

## ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ СОЛОМЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ ЗЕРНОВЫХ

Савелий Кухарец, Владислав Шубенко, Анна Голубенко, Наталия Цивенкова

Житомирский национальный агроэкологический университет. г. Житомир  
адрес: бульвар Старый 7, Житомир, 10008, Украина  
e-mail: [nika114@yandex.ru](mailto:nika114@yandex.ru), [thyvenkova@yandex.ru](mailto:thyvenkova@yandex.ru)

**Аннотация.** Приведен анализ ресурсного обеспечения технологических процессов сушения зерна за счет энергетического использования побочной продукции – соломы, совершаемого посредством газификации и сжигания генераторного газа. Приведено экономическое обоснование внедрения газогенераторного оборудования в процесс сушения зерновых.

**Ключевые слова:** зерно, солома, сушение, газификация, энергоэффективность, брикеты, пеллеты, гранулы.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ В ОБЩЕМ ВИДЕ

Сушение зерновых является важным технологическим процессом от показателей исполнения которого зависит сохранность сформированного качества объекта сушения и снижение себестоимости конечного продукта. Задача же использования соломы для сушки зерна остается открытой [5, 18]. Это связано с тем, что например, при производительности сушилки 20 т/час нужно обеспечить сжигание не менее 500 кг/час соломы при тепловой мощности теплогенератора 2000 кВт. Эта техническая задача, на наш взгляд, не может быть решена без разработки технических средств для газификации соломы. Потому схема технологического процесса сушения зерновых с использованием продуктов газификации соломы требует согласования технологических и конструктивных параметров оборудования. Кроме того необходимо определить граничные условия рационального использования технологии газификации.

Практика газификации соломы показывает, что состав генераторного газа значительно зависит от агротехнических характеристик зерновых культур, вида подготовки соломы к газификации, типа газогенератора по характеру процесса газификации, конструкции самого газогенератора и правильности выбора режимов газификации [2, 11]. Очевидно, что к химическому составу газа, который будет использоваться в двигателях внутреннего сгорания, ставят более высокие требования, чем к газу предназначенному для прямого сжигания в котлах и горелках [14]. Поэтому использование генераторного газа в технологическом процессе сушения зерновых может оказаться одним из путей решения вышеуказанной задачи.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Сушение зерновых является важным технологическим процессом, необходимым для качественного и полноценного их хранения. По способу передачи тепла к зерну процесс сушки может быть: конвективным, кондуктивным, радиационным (излучением) и при помощи электротока. Существует также способ сушения без передачи тепла – адсорбционно-контактный.

Для сохранения пищевых и семенных качеств зерновых при дальнейшем их хранении важным является соблюдение технологических режимов сушения.

Сушение зерновых за счет сжигания соломы специфично из-за низкой плотности и неравномерности полученного теплового потока, что не позволяет обеспечить качественный результат в процессе сушения зерна [19, 10, 8, 15].

Режимы сушения могут существенно отличаться не только в зависимости от культуры но и от дальнейшего предназначения зерна. Так, например, сушение зерна кукурузы для крохмалопаточной промышленности проводят при нагревании зерна не выше 460°C [12, 19].

К процессу сушения ставят и повышенные требования по пожарной безопасности. Особенно важно это для масличных культур, например рапса [17].

В Украине солома сельскохозяйственных культур составляет наибольшую долю в структуре потенциала биомассы для энергетических нужд – 43%. Ежегодное ее производство достигает около 7,62 млн. т., из которых только 20% можно использовать в энергетических целях, тогда как в странах ЕС этот показатель достигает 35% [4, 3, 9]. Очевидно, что использование биотоплива для обеспечения энергетической автономности сельскохозяйственного производства (рис.1) связано, в первую очередь, с необходимостью эффективного доведения такого топлива до

концентрированного состояния [4, 13]. Исходя из вышесказанного на основе соломы можно создать мощную энергосырьевую базу с дальнейшим ее использованием в газогенераторных установках.

В Украине производятся газогенераторные установки для газификации соломы, которые можно агрегатировать с сушилками, и использовать генераторный газ для сушения зерновых, а также, прессовое оборудование для производства гранул и брикет соломы [7, 16]. Использование же химико-термической конверсии соломы в агроэкосистемах с производством генераторного газа дает возможность обеспечить частичную энергетическую автономность производства с сохранением плодородности грунтов [6].

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Установление рационального состава линии для сушения зерновой продукции с использованием газогенераторных технологий; определение преимуществ использования таких технологий и границ их практического применения.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс сушения зерновых, его особенности, параметры, которые определяют выбор состава технологического комплекса и исходные характеристики соломы для прямого сжигания и газификации (химический состав, состав и количество загрязняющих компонентов, температурные условия, влажность газа, теплоту сгорания генераторного газа).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследования использовано комплекс методов научного исследования: сравнительный, теоретический и статистический методы, системный метод анализа и синтеза, формальная и аналитическая оптимизация системы использования генераторного газа для сушки зерновых.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Обобщенная схема энергетического использования соломы при помощи газогенераторной установки изображена на рис. 1.

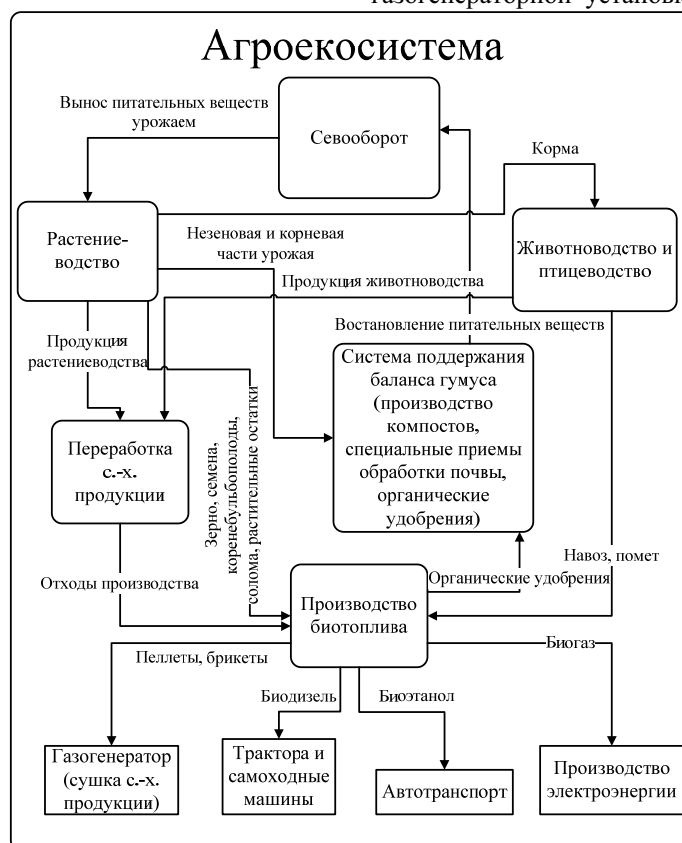


Рис. 1. Структурная схема функционирования агроэкосистемы  
Fig. 1 Structural scheme of agroecosystem functioning

Согласно приведенной схемы сбор соломы является первым звеном технологического процесса ее подготовки к газификации. Как показывают отдельные исследования эффективность использования незерновой части урожая в качестве

энергоносителя значительно зависит от затрат при сборе соломы. Так увеличение затрат на 20% приводит к возрастанию стоимости энергоносителя на 10-15%. В Украине приобрели распространение такие технологии сбора соломы зерновых культур:

измельчение зерноуборочным комбайном, транспортирование тракторными прицепами, стогование с формированием стога; копнирование зерноуборочным комбайном, стягивание тросовой волокушей на край поля, стогование; валковая технология сбора соломы.

Однако все чаще применяют валковую технологию, основным преимуществом которой есть возможность складирования соломы под укрытие, что позволяет повысить качество процесса подготовки соломы к сжиганию и уменьшить транспортные затраты. В Украине для заготовки прессованной соломы применяют в основном прицепные пресс-собиратели рулонного типа собственного производства и импортные. Тюкование значительно уменьшает объем соломы и позволяет механизировать ряд операций при складировании и транспортировке соломы, а также при обслуживании котлов ее прямого сжигания.

Проведенные исследования экономической эффективности сбора соломы свидетельствуют, что минимальные капиталовложения и приведенные затраты получены при сборе соломы в рулоны.

Следующим, согласно рис. 2, процессом является транспортирование соломы от места сбора до пункта ее подготовки, хранения и дальнейшего использования. Транспортирование связано с расходом топлива, что удорожает использование соломы в качестве биотоплива. Следовательно, ограничивающим фактором в данном случае есть расстояние транспортирования (преимущественно до 30 км).

Подготовка соломы к сжиганию содержит несколько традиционных стадий: сушение, измельчение, уплотнение. На начальном этапе переработки, как правило, сталкиваемся с соломой в виде рулонов и тюков, при этом плотность соломы значительно ниже плотности тирсы и щепы. Учитывая, что преимущественное количество соломы собирается механизированным способом, в соломе может присутствовать грунт, который негативно влияет как на процесс подготовки к сжиганию, так и непосредственно на газификацию. При значительном загрязнении соломы предпочтение следует уделять ее прессованию и брикетированию, при незначительном – пеллетированию (гранулированию).

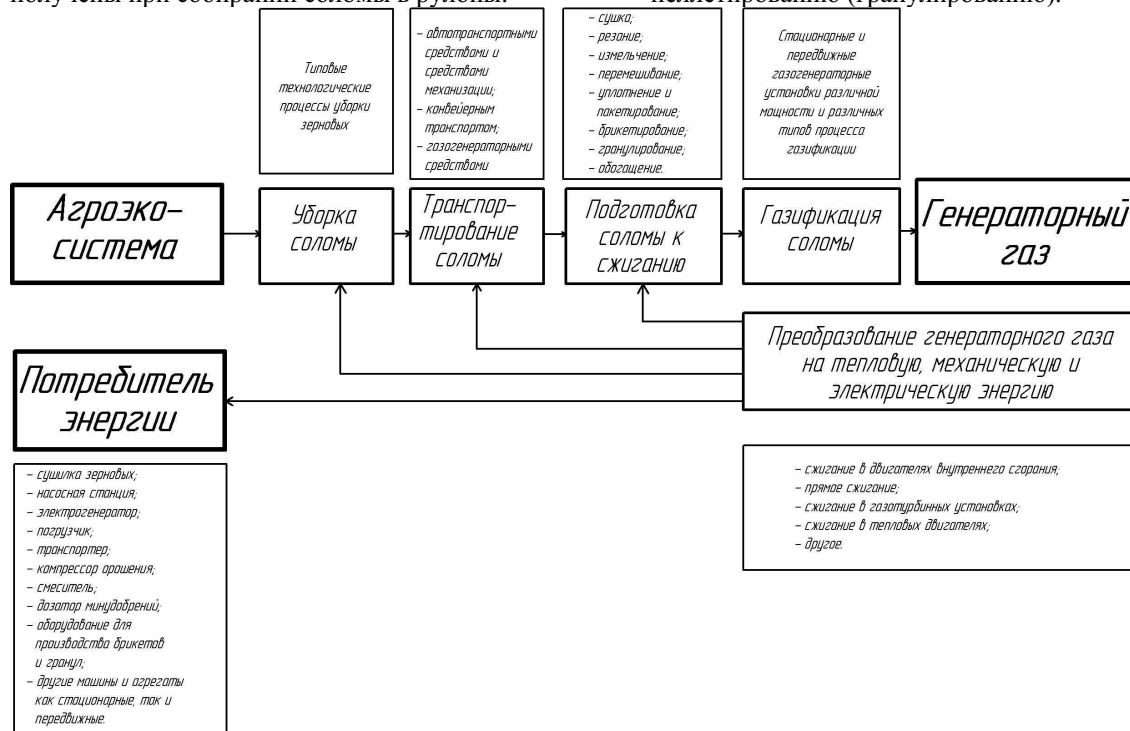


Рис.2 Обобщенная схема технологического процесса энергетического использования сырья растительного происхождения

Fig. 2 The generalized scheme of technological process of biomass energy use

Газификация соломы без предварительной ее подготовки снижает эффективность этого процесса и усложняет загрузку газогенератора.

Газификацию соломы следует проводить в газогенераторах специальной конструкции, которая учитывает способ подготовки топлива, или в модернизированных газогенераторах [1]. Использование соломенных брикетов и пеллет допускает использование газогенераторов для газификации древесины с минимальными

конструктивными изменениями – заменой камеры газификации с фурменным поясом. Однако, для достижения наилучшего качества генераторного газа, предпочтение следует отдавать проектированию газогенераторной установки под конкретные условия.

Приведенная на рис. 2 схема очерчивает широкие границы использования соломы для обеспечения разными видами энергии локальных потребителей, и служит основой для модернизации

существующего или создания нового энергетического комплекса с использованием сырья растительного происхождения.

Одним из наиболее энергоемких процессов переработки зерновых является их сушка. Учитывая то, что солома – один из побочных продуктов производства зерна и ее количество в определенных границах пропорционально количеству полученного товарного продукта, логично проектировать технологический процесс сушения зерновых с использованием собственной соломы. Рассмотрим технологический процесс использования соломы для сушки зерновых начиная с собирания с дальнейшей ее подготовкой к газификации в газогенераторных установках и получением газа. Схема такого процесса представлена на рис. 3.

Для построения схемы, приведенной на рис. 3 был избран распространенный метод сбора соломы с поля – тюковым пресс-собираателем с дальнейшей ее транспортировкой с поля до места подготовки к газификации. Из соломы производим топливные гранулы (пеллеты), которые загружаются в газогенератор.

Учитывая использование технологий газификации для сушки зерновых уместно выбрать конвективный и кондуктивный способы, поскольку именно эти способы позволяют более полно использовать потенциал газификации при использовании побочной продукции.

Важным требованием к процессу сушения есть стабильность температуры агента на протяжении всего цикла, что ставит дополнительные требования к управляемости процесса получения тепла и регулировки его подачи в сушильную камеру. В зависимости от влажности зерна процесс сушки длится на протяжении 20...36 часов. При этом при температуре агента сушения в пределах 120...140°C потребляется около 5 кВт/час на 1 кг испаряемой влаги.

Основной особенностью схемы, (рис. 2) является использование выделенной технологическим оборудованием побочной энергии и использование части генераторного газа в процессе производства пеллет. Тепловая энергия, которая выделяется при газификации, при охлаждении генераторного газа и при сжигании его в ДВС, используется для подсушивания соломы и предварительного подсушивания зерна.

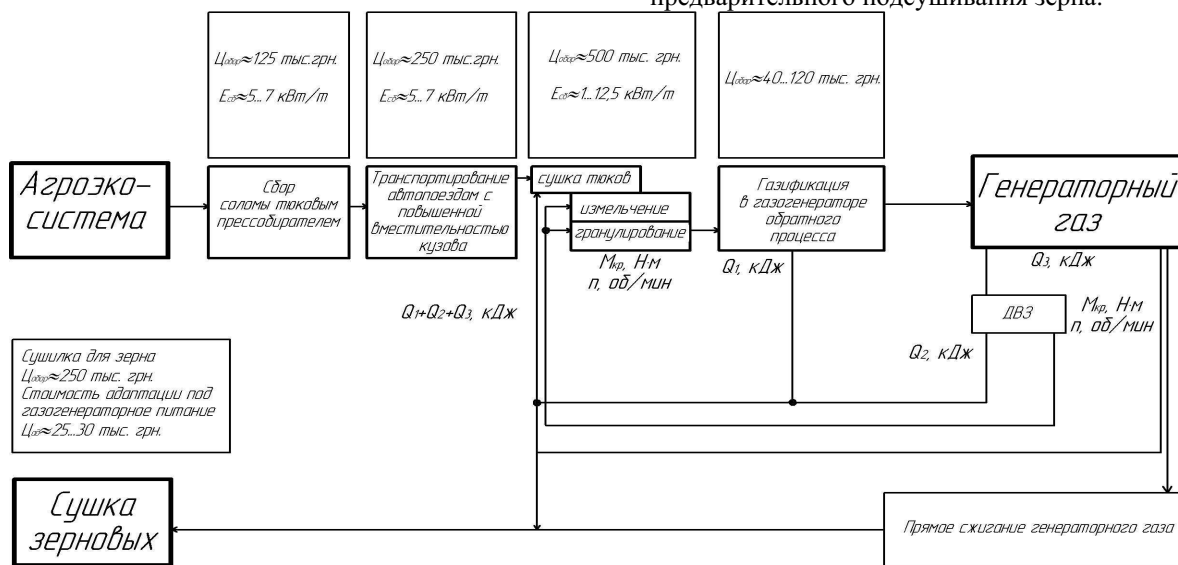


Рис.3. Схема технологического процесса сушки зерновых с энергетическим использованием собственного сырья растительного происхождения

Fig. 3 The scheme of grain drying technological process with energetical using of own biomass

Возможные проблемы использования генераторного газа для сушки зерновых, связаны с нестабильностью процесса газификации и сменой состава газа на протяжении цикла. Также изменяются температурные параметры газификации и ее продуктов, в том числе и количество теплоты, выделяемой при охлаждении генераторного газа. Частично эта проблема может быть решена использованием электрических подогревателей, которые питаются от электрогенератора, работающего на генераторном газе.

Еще одним важным условием реализации схемы, приведенной на рис. 3 является сохранение энергетического баланса внутри системы. Потребность энергии не должна превышать энергетического потенциала соломы, образующейся при производстве необходимого объема зерновых, с учетом энергозатрат на их транспортирование и подготовку.

Учитывая выше сказанное, энергоемкость соломы для энергетических нужд:

$$\mathcal{E}E = \mathcal{E}E_1 + \mathcal{E}E_2 + \mathcal{E}E_3 + \mathcal{E}E_4 \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}E$  – общая энергоемкость соломы для энергетических нужд, МДж/т;  $\mathcal{E}E_1$  – энергоемкость сбора соломы, МДж/т;  $\mathcal{E}E_2$  – энергоемкость транспортирования соломы, МДж/т;  $\mathcal{E}E_3$  – энергоемкость подготовки соломы к дальнейшему использованию в энергетических целях (конверсии), МДж/т;  $\mathcal{E}E_4$  – энергоемкость хранения соломы от сбора до начала использования в качестве энергоносителя, МДж/т.

Приведенная стоимость использования соломы в энергетических целях:

$$C = \sum Z_i + \sum A_i + \sum 3P_i + \sum \mathcal{E}_i \quad (2)$$

где  $C$  – приведенная стоимость использования соломы в энергетических целях, грн.;  $Z_i$  – другие затраты по каждому из этапов энергетического использования соломы, грн.;  $A_i$  – амортизационные отчисления соответствующей группы оборудования на каждом из этапов: сбор, транспортировка, хранение, подготовка, грн.;  $3P_i$  – соответствующая заработная плата, грн.;  $\mathcal{E}_i$  – затраты на энергоносители, грн.

$$A_i = \frac{H_i \cdot B_i}{100\%} \quad (3)$$

где  $A_i$  – амортизационные отчисления соответствующей группы оборудования на каждом из этапов: сбор, транспортировка, хранение, подготовка, грн.;  $B_i$  – балансовая стоимость соответствующей группы оборудования, грн.;  $H_i$  – норма амортизации для соответствующей группы основных средств, % ( $H_{\text{трансп}}=25\%$ ;  $H_{\text{оборуд}}=15\%$ ;  $H_{\text{строений}}=5\%$ );

В целом использование соломы для сушки зерновых целесообразно при таких условиях:

$$\begin{cases} C_{\text{соломы}} \leq C_{\text{традиц}} \\ (Q - Q_{\text{подгот}}) \cdot \eta \geq Q_{\text{суш}} / k_{\text{ост}} \end{cases} \quad (4)$$

где  $C_{\text{соломы}}$  и  $C_{\text{традиц}}$  – стоимость сушки зерна соответственно при помощи собственной соломы и традиционными способами, грн.;  $Q$  – энергия выделяющаяся при энергетическом использовании соломы, МДж;  $Q_{\text{подгот}}$  – энергия затрачиваемая на подготовку соломы для использования энергетических целях, МДж;  $\eta$  – коэффициент полезного действия оборудования;  $Q_{\text{суш}}$  – энергия необходимая для сушки зерна, МДж;  $k_{\text{ост}}$  – коэффициент соломистости (количество растительных остатков припадающих на единицу массы собранного зерна).

Для сушки зерновых с использованием газогенераторных технологий можно откорректировать уравнение теплового баланса процесса сушки согласно рис. 2 с учетом тепла выделяющегося при газификации:

$$(Q + Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_{\text{подг}}) \cdot \eta \geq Q_{\text{суш}} / k_{\text{ост}} \quad (5)$$

где  $Q$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  – тепловая энергия в МДж, выделяющаяся в соответствующих элементах газогенераторной установки: газогенераторе, двигателе внутреннего сгорания, системе фильтрации и охлаждения генераторного газа.

Процессы газификации соломы в подготовленном виде, т.е. в виде брикета или топливных гранул, мало чем существенно отличаются от газификации других видов растительной биомассы, подготовленной соответствующе. В то же время солома имеет повышенную зольность, что вызывает определенные трудности, особенно в газогенераторах с неподвижным слоем топлива. При газификации солома менее склонна к спеканию, однако в слое топлива часто образуются неравномерности выгорания топлива специфически расположенные в поперечном сечении, которые можно объяснить гидродинамическими особенностями прохождения газов дутья через слой свободно насыпанного материала. Большое влияние на выше упомянутые явления имеет насыпная плотность и пористость топливного слоя, неравномерность химического состава топлива и его физико-механических свойств. Именно поэтому важным для обеспечения постоянных характеристик генераторного газа и стабильности процесса газификации в целом является возможность выравнивания состава слоя топлива, особенно в зоне горения и газификации, прежде всего за счет механического влияния.

## ВЫВОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Из выражения (5) следует, что граничные условия для прямого сжигания не исполняются, потому что использование данной технологии для сушки зерновых ограничено необходимостью привлечения добавочного количества топливной биомассы, что в большинстве случаев экономически необоснованно. Использование генераторного газа газифицированной соломы с учетом использования скорректированного теплового баланса делает процесс сушки зерновых возможным в границах использования собственной соломы, доступной для энергетического использования. Это происходит как посредством повышения теплотворной способности генераторного газа в сравнении с прямым сжиганием соломы, так и посредством добавочных резервов энергетических потоков, которые образуются в предложенной схеме.

При газификации сырья растительного происхождения, в том числе и соломы, следует учитывать отличия их химических и физико-механических характеристик, зависящих от вида растений, способа выращивания и сбора, метеорологических условий на протяжении всего периода развития растений и во время сбора сырья растительного происхождения; способов режимов и длительности их хранения. Это ставит определенные условия к конструкции газогенераторов, такие как способность газогенератора определенным образом компенсировать отличия выше упомянутых характеристик за счет внесения определенных конструктивных изменений, при чем возможность совершения этих изменений должна быть заложена в конструкции газогенератора в виде настройки режима газификации.

Научной проблемой есть то что существующих закономерностей недостаточно для определения конструкционно-технологических параметров машин и оборудования для повышения эффективности производства и использования биотоплив путем усовершенствования и обновления экологически безопасных технологических процессов, средств механизации и оборудования.

Требуют решения задания минимизации добавочных затрат на придание биологическим топливам потребительских качеств. Особенную актуальность это приобретает при возрастании уровня механизации производства и цен на высокоэнергетические невозобновляемые источники энергии и одновременном увеличении требований к охране окружающей среды как среды обитания человека.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Frandsen F.J., Nielsen F.J., Jensen P.A., 2-7 ноября 1997. Deposition and corrosion in straw and

coal-straw co-fired utility boilers: Danish experiences // Препринт конференции Engineering Foundation: «Impact of mineral impurities in solid fuel combustion». - Кона, США.

2. Skrifvars B.J., Huppa M., Moilanen A., Lundqvist R., 1996. Characterization of biomass ashes // Application of Advanced Technology to Ash-Related Problems in Boilers. (Eds L. Baxter and R.DeSollar). New York and London: Plenum Press.

3. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., 1998. Обзор технологии сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии. Экотехнологии и ресурсосбережение. - №6. 3-12.

4. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Матвеев Б.Ю., Жовнір М.М., 2006. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні. Промислова теплотехніка. – Т.28, №2. 85-93.

5. Головченко Н.М., Данкевич В.С., Добрякова С.В., Дубровін В.О., Зіміна Г.Р., Зіновчук В.В., Зіновчук Н.В., Карпюк В.М., Кухарець В.В., Кухарець С.М., Ращенко А.В., 2011. Рекомендації щодо створення сільськогосподарського обслуговуючого кооперативу для надання послуг у виробництві та реалізації біопалива в Житомирській області. – Житомир. - 96с.

6. Голуб Г.А., 2005. Проблемы биоконверсии органической сировины в агроценозах. Вісник аграрної науки. - № 1. 43-48.

7. Голуб Г.А., Марус О.А., 2011. Оптимізація параметрів машин та обладнання. MOTROL. – Т. 13В. 15-19.

8. Голуб Г.А., Лук'янець В.О., Субота С.В., 2010. Теплота згоряння та умови спалювання соломи. Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» УААН. – №8. 49-52.

9. Жовнір М., Олійник Є., Чаплигін С., 2007. Альтернативное теплоснабжение за счет использования соломы. Коммунальное хозяйство. - №8. 24-27.

10. Жовнір М., Олійник Є., Чаплигін С., 2007. Солома обігріє села. Агросектор. - № 5. 28-31.

11. Зысин Л.В., Кошкин Н.Л., 1993. Энергетическое использование биомассы на основе термической газификации. Теплоэнергетика. – № 4. 23–26.

12. Комышник Л.Д., Журавлев А.П., Хасанова Ф.М., 1988. «Сушка и хранение семян подсолнечника». – М.

13. Кухарець С.М., 2012. Енергоавтономність агроєкосистем на основі біологічних видів палива. Зб. наук. пр. Спеціальний випуск до VII науково-практичної конференції «Сучасні проблеми збалансованого природокористування». – Кам'янець – Подільський: ПДАТУ. 149-154.

14. Подзноев Г., Абдулгазис У., 2009. Возможности регенерации теплоты в термодинамическом цикле дизеля. MOTROL. – Т. 11А. 272-277.

15. Пугач Л.И., Серант Ф.А., Серант Д.Ф., 2006. Нетрадиционная энергетика – возобновляемые источники, использование биомассы, термохимическая подготовка, экологическая безопасность: учеб. пособ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 347.
16. Самочетов В.Ф., Джорогян Г.А., Никулин Е.И., 1978. «Техническая база хлебоприемных предприятий». – М.
17. Суханов Ф.Д., Артемов И.В., 1987. «Рекомендации по интенсивной технологии возделывания рапса». – Липецк.
18. Черевко Г., Кохана Т., Магійович І., 2006. Альтернативна енергетика агропромислового комплексу України. MOTROL. – Т. 8А. 106-116.
19. Эугениуш Д., 1984. «Послеуборочная обработка зерна». – Познань.

JUSTIFICATION OF THE RATIONALITY OF  
USING OF STRAW GASIFICATION PRODUCTS IN  
THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF GRAIN  
DRYING

**Summary.** The analysis of resource support of grain drying technological processes through the energetical use of by-products such as straw is done. It implements by the way of gasification and generator gas's combustion. The economic justification of implementation of gas-generator equipment in the process of grain drying is done.

**Key words:** grain, straw, drying, gasification, energy efficient, briquettes, pellets, granules.