

## Дослідження варіантів виробництва твердого палива з відходів цукрового виробництва та умов його спалювання

**В.В. Шутюк**, кандидат технічних наук, доцент Національного університету харчових технологій  
**К.О. Штангеев**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту післядипломної освіти Національного університету харчових технологій  
**Т.П. Василенко**, аспірант Національного університету харчових технологій  
**С.М. Самійленко**, кандидат технічних наук, доцент Національного університету харчових технологій

20

Для економіки України використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів слід вважати стратегічним напрямом вирішення паливно-енергетичних проблем. На даний момент потенційні можливості вирощування цукрових буряків в Україні вдвічі перевищують їх потребу для забезпечення виробництва цукру.

Предметом дослідження є цукровмісний напівпродукт, технологія його одержання та можливість використання відходів виробництва для одержання твердого палива. В роботі використовувалися методи системного аналізу, інформаційного підходу.

За загальною масою найбільша частка твердих відходів цукрового виробництва (до 75...83% до маси перероблених буряків) припадає на жом. Більша частина жому в даний час не використовується і перед початком нового виробничого сезону має вивозитися у відвали або на поля. Потенційно кількість жому, який може бути використаний для енергетичних потреб, становить 4,5...5 млн. тонн на рік, або в перерахунку в суху речовину 330...370 тис. тонн.

Можливі два напрями його застосування – використання як вторинного палива сушеного жому та безпосереднє спалювання віджатого жому. Основною горючою частиною жому є клітковина (целюлоза, геміцелюлоза), є також інша горюча органіка, в тому числі цукор. Теоретична теплотворна здатність целюлози становить 3465 ккал/кг сухої речовини.

Для умов використання в теплоелектроцентралі цукрового заводу процес спалювання біомаси жому доцільно проводити із максимально можливим виходом газоподібного палива при рівні температур понад 500 °С.

**Ключові слова:** цукробурякова промисловість, жом, біопаливо, спалювання

Для экономики Украины использование альтернативных энергетических ресурсов следует считать стратегическим направлением решения энергетических проблем. На данный момент потенциальные возможности выращивания сахарной свеклы в Украине в два раза превышают их потребности для обеспечения производства сахара.

Предметом исследования является сахаросодержащий полупродукт, технология его получения и возможность использования отходов производства для получения твердого топлива. В работе использовались методы системного анализа, информационного подхода.

По общей массой наибольшая доля твердых отходов сахарного производства (до 75...83% к массе переработанной свеклы) приходится на жом. Большая часть жома в настоящее время не используется и перед началом нового производственного сезона имеет вывозиться в отвалы или на поля. Потенциально количество жома, который может быть использован для энергетических нужд, составляет 4,5...5 млн. тонн в год, или в пересчете на сухие вещества 330...370 тыс. тонн.

Возможны два направления его применения – использование в качестве вторичного топлива сушеного жома и непосредственное сжигание отжатого жома. Основной горючей частью жома является клетчатка (целлюлоза, геміцеллюлоза), также другая горючая органика, в том числе сахар. Теоретическая теплотворная способность целлюлозы составляет 3465 ккал/кг сухого вещества.

Для условий использования в теплоэлектроцентрали сахарного завода процесс сжигания биомассы жома целесообразно проводить с максимально возможным выходом газообразного топлива при уровне температур выше 500 °С.

**Ключевые слова:** свеклосахарная промышленность, жом, биотопливо, сжигание

*The use of alternative fuel and energy resources should be considered as the strategic approach to solving energy issues of Ukraine's economy. Currently the potential capabilities of growing sugar beet in Ukraine are twice as good as the need for sugar production support.*

*The subject of research is the sugar-containing preproduct, its production technology and potential waste for solid fuel generation. In the paper we used systems analysis method and informational approach.*

*On a total mass basis the major part of solid waste of sugar industry (up to 75...83 % in relation to the mass of processed sugar beet) accrues to pulp. Currently the most of pulp is not used and has to be taken to stockpiles or fields before the start of the new sugar campaign. Potentially, the amount of pulp which can be used for energy needs takes up 4,5...5 million tons per year, or in conversion to dry basis - 330...370 thousand tons.*

*There are two possible ways of its use: use of dried pulp as secondary fuel and direct firing of pressed pulp. The main pulp combustible is cellulose (hemicellulose); the pulp also contains other combustible organic compounds, including sugar. Theoretical calorific efficiency of cellulose amounts 3465 kcal/kg of dry basis.*

*It would be reasonable to conduct the pulp biomass combustion process in thermal power station of sugar plant with the maximum possible fuel gas formation at the temperature of more than 500 °C.*

*Key words: sugar industry, pulp, biofuel, burning.*

### Вступ

Для економіки України проблеми подолання дефіциту енергоносіїв, а також необхідного та своєчасного енергозабезпечення набули особливої гостроти, тому їх розв'язання потребує пошуку альтернативних шляхів енергозабезпечення. Використання альтернативних паливно-енергетичних ресурсів слід вважати стратегічним напрямом вирішення паливно-енергетичних проблем.

Цукрові буряки в Україні є єдиною вітчизняною сировиною для виробництва цукру – стратегічно важливого для держави продукту харчування.

На даний момент площі посіву і обсяги заготівлі цукрових буряків забезпечують виробництво цукру лише в обсягах, необхідних для потреб внутрішнього ринку. Фахівцями доведено, що потенційні можливості вирощування цукрових буряків в Україні вдвічі перевищують їх потребу для забезпечення виробництва цукру.

Окрім того, цукрова промисловість має надлишкові потужності, які можуть бути задіяні в разі збільшення обсягів переробки цукрових буряків. Тому, на наш погляд, було б доцільно поєднати виробництво цукру із буряків з отриманням із цукровмісних напівпродуктів біоетанолу, а з надлишку жому – енергії для технологічних потреб [1, 6].

При переробленні цукрових буряків на біоетанол виникають проблеми, пов'язані з порівняно малим періодом (2-3 місяці) перероблення буряків, оскільки цукрові буряки не підлягають тривалому зберіганню, вони швидко псуються, втрачають цукор. Отже, виникає необхідність пошуку способів організації виробництва біоетанолу з таких напівпродуктів цукрового виробництва, які можуть зберігатися, а також є привабливими з економічної точки зору, тобто які дають змогу одержати максимальний вихід біоетанолу.

### Матеріали та методи дослідження

Предметом дослідження є цукровмісний напівпродукт, технологія його одержання та можливість використання відходів виробництва для одержання твердого палива.

**Мета роботи** – дослідження технологічних схем одержання біоетанолу з напівпродуктів цукрового виробництва, твердого палива з відходів виробництва та доцільності їх використання як альтернативних джерел енергії.

В роботі використовувались методи системного аналізу, інформаційного підходу.

### Результати та обговорення

Баланс твердих органічних відходів цукрового заводу.

За загальною масою найбільша частка твердих відходів (до 75...83% до маси перероблених буряків) припадає на жом. Частина жому споживається на корм худобі у вигляді свіжого, кислого або сушеного жому. Сушений гранульований жом переважно йде на експорт, при цьому його ціна, залежно від сезону та фінансових умов, досягає 100...150 євро за тонну.

Більша частина жому в даний час не використовується і перед початком нового виробничого сезону має вивозитися у відвали або на поля. Це призводить до забруднення навколишнього середовища та погіршує родючість землі.

Потенційно кількість жому, який може бути використаний для енергетичних потреб, становить 4,5...5 млн. тонн на рік, або в перерахунку у суху речовину 330...370 тис. тонн.

До твердих органічних відходів цукрового виробництва слід також віднести вловлену ботву та відходи буряків (хвостики, дрібний бій), кількість яких на цукрових заводах становить 5...8% до маси буряків. Ця біомаса повністю вивозиться у відвали. Її кількість на цукрових заводах України досягає у загальній вазі 600...900 тис. тонн,

## БІОПАЛИВО

або в перерахунку на суху речовину – 50...75 тис. тонн за рік.

Кількість фільтраційного осаду становить 3...3,5% до маси буряків. Сухі речовини фільтраційного осаду більш ніж на 3/4 складаються із негорючої частини –  $\text{CaCO}_3$ , решта сухої речовини фільтраційного осаду є органічні речовини. Кількість сухої речовини органічних речовин, що містяться у фільтраційному осаді складає 50...60 тис. тонн. Але на більшості цукрових заводів України видалення фільтраційного осаду за межі головного корпусу цукрового заводу відбувається у вигляді водної суспензії на поля фільтрації. На теперішній час лише близько 8...10% осаду отримують на камерних прес-фільтрах, і він може видалятися у сухому вигляді (з вмістом сухої речовини 60...70 %).

На цукрових заводах також наявні до 10...15 тис. тонн відсіву вугілля, який утворюється при підготовці палива для випалу вапняку в шахтних печах.

Загальний теоретичний баланс вторинних видів твердого палива для цукрових заводів України (при обсягах сезонної переробки 13 млн. тонн буряків) представлено в **табл. 1**:

стосовується пресування жому. Останнім часом на цукрових заводах України почалося впровадження пресів із глибоким ступенем пресування жому – до вмісту сухої речовини 24...30%.

Впровадження таких пресів зумовлено як можливістю значного зменшення величини відкачки дифузійного соку (до рівня 100...110% до маси буряків) при збереженні нормативної величини втрат цукру в жомі. Цей захід дає змогу на 8...20% зменшити витрати палива на технологічні потреби цукрового виробництва. Одночасно глибоке пресування жому сприяє зменшенню питомої витрати палива на сушіння жому в 1,5...2,5 рази.

Очевидно, що в найближчій перспективі глибокий ступінь пресування жому буде впроваджено на переважній більшості працюючих цукрових заводів України. Це може також позитивно вплинути на можливість застосування жому як вторинного виду твердого палива для цукрового виробництва. Тут можливі два напрями його застосування.

Виходячи із наведених вище даних в роботі передбачається виконати аналіз обох можливостей використання віджатого жому та визначення шляхів його застосування.

*Таблиця 1*

**Баланс вторинних видів твердого палива на цукрових заводах України**

Вид джерела ПЕР	Сира маса, тис. тонн	Вміст сухої речовини, тис. тонн	Теплотворна здатність на СР, ккал/кг	Теоретична кількість у.п., тис. тонн
<b>Жом</b>	9600–10400	730–1050	3000	156–169
<b>Ботва</b>	600–1040	48–83	2900	20–22
<b>Фільтраційний осад</b>	300–330	300–330	2500	2,7–2,9
<b>Відсів вугілля</b>	13,4–14,6	13,4–14,6	5800	11,1–12,1
<b>ВСЬОГО</b>	10513–11780	1090–1210	—	190–206

Як впливає із наведеного в табл. 1 балансу потенційних теоретичних резервів твердого палива із відходів цукрового виробництва для умов цукрових заводів України можуть досягати чверті нинішнього рівня споживання палива на виробництво цукру.

Але в той же час усі ці види вторинного твердого палива, окрім відсіву вугілля, мають дуже високий вміст вологи, що значно ускладнює його використання безпосередньо як твердого палива. В первинному своєму стані вони більш придатні для переробки біохімічними методами.

Фільтраційний осад, з точки зору його потенціалу як палива мало перспективний, але при широкому впровадженні камерних прес-фільтрів було б більш доцільно використовувати його в агротехнології для підвищення лужності й родючості ґрунтів.

У процесі удосконалення технології та теплотехніки цукрового виробництва широко за-

### *Способи отримання енергії з біомаси*

Процес горіння палив є досить складним, і для його опису потрібні знання з області фізичної хімії, зокрема про хімічну кінетику, тепло- і масо передачу з гідроаеромеханіки і прикладної математики.

Складність кількісного опису процесу горіння біомаси в значною мірою зумовлена її неоднорідністю. Слід зважати на те, що у нормальному стані потенційно «горючі» компоненти біомаси є тверді, органічні речовини, які при нагріванні розкладаються, внаслідок чого утворюється суміш горючих летких речовин і вуглистої маси. Летючі речовини згоряють в газовому потоці, а вуглиста маса, як правило, на топкових решітках. Отже, ці два способи спалювання мають різні хімічний механізм і кінетику [4].

В загальному випадку спалювання біопалива принципово описується рівнянням:

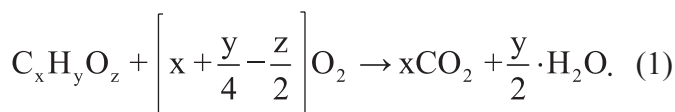
Теплота згоряння рослинної біомаси

Речовина	Q <sub>B</sub> <sup>p</sup> , кал/г	Вуглиста речовина		Горючі леткі речовини	
		Вихід, %	Q <sub>B</sub> <sup>p</sup> , кал/г	Вихід, %	Q <sub>B</sub> <sup>p</sup> , кал/г
Целюлоза	4143	14,9	7052	85,1	3634
Лігнін	6371	59,0	7416	41,0	4867
Деревина і тополі	4618	21,7	7124	78,3	3923
Сосни	5120	41,8	7044	58,2	3738
Осика (сухе листя)	5034	37,8	6344	62,2	4238

Таблиця 3

Теплота згоряння продуктів піролізу біомаси

Речовина	Вуглиста речовина, кал/г	Горючі летючі речовини, кал/г	Всього, кал/г
Целюлоза	1050	3093	4143
Лігнін	4375	1995	6370
Деревина і тополі	1546	3072	4618
Сосни	2438	2708	5146
Осика (сухе листя)	2398	2636	5034



Де, при повному згоранні органічних речовин утворюються діоксид вуглецю і вода, що не являють собою небезпеку для навколишнього середовища, тоді як при неповному згорянні утворюються вуглисті й зольні леткі частинки, дим, смолистий аерозоль, а також смердючі й шкідливі гази з карбоніловими з'єднаннями і монооксидом вуглецю.

Біомаса рослинного походження, до якого належить і буряковий жом, зазвичай містить поглинену і конденсовану вологу, різні типи органічних і деякі неорганічні сполуки. Склад біомаси залежить від її походження [2].

Для рослинної тканини характерна наявність в стінках клітковини, або целюлози, а також великих порожнин (вакуолів). Протоплазма живих клітин, наприклад зеленого листя, містить деякі протеїни і значну кількість води. Деревина, або ксилема-тканина вищих рослин складається з провідних елементів трахеїтів, судин механічних (лібриформ) і паренхімних клітин.

Вміст вологи. У механічних клітках може міститися значна кількість вологи - конденсованої і абсорбованої, причому кількість останньої залежить від вологості навколишнього середовища.

В 100 кг сухих речовин свіжого жому міститься близько 20 кг клітковини, 30...35 кг геміцелюлози, приблизно така ж кількість пектину, 8...10 кг білків, 2...3 кг цукру і до 2 кг міне-

ральних речовин.

Таким чином, основною горючою частиною жому є клітковина (целюлоза, геміцелюлоза), наявна також інша горюча органіка, в тому числі цукор. Теоретична теплотворна здатність целюлози становить 3465 ккал/кг сухої речовини. Для сухої речовини цукру теплотворна здатність становить 3607 ккал/кг.

Тобто в цілому для сухого жому теплотворна здатність має бути в межах 3300 – 3500 ккал/кг, тобто на рівні сухого торфу або низькоякісного бурого вугілля. Але при спалюванні жому в реальних умовах слід враховувати вплив вологи, яка може значно, у багато разів зменшувати його теплотворну здатність.

**Піроліз і теплота згоряння біомаси**

У процесі горіння біомаси відбувається її розкладання з подальшим окисленням продуктів розпаду. Як правило, цей процес проходить як піроліз компонентів біомаси [2, 7].

У міру нагрівання в камері згоряння або в іншому пристрої біомаса руйнується: відділяються летючі речовини і залишається вуглиста речовина з великим вмістом мінеральних сполук. Летючі речовини містять CO, CO<sub>2</sub>, деяку кількість вуглеводнів і H<sub>2</sub>. Частина летючих речовин, що конденсується, містить воду і такі низькомолекулярні органічні сполуки, як альдегіди, кислоти, кетони і спирти. До складу смоляної фракції входять високомолекулярні цукри, похідні фурану і фенолові сполуки.

Частка летючих речовин, що утворюються, і

## БІОПАЛИВО

залишку, що конденсується, а також їх випарувальна здатність визначаються термогравіметричним методом, а зміни ентальпії  $\Delta I$  – методом диференційного термічного аналізу або скануючої калориметрії (термічний аналіз). Ці методи можуть використовуватися для вимірювання енергії, необхідної для осушення, перегонки, піролізу і нагріву біомаси перед спалюванням (теплота, що витрачається перед горінням). Енергія, що генерується в результаті повного спалювання продуктів розкладання, вимірюється калориметричним методом. Енергія, що вивільняється, може бути також замірjana в процесі піролізу і горіння як функція часу або температури.

Теплота згоряння рослинної біомаси різного типу і її компонент наведена в **табл. 2**, а теплота згоряння продуктів піролізу біомаси – у **табл. 3** [2].

Теплота згоряння різних видів палив з біомаси перебуває у тісному взаємозв'язку з потрібною для їх спалювання кількістю кисню. Приблизно на кожен грам кисню при згоранні вивільнюється близько 3,349 кал теплової енергії [6]. Таким чином, теплота згоряння визначається глибиною окиснення палива. Для палив з біомаси однакового типу теплота згоряння сировини і продуктів піролізу визначається вмістом вуглецю.

Залежність між теплою згоряння різних палив з біомаси і продуктів її піролізу (вуглистих і летких речовин) від вмісту в них вуглецю може бути описана за допомогою виразу:

$$Q_v^p(\text{кал/г}) = 94,19 (C\%) + 55,01, \quad (2)$$

що цілком допустимо, оскільки кисень витрачається головним чином на окиснення вуглецю.

При термічному розкладанні целюлози і геміцелюлози відбуваються складні реакції з утворенням проміжних продуктів. Ці реакції можуть проходити як паралельно, так і послідовно, і їх можна класифікувати таким чином [2, 7]:

– при температурах нижче 300°C піроліз целюлози в повітрі або інертному середовищі супроводжується такими процесами, як утворення вільних радикалів, видалення води, деполімеризація, утворення з'єднань з карбонільною і карбоксильною групами, CO і CO<sub>2</sub>, внаслідок чого виходить, головним чином, обвуглений залишок;

– при температурах 300...450°C глікозидний зв'язок полісахаридів руйнується з утворенням однієї вільної гідроксильної групи в суміші левоглюкозанів й інших похідних глюкози і олігосахаридів. Цю суміш зазвичай називають смолянистою фракцією;

– при температурі 300–450 °C або вище в результаті дегідратації, перегруповування і розщеплювання цукрів утворюються різні карбонільні сполуки – оцтовий альдегід, гліоксаль і акролеїн, які легко випаровуються.

При високих температурах і малих розмірах частинок сировини в основному йде процес газифікації, а при низьких температурах і великих розмірах частинок, а також за наявності в сировині вологи і неорганічних речовин – утворення вуглистої речовини, води і CO<sub>2</sub>.

Як зазначалося вище, для умов використання в ТЕЦ цукрового заводу процес спалювання біомаси жому доцільно проводити із максимально можливим виходом газоподібного палива [3]. Тобто необхідно забезпечити максимально можливий рівень температур (понад 500...600°C), причому для забезпечення утворення синтез-газу слід частину водяної пари, що утворюється, при підсушуванні жому перед спалюванням спрямовувати в камеру згоряння.

### Висновки

Проведений аналіз балансу твердих органічних відходів як джерела альтернативного палива для цукрового заводу показав, що найбільший ресурс як джерела палива має жом. Можливі два напрями його використання – як вторинного палива сушеного жому та безпосереднє спалювання віджатоного жому.

Для умов використання в ТЕЦ цукрового заводу процес спалювання біомаси жому доцільно проводити із максимально можливим виходом газоподібного палива при рівні температур понад 500 °C.

### Список використаних джерел

1. *Безвідхідна переробка цукрових буряків / О.С. Заєць, В.О. Штангеев, Ю.О. Заєць та ін. – К. : Урожай, 1992. –184 с.*
2. *Біопалива (Технології, машини і обладнання) / В.О. Дубровін та ін./ – К. : ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.*
3. *Боднарчук В.В. Управління питомими витратами умовного палива – основна складова розвитку ТЕЦ в умовах сучасної економіки / В.В. Боднарчук // Інвестиції: практика та досвід. – 2009. – № 7. – С. 42–46.*
4. *Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Технология сжигания органических топлив. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2006. – 92 с.*
5. *Гуцин С.Н., Князев М.Д. Расчеты горения топлив. – Изд-во УМЦ УПИ, 2001. – 47 с.*
6. *Кривручко В. Використання побічних продуктів переробки цукрових буряків і картоплі при виробництві біогазу / В. Кривручко [та ін.] // Наук. вісн. Нац. аграр. ун-ту. – 2007. – № 107. – С. 35–46.*
7. *Методики по визначенню нормативних показників питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів в цукровій промисловості. – К. : Цукор України, 2006. –150 с.*