МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

Бунецький В. О.¹, експерт у галузі біоенергетики та пелетного виробництва, керівник
інжинірингової компанії у галузі перероблення біомаси ООО BM-Engineering, аспірант,
Корінчук Д. М.², канд. тех. наук

¹Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. Петра Василенка

²Інститут технічної теплофізики НАН України

Анотація. У статті, на базі запропонованих авторами методів наукового передбачення якісних показників твердого біопалива, запропоновано інноваційні методи прогнозування (розраховування) якісних характеристик вироблюваного твердого біопалива (пелет, брикетів). З огляду на те, що деревина, яка є сировиною для вироблення твердого біопалива, є біополімером, готова продукція, вироблена з неї, також буде композиційним біополімером.

У статті обґрунтовано очевидну залежність якості готової продукції (пелет, брикетів) від вологості початкової деревини та її породи. Крім того, було взято до уваги умови та термін зберігання заготовленої сировини, що впливають на вологість, наявність грибків та бактерій, а також хімічний склад деревини з урахуванням її породи. Всі ці показники також значною мірою впливають на якість готової продукції. При цьому хімічний склад біополімерів різних порід на порядки відрізняється за вмістом важких металів та сірки, які потім впливають на зольність та екологічні показники біопалива та на їх відповідність європейським стандартам ENPlus.

За результатами детального аналізу фізико-хімічних та реологічних властивостей біополімерів, вперше було запропоновано точний метод розрахунку теплотворної здатності, зольності та міцності вироблюваного твердого біопалива (композитного біополімера).

Діаграми та дані щодо фактичного складу деревини різних порід та формули для розраховування фізико-хімічних та реологічних властивостей готової продукції, слугують основою для подальшого прогнозування її якості, та її гарантованого сертифікування за європейськими стандартами ENPlus.

Обґрунтовані переваги біопалива другого покоління (поверхневозасклованих пелет) та третього покоління (плавленого біовугілля).

На жаль, на тепер виробники твердого біопалива не прогнозують його якість, а лише після отримання готової продукції не систематично контролюють її на відповідність європейським або вітчизняним стандартам. Новизна запропонованих методів прогнозування якості твердого біопалива ще на стадії контролю первинної сировини є важливою основою для створення сучасних технологій та обладнання, які будуть реалізовувати енергоефективне та окупне вироблення твердого біопалива.

Ключові слова: біопаливо, біомаса, біополімер, склад сировини, породи деревини, пелети, поверхнево заскловані пелети, плавлене біовугілля, фізико-хімічні властивості, реологічні властивості.

SOLID BIOFUEL QUALITY FORECASTING METHODS

Buneckiy V.O.¹, expert in bioenergetics and pellet's production field, engineering company in biomass processing head Ltd BM-Engineering, graduate student,

Korinchuk D.M.², PhD

¹Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture

²Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Abstract. In the article, on the basis of introduced by authors methods for **scientific prediction** of solid biofuel qualitative indicators where offered innovative forecasting (calculation) methods for produced solid biofuel (pellets, briquettes) qualitative characteristics. On this account that wood, which is the raw material for solid biofuel production is a biopolymer, the finished product made from it will also be a composite biopolymer.

The article substantiates the obvious dependence of the finished products (pellets, briquettes) quality on the moisture content of the original wood and its race. In addition, the conditions and shelf life of harvested raw materials, which affect on humidity, the presence of fungi and bacteria, as well as the chemical composition of wood, taking into account its race, were taken into account. All these indicators also significantly affect on the quality of finished products. Under such conditions the chemical composition of biopolymers of different races differs by orders of magnitude in the content of heavy metals and sulfur, which then affect on the ash content and ecological dimensions of biofuels and their compliance with European standards ENPlus.

Based on the physicochemical and rheological biopolymers properties detailed analysis results, for the first time an accurate method for calculating the calorific value, ash content and strength of the produced solid biofuel (composite biopolymer) was proposed.

Diagrams and data on the actual composition of wood of different races and formulas for calculating of the finished products physicochemical and rheological properties, serve as a basis for further forecasting of its quality and its guaranteed certification according to European standards ENPlus.

The second generation biofuel (surface glazed pellets) and the third generation (fused biochar) advantages where grounded.

Unfortunately, at present, solid biofuels producers do not forecast its quality, and only after finished product receiving do not systematically control it for compliance with European or domestic standards. The novelty of the proposed methods for solid biofuels quality forecasting at the primary raw materials control stage is an important basis for the creation of modern technologies and equipment that will implement energy-efficient and cost-effective solid biofuels production.

Key words: biofuel, biomass, biopolymer, raw materials composition, wood race, pellets, surface vitrified pellets, fused biochar, physicochemical properties, rheological properties.

Вступ. У наш час у всьому світі значну увагу приділяють підвищенню теплотворної здатності твердого біопалива. Цю статтю присвячено екологічній складовій галузі теплоенергетики та її енергоефективності, а саме приведенню якості біопалива до міжнародних стандартів якості. Поступова заміна викопного палива на екологічно чисте відновлюване, підвищує вимоги комунальної енергетики та окремих споживачів до якості, екологічності та енергоємності пелет та брикетів.

Важливість та актуальність використання твердого біопалива також базуються на тому, що воно є поновлюваним джерелом енергії та не залежить від поступового виснаження природних ресурсів. Тому прогнозування його якості є таким важливим для виробників. У цій статті запропоновані сучасні точні методи прогнозування якості вироблюваного палива у залежності від використовуваної сировини та технологічного процесу виробництва.

У світі постійно зростає частка використання біопалива у вироблянні теплової та електричної енергії. Викопне паливо дорожчає, також зростають штрафи за його використання. Тому у Директиві ЄС 2012/27EU щодо енергоефективності [1], та у Висновках Європейської Ради від 8 и 9 березня 2007 р. було вказано на необхідність підвищення енергоефективності у країнах ЄС задля економії у порівнянні із прогнозами до кінця 2020 року на 20 % від обсягу первинного енергоспоживання у ЄС.

Очевидно, що для України, яка володіє великими, постійно поновлюваними запасами біомаси різного походження, ефективне виробляння високоякісного сертифікованого біопалива за стандартами якості ENPlus може стати основою для формування однієї із самих прибуткових та наукоємних галузей енергетики [2].

Мета роботи – обґрунтування методів прогнозування якості вироблюваного твердого біопалива на базі розраховування його властивостей з урахуванням характеристик деревної сировини, як біополімеру.

Об'єктом дослідження є метод розраховування характеристик твердого біопалива за параметрами вихідної сировини.

Предмет дослідження – деревна сировина, як біополімер, та тверде біопаливо як композитний біополімер.

Усі дослідження було виконано на базі компанії ООО BM-Engineering.

Аналіз проблематики та останні дослідження. Цю статтю присвячено обґрунтуванню використання методів розрахунку та прогнозування якості біопалива чотирьох поколінь. Без науково обґрунтованого прогнозування якості біопалива неможливо створити ефективне виробництво та забезпечити гарантований збут якісної продукції [3]. Ці методи повинні базуватися на експериментальному визначенні точних фізико-хімічних та реологічних характеристик біомаси, як композиційного біополімеру. Важливим фактором, який принципово впливає на фізико-хімічні перетворення біомаси у процесі її пресування, є характер деформаційного впливу на її волокна.

Для біополімерів у будь-якому релаксаційному стані характерно співіснування усіх трьох видів деформації - пружної, високоеластичної та в'язкої - з переважанням одного з них. Релаксаційний характер процесів деформації полімерів призводить до того, що межі між релаксаційними станами визначають не лише за температурою та структурними характеристиками речовини, а й за типом навантаження (значенням, швидкістю і тривалістю навантаження).

Залежно від характеру навантаження, один і той же біополімер при заданій температурі та структурних характеристиках може вести себе як пружне, високо еластичне, або пластичне тіло. Під час впливу на полімер «швидких» сил (ударного навантаження) - головним чином проявляється пружність, а у разі впливу «повільних» сил - в основному пластичність.

Біополімер, що є при заданій температурі і структурних характеристиках високоеластичним, при великій швидкості короточасних навантажень поводить себе як пружне тіло, а при тривало діючій силі виявляє плинність, а рідкий полімер може за певних умов проявити високоеластичність, та навіть пружність. Для отримання максимально щільної гранули за найменших енергетичних витрат. Тому у процесі пресування біомаси необхідно створити умови для максимального прояву механізму деформації в'язкої течії.

Переважаючи властивостей пластичності при пресуванні повинно призводити до змін в надмолекулярній структурі біополімеру в напрямі збільшення щільності упаковки молекул, а значить, отримання гранул високої щільності. Іншими словами, навантаження при пресуванні підготовленої біомаси повинно бути максимально «повільним».

Окремо слід відзначити вплив деформацій зсуву на енерговитрати стадій подрібнення та пресування. Як відомо, саме опір деформаціям зсуву у двічі менший, за деформацію осьового стискання чи розтягування. Урахування реологічних властивостей біомаси при залученні деформацій зсуву вологих шарів біополімерів необхідне під час підготування (подрібнювання та пресування) початкової сировини. Контролю якості сировини повинні приділяти увагу на усіх підприємствах, які поставили собі за мету виробляти якісну продукцію [4].

Окрім високих екологічних характеристик, одним із визначальних показників, від яких залежить якість та вартість пелет (брикетів), є їх теплотворна спроможність, адже паливо призначене саме для вироблення енергії. Як відомо з теплофізики, вища теплотворна спроможність ($\text{Higher Calorific Value} = \text{Gross Calorific Value} = \text{GCV} = \text{ВТС}$) – кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні палива, охолодженні продуктів згоряння до початкової температури палива та конденсації водяної пари, що утворилася при окисленні водню, що входить до хімічного складу палива. Нижча теплотворна здатність ($\text{Lower Calorific Value} = \text{Net Calorific Value} = \text{NCV} = \text{НТС}$) – кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні палива без конденсації водяної пари.

Основні проблеми, з якими стикаються виробники твердого біопалива – високі питомі енерговитрати на вироблення однієї тонни готової продукції, і як наслідок – довготривалий період окупності встановленого обладнання.

Усі ці проблеми обумовлені використанням неефективних технологій, подрібненням сухої сировини, великою кількістю відходів, і як наслідок, підвищеними енерговитратами. Тому обрання правильної **наукоємної інноваційної технології для вироблення пелет** повинно охоплювати усі етапи виробничого циклу – зберігання, підготування і подрібнення сировини, пресування готової продукції. Особливо важливим є саме використання технологій: зсувних деформацій біополімерів під час підготування сировини, зволоженого пресування та вироблення пелет другого і третього покоління [5].

Результати досліджень та їх обговорення. Прогнозована вартість та якість готової продукції напряму залежать від якості початкової сировини. Величину нижчої та вищої теплоти згоряння треба визначати на одиницю сухого палива (як правило, на один кг або на один м^3) або на одиницю палива з урахуванням його вологості.

Окрім вологи, що входить до складу готового палива, необхідно брати до уваги та урахувати те, що волога також утворюється під час згоряння водню при хімічному сполученні його з атмосферним киснем. Під час визначення значення ВТС припускають, що волога конденсується у воду, а при вираховуванні значення НТС припускають, що волога вже знаходиться у складі палива у вигляді насиченої пари. Найбільш часто теплотворну спроможність вимірюють у Дж/кг (Дж/м^3), МДж/кг (МДж/м^3). Значення ВТС для пелет зазвичай складає 17 - 21 МДж/кг .

Теплоту згоряння визначає хімічний склад горючої речовини та вона залежить від наявності:

- горючих складових палива (вуглецю, водню, летючої горючої сірки та ін.);
- вологості та зольності палива.

Чим вищою буде питома теплота згоряння палива, тим менше його витрати для вироблення тієї ж кількості теплової енергії. Тому саме теплотворна здатність є однією з найбільш важливих характеристик палива.

Під час вироблення пелет (брикетів) великий вплив на собівартість технологічного процесу чинять якість та вологість сировини. На рис. 1 показано, як треба визначати вологість сировини (наприклад, деревного палива) та відмінність аналогічних розрахунків під час визначення вологості деревини у якості пиломатеріалу.

Рис. 1 – Номограма для перерахунку вологості, схема та формули для розрахунку

Відносна вологість деревини $W_{\text{отн}}$ - відношення маси води, яку утримує деревина, до маси деревини у вологому стані.

Абсолютна вологість $W_{\text{абсол.}}$ - відношення маси води, що знаходиться у цьому обсязі деревини, до маси абсолютно сухої деревини того ж обсягу.

Вологість свіжої деревини, зазвичай, становить 40 – 60%, та залежить від багатьох факторів, у тому числі місця вирощування, виду дерева, пори року (під час росту влітку вологість вища, взимку – нижча). Вологість окремих частин дерева також різна.

Вологість рослинної біомаси також залежить від сезону. Під час збирання зернових культур вологість рослинної біомаси становить 30 – 60%. Оскільки при зберіганні вологість знижується на 2 – 6%, то для одержання придатної до спалювання рослинної біомаси її треба використовувати при вологості 20 – 25%.

Більш вологу біомасу треба підсушити до складування, або на складі. Це захистить її від самонагрівання та гниття під час зберігання. Теплотворна спроможність деревини напряму залежить від її щільності, сорту та виду деревних порід (хімічного складу і структури), та може змінюватися у дуже широких межах. Відомо, що щільність деревини нестабільна. Вона залежить від породи деревини, рівня вологості, та навіть в одній і тій самій породі може бути різною.

Залежність теплоти згоряння від абсолютної вологості деревини (усереднена для різних порід деревини) показана на рис. 2.

Рис. 2 – Залежність НТС и ВТС від абсолютної вологості деревини

Експериментально визначені середні довідкові відомості (Табл. 1) щодо теплотворної спроможності дров, які мають різний вміст води у своєму складі. Наприклад, прийнято вважати, що:

- 12% - це добре висушені дрова в умовах їх зберігання в ізольованих приміщеннях (кімнатах, кухнях, котельнях);
- 25% - дрова, що були висушені на зовнішньому повітрі під дахом (навіси, сараї, склади);
- 50% - сирі дрова зі свіжозрубаної деревини.

Таблиця 1

Залежність теплотворної спроможності дров від породи деревини та її вологості

Порода	Теплотворна спроможність, ккал/дм ³ , за вологості, %			Теплотворна спроможність, кВт·г/м ³ , при вологості, %		
	12%	25%	50%	12%	25%	50%
Дуб	3240	2527	1110	3758	2932	1287
Модрина	2640	2059	904	3062	2389	1049
Береза	2600	2028	891	3016	2352	1033
Кедр	2280	1778	781	2645	2063	906
Сосна	2080	1622	712	2413	1882	826
Осіка	1880	1466	644	2181	1701	747
Ялина	1800	1404	617	2088	1629	715
Ялиця	1640	1279	562	1902	1484	652
Тополя	1600	1248	548	1856	1448	636

В елементному складі деревного палива переважають три хімічні компоненти: вуглець (С), водень (Н) та кисень (О), що утворюють у сумі близько 99 % від сухої маси. Вміст азоту (N) залишається зазвичай нижче 0,2%, сірки (S) – нижче 0,05 % від сухої маси. Вміст сірки у паливі становить інтерес насамперед через виникнення сірчистих відходів, однак, при її високому вмісті може виникати загроза низькотемпературної корозії у газоходах та димарі. Оскільки хлор (Cl) також може викликати корозію поверхонь нагрівання, важливо знати і його вміст у паливі. Хлор може створювати проблему при спалюванні, наприклад, тріски хвойних порід, якщо їх частка в паливі досить велика.

Хоча вміст важких металів у деревній масі не сягає небезпечних величин, у випадку жорстких вимог до охорони довкілля на них слід уважатися. У різних частинах дерева містяться у малих кількостях нікель, арсен, кадмій, хром, мідь, ртуть, свинець та цинк.

Поряд з деревним паливом використовують паливо рослинного походження, у тому числі енергетичні сіно та солому. Властивості біомаси рослин значною мірою залежать від місця вирощування, пори року і погоди, ґрунту і добрив. Наприклад, вміст хлору у рано зібраній соломі майже у 4 рази вище, ніж у пізній. Максимальний вміст хлору може досягати 0,97 %, і це впливає на корозію поверхонь нагрівання при спалюванні.

Типові значення показників, які характеризують властивості природних деревних матеріалів без кори, листя та хвої, або з незначною їх кількістю у відповідності до ISO 17225-1:2014 наведено у табл. 2. Саме з використанням цих показників вираховують фізико-хімічні характеристики вироблюваного біопалива.

Таблиця 2

Типові значення показників складу хімічних речовин у деревних матеріалах без кори, листя та хвої, або із незначною їх кількістю

Назва показника	Одиниця вимірювання	Хвойна деревина		Листяна деревина	
		Типове значення	Типовий діапазон значень	Типове значення	Типовий діапазон значень
Зольність	%	0,3	0,1-1,0	0,3	0,2-1,0
Вища теплота згоряння	МДж/кг	20,5	20,0-20,8	20,1	19,4-20,4
Нижча теплота згоряння	МДж/кг	19,1	18,5-19,8	18,9	18,4-19,2
Вуглець, С	%	51	47-54	49	48-52
Водень, Н	%	6,3	5,6-7,0	6,2	5,9-6,5
Кисень, О	%	42	40-44	44	41-45
Азот, N	%	0,1	<0,1-0,5	0,1	<0,1-0,5
Сірка, S	%	<0,02	<0,01-0,02	0,02	<0,01-0,05
Хлор, Cl	%	0,01	<0,01-0,03	0,01	<0,01-0,03
Фтор, F	%	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005
Алюміній, Al	мг/кг	100	30-400	20	<10-50
Кальцій, Ca	мг/кг	900	500-1000	1200	800-20000
Залізо, Fe	мг/кг	25	10-100	25	10-100
Калій, K	мг/кг	400	200-500	800	500-1500
Магній, Mg	мг/кг	150	100-200	200	100-400
Марганець, Mn	мг/кг	100	40-200	83	-
Натрій, Na	мг/кг	20	10-50	50	10-200
Фосфор, P	мг/кг	60	50-100	100	50-200
Кремній, Si	мг/кг	150	100-200	150	100-200
Титан, Ti	мг/кг	<20	<20	<20	<20
Арсен, As	мг/кг	<0,1	<0,1-1,0	<0,1	<0,1-1,0
Кадмій, Cd	мг/кг	0,10	<0,05-0,50	0,10	<0,05-0,50
Хром, Cr	мг/кг	1,0	0,2-10,0	1,0	0,2-10,0
Мідь, Cu	мг/кг	2,0	0,5-10,0	2,0	0,5-10,0
Ртуть, Hg	мг/кг	0,02	<0,02-0,05	0,02	<0,02-0,05
Нікель, Ni	мг/кг	0,5	<0,1-10,0	0,5	<0,1-10,0
Свинець, Pb	мг/кг	2,0	<0,5-10,0	2,0	<0,5-10,0
Ванадій, V	мг/кг	<2	<2	<2	<2
Цинк, Zn	мг/кг	10	5-50	10	5-100

Дані отримано за результатами досліджень, що було проведено у Швеції, Фінляндії, Данії, Нідерландах та Німеччині.

Відомі дані щодо хімічного складу деревної сировини дозволяють спрогнозувати (розрахувати) приближене значення теплотворної спроможності кінцевої продукції – пелет (брикетів). З урахуванням того, що теплову енергію отримують від згоряння сухої беззолної маси, можна вважати, що теплотворна спроможність значною мірою залежить від рівня вологості, з огляду на те, що випаровування води також потребує додаткових витрат енергії. Таким чином, розрахункову ВТС пелет (брикетів) можна досить точно визначити за формулою, яку отримано емпіричним шляхом, за результатами проведених дослідів:

$$ВТС = 0,3491 \cdot C + 1,1783 \cdot H + 0,1005 \cdot S - 0,0151 \cdot N - 0,1034 \cdot O - 0,0211 \cdot A, \text{ МДж/кг де,}$$

C - вміст у складі пелет вуглецю (C);

H - вміст у складі пелет водню (H);

S - вміст у складі пелет сірки (S);

N - вміст у складі пелет азоту (N);

O - вміст у складі пелет кисню (O);

A - вміст у складі пелет золи у вагових %.

Як слідує з цієї формули, збільшення вмісту вуглецю та водню підвищує ВТС, а збільшення вмісту азоту, кисню та золи знижує ВТС. Необхідно відзначити, що у середньому значення розрахункової теплотворної спроможності на 1,8 % нижче за виміряне значення ВТС. Природно, що пелети (брикети) із більш високою теплотворною спроможністю, мають більш привабливі споживчі якості, та їх легше продавати. Виробник може впливати на вміст указаних вище хімічних елементів у пелетах (брикетах) шляхом цілеспрямованого вибору сировини, його підготування та зменшення втрат сировини під час вироблення продукції на конкретному підприємстві. Наприклад, вміст золи зазвичай складає декілька відсотків, або долі відсотка (0,3 % у деревині ялини або берези без кори, 1,6 % у березовій корі та 3,4 % у корі ялини). Різні породи дерев відрізняються вмістом азоту, яке складає у середньому 0,75 %. Наприклад, тріска, яку було отримано з так

званої азотфіксуючої деревини таких дерев, як вільха, містить більш ніж у два рази більше азоту, ніж тріска, яку було отримано з деревини хвойних порід. З огляду на те, що плавкісні характеристики золи біопалив безпосередньо впливають на роботу котла, необхідно під час вироблення пелет та брикетів значну увагу приділяти саме цим характеристикам. Плавлення золи може викликати шлакування топки та виникнення щільних відкладень на конвективних поверхнях нагрівання, що особливо актуально в умовах України, при переведенні котельного обладнання на використання альтернативних палив.

Для визначення плавкісних характеристик золи існує ряд стандартів: американський ASTM D1857 та європейські ISO 540 та DIN 51730. За стандартом ASTM вимірюють зміну форми стандартного конуса золи при його нагріванні в окисному середовищі (рис. 3).

Плавкісні характеристики деревної золи можуть коливатися у широких межах залежно від виду дерева, місця зростання, включень, що потрапили у паливо (наприклад із ґрунту). Відрізняється й зола різних частин дерева. З літературних джерел відомо, що плавкісні характеристики деревної золи достатньо високі.

Якщо у золи кори температура розм'якшення вище 1500°C та вона не викликає шлакування топки й колосника, то для золи ошурок і тріски вона нижче, і для того, щоб уникнути проблем шлакування необхідно строго витримувати режим горіння. Температура плавлення золи рослинної біомаси може бути значно нижчою, ніж у золи деревних палив, розм'якшення золи соломи жита, вівса та ячменя починається при дуже низьких температурах ($735 - 840^{\circ}\text{C}$), що необхідно враховувати при виборі технології спалювання й налагодженні режиму горіння у топці.

Висновки. Енергоефективну технологію вироблення пелет (брикетів) необхідно базувати на науково обґрунтованих методах прогнозування (розрахування) якості біопалива, яке виробляють із біополімерів різного походження. Запропоновані автором методи базуються на:

1. аналізуванні та контролюванні хімічного складу, фізичних та реологічних властивостей сировинної бази, її характеристиках, логістиці постачання сировини та умовах її зберігання, які значною мірою впливають на вологість та склад сировини;
2. необхідності проведення сертифікації використовуваної сировини, що дасть можливість сертифікувати вироблене паливо за стандартами EN Plus;
3. прогнозуванні якості сировини, що дасть можливість обґрунтувати вибір технології виробництва біопалива з урахуванням прав інтелектуальної власності на розроблені інноваційні технології для вироблення пелет другого та третього покоління.

Вперше запропоноване автором використання інформації щодо прогнозування властивостей та якості вироблюваного твердого палива дасть можливість попередньо оцінити технічні, екологічні та економічні параметри проекту створення пелетного виробництва, визначити та обґрунтувати термін його окупності та створить прогноз прибутковості.

References

1. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. Brussels, Belgium: European Council. (2012).
2. Pro Natsional'nyy plan diy z vidnovlyuvanoyi enerhetyky na period do 2020 roku. № 902-r. (2014).
3. Lugovaya, D., (2013). Printsipi ustoychivogo proizvodstva drevesnogo biotopliva. *Les I Klimat, Ustoychivoye Lesopol'zovaniye*, 4 (37), 36-42
4. Berthold Otzisk, Kurita Europe, Quality control in biofuels production, Retrieved from <https://www.digitalrefining.com/article/1001002/quality-control-in-biofuels-production#.X8OtYmgza70>
5. Voytov, V.A., Kravtsova, N.V., Bunetskiy, V.A. (2012). Vlazhnoye pressovaniye - odin iz putey snizheniya energozatrat pri proizvodstve tverdogo biotopliva iz biomassy. *Khraneniye i pererabotka zerna*, 11 (161), 48 – 53.

Отримано в редакцію 15.07.2020
Прийнято до друку 05.11.2020

Received 15.07.2020
Approved 05.11.2020

1 – вихідний стан, до початку нагрівання (верхівка конуса гостра); IT – початок деформації, гостра вершина конуса округлюється; ST – точка розм'якшення, золотий конус сплющується так, що величина твірних зменшується до діаметру ($H = B$); HT – точка утворення напівсфери, конус перетворюється у напівсферу ($H = 0,5 \cdot B$); FT – точка розтікання, рідка зола розтікається по поверхні

Рис. 3 – Зміна форми стандартного конуса золи при його нагріванні