

## ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПИВОВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

Шовкалюк М.М., Голуб М.А., Шовкалюк Ю.В.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

В даній статті об'єктом дослідження є сучасне підприємство з виробництва пива та безалкогольних напоїв. Енерго- та ресурсозбереження є одним із шляхів зниження питомих виробничих витрат. Головною метою статті є опис результатів енергообстеження та аналіз впливу різних факторів в ході технологічного процесу на питомих споживання теплоти, а також розробка пропозицій відносно виробничих норм споживання енергоресурсів.

**Ключові слова:** підприємство, пиво, норми, споживання енергії.

**Постановка проблеми.** Для України актуальною задачею є підвищення енергетичної ефективності промислових підприємств та удосконалення методів моніторингу і контролю. Виробництво, зберігання та розлив пива являють собою енергоємні процеси, тому для їх мінімізації потрібним є раціональне використання енергії та ресурсів. Актуальним питанням є також аналіз та оцінювання впливу різних факторів під час протікання технологічних процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективне використання ресурсів передбачає моніторинг, контроль, нормування і аналіз витрат. Для об'єктивної оцінки використання енергоресурсів нормативи енергоспоживання повинні розроблятися окремо для кожного об'єкта, враховуючи індивідуальні особливості [1, 2]. Витрата енергії при виробництві солоду та пива складає значну частку виробничих витрат, для їх мінімізації потрібним є раціональне використання енергії та ресурсів (води, теплоенергії, стисненого повітря і т.д.) [3].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Невід'ємною частиною процесу управління є виконання функції контролю ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів. Питоме споживання енергії залежить від технологічного процесу, проте відмінність підприємств одне від одного може бути пов'язане з різницею в рецептурі продукції, вигляді упаковки, різної початкової температури води, кліматичними умовами [5]. Показники споживання енергетичних і водних ресурсів для пивоварних заводів на повний цикл виробництва [4, 5]: тепла енергія – 85÷120 МДж/гЛ, електрична енергія – 7,5÷11,5 кВт-год/гЛ, загальна витрата енергії – 100÷160 МДж/гЛ, водоспоживання – 4÷7 гЛ/гЛ. Укрупнені показники теплоспоживання не можуть свідчити про ефективність діяльності підприємства. Тому слід розробляти власні норми теплоспоживання для конкретного виробничого процесу для можливості впровадження моніторингу та планування. Власні норми питомого споживання потрібно встановлювати не для підприємства в цілому, а по цехам та підрозділам. Під час моніторингу та аналізу потрібно також оцінювати вплив особливостей технологічного процесу на питомих теплоспоживання.

**Мета статті.** Метою даної роботи є визначення питомих показників теплоспоживання на виробничі потреби за видами продукції для моніторингу і контролю, а також розробка математичних моделей для оцінювання впливу різних факторів під час технологічного процесу на споживання теплової енергії.

**Опис об'єкта дослідження.** Об'єктом дослідження є сучасне пивоварне підприємство що здійснює

свою діяльність в Україні. Потужність виробництва складає 470 млн. літрів пива на рік. Кількість працівників заводу – більше 400 осіб. Одна із особливостей полягає в тому, що для виробництва пива всіх найменувань характерна однорідна структура технологічних процесів, підготовка сировини, варка суслу, головне бродіння, доброджування, фільтрація та розлив готового пива. Особливістю пивоварного виробництва є також достатньо довга тривалість виробничого циклу в зв'язку з наявністю природних біологічних процесів. Більш детально організація управління виробництвом, виробнича структура підприємства та аналіз споживання енергетичних ресурсів описані в [6]. Для оцінювання фактичних обсягів споживання енергоресурсів в рамках дослідження виконано збір інформації по споживанню води, теплової енергії та CO<sub>2</sub> різними установками та споживачами та структуровано за підрозділами за два роки. Пивоварні заводи використовують воду не тільки для приготування пива, але і для нагрівання, охолодження, мийки виробничого обладнання та посуду для розливу, прибирання виробничих ділянок, миття транспортних засобів, у санітарно-побутових цілях. Втрати води мають місце в процесі кип'ятіння суслу і при утилізації пивної дробини [7]. Вуглекислий газ у пивоварній галузі є не тільки одним з виробничих відходів її діяльності, а й необхідним інгредієнтом при виробництві та розливі пива. Основним споживачем води та теплоенергії досліджуваного підприємства є цех пивовиробництва, а CO<sub>2</sub> – цех розливу.

**Аналіз показників виробничого процесу.** Виробничий процес приготування пива складається з таких технологічних стадій: очищення зерно-продуктів; змішування з водою і витримка при певних температурах, сприятливих для дії ферментів; фільтрування затору та промивання сировини водою; кип'ятіння одержаного водного розчину (суслу) з хмелем; відокремлення суслу від хмелю; освітлення та охолодження суслу; зброджування пивного суслу; доброджування пива; пастеризація. Пара подається у відварочний, заторний та суслотварочний котли для підігріву і кип'ятіння суслу, а також у теплообмінник для підігріву води. Процес кип'ятіння суслу в суслотварочному котлі є найбільш енерговитратним у всьому циклі приготування суслу у варильному відділенні. Дослідження проводилося для всіх стадій технологічного процесу виробництва суслу, починаючи від відварочного котла та закінчуючи теплообмінником для охолодження суслу. Основні параметри виробничого процесу, які визначалися та аналізувалися:

– параметри відварки: об'єм та температура води, маса зернопродуктів, початкова та кінцева температури відварки;

- параметри затору: об'єм та температура води, маса зернопродуктів, температура затору;
- параметри суміші відварки і затору: маса, початкова та кінцева температури;
- параметри заторного фільтру: температуру суслу на вході, об'єм першого суслу, об'єм слабого суслу, температура та маса промивної води, об'єм суслу, що надходить до буферної ємності;
- параметри теплообмінника: початкова та кінцева температури суслу;
- параметри суслотварильного котла: температура та об'єм суслу на вході, тиск та температура пари, кінцева температура суслу, споживання пари;
- параметри гідроциклонного апарату: об'єм суслу, об'єм білкових речовин;
- параметри теплообмінника для охолодження: початкова та кінцева температури суслу, температури гарячої та холодної води, об'єм холодної води для охолодження, об'єм охолоджуваного суслу.

Вихідні дані отримувалися з приладів технічного обліку, технологічних листів варок, а також з програмного забезпечення «Meura Montelektro», яке відображає у реальному часі хід процесу. Всього було проведено по 20 вимірів для кожного виду продукції заводу. Задавання параметрів технологічного процесу здійснюють оператори варильного відділення за технологією. Однак в ході технологічного процесу параметри можуть змінюватися під впливом багатьох факторів. В якості прикладу на рис. 1 зображено температури відварки, затору та їхньої суміші для 20 вимірів циклів варіння суслу «Славутич». Температура відварки повинна бути 64°C, затору 51°C, а їхньої суміші 64°C.

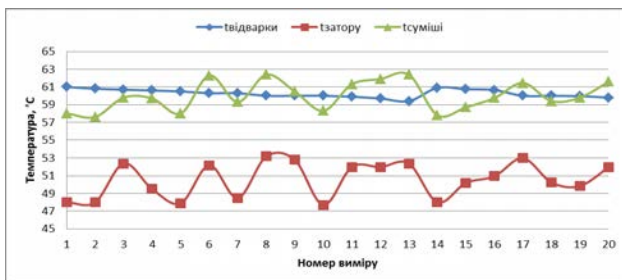


Рис. 1. Температури суслу

Джерело: розроблено авторами

Проаналізуємо інтервали значень основних параметрів технологічного процесу (див. табл. 1 на прикладі одного з видів суслу).

Дані в таблиці 1 свідчать, що параметри процесу не є постійними величинами, вони коливаються, що в результаті впливає на енергоспоживання. Детально оцінка впливу різних факторів на питоме теплоспоживання наведено в [6]:

- вплив витрати пари на суслотварильний котел для різних видів суслу,
- вплив мінімальних та максимальних значень температури суміші відварки та затору на питоме теплоспоживання на прикладі різних видів суслу;
- вплив температур робочого тіла технологічного процесу,
- вплив масових показників, тощо.

На підняття температури на 1°C у відварочному котлі витрачається в залежності від виду суслу від 198 до 213 МДж на 1 варку. Це є впливовим фактором на споживання пари в ході технологічного процесу. Маса суміші відварки та затору підігривається у три етапи для витримування температурних пауз у 63°C, 72°C та 78°C. Чим більша початкова температура суміші, тим менше теплової енергії по-

трібно витратити на підігрів до 78°C. На підняття температури на 1°C у відварочному котлі витрачається залежно від виду суслу від 131 до 152 МДж на 1 варку. Чим більша маса відварки, тим більше теплової енергії потрібно витратити на її підігрів. Збільшення маси відварки на 1000 кг призведе до збільшення споживання теплоенергії на 156 МДж (сусло «Славутич»). Аналогічний аналіз виконано для інших видів суслу. Межі коливань, спричинені впливом такого фактору, як маса відварки, становлять від 146 до 167 МДж.

Таблиця 1

**Інтервали значень основних параметрів  
(на 1 порцію за технологічний цикл)**

Параметр	min	max	max-min	Δ, %, відносно середнього значення
Кількість зернопродуктів для відварки, кг	3735	3983	248	6,4
Маса води на відварку, кг	12060	12840	780	6,4
Початкова температура відварки, °C	59,4	61	1,6	2,7
Кількість зернопродуктів для затору, кг	7615	7985	370	4,7
Маса води на затор, кг	17560	18060	500	2,8
Температура затору, °C	47,7	53,2	5,5	10,9
Температура суміші відварки і затору, °C	57,6	62,4	4,8	8
Витрата пари на суслотварильний котел, кг	3070	3960	620	17,7

Джерело: розроблено авторами

CO<sub>2</sub> використовується для витіснення повітря з тари безпосередньо перед розливом готової продукції. На заводі функціонують 6 ліній розливу, лінія для розливу кег та лінія для жерстяної банки. З метою оцінювання фактичного споживання CO<sub>2</sub> виконано збір вихідної інформації за даними витратомірів, встановлених на кожній лінії. В ході дослідження були зібрані детальні дані по споживанню CO<sub>2</sub> протягом 3 місяців для усіх ліній розливу на підприємстві для різних форматів тари. Протягом процесу розливу спостерігаються піки споживання CO<sub>2</sub>, пов'язані зі стартом та зупинкою лінії, з поломками, тощо. Далі визначалися питомі усереднені значення споживання CO<sub>2</sub> на 1 гл продукції.

**Визначення питомих показників.** Виконаний збір статистичної інформації щодо основних параметрів технологічного процесу та їх аналіз дозволив визначити питомі показники. В результаті було визначено питоме усереднене теплоспоживання для 21 виду алкогольних напоїв та 2 безалкогольних на технологічний цикл (рис. 2), питоме споживання CO<sub>2</sub> (табл. 2) для різної тари.

Як бачимо, чим більший формат тари, тим менше споживання CO<sub>2</sub>.

**Математичне моделювання технологічного процесу.** Об'єкт дослідження при моделюванні: варильне відділення пивоварного заводу. Предмет дослідження: технологічний процес виробництва суслу (у спрощеному вигляді) принципова технологічна схема зображена на рис. 3).

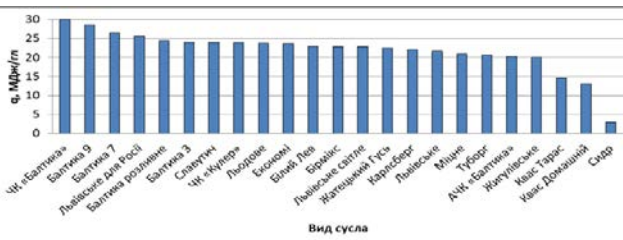


Рис. 2. Питоме споживання теплоенергії для різних видів сусла

Таблиця 2

Питоме споживання CO<sub>2</sub> різними форматами тари

Лінія розливу	Формат тари	Питоме споживання CO <sub>2</sub> , кг/гЛ
BGL-4	0,2 л	0,72
	0,3 л	0,33
	0,33 л	0,32
	0,5 л	0,57
BGL-7	0,44 л	0,45
	0,5 л	0,32
PET-3	1 л	0,37
	1,25 л	0,19
	1,5 л	0,09
	2 л	0,04
PET-5	1 л	0,69
	2 л	0,75
	2,5 л	0,67
KEG	30 л	0,6
	50 л	0,45
CAN-2	0,33	1,61
	0,5	1,22
	0,55	0,98

Джерело: розроблено авторами



Рис. 3. Принципова технологічна схема виробництва сусла

Джерело: розроблено авторами

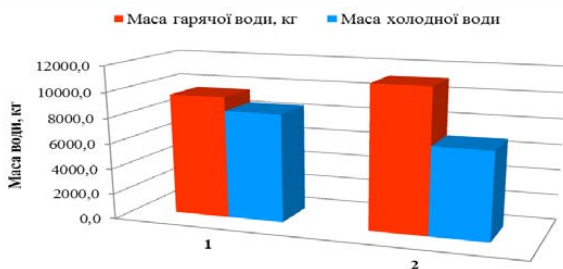


Рис. 6. Співвідношення маси гарячої і холодної води для затору

У якості вхідних даних досліджувалися наступні складові: масові та енергетичні потоки, як вихідні результати оцінювалися питомі витрати теплової енергії на виробництво різних видів сусла (рис. 4).

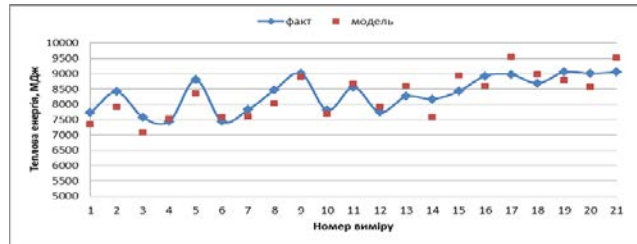


Рис. 4. Вхідні та вихідні потоки для розробки математичної моделі

Джерело: розроблено авторами

Для можливості проведення подальших досліджень створено математичну модель [7]. Перевірка адекватності моделі здійснювалася методом порівняння фактичних та розрахункових даних технологічного процесу виробництва на прикладі сусліварочного апарату (рис. 5). Похибка не перевищує 8%. За допомогою моделі досліджувався вплив різних факторів на теплоспоживання.

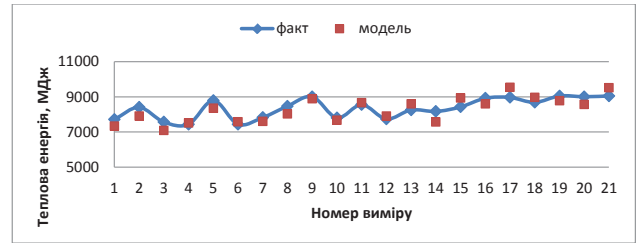


Рис. 5. Порівняння фактичних та розрахованих за моделлю даних

Розглянемо детально вплив зміни співвідношення холодної і гарячої води для затору для різних видів сусла (рис. 6, 7 на прикладі сусла «Туборг»).

Подібні розрахунки виконані для інших видів сусла, результати показують можливість зменшення питомого споживання від 6 до 10% за рахунок підвищення температури теплої води на 5°C.

**Висновки.** В результаті обробки статистичної інформації отримані норми споживання теплової енергії та CO<sub>2</sub> по кожному з видів продукції, що дозволить проводити моніторинг та контроль енергоспоживання. Розроблено математичну модель процесу виробництва сусла, за допомогою якої можна оцінювати вплив різних факторів впливу з урахуванням технологічних особливостей.

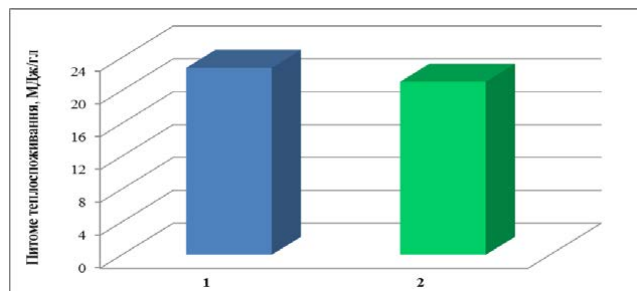


Рис. 7. Питоме усереднене теплоспоживання на одну варку сусла (1 – фактично; 2 – за моделлю (за умови підвищення температури суміші води на 5°C)

Джерело: розроблено авторами

**Список літератури:**

1. Контроль ефективності енерговикористання – ключова проблема управління енергозбереженням / Праховник А. В., Находов В. Ф., Борисенко О. В. // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2009. – № 8(66). – С. 46.
2. Остапчук М. В., Сердюк Л. В., Овсянникова Л. К. Система технологій. Підручник. – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 368 с.
3. Рябин В. В. Энергоресурсосбережение на пивоваренном заводе. – М., 2008.
4. Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива – М.: Профессия, 2001. – 912 с.
5. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда. Пивоваренное производство. – М., 2006.
6. Шовкалюк М. М., Аналіз енергетичної ефективності діяльності підприємства з виробництва пива [Текст] / Шовкалюк М. М., Голуб М. А. // Молодий вчений. – 2015. – № 2 (17).
7. Голуб М. А., Шовкалюк М. М. Дослідження виробничих норм теплоспоживання пивоварного виробництва / Збірник наукових праць XII міжнар. наук.-практ. конф. аспірантів, магістрантів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». [Київ, 22-25 квітня 2014] – К.: НТУУ «КПІ», ТЕФ, 2014. – С. 175.

**Шовкалюк М.М., Голуб М.А., Шовкалюк Ю.В.**

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПИВОВАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

### **Аннотация**

В данной статье объектом исследования является современное предприятие по производству пива и безалкогольных напитков. Энерго- и ресурсосбережение является одним из путей снижения удельных производственных затрат. Главной целью статьи является описание результатов энергообследования и анализ влияния разных факторов в ходе технологического процесса на удельное потребление теплоты, а также разработка предложений относительно производственных норм потребления энергоресурсов.

**Ключевые слова:** предприятие, пиво, нормы, потребление энергии.

**Shovkaliuk M.M., Holub M.A., Shovkaliuk Yu.V.**

National Technical University of Ukraine  
«Kyiv Polytechnic Institute»

## **ENERGY EFFICIENCY OF BREWING INDUSTRY AND MATHEMATICAL MODELING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES**

### **Summary**

In this article, the object of study is a modern enterprise for the production of beer and soft drinks. Energy and resource efficiency is one of the ways to reduce average unit cost. The main purpose of the article is to describe the results of energy audits and analysis of the influence of different factors of the technological process on the specific consumption of heat and the development of proposals for the energy consumption standards in production.

**Keywords:** company, beer, standards, energy consumption.