;8(1):663-675. URL: <https://vk.cc/cjosiF>
58. Nielsen S. K., Mandø M., Rosenørn A. B. 1D Model for investigation of energy consumption and wear in die designs used for biomass pelleting. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*. 2018;26:550-558. DOI: <https://doi.org/10.5071/26thEUBCE2018-2CO.13.1>
59. Wu K., Shi S. J., Wang Y. L., Peng B. B. FEA simulation of extruding feed through die hole in pelleting process. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;109:350-354. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.109.350>
60. Януков Н., Волков А., Лукина Д., Прохорова Л., Брыгин В. Повышение эффективности работы матричного пресс-гранулятора. *Комбикорма*. 2020;(2):43-45. DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2020-02-2-093> EDN: OSMDAZ
- Yanukov N., Volkov A., Lukina D., Prokhorova L., Brygin V. Improving the efficiency of the die pelletizer. *Kombikorma*. 2020;(2):43-45. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25741/2413-287X-2020-02-2-093>
61. Thek G., Obernberger I. *The Pellet Handbook: The production and thermal utilization of biomass pellets*. London: Routledge, 2010. 592 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
62. Monedero E., Portero H., Lapuerta M. Pellet blends of poplar and pine sawdust: Effects of material composition, additive, moisture content and compression die on pellet quality. *Fuel Processing Technology*. 2015;132:15-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.013>
63. Stelte W., Clemons C., Holm J. K., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B., Sanadi A. R. Fuel pellets from wheat straw: the effect of lignin glass transition and surface waxes on pelletizing properties. *Bioenergy Research*. 2012;5(2):450-458. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-011-9169-8>
64. Adapa P., Tabil L., Schoenau G., Opoku A. Pelleting characteristics of selected biomass with and without steam explosion pretreatment. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2010;3(3):62-79. DOI: <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.03.062-079>
65. Theerarattananoon K., Xu F., Wilson J., Ballard R., Mckinney L., Staggenborg S., Vadlani P., Pei Z. J., Wang D. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*. 2011;33(2):325-332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.014>
66. Puig-Arnabat M., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. Validation of a multiparameter model to investigate torrefied biomass pelletization behavior. *Energy and Fuels*. 2017;31(2):1644-1649. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02895>

67. Holm J. K., Stelte W., Posselt D., Ahrenfeldt J., Henriksen U. B. Optimization of a multiparameter model for biomass pelletization to investigate temperature dependence and to facilitate fast testing of pelletization behavior. *Energy and Fuels*. 2011;25(8):3706-3711. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef2005628>
68. Kaliyan N., Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*. 2009;33(3):337-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
69. Shuijuan S., Kai W., Binbin P., Shuanhu W., Yu S. Mechanical model and FEA of ring die of three-roller pellet mill. In: 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. IEEE, 2010. pp. 76-80. DOI: <https://doi.org/10.1109/MACE.2010.5535988>
70. Holm J. K., Henriksen U. B., Hustad J. E., Sorensen L. H. Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hard-wood pellets production. *Energy and Fuels*. 2006;20(6):2686-2694. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef0503360>
71. Xia X., Sun Y., Wu K., Jiang Q. Modeling of a straw ring-die briquetting process. *BioResources*. 2014;9(4):6316-6328. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.6316-6328>
72. Полищук В. Ю., Панов Е. И., Василевская С. П. Определение влияния на энергоёмкость гранулирования радиусов рабочих органов пресс-гранулятора. *Тракторы и сельхозмашины*. 2019;(6):86-92. DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-6-86-92> EDN: MVYLAC
- Polishchuk V. Yu., Panov E. I., Vasilevskaya S. P. Determination of the effect on the energy intensity of granulation of the radii of the working bodies of the press granulator. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2019;(6):86-92. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-6-86-92>
73. Wu K., Shi S., Ding W., Peng B., Sun Y. Influence of die speed on the energy consumption in the pelleting process. 2010 International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering. IEEE, 2010. pp. 247-250. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCIE.2010.70>

Сведения об авторах

Брагинец Сергей Валерьевич, доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnizk30@mail.ru; доцент кафедры «Проектирование и технический сервис транспортно-технологических систем», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344010, e-mail: spu-24@donstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

✉ **Бахчевников Олег Николаевич**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина, д. 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnizk30@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Деев Константин Александрович, инженер отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина, д. 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnizk30@mail.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

Information about the authors

Sergey V. Braginetz, DSc in Engineering, leading researcher, the Department of Plant Products Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnizk30@mail.ru, associate professor at the Department «Design and Maintenance of Transport and Technological Systems», Don State Technical University, 1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344010, e-mail: spu-24@donstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

✉ **Oleg N. Bakhchevnikov**, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Plant Products Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnizk30@mail.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Konstantin A. Deev, engineer, the Department of Plant Products Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnizk30@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4160-0382>

✉ – Для контактов / Corresponding author