

УДК 662.63:620.952  
DOI

## МОДУЛЬНЫЙ ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ПЕЛЛЕТ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Бунецкий В.А.<sup>1</sup>, Зыков А.В.<sup>2</sup>, Войтенко А.К.<sup>2</sup>, Безбах И.В.<sup>2</sup>, Кашкарев А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «BM-Engineering»,

<sup>2</sup>Одесская Национальная Академия Пищевых Технологий

**Аннотация.** В работе решается задача создания в Украине современного уровня проекта предприятия по тоннажному производству пеллет из биомассы. Основной технической концепцией такого проекта является блочно-модульный принцип комплектации технологической линии, узла приемки сырья и энергетического комплекса. В проекте использованы передовые идеи экономичного функционирования сложных энергоемких производств – альтернативные источники энергии и глубокая утилизация теплоты теплоносителей, возврат их энергии в технологию. Основным энергоносителем производства являются пеллеты собственного производства. В качестве тепловых утилизаторов проектируются аппараты на термосифонах. Именно такие аппараты не имеют альтернатив в современных системах утилизации теплоты газов для нагрева воздушных потоков. Декомпозиция производственной линии, структуры модулей обоснованы технологически, энергетически и экономически.

Для этого рассмотрена современная классификация рынка пеллет, его три наиболее ёмких сегмента. Рассмотрена классификация качественных характеристик пеллет из растительного сырья, требования по их сертификации. Дан анализ современных технологий производства альтернативного топлива из биомассы. Выявлены мировые тенденции развития пеллетных технологий. Исследованы тенденции рынка пеллет по разным сегментам, по странам Европы. Показано, что в настоящее время спрос на пеллеты превышает предложения. Определены проблемы и научно-технические противоречия пеллетных технологий. С одной стороны растет потребность в мощных заводах по производству альтернативного топлива из биомассы. С другой стороны – источники сырья оказываются нестабильными. А это серьезный барьер для строительства крупных заводов. Решение этого противоречия в предлагаемом инновационном проекте – переход на блочно-модульный принцип. В рамках модуля решаются технологические задачи, которые требуют оборудования, соответствующего виду сырья. Предложены модули для механической переработки, сушки, грануляции. Предварительное дробление сырья осуществляется оригинальными дезинтеграторами конструкции авторов. Предложенный проект позволяет в кратчайшие сроки провести монтаж оборудования, его передислокацию в другой сырьевой район, повысить тоннажность производства, перевести его на другой вид сырья.

**Ключевые слова.** Пеллетные технологии, энергоэффективность, дезинтеграторы, барабанная сушилка, грануляторы.

## MODULAR PRINCIPLE OF PELLETS FROM VEGETABLE RAW MATERIALS PRODUCTION SETUP

Bunetskiy V.A.<sup>1</sup>, Zykov A.V.<sup>2</sup>, Voitenko A.K.<sup>2</sup>, Bezbakh I.V.<sup>2</sup>, Kashkarev A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BM-Engineering Ltd,

<sup>2</sup>Odessa National Academy of Food Technologies

**Abstract.** The work solves the problem of creating in Ukraine a modern-level project of an enterprise for tonnage production of biomass pellets. The main technical concept of such project is the block-modular principle of a complete set of a process line, a raw material receiving station and an energy complex. The project used advanced ideas of economical functioning of complex energy-intensive industries - alternative energy sources and deep utilization of heat-carrier heat, returning their energy to the technology. The main energy source of production is own-produced pellets. As thermal utilizers, devices on thermosiphons are designed. It is these devices that have no alternatives in modern systems of utilization of the heat of gases for heating air currents. Decomposition of the production line, the structure of the modules grounded technologically, energy and economically. For this, the modern classification of the pellet market, its three most capacious segments, is considered.

The classification of quality characteristics of vegetable pellets, the requirements for their certification are considered. The analysis of modern technologies for the production of alternative fuels from biomass is given. Revealed global trends in the development of pellet technologies. The trends of the pellet market in different segments, across

*Europe are studied. It is shown that at present the demand for pellets exceeds supply. The problems and scientific and technical contradictions of the pellet technologies are identified. On the one hand, there is a growing need for powerful plants for the production of alternative fuels from biomass. On the other hand, the sources of raw materials are unstable. And this is a serious barrier for the construction of large plants. The solution to this contradiction in the proposed innovative project is the transition to a block-modular principle. Within the module, technological tasks are solved that require equipment corresponding to the type of raw material. Modules for mechanical processing, drying, and granulation are proposed. Pre-crushing of raw materials is carried out by the original disintegrators of the authors design. The proposed project allows in the shortest possible time to install equipment, relocate it to another raw material area, increase the production tonnage, and transfer it to another type of raw material.*

**Keywords:** Pellet technologies, energy efficiency, disintegrators, drum sush, granulators.

**Введение.** Мировые энергетические проблемы вызвали повышенный спрос на альтернативные источники энергии, среди которых динамично растет популярность агропеллет. Интерес к агропеллетам в первую очередь экономичен, так как сырье в настоящее время по большей части еще малоценное. Такая ситуация характерна для Западной Европы [1]. Особенно перспективный вопрос агропеллет для фермеров, поскольку обеспечит их новыми источниками дохода за счет перехода от дорогих ископаемых ресурсов, к энергии, полученной из отходов. Цена, развитие энергетического сектора биомассы делает пеллеты все более привлекательной альтернативой для бытового и даже городского отопления.

Сельскохозяйственные отходы, особенно солома, побочные продукты и специальные многолетние культуры, являются сегодня явным ресурсом для разработки пеллет. Среди этих сельскохозяйственных биомасс в настоящее время пригодны для грануляции солома, зерновые продукты, мискантус, ядра оливок и пр [1]. Эти биомассы имеют низкое содержание влаги, что устраняет необходимость в сушке, что часто проблематично для уплотненной древесины. Древесина, как топливо, громоздко и создает логистические проблемы. В зависимости от типов почв, используемых удобрений и периодов сбора, они могут иметь более высокие или более низкие уровни азота, серы, хлора и калия, чем древесина [1].

Тем не менее, все еще существуют технические и экологические проблемы, которые необходимо решить, и решения будут проходить через уменьшение количества агрессивных газов за счет добавок; смеси сырья для снижения зольности и совершенствования методов сжигания для ограничения оксидов азота (NOx). Актуален вопрос создания современного оборудования для производства пеллет.

#### **Анализ литературных источников и формулировка проблемы**

Технологиям и технике производства пеллет посвящено значительное количество научных исследований, и их количество стремительно растет. Рассматриваются вопросы эффективности их использования [2], оборудования [3], технологии [4]. Серьезный аналитический обзор, по проблемам пеллетных производств, выполнен в работе [5]. Производство древесных гранул включает в себя следующие этапы: сбор и предварительная обработка сырья (окорка при необходимости и измельчение); сушка опилок (используются две технологии: технология сушильного барабана, питаемого генератором горячего воздуха, или технологии сушики ковра, питаемой бойлером с горячей водой, или даже когенерацией); переработки; гранулирование, охлаждение и расфасовка продукта; хранение.

Грануляционная установка мощностью 60-80 000 тонн в год требует значительные инвестиции, порядка 10-12 миллионов евро. Термин «древесные гранулы» фактически объединяет несколько различных продуктов для разных рынков. Европейские стандарты определяют аналитические характеристики, используемые методы измерения и исходные материалы, которые могут быть включены в каждый класс гранул. Международная нормативная база (ISO), которая в настоящее время дорабатывается, вскоре заменит европейские стандарты (EN) [5]. В этой работе классифицированы международные рынки древесных гранул. Представлена классификация и их качества. Показано, что существует три основных рынка древесных гранул. Наиболее обширный – это рынок топлива для отопления жилых помещений. Он представляется древесными гранулами высшего сорта (класс A1), изготовленными из первичной древесины.

Содержание золы в них очень низкое (<1%), а теплотворная способность высокая (PCI > 4,6 кВтч / кг = 16,5 МДж/кг и часто ближе даже к 5 кВтч/кг) [5]. Пеллеты, как правило, очень эффективны, и генерируют очень мало загрязняющих выбросов (частиц, летучих органических соединений). Котлы на пеллетах имеют одинаковые выходы и выбросы пыли менее 150 мг/м<sup>3</sup> при 13% O<sub>2</sub>. В зависимости от их мощности максимальные концентрации их паров составляют 2500 или 3000 ч/млн CO и 80 или 100 мг/м<sup>3</sup> летучих органических соединений. Практические, экологические и экономические преимущества древесных гранул объясняют его экспоненциальный успех. На мировом рынке гранул премиум-класса доминирует Европа (85%) [5]. В настоящее время он составляет около 8 млн. тонн и, как ожидается, достигнет 16 млн. тонн в 2020 году, что означает значительный рост (9-10 %/год), но остается совместим с поставками по всему континенту. Италия является крупнейшим потребителем (2 млн. тонн). Французское производство почти исключительно состоит

из гранул премиум-класса. Здесь 70% потребления сжигается в печах, а остальное – в небольших индивидуальных или коллективных котлах [5].

Второй по емкости рынок – это тепловые электростанции [5]. Он требует «промышленные» качественные древесные пеллеты, и существует главным образом в некоторых европейских странах, которые массово производят свою электроэнергию из угля (Англия, Бенилюкс, Польша, Дания, Германия) и которые должны соблюдать коллективные обязательства по производству возобновляемой энергии и сокращению на 20% выбросов CO<sub>2</sub> к 2020 году. Наименее дорогим и быстрым решением является частичная или полная замена угля биомассой. Преимущество гранулы в том, что они хорошо подходят для совместного сжигания с углем. Объемы потенциально велики, но нестабильны, так как они зависят от политических решений и процентных ставок, рассчитанных по ставкам на уголь, газ и CO<sub>2</sub>.

Такие рынки уже представляют более 4 млн. Тонн в Европе и должны достичь 14 млн. Тонн в 2020 году, но это также повлияет на другие области, которые также начинают учитывать необходимость борьбы с изменением климата (Корея, Япония) [5]. Эти рынки существуют сегодня только благодаря экономической поддержке, оказываемой заинтересованными государствами, которые полностью или частично оплачивают расходы потребителя за электроэнергию.

Электрическая эффективность остается низкой (30-40%) в единицах, которые не ценят произведенное тепло, и мы можем подвергнуть сомнению возможность такого масштабного использования возобновляемой энергии, которая недоступна в неограниченном количестве. Так, единственная тепловая электростанция RWE в Тилбери в Великобритании требует поставки 2,5 млн. Т / год древесных гранул). При этом, многие "мега-фабрики" из более чем 500 000 тонн годовой производственной мощности были построены или планируются в странах с обильными и дешевыми лесными ресурсами, таких как США, Канада, Россия, в ожидании Бразилии, Австралии и некоторых африканских стран. Европейские производители древесных гранул мало заинтересованы в том, чтобы выходить на такие рынки (большие объемы, низкие цены, неопределенная долговечность).

Третий рынок – это коллективное и промышленное отопление. Промежуточные категории гранул предусмотрены в стандартах для этого третьего сегмента, но на них не распространяется эффективное производство. Таким образом, значительная часть этого рынка (небольшие заводы) представлены гранулами премиум класса. В настоящее время этот сегмент, находящийся в зачаточном состоянии, как ожидается, продемонстрирует очень сильный рост и к 2020 году достигнет 5 миллионов тонн в Европе [5]. Пеллетное топливо значительно дороже, чем щепа. Тем не менее, в целом решение для пеллет является привлекательным во многих ситуациях, если принять во внимание другие затраты, связанные с производством МВтч теплоты (инвестиции, трудозатраты, обслуживание). Гранулят особенно подходит для установок мощностью менее 500 кВт, с высокой периодичностью, с небольшим пространством для хранения или ограниченным доступом.

Различные исследования пытаются определить потребление древесных гранул к 2020 году. Они существенно различаются в оценке промышленного рынка для производства электроэнергии. Наиболее реалистичные оценки указывают на мировой рынок от 50 до 60 млн. тонн окатышей к 2020 году (14 млн. Тонн в 2010 году), из которых 35 млн. тонн только для Европы (12 млн. тонн в 2010 году). Потребуется импорт от 15 до 20 млн. Тонн, в основном промышленные пеллеты, хотя в настоящее время они не превышают 3 млн. Тонн. Поэтому международная торговля значительно укрепит. В 2010 году только 5 стран произвели более 1 млн. тонн в год (США, Канада, Германия, Швеция и Россия), в то время как 70% мирового спроса приходилось на 6 стран, каждая из которых потребляла более 1 млн. Тонн в год (Швеция, Дания, США, Нидерланды, Италия и Германия).

Целью работы является разработка универсальных комплексов модульного типа для производства пеллет из различного растительного сырья.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Научно-техническая гипотеза разработки формулируется следующим образом. Создание производственной базы по переработке биомассы на пеллеты блочно-модульного типа позволит сократить сроки монтажа оборудования и запуска производства, упростит задачи эксплуатации, позволит без серьезных проблем проводить передислокацию производства в другой регион, перестраиваться на другой вид биосырья.

Обосновано, что для решения поставленной задачи целесообразен следующий набор: модуль приемки сырья; модуль измельчения; модуль сушки; модуль сбора сухого сырья; модуль термовлажностной обработки; модуль грануляции и модуль энергетический.

Такая декомпозиция производства позволит осуществлять гибкое использование оборудования в течение длительного срока функционирования, не критично к текущим ценам на сырье, легко перестраивается на другой вид растительного сырья. Позволяет наращивать производство путем установки дополнительных модулей.

Рассмотрим структуру основных модулей. В целом линия производства пеллет из древесного материала состоит из следующих технологических участков: участок приёмки сырья, участок измельчения сырья, участок сушки, участок термовлажностной обработки, участок грануляции и энергетический участок.

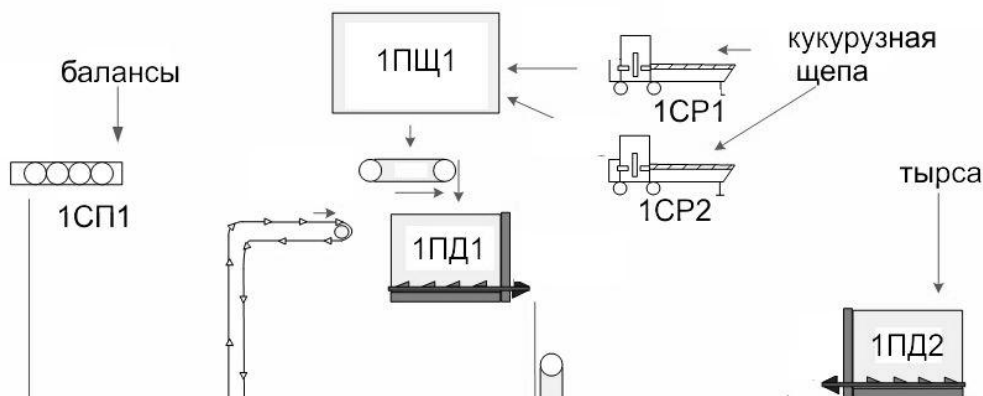
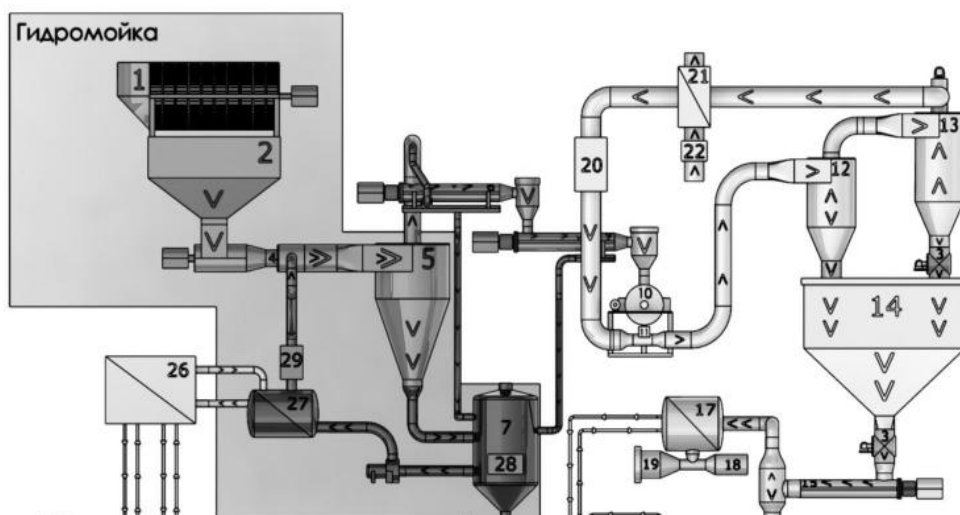


Рис. 1 – Участок приёмки сырья

Участок приёмки сырья (рис.1) предназначен для подачи разного типа древесного материала на соответствующее оборудование участка измельчения (рис.3). Так тырса при помощи подвижного дна 1ПД2 подается непосредственно на измельчитель дисковый тонкого помола 2ИТП1.

Кукурузная щепа в секции приёмки сырья проходит предварительную обработку в соломорезах 1СР1 и 1СР2 и блоке гидромойки щепы (рис.2) где щепа, пройдя через просеиватель 1, смешивается с подогретой водой для очистки от загрязнений. В гидроциклоне 5 происходит разделение отмытой щепы от твердых загрязнений, после чего в шнековом водоотделителе 6 и отжимном прессе 9 происходит отделение щепы от моющей среды. Отмытая щепа ленточным транспортером подается в подвижное дно 1ПД1. Сюда же подается и измельченная балансная древесина, которая предварительно измельчается в измельчителе балансов 2ИБ1 на участке измельчения.



1 – просеиватель барабанный; 2 – бункер входной; 4 – СК-смеситель; 5 – гидроциклон; 6 – водоотделитель шнековый; 7 сборник воды; 8 насос; 9 пресс отжимной; 28 тен; 29 тен проточный.

Рис. 2 – Гидромойка

Подаются балансы на участок измельчения при помощи цепного стола подачи 1СП1. Измельченные балансы и (или) отмытая щепа из подвижного дна 1ПД1 при помощи ленточного транспортера подаются на измельчитель щепы 2ИЩ1 участка измельчения.

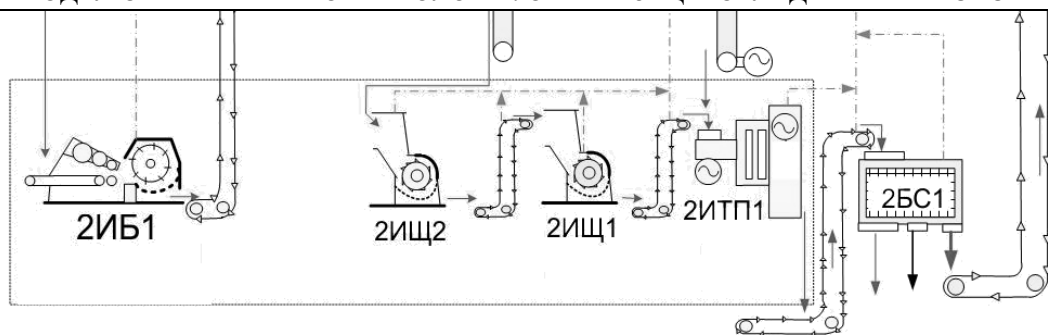
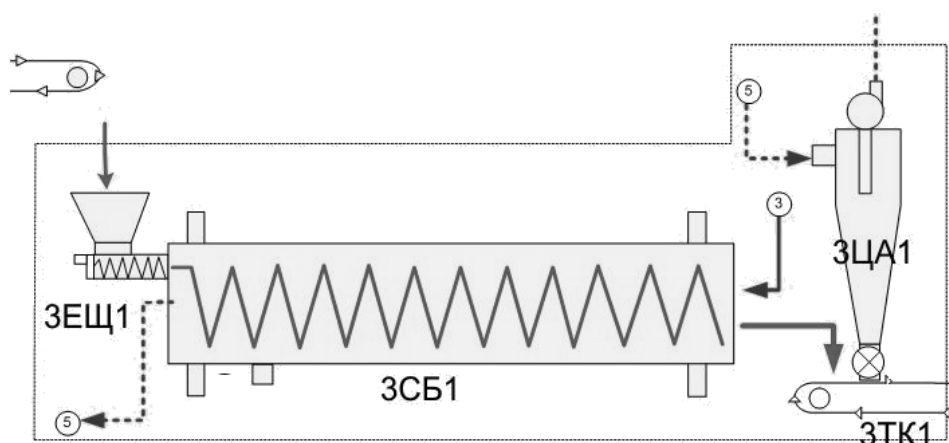


Рис. 3 – Участок измельчения сырья



3 – сушильный агент; 5 – отработанный сушильный агент;

Рис. 4 – Участок сушки

Участок измельчения сырья (рис. 3) предназначен для измельчения до необходимой степени разнородного сырья для чего имеются измельчитель балансов 2ИБ1, измельчители щепы 2ИЩ2 и 2ИЩ1 и измельчитель дисковый тонкого помола 2ИТП1. В зависимости от степени измельчения исходное сырье поступает на соответствующее оборудование участка измельчения.

Измельченное древесное сырье поступает на участок сушки (рис. 4) где происходит удаление влаги из него в барабанной сушилке 3СБ1. Подача сырья в сушилку осуществляется шнековым питателем 3ЕЩ1. Отработанный сушильный агент проходит очистку от древесной пыли в активном циклоне 3ЦА1. Высушенное сырье вместе с уловленной в циклоне пылью ковшевым транспортером 3ТК1 подается в секцию термовлажностной обработки (рис 5)..

Термовлажностная обработка является ключевым этапом, влияющим на качество конечного продукта и энергетические затраты, при производстве поверхностно остеклованных пеллет. Термовлажностная обработка последовательно производится в двухшнековых инактиваторах 5ДИ1 и 5ДИ2. Подогрев сырья производится подачей «глухого» пара в рубашку инактиватора, а

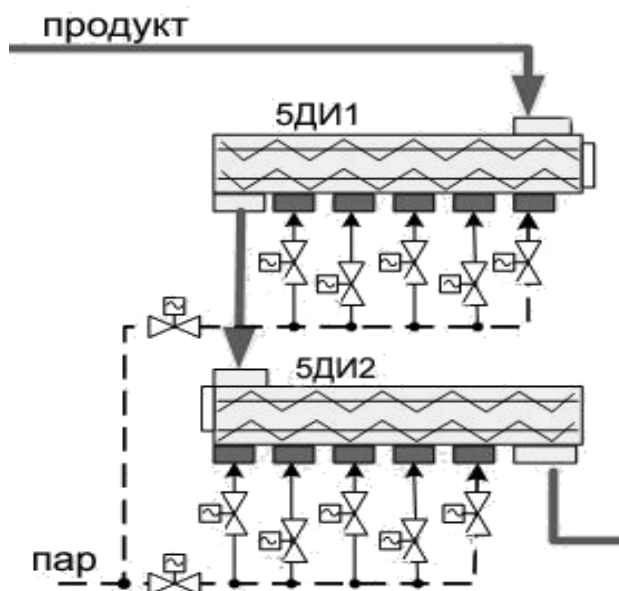


Рис. 5 – Участок термовлажностной обработки

необходимое увлажнение поверхности осуществляется за счет импульсной подачи пара в древесный материал через систему форсунок.

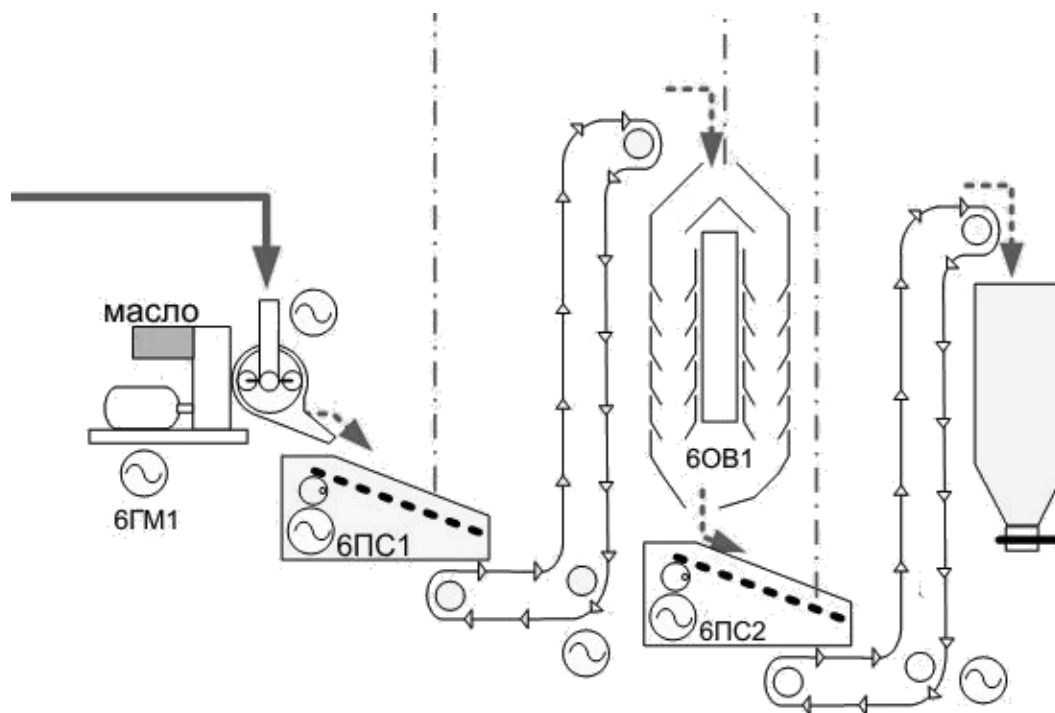
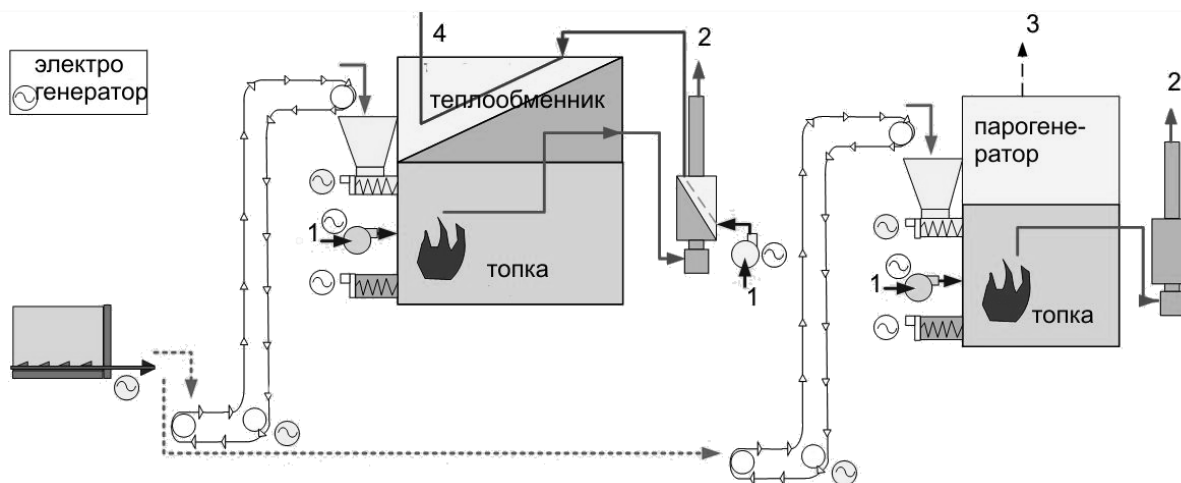


Рис. 6 – Участок грануляции

Увлажненное и подогретое сырье поступает на участок грануляции (рис. 6), где гранулы, полученные в грануляторе 6ГМ1, охлаждаются в воздушном охладителе 6ОВ1 и сортируются на ситовых просеивателях 6ПС1 и 6ПС2.



1 – воздух; 2 – топочные газы; 3 – водяной пар; 4 – сушильный агент;

Рис. 7 – Энергетический участок

Для обеспечения производства тепловой энергией предназначен энергетический участок (рис. 7). Тепловая энергия в виде горячего воздуха требуется для проведения процесса конвективной сушки в барабанной сушилке. Подогрев воздуха осуществляется дымовыми газами, получаемыми при сжигании пеллет собственного производства. Также энергия, получаемая при сжигании пеллет, используется для генерации водяного пара, который требуется для термовлажностной обработки сырья перед гранулированием. Значительно сократить энергозатраты на производство позволяет предварительный подогрев дутьевого воздуха в термосифонном теплоутилизаторе за счет использования энергии отработанного сушильного агента, поки-

дающего барабанную сушилку. В случае необходимости обеспечения полной энергетической автономности производства энергетический участок снабжается модулем когенерации тепловой и электрической энергии.

**Выводы.** Мировой рынок пеллет характеризуется дефицитом. При этом, значительная часть биомассы не перерабатывается. Заводы по тоннажному производству пеллет в Украине отсутствуют. Серьезные научно-технические противоречия по нестабильности объема биомассы, ее вида и эффективности крупных предприятий по их переработке в настоящее время не имеют практического решения.

В работе обоснована гипотеза об экономической, энергетической и технологической эффективности разработки предприятий по переработки биомассы блочно-модульного типа. Предусмотрены модули для механических и сушильных процессов; для тепловлажностной обработки и гранулирования. Отдельный модуль решает задачи обеспечения технологии паром, подогретым воздухом и горячей водой. Энергетическая эффективность производства достигается за счет использования в качестве топлива пеллеты собственного производства и системы глубокой утилизации теплоты технологических выбросов. Модули используют инновационные дезинтеграторы и термосифонные теплоутилизаторы, которые разработаны авторами.

#### References

1. Frédéric Douard (2019). La consommation de granulés de bois en France a passé 1,5 million de tonnes en 2018. Retrieved from: <https://www.bioenergie-promotion.fr> [Accessed 2 Apr. 2019].
2. Consoglobe (2017). Le marché du granulé de bois flambé. *Conso durable et styles de vie engagés. Environnement, éthique, partage, services collaboratifs pour vivre mieux*. Retrieved from: <https://www.consoglobe.com/marche-filiere-granule-de-bois-croissance-cg> [Accessed 2 Apr. 2019].
3. Simplyfeu (2019). Procédé de fabrication des granulés de bois. *Bois de chauffage: buches com-pressées et granulés de bois*. Retrieved from: <https://www.simplyfeu.com/blog/granules-de-bois-pellets/procede-de-fabrication-des-granules-de-bois> [Accessed 2 Apr. 2019].
4. Junginger, M., Goh, C. S., & Faaij, A. (2016). *International bioenergy trade: History, status & outlook on securing sustainable bioenergy supply, demand and markets*. Dordrecht: Springer.
5. ENplus (2019). ENplus Handbook. Retrieved from: <https://enplus-pellets.eu/en-in/> [Accessed 2 Apr. 2019].
6. Burdo, O.G., Smirnov H.F., Terziev, S.G., Zykov A.V. (2014). *Innovatsionnyie teplotehnologii APK na osnove teplovyih trub*. Odessa: INVATs.
7. Dahiya, A. (2015). *Bioenergy: Biomass to biofuels*. Amsterdam: Elsevier, Academic Press.
8. Li, Y., & Khanal, S. K. (2017). *Bioenergy: Principles and applications*. Hoboken, NJ: Wiley Blackwell.
9. Peretyaka, S N. (2010). Perspektivnyi biotopliva v Ukraine. *Naukovi pratsi ONAHT*,1(37), 203-206.
10. ALLIGNO (2019). Prakticheskoe rukovodstvo po sozdaniyu pelletnogo proizvodstva. Maschine nexport GmbH: Retrieved from: <http://www.Alligno.Ru/>
11. Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen, M. T., & Faaij, A. (2011). The European wood pellet markets: Current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*,5(3), 250-278. doi:10.1002/bbb.277
12. Stolarski, M. J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Gulczyński, P., & Mleczek, M. (2013). Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable Energy*,57, 20-26. doi:10.1016/j.renene.2013.01.005
13. Gong, C., Lu, D., Wang, G., Tabil, L., & Wang, D. (2015). Compression Characteristics and Energy Requirement of Briquettes Made from a Mixture of Corn Stover and Peanut Shells. *BioResources*,10(3). doi:10.15376/biores.10.3.5515-5531
14. Mustelie, N. L., Almeida, M. F., Cavalheiro, J., & Castro, F. (2012). Evaluation of Pellets Produced with Undergrowth to be Used as Biofuel. *Waste and Biomass Valorization*,3(3), 285-294. doi:10.1007/s12649-012-9127-5
15. Junginger, H. M., Mai-Moulin, T., Daioglou, V., Fritsche, U., Guisson, R., Hennig, C., Wild, M. (2019). The future of biomass and bioenergy deployment and trade: A synthesis of 15 years IEA Bioenergy Task 40 on sustainable bioenergy trade. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*,13(2), 247-266. doi:10.1002/bbb.1993

Отримано в редакцію 06.05.2019  
Прийнято до друку 18.06.2019

Received 06.05.2019  
Approved 18.06.2019