

Radiation-convective conveyor drying of basalt-bentonite cardboard

A.V. Timoshchenko (ORCID 0000-0001-6840-5491), Ye.V. Timoshchenko (ORCID 0000-0002-0012-2732), O.V. Hyliienko (ORCID 0000-0002-2220-3154), I.P. Bieliaieva (ORCID 0000-0001-5456-8169)

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, str. Bulakhovskogo, 2, Bldg. 2, Kyiv, 03164, Ukraine
Tel.: +380444243285, +380444241156
E-mail: a_timoshchenko@ukr.net*

Article info: received 12.03.2019, revised 15.03.2019, accepted 26.03.2019

Timoshchenko, A.V., Timoshchenko, Ye.V., Hyliienko, O.V., Bieliaieva, I.P. Radiation-convective conveyor drying of basalt-bentonite cardboard (2019) 1(42), doi: 10.26909/csl.1.2019.2

The manuscript presents the results of the research of the kinetics of radiation drying of basalt-bentonite cardboard. It has been established that in the case of high-temperature radiation drying of cardboard, the value of the reduced first critical moisture content in the area with low values – 0.17 is observed; compared to the same indicator for convective drying of slabs 50 and 100 mm thick - 0.41 and 0.20, respectively. This feature of the process allows you to raise the temperature in the first drying chamber to 570-600 °C without fear of local overheating of the material. It was noted that at the stage of the falling drying speed, which is largely implemented in the second drying chamber, in order to avoid local overheating of the material, the temperature in the chamber is limited to 440 °C. The decrease in the temperature level of the process in the second drying chamber is compensated for by the active gas-dynamic environment, in which the average speed of the drying agent in the inlet action zone can reach values of ± 5 m/s. The results of the controlled operation of the pilot conveyor drying installation are given. Its satisfactory specific energy indicators are noted, which for the same type of installations can reach values of 1200 - 2000 kcal/kg of moisture. In conclusion, it is noted that, in addition to the traditional positions of the heat balance of the plant, an energy-efficient modernization of a conveyor drying plant should include reducing losses with a spent drying agent, with recuperative losses through walling structures, with unorganized gas exchange in the drying chamber, and such positions as efficient drying agent with the optimization of its gas dynamics in the drying chamber.

Key words: conveyor drying, basalt-bentonite cardboard, drying agent.

Радіаційно-конвективна конвеєрна сушка базальто-бентонітових картонів

А.В. Тимощенко, Є.В. Тимощенко, О.В. Гулієнко, І.П. Беляєва

Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

У роботі наводяться результати дослідження кінетики радіаційного сушіння базальто-бентонітового картону. Встановлено, що у випадку високотемпературного радіаційного сушіння картону спостерігається затягування величини приведенного першого критичного вологовмісту в область з низькими значеннями - 0,17, у порівнянні з аналогічним показником при конвективному сушінні плит товщиною 50 і 100 мм - 0,41 і 0,20, відповідно. Така особливість протікання процесу дозволяє підвищити температуру в першій камері сушіння до величин 570 – 600 °С, не зважаючи на небезпеку локального перегріву матеріалу. Відзначено, що на етапі падаючої швидкості сушки, який в значній мірі реалізується в другій камері сушіння, щоб уникнути локальних перегрівів матеріалу температура в камері обмежується величиною 440 °С. Зниження температурного рівня процесу в другій камері сушіння компенсується активною газодинамічною обстановкою, при якій середня швидкість агента сушіння в зоні дії припливного струменя може досягати величин ± 5 м/с, наводяться результати чисельного моделювання аеродинаміки агента сушіння в поперечному перерізі камери. Наводяться результати підконтрольної експлуатації дослідно-промислової конвеєрної установки сушіння. Відзначено її задовільні питомі енергетичні показники, які для аналогічного типу установок можуть досягати величин 1200 - 2000 ккал/кг вологи. На закінчення

відзначається, що енергоефективна модернізація конвеєрної сушильної установки повинна стосуватися крім традиційних статей теплового балансу установки - зниження втрат з відпрацьованим агентом сушіння, з рекуперативними втратами через огорожувальні конструкції, з неорганізованим газообміном в камері сушіння, і таких статей, як ефективно (інтенсивне) приготування агента сушіння з оптимізацією його газодинаміки в камері сушіння.

Вступ

Пласкі теплоізоляційні базальто-бентонітові вироби є найбільш технологічні вироби в будівництві та термореновації споруд, які вдало суміщають виключну пожежостійкість, екологічну толерантність, довговічність, високий опір тепловтрапам і значно перевищують, щодо якості, всі інші вироби, представлені на ринку. Але на заводі їх широкого розповсюдження постають значні питомі витрати енергії при їх виробництві, що спричиняє підвищення собівартості, а, відповідно, і ціни [1].

Окреме місце займають в класі базальто-бентонітових виробів картони, пласкі листкові вироби товщиною 5, 10, 15 мм (за існуючою номенклатурою виробництва). Картони широко застосовуються і як будівельні, і як спеціалізовані теплоізоляційні вироби, і як елементи систем вогнезахисту вентиляційних каналів та шахт, кабін ліфтів, внутрішніх вогнезахисних перегородок будівель цивільного та промислового призначення. Слід зазначити, що і структурно, і фізично базальто-бентонітові картони близькі до плит. Нижче наведено деякі характеристики базальто-бентонітових виробів (таблиця 1).

При цьому спостерігаються і відмінності, причинені, як вже зазначалося в ряді робіт, особливостями технології їх виробництва. В основу виробництва базальто-бентонітового картону покладено технологію виробництва паперу. На першому етапі відбувається виготовлення базальто-бентонітової суспензії – у великий об'єм з високошвидкісним перемішувачем послідовно додаються компоненти суспензії – вода, базальтове волокно, бентонітова глина, флокулянт. На другому етапі, готова суспензія перекачується на ділянку формування вологої заготовки, де неперервно, на барабанному

вакуум-фільтрі відбувається формування неперервної вологої заготовки. На третьому етапі заготовка калібрується, волога заготовка на конвеєрній стрічці кілька разів проходить через прижимні валки, при цьому додатково механічно видаляється частина вологи, формуються задані товщина і густина виробу. На четвертому етапі заготовка сушиться. Сушіння проводиться у двох камерах. Поки волога неперервна заготовка не має механічної міцності, її сушіння і транспортування здійснюється на стрічці конвеєра. Після набування заготовкою механічної міцності, сушіння продовжується в камері з рольгангом. На п'ятому етапі висушене полотно картону розрізається і складається.

Як об'єкт сушки базальто-бентонітовий картон може бути віднесений до капілярно-пористих колоїдних тіл. За аналогією з проведеними раніше дослідженнями [3 - 5] можна очікувати, що весь цикл сушіння буде розподілений на періоди, які відрізняються між собою характером зміни вологовмісту у часі, швидкістю сушки і розподілом температури по перерізу виробу. Дослідження, що проведені на базальто-бентонітових плитах товщиною 50 і 100 мм виявили тенденцію скорочення тривалості першого періоду сушки із зменшенням товщини плити. При переході до картонів товщиною 5, 10 і 15 мм і підвищених температур в камері сушіння (до 600 °С) слід також очікувати збільшення швидкості сушки, при загальному скороченні її тривалості.

Матеріали та методи дослідження

Мета роботи полягає у вивченні процесу сушки базальто-бентонітового картону в конвеєрній сушильній установці неперервної дії, одержанні питомих енергетичних показників установки і виявленні можливостей її подальшої модернізації. При прове-

Таблиця 1.

Характеристика базальто-бентонітового картону [2]

Виріб	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c_p , кДж/(кг·К)	Розмір АхВхН, мм	Температура застосування, °С
Картон ТК-1	до 270	$0,0375+15,03 \cdot 10^{-5}t$	0,84	(700...1250)×850×5; 10; 15	$t_3 \leq 850$

денні роботи, експериментально, на лабораторному устаткуванні, було отримано кінетику радіаційної сушки зразків базальто-бентонітового картону, обробку результатів проведено методом Краснікова [6]. З використанням методів CFD моделювання і натурних експериментальних вимірів було одержано величини швидкості і температури агента сушіння у поперечному перерізі камери сушіння. В умовах підконтрольної експлуатації дослідно-промислової установки для різних технологічних режимів було одержано основні технічні характеристики і питомі енергетичні показники установки.

На рис. 1 наведено результати радіаційної сушки базальто-бентонітового картону товщиною 10 мм, при температурі в камері сушіння 566 °С і швидкості агента сушіння менш ніж 0,2 м/с. Час сушки склав 14 хв. Результати обробки кривої швидкості сушки і узагальненої кривої сушки, представлені на рисунках 2 та 3, відповідно, і зведені в таблицю 2.

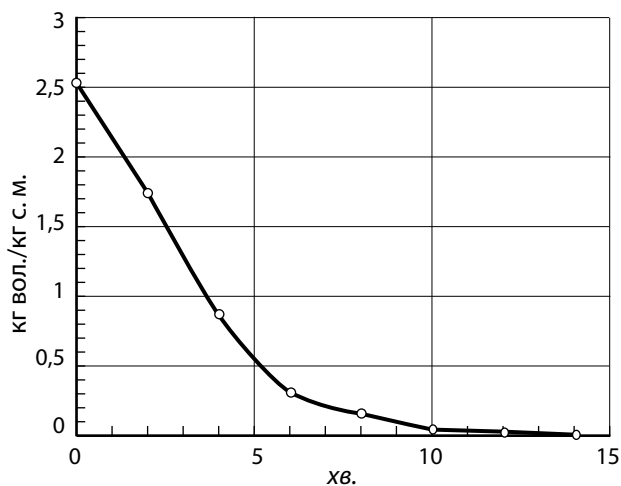


Рис. 1. Крива радіаційної сушки базальто-бентонітового картону товщиною 10 мм, температури в камері 566 °С і швидкості агента сушіння менш ніж 0,2 м/с

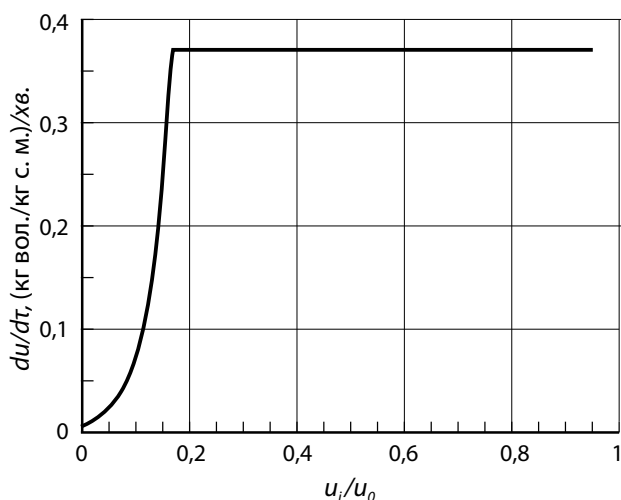


Рис. 2. Крива швидкості сушки картону товщиною 10 мм

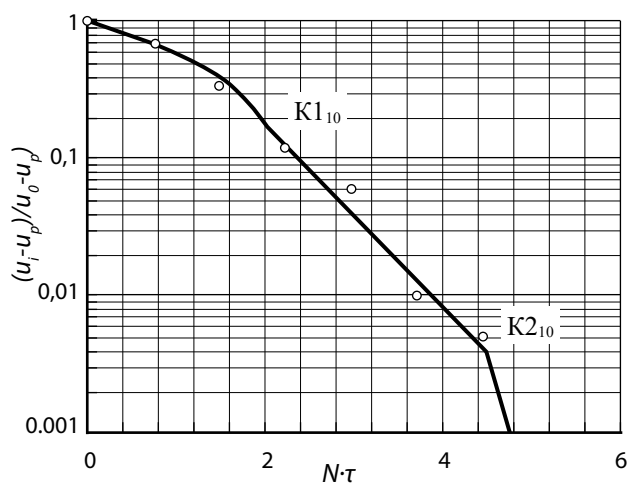


Рис. 3. Узагальнена крива радіаційної сушки базальто-бентонітового картону товщиною 10 мм

Таблиця 2.

Результати обробки кривих сушіння

№ пп	Товщина виробу, δ, мм	Температура в камері сушіння, t _c , °С	Швидкість сушки в першому періоді, N, кг вол./кг с. м.	Приведений критичний вологовміст	
				K1 ₁₀	K2 ₁₀
1	10	566	0,37	0,17	0,004

Результати та їх обговорення

Умови проведення експерименту з радіаційного сушіння базальто-бентонітового картону наводяться в таблиці 3.

Конвеєрна установка призначена для радіаційно-конвективної сушки теплоізоляційного базальто-бентонітового картону. В якості енергоносія використовується природний газ середнього тиску. Установка складається з двох камер, в яких забезпечуються різні термічні і газодинамічні умови. В якості агента сушіння використовується суміш продуктів згоряння природного газу з повітрям. В камері сушіння №1 коефіцієнт надлишку повітря в агенті сушіння складає 1,8 - 2,2 одиниці. В камері сушіння №2 коефіцієнт надлишку повітря в агенті сушіння складає 3,0 - 3,5 одиниці. Загальна довжина сушильної установки 26 метрів. Довжина камери №1 – 12 метрів. Довжина камери №2 – 12 метрів. Між камерами відкрита 2 метрова технологічна ділянка. Середня температура внутрішнього простору в камері №1 складає 570 – 600 °С. Дослідним шляхом встановлено, що для існуючої конструкції камери подальше підвищення температури в ній призводить до локальних перегрівів заготовки, і, як наслідок, втрати якості кінцевої продукції. Загальна кількість пальників в камері №1 – 16 штук, по 8 пальників з кожного боку. Пальники розташовані в «шаховому» порядку. Кожна пара пальників утворює свою циркуляційну зону (рис. 4).

В камері сушіння №2 підтримується температура до 440 °С. Верхнє значення температури обмежено умовами збереження якості продукції. Загальна кількість пальників у камері №2 – 10 штук, по 5 пальників з кожного боку. Розташування пальни-

ків – «шахове». Вся сушильна установка обладнана пальниками типу СГ. Відведення продуктів згоряння з камер сушіння здійснюється у верхній частині камери перед останньою парою пальників.

Дослідження газової динаміки у внутрішньому просторі камери сушіння виконувалося CFD методами. Моделювалася ідеалізована ситуація – ізотермічна турбулентна течія повітря над заготовкою базальто-бентонітового картону. Лінії плинину і вектора швидкостей агента сушіння в розрахунковій області наведено на рис. 5. Номерами 1-7 (рис. 5) позначено перерізи, для яких побудовано профілі швидкості та визначено її середні значення, рис. 6, таблиця 4. Задача розглядалася в 2D постановці. Моделювалася стаціонарна ізотермічна турбулентна течія повітря (використовувалася стандартна $k - \epsilon$ модель турбулентності). У вхідному перерізі задавалися величина швидкості повітря (20 м/с) і характеристики турбулентності потоку – інтенсивність

Таблиця 4.
Результати розрахунку середньої швидкості агента сушіння

Величина середньої швидкості агента сушіння, м/с, в перерізах 1-7 (рис. 5)						
1	2	3	4	5	6	7
-5,0	-5,1	-5,0	-5,0	-5,0	-4,9	-4,9

Таблиця 3.

Вихідні дані

№ пп	Найменування позиції	Позначення	Одиниці вимірювання	Величина
1	Товщина виробу	δ	мм	10_{-2}^{+0} *
2	Початковий вологовміст виробів	u_o	кг вол./кг с. м.	$2,5_{-0}^{+0,3}$
3	Рівноважний вологовміст	u_p	кг вол./кг с. м.	0,02
4	Густина виробів	ρ	кг/м ³	200
5	Температура агента сушіння (початкова)	t_c	°С	566_{-5}^{+0}
6	Швидкість агента сушіння	v	м/с	менше 0,2
7	Вологовміст агента сушіння (початковий)	d	г вол./кг с. пов.	0,5

* - діапазон зміни величини

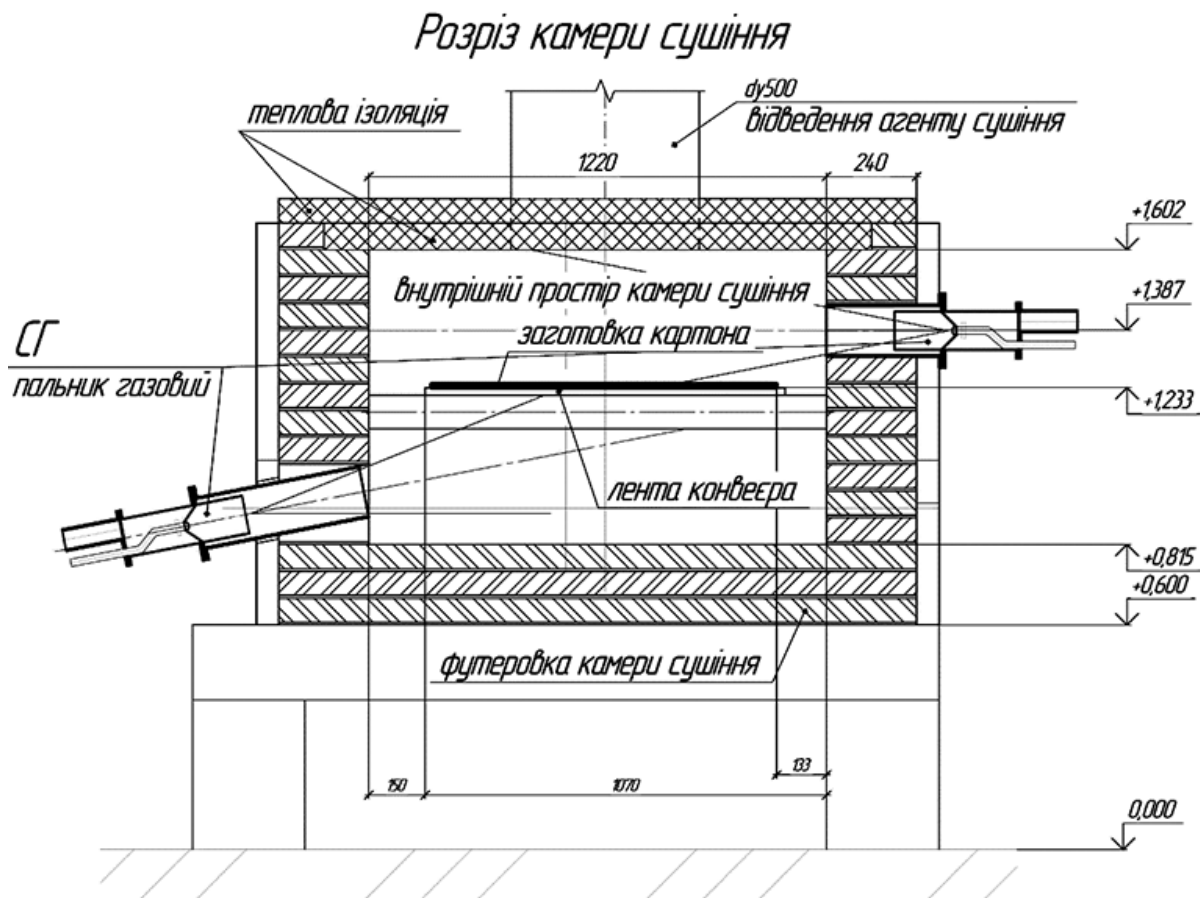


Рис. 4. Розріз камери сушіння конвеєрної установки (перетин перпендикулярний до напрямку руху картону)

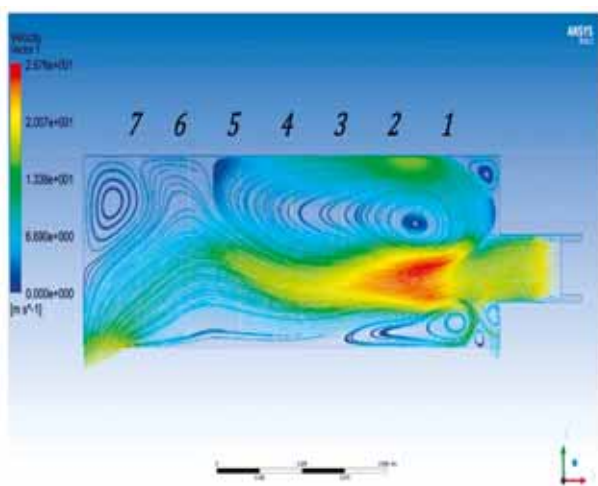


Рис. 5. Результати CFD моделювання аеродинаміки в камері сушіння

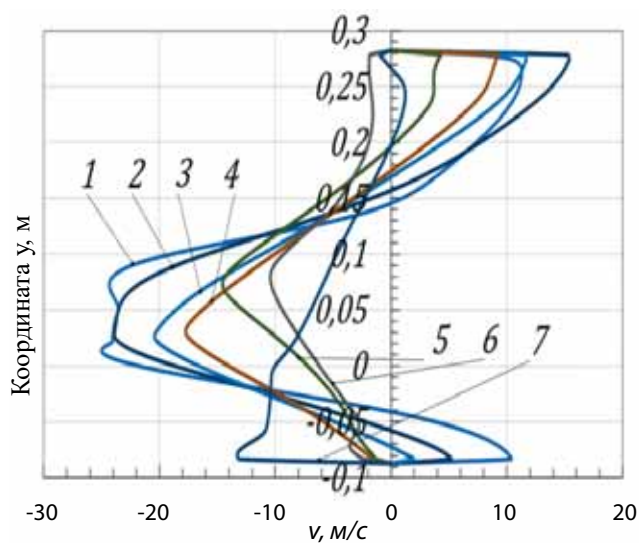


Рис. 6. Профілі швидкості агента сушіння у розрахунковій області, перерізи 1-7 (рис. 5)

турбулентності (5 %) і коефіцієнт турбулентної в'язкості (10). У вихідному перерізі задавалися величина надлишкового тиску (0 Па) і характеристики турбулентності потоку (аналогічні характеристикам у вхідному перерізі).

В камерах сушіння заготовка картону потрапляє в складну газодинамічну картину течії агента сушіння, де напрямок руху агента сушіння змінюється як по довжині камери, так і в границях поперечного перерізу камери. Інтенсивний газообмін призводить до осереднення температури агента сушіння над заготовкою картону по перерізу камери (рис. 7).

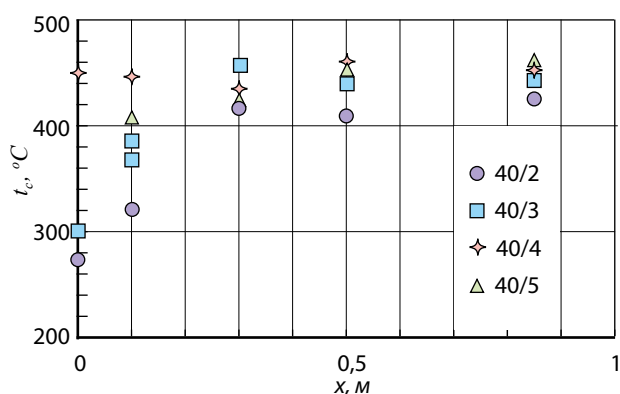


Рис. 7. Розподіл температури агента сушіння (t_e) по ширині сушильної камери (40 – величина надлишкового тиску природного газу, кПа; 2 - 5 – величини надлишкового тиску повітря, кПа, перед газовим пальником)

Нижче наводяться результати вимірювання температури агента сушіння над заготовкою картону по ширині камери сушіння, для різних величин коефіцієнта надлишку повітря у складі агента сушіння. Як можна бачити, із зміною величини надлишкового тиску повітря перед газовим пальником вирівнюється середня температура агента сушіння по ширині камери. В експерименті надлишковий тиск природного газу перед пальником не змінювався і відповідав 40 кПа, а надлишковий тиск повітря (окиснювача) змінювався в діапазоні від 2 до 5 кПа. Підконтрольна експлуатація дослідно-промислового зразку конвеєрної сушильної установки дозволила одержати її основні технічні характеристики і питомі енергетичні показники для сушіння картонів різної товщини. Результати експлуатації зведено в таблицю 5.

Висновки

Дослідження кінетики сушки дозволило встановити якісні та кількісні показники процесу радіаційної сушки базальто-бентонітового картону. У випадку з високотемпературною радіаційною сушкою картону спостерігається зтягування величини приведенного першого критичного вологовмісту в область з низькими значеннями $K1_{10} = 0,17$, у порівнянні з аналогічним показником при конвективному сушінні плит: $K1_{50} = 0,41$, $K1_{100} = 0,20$. Така особливість протікання процесу дозволяє підвищити температуру в першій камері сушіння

Таблиця 5.

Основні технічні характеристики конвеєрної установки

№ пп	Найменування позиції	Одиниці вимірювання	Величина (картон товщиною, мм)		
			5	10	15
1	Продуктивність установки за готовою продукцією	м ³ /добу	23	21	
2	Номінальна теплова потужність установки	МВт	1,265		
3	Час сушки базальто-бентонітового картону	хв.	8,3	13	23
4	Початковий вологовміст заготовки	кг вол./кг с. м.	2,0	2,5 - 2,8	
5	Питомі витрати енергії на кг випареної води	ккал/кг вол.	1970	2790	2950
6	КПД установки	%	32	23	22

до величин 570 – 600 °С, без ризику локальних перегрівів матеріалу. На етапі спадаючої швидкості сушки, який в основному реалізується у другій камері сушіння, задля уникнення локальних перегрівів матеріалу температура в камері обмежується величиною 440 °С. Зниження температурного рівня процесу у другій камері сушіння компенсується активною газодинамічною картиною, за якої середня швидкість агента сушіння в зоні дії припливного струменя може сягати величин ± 5 м/с. Результати підконтрольної експлуатації дослідно-промислової установки продемонстрували задовільні питомі енергетичні показники, які для аналогічного типу установок можуть досягати величин 1200 - 2000 ккал/кг вологи. Енергоефективна модернізація конвеєрної сушильної установки повинна стосуватися крім традиційних статей теплового балансу установки – зниження втрат із відпрацьованим агентом сушіння, з рекуперативними втратами через огорожувальні конструкції, з неорганізованим газообміном в камері сушки, – і таких статей, як ефективне (інтенсивне) приготування агента сушіння з оптимізацією його газодинаміки в камері сушіння.

References

1. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Базальты: от извержения до волокна / Аблесимов Н.Е., Земцов А.Н. – Москва: РАН Дальневосточное отделение. Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина. – 2010. – 400 с.
2. Джигирис, Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. – М.: Теплоэнергетик. – 2002. – 411 с.
3. Теплотехнический справочник: в 2 т./ [ред. В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев]. – М.: Энергия. – 1976. – Т. 2. – 896 с.
4. Тимощенко, А.В. Особенности прогрева поверхности теплоизолирующих плит на основе базальтового волокна при их сушке / Кремнев В.О., Шелиманова Е.В., Билецкая Е.В, А.В. Тимощенко // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловлажностная обработка материалов) СЭТТ. – 2011. – С. 184-188.
5. Красников, В.В. Кондуктивная сушка / Валерий Владимирович Красников. – М.: Энергия. – 1973. – 288 с.