

В. А. Пашинский,
к.т.н., доцент, Международный государственный экологический
институт им. А. Д. Сахарова БГУ, Минск

Энергетика замкнутого цикла на основе отходов переработки продукции растениеводства в Беларуси

УДК 620.91



Аннотация

Рассмотрены возможности и перспективы использования отходов переработки продукции растениеводства АПК Беларуси для получения энергии замкнутого цикла, произведена энергетическая оценка прогнозируемого валового и технического потенциалов на основе отходов производства крупы, льноволокна и зерна кукурузы. Технический потенциал использования абсолютно сухих костры льна, лузги зерновых и надземной части кукурузы при производстве зерна в Республике Беларусь на энергетические цели в 2031 году составит 565 тыс. т у.т., что обеспечит около 1,5 % потребности в энергоресурсах страны или 10,5 % потребности АПК в энергоресурсах.

Ключевые слова: отходы, лузга, надземная часть кукурузы, костра, энергетический потенциал, оценка потенциала, валовой энергетический потенциал.

Abstract

The possibilities and prospects for using crop processing waste from the Belarusian agricultural sector to generate closed-loop energy are examined. An energy assessment is made of the projected gross and technical potential based on waste from the production of cereals, flax fiber, and corn grain. The technical potential for using absolutely dry flax husks, grain husks, and the above-ground portion of corn in grain production in the Republic of Belarus for energy purposes in 2031 will amount to 565.000 tons of fuel equivalent, which will meet approximately 1.5% of the country's energy needs or 10.5% of the energy needs of the agricultural sector.

Keywords: waste, husk, aboveground part of corn, husk, energy potential, potential assessment, gross energy potential.

Введение

Отходы производства – остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, иных изделий и продуктов, образовавшиеся в течение или по завершении производственного процесса, не используемые в непосредственной связи с этой деятельностью и утратившие свои потребительские свойства.

Отходы делятся на используемые и неиспользуемые. Используемые отходы рассматриваются как вторичные сырьевые ресурсы или отходы, создающие энергетические ресурсы замкнутого цикла. К этой группе отходов относится наибольшее число отходов в АПК (рис. 1), которые могут быть реализованы в дальнейшем в качестве сырья или добавок к нему при производстве новой продукции либо непосредственно (без переработки) как продукция другого назначения, например топливо.

В связи с внедрением прогрессивных технологических процессов, передовой техники, новых видов сырья и с изменением спроса на вырабатываемую продукцию отходы производства могут менять свое назначение. Так, например, для производства тепла и электроэнергии из соломы в Дании, которая является мировым лидером использовании соломы на эти цели, ежегодно используется более 1,3 млн т этого сырья [1, 2]. Энергетической программой Дании предусматривается, что к 2030 году доля возобновляемых источников энергии в общем объеме потребления энерго-ресурсов превысит 50 %, а в Республике Беларусь предусматривается увеличение объема производства энергии из возобновляемых источников энергии к валовому потреблению ТЭР до 9 % в 2035 году, а электроэнергии с 1,8 до 2,6 млрд кВт·ч, что составит 6 % от объема потребления электроэнергии [3].

Сегодня в Республике Беларусь появились технологии, позволяющие использовать в качестве источников энергии растительную биомассу, что позволит не только экономить традиционные виды органического топлива, но и положительно влиять на экологическую обстановку [4, 5].

Проблема использования отходов переработки продукции растениеводства и в первую очередь лузги зерновых культур при производстве различных видов круп, костры льна при производстве льноволокна, надземной части кукурузы при производстве зерна кукурузы на энергетические цели обусловлена значительным ко-



Рис. 1. Отходы АПК Республики Беларусь для получения энергии замкнутого цикла

личеством аспектов технологического, экологического и экономического характера, требующих своего разрешения.

Цель исследования – оценка валового и технического энергетических потенциалов получения энергии замкнутого цикла из отходов переработки продукции растениеводства, таких как лузга зерновых культур, костра льна и надземная часть кукурузы при производстве зерна в Республике Беларусь.

Методика исследований

Оценку валового и технического энергетических потенциалов отходов переработки продукции растениеводства АПК Республики Беларусь выполняли балансовым методом. Для этого надо знать производство i -го вида крупы, льноволокна и зерна кукурузы, высшую теплоту сгорания лузги различных зерновых культур, костры льна и надземной части кукурузы, естественную влажность и техническую доступность к использованию лузги зерновых культур, костры льна и надземной части кукурузы на энергетические цели.

Валовой потенциал энергии биомассы лузги зерновых культур, костры льна и надземной части кукурузы является теоретическим пределом извлечения энергии, из них и определяется путем умножения высшей теплоты сгорания этих отходов на их объем.

Расчет **технического энергетического потенциала** биомассы лузги зерновых культур и костры льна определяли перемножением валового потенциала на соответствующий нормативный коэффициент технически доступного ресурса отходов для энергетических целей, которые зависят от выхода готовой продукции и величины отходов. Нормативный коэффициент технически доступного ресурса надземной части кукурузы для энергетических целей приняли на уровне 0,2 от валового потенциала [6].

Общее количество производства круп различных видов, льноволокна и надземной части кукурузы определяли в соответствии со статистическими данными и данными Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, которые приведены в таблице 1 [7].

Валовой сбор лузги M при производстве круп равен [6]:

$$M = \sum_{i=1}^n B_i K_i, \text{ т} \quad (1)$$

где B_i – масса зерна для производства i -го вида крупы, т;

K_i – технически доступный выход лузги при производстве крупы i -го вида для энергетических целей [8].

Валовой сбор костры льна или надземной части кукурузы M при производстве льноволокна или зерна кукурузы равен [6]:

$$M = B \cdot K, \text{ т} \quad (2)$$

где B – масса переработки льна или надземной части кукурузы, т;

K – технически доступный выход костры или надземной части кукурузы

Таблица 1. Производство льноволокна, зерна кукурузы и круп в Республике Беларусь с 2019 по 2024 год, тыс. т

Наименование продукции	Годы					
	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Льноволокно	46,0	47,8	35,7	47,6	37,2	45,2
Зерно кукурузы	1 053,1	1 015,2	1 148,1	1 073,5	1 642,6	1 956,8
Всего крупы	40,087	47,650	52,898	46,196	40,961	37,935
Овсяная крупа и хлопья	20,524	22,231	23,993	21,297	18,015	16,647
Ячменная	11,424	12,311	15,623	12,803	9,665	9,981
Гречневая	4,709	9,088	9,960	9,056	8,515	6,325
Пшеничная	1,000	0,896	0,839	0,785	0,782	0,644
Пшено	1,284	1,710	1,693	1,207	2,818	2,608
Горох	1,146	1,414	0,790	1,048	1,166	1,730

Таблица 2. Выход продукции и отходов при переработке зерновых культур, льна и початков кукурузы [8-10]

Вид крупы или продукции	Выход крупы, %	Выход лузги, %	Выход льноволокна, %	Выход костры, %	Выход зерна кукурузы, %	Выход надземной части, %
Овсяная крупа и хлопья	52,0	27,0	-	-	-	-
Ячменная крупа	45,0	7,0	-	-	-	-
Гречневая крупа	56...62	19,3-20,8	-	-	-	-
Пшеничная крупа	45,0	7,0	-	-	-	-
Пшено крупа	65,0	15,5	-	-	-	-
Горох крупа	77,0	7,0	-	-	-	-
Лен	-	-	23,4-27,0	73,0-76,6	-	-
Зерно кукурузы	-	-	-	-	45,0	55,0

при производстве льноволокна или зерна кукурузы для энергетических целей [9].

Выход продукции и отходов при переработке зерновых культур, льна и надземной части кукурузы представлен в таблице 2 [8-10].

Высшую теплоту сгорания лузги различных зерновых культур, костры льна и надземной части кукурузы определяли калориметрическим методом с помощью изопериболического калориметра бомбового «БИК-100». Сущность метода оценки теплотворной способности заключается в полном сжигании массы испытуемого топлива в калориметрической бомбе в изотермическом режиме при постоянном объеме. Сжигание происходит в среде сжатого кислорода при измерении подъема температуры калориметрического сосуда за счет те-

плоты, выделившейся при сгорании топлива и вспомогательных веществ, а также при образовании водных растворов азотной и серной кислот в условиях испытания. Для этого аналитическую пробу топлива перемешивали, навеску лузги, костры или стержня початка помещали в заранее взвешенный тигель и взвешивали с погрешностью не более 0,2 мг. Масса навески должна быть не более 1,5 г. Взвешивание массы лузги зерновых, костры льна или стержней початков осуществляли на весах марки КВ с точностью до 10⁻³ г.

Теплоту сгорания топлива в бомбе, кДж/кг, вычисляли по формуле:

$$Q_b^a = \frac{(C_i + cm_c)\Delta t - q_1 m_1}{m}, \quad (3)$$

где C_i – энергетический эквивалент калориметрической системы, кДж/°С;

c – удельная теплоемкость калориметрической жидкости, кДж/(кг·К); m_c – масса калориметрической жидкости, кг; Δt – исправленный прирост температуры в сосуде, °С; q_1 – теплота сгорания проволоки, кДж/кг; m_1 – масса сгоревшей проволоки, равная разности масс проволоки до и после сжигания, кг; m – кажущаяся масса образца топлива, кг.

$$\Delta t = (t_n - t_o + \Delta h), \quad (4)$$

где t_o , t_n – показания термометра, соответствующие температуре зажигания (начальная температура главного периода) и конечной температуре главного периода, °С; Δh – поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой, °С.

$$\Delta h = \frac{V' + V''}{2} n_1 + V'' n_2, \quad (5)$$

где $V' = \frac{t' - t_o}{n_o}$; $V'' = \frac{t_n - t''}{n_n}$ – средние

скорости изменения температуры в начальном и конечном периодах за полуминутный промежуток, °С; t' и t'' – начальная температура начального периода и конечная температура конечного периода, °С; n_1 – число отсчетов главного периода с быстрым повышением температуры (0,3 °С и более); n_2 – то же, с медленным повышением температуры ($n_2 = n - n_1$); n – число измерений в главном периоде.

Высшую теплоту сгорания испытуемой пробы соломы, кДж/кг, вычисляли по формуле:

$$Q_c = Q_b^a - (94S_s^a + \alpha Q_b^a), \quad (6)$$

где 94 – коэффициент, учитывающий теплоту образования серной кислоты из диоксида серы и растворения серной кислоты в воде на 1 % серы, перешедшей при сжигании топлива в серную кислоту, кДж/кг; S_s^a – массовая доля серы в топливе, %; α – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения в воде азотной кислоты, равный для углей, горючих сланцев, торфа, лузги и костры $\alpha = 0,0015$.

Низшую теплоту сгорания топлива, кДж/кг, вычисляли по формуле:

$$Q_n = Q_b^a - 24,42(8,94H^a + W^a), \quad (7)$$

где 24,42 – теплота парообразования 0,01 кг водяного пара, кДж; 8,94 – коэффициент пересчета содержания водорода в топливе на воду; H^a – массовая доля водорода в аналитической пробе топлива, %; W^a – массовая доля воды в испытуемой пробе топлива, %.

Определение содержания влаги в образцах отходов производили методом высушивания по ГОСТ 32975.3-76 [11], а их зольности по методике, изложенной в ГОСТ 32988-2014 [12].

Таблица 3. Среднегодовые индексы производства льноволокна, круп и зерна кукурузы в Республике Беларусь за период с 2019 по 2024 год

Наименование продукции	Среднегодовое производство продукции, тыс. т	Выход костры, лузги и надземной части кукурузы, %	Индекс производства, $i_{ср.i}$	Коэффициент технически доступного ресурса
Льноволокно	43,25±3,07	73,0-76,6	1,0231	0,74
Зерно кукурузы	1 123,53±181,07	55,0	1,1502	0,20
Овсяная крупа и хлопья	20,45±0,51	27,0	0,9639	0,27
Ячменная крупа	11,97±0,73	7,0	0,9907	0,07
Гречневая крупа	7,94±0,72	19,3-20,8	1,1236	0,20
Пшеничная крупа	0,82±0,05	7,0	0,9175	0,07
Крупа пшено	1,89±0,28	15,5	1,2589	0,15
Крупа гороха	1,22±0,005	7,0	1,1430	0,07
Всего круп	44,29±2,30	-	0,9969	

Результаты исследований

Для оценки валового и технического энергетических потенциалов отходов продукции растениеводства АПК Беларуси приняты высшую теплоту сгорания: лузги зерновых – 17 Мдж/кг, костры льна – 15,7 Мдж/кг и надземной части кукурузы – 16,7 Мдж/кг.

Определим среднегодовые индексы производства льноволокна, круп и зерна кукурузы в Республике Беларусь на основании данных таблицы 1. Индекс производства льноволокна, круп и зерна кукурузы $i_{ср.i}$ – относительный статистический показатель, характеризующий изменение объема производства продукции АПК Беларуси в сравниваемых периодах, который равен:

$$i_{ср.i} = \left(\frac{W_2}{W_1} + \frac{W_3}{W_2} + \dots + \frac{W_n}{W_{n-1}} \right) / (n - 1), \quad (8)$$

где W_n – объем производства льноволокна, круп и зерна кукурузы в Республике Беларусь по годам за период с 2019 по 2024 год, тыс. т; n – количество лет, за которое имеются данные производства льноволокна, круп и зерна кукурузы в Республике Беларусь.

Среднегодовое производство продукции и индексы производства льноволокна, крупы и зерна кукурузы в Республике Беларусь за период с 2019 по 2024 год приведены в таблице 3. Значения средней ошибки среднегодового производства продукции определены разностным методом обработки результатов.

Можно предположить, что производство круп сохранится на прежнем

Таблица 4. Прогнозируемый валовой сбор льноволокна, круп и зерна кукурузы в Республике Беларусь по годам (тыс. т)

Наименование продукции	Годы					
	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Льноволокно	43,25	44,25	45,27	46,31	47,38	48,48
Зерно кукурузы	1 956,8	2 250,7	2 588,8	2 977,6	3 424,8	3 939,2
Всего круп	44,29	44,29	44,29	44,29	44,29	44,29

Увеличение отходов переработки продукции растениеводства АПК страны к 2031 году позволит получить до 1,5 % потребности страны в энергоресурсах или около 20 % потребности АПК Беларуси в них

уровне, а производство льноволокна и зерна кукурузы будет ежегодно увеличиваться с индексом производства: льноволокна – 1,0231, зерна кукурузы – 1,1502. Прогнозируемое производство льноволокна, круп и зерна кукурузы в Республике Беларусь с 2026 по 2031 год представлено в таблице 4.

В результате моделирования оценки биомассы лузги различных зерновых культур при производстве круп в качестве источника энергии валовой потенциал абсолютно сухой био-

массы в 2026 году в среднем составит 22,2 тыс. т у.т. Технический потенциал абсолютно сухой лузги варьирует на уровне 9,2 тыс. т у.т., что обеспечит около 0,3 % потребности в энергоресурсах агропромышленный комплекс страны.

В результате моделирования оценки биомассы костры льна при производстве льноволокна в качестве источника энергии валовой потенциал абсолютно сухой биомассы в 2026 году в среднем составит 7,0 тыс. т у.т. Технический потенциал абсолютно сухой лузги варьирует на уровне 6,9 тыс. т у.т., что обеспечит около 0,25 % потребности в энергоресурсах агропромышленный комплекс страны.

В результате моделирования оценки биомассы надземной части кукурузы при производстве зерна в качестве источника энергии валовой потенциал абсолютно сухой биомассы в 2026 году составит 1 665,8 тыс. т у.т. Технический потенциал абсолютно сухой биомассы надземной части кукурузы варьирует на уровне 288,7 тыс. т у.т., что обеспечит около 10,7 % потребности в энергоресурсах агропромышленный комплекс страны или около 0,7 % потребности в энергоресурсах страны.

Результаты моделирования оценки валового и технического потенциалов использования абсолютно сухих костры льна, лузги зерновых и надземной части кукурузы в Республике Беларусь на энергетические цели с 2026 по 2031 год приведены на рис. 2. Валовой энергетический потенциал отходов переработки продукции растениеводства Республики Беларусь увеличится с 1 695,0 тыс. т у.т. в 2026 году до 3 380,0 тыс. т у.т. в 2031-м, а технический энергетический потенциал их увеличится в 1,27 раза с 288,7 до 365,2 тыс. т у.т.

Заключение

Объем образования отходов переработки продукции растениеводства АПК в Республике Беларусь ежегодно возрастает и к 2031 году будет составлять около 5 200,0 тыс. т. Львиную долю отходов будет составлять надземная часть кукурузы при производстве зерна. Так, в 2026 году их доля составит 86,0 %, а к 2031-му – 93,0 %.

Исследования подтверждают перспективность использования отходов переработки продукции растениеводства АПК Республики Беларусь для производства энергии замкнутого цикла. Так, технический энергетический потенциал из отходов переработки продукции растениеводства в Республике Беларусь в 2026 году может составить около 288,7 тыс. т у.т., что составляет 0,7 % потребности страны в энергоресурсах или около 10,5 % потребности в энергоресурсах АПК.

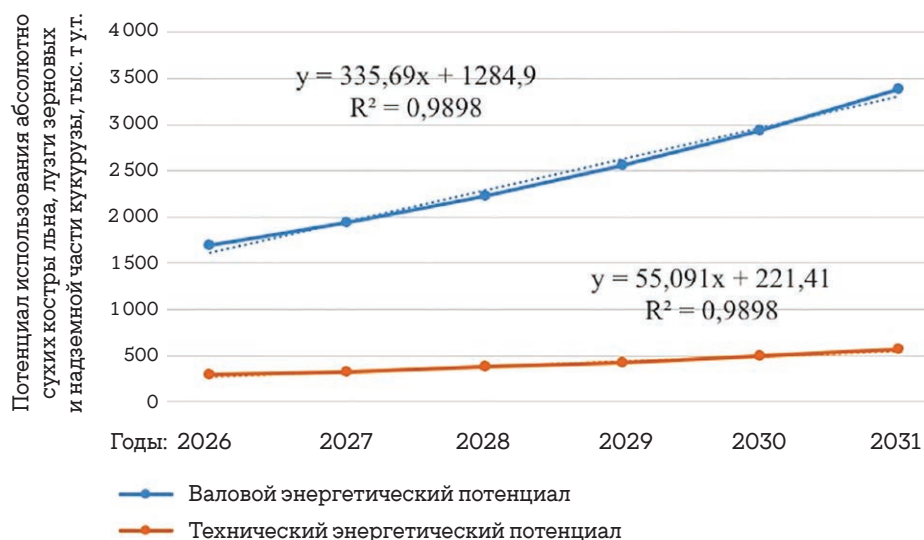


Рис. 2. Валовой и технический потенциалы использования абсолютно сухих костры льна, лузги зерновых и надземной части кукурузы при производстве зерна в Республике Беларусь на энергетические цели с 2026 по 2031 год

Увеличение отходов переработки продукции растениеводства АПК страны к 2031 году позволит получить до 1,5 % потребности страны в энергоресурсах или около 20 % потребности АПК Беларуси в них. ■

Статья поступила в редакцию 01.04.2026

Список цитированных источников

1. Energy 21 the Danish government's action plan for energy 11 Danish Ministry of Environment and Energy, Copenhagen, 1996. – 125 p.
2. Evald, A. Agricultural biomass – experiences from Denmark, 2011. – Mode of access: http://nsae.ea/fens/ag_biomass/1_Anders_Evald_Framing_the_Opportunity.pdf (date of access: 30.07.2025).
3. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 декабря 2015 г. № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/natsionalnyy-geestr/poisk-v-geestre/?p1=5/52666> (дата обращения: 30.07.2025).
4. Пашинский, В. А. Экологические аспекты проектирования и эксплуатации установок для сжигания биомассы в Беларуси / В. А. Пашинский, А. А. Бутько, Ю. М. Шульга // Энергоэффективность. – 2025. – № 6. – С. 28-31.
5. Пашинский, В. А. Техничко-экономические аспекты проектирования и эксплуатации установок для сжигания биомассы в Беларуси / В. А. Пашинский, А. Ф. Молочко // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2025. – № 3. – С. 39-44.
6. Родькин, О. И. Технологические аспекты использования соломы в качестве биотоплива / О. И. Родькин // Экологический вестник. – 2015. – № 3(33). – С. 37-43.
7. Сельское хозяйство Республики Беларусь. Статистический буклет / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск : 2025. – 36 с. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/selskoe-hozyaystvo/selskoe-khozyaystvo/statisticheskie-izdaniya/index_151587/ (дата обращения: 08.01.2026).
8. Об утверждении показателей нормативов образования отходов производства технологических процессов : утв. приказом Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 11.11.2025 № 200-ОД. – Минск, 2011. – 65 с. URL: <https://minpriroda.gov.by/ru/4/view/ob-opredelenii-normativov-obrazovaniya-otxodov-proizvodstva-6483-2025/> (дата обращения: 08.01.2026).
9. Технологические нормативы переработки тресты и получения трепаного длинного и короткого льноволокна на действующих и импортных льноперерабатывающих линиях : [утв. зам. министра сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 14 октября 2014 г. № 74 : вступ. в силу с 14 окт. 2014 г.]. – Минск : Энергопресс, 2014. – 5 с.
10. ГОСТ 11225-76. Зерно. Методы определения выхода зерне из початков кукурузы. Введ. 01.07.77. – М. : Межгосударственный стандарт. – 3 с.
11. ГОСТ 32975.3-2014 (EN 14774-3:2009). Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием, Часть 3. Влага аналитическая [Текст]: межгосударственный стандарт. – Введ. 01.04.2016. – М. : Стандартинформ, 2015. – 8 с.
12. ГОСТ 32988-2014 (EN 14775:2009). Биотопливо твердое. Определение зольности [Текст]: межгосударственный стандарт. – Введ. 01.04.2016. – М. : Стандартинформ, 2015. – 8 с.