

УДК 66.03

DOI: 10.18372/2310-5461.38.12824

*Жученко О. А.*, канд. техн. наук, доц.  
Національний технічний університет України  
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

*Коротинський А. П.*, аспірант  
Національний технічний університет України  
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»  
ihfantkor@gmail.com

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗРІДЖЕННЯ НА ПРОЦЕС НАГРІВУ БАГАТОКАМЕРНОЇ ПЕЧІ ВИПАЛЮВАННЯ ДИМОВИМИ ГАЗАМИ

### Вступ

Однією з головних технологічних операцій, що визначає якість вуглеграфітових виробів із заданими фізико-механічними властивостями є випалювання.

Головним процесом під час випалювання «зелених» заготовок є формування цементуючої коксової решітки з сполучного матеріалу. При цьому відбувається термічна деструкція сполучного матеріалу, та створення з нього напівкоксу і подальше перетворення його в кокс.

Отриманий в результаті спікання матеріал являє собою агломерат вуглецевих частинок, скріплених коксом сполучного. Це нове поєднання забезпечує такі цінні властивості як: міцність, термічна і хімічна стійкість, висока електропровідність [1].

Дослідження і вдосконалення технології випалювання вуглеграфітової продукції в багатокамерних печах випалювання закритого типу, розробка комплексу технічних і технологічних заходів з модернізації технології випалювання на основі розвитку наукових уявлень про процеси, що протікають у кільцевих камерних печах є досить складною та важливою науковою задачею [1].

### Постановка проблеми

Усі якісні показники вуглецевих виробів повною мірою залежать від температурного режиму кампанії випалювання та визначаються відповідними нормативними стандартами: державним стандартом ДСТУ 4494:2005 та технічними умовами ТУ У 27.9-00196204-005:2013 [2-3].

Саме тому дослідження температурних полів, що формуються у процесі випалювання за різних режимів його ведення є важливим етапом розробки системи керування даним процесом, яка повинна забезпечувати вихід готової продукції відповідної якості.

Відомо, що кількість повітря, що подається на горіння, визначається переважно, розрідженням у печі. Чим більше розрідження, тим більше поступає димових газів у камеру.

Це обмежує можливість управління тепловим режимом печі [4].

Для декомпозиції задачі дослідження і вдосконалення технології випалювання вуглеграфітової продукції в багатокамерних печах випалювання закритого типу, пропонується розглядати окремо вплив розрідження на етапі нагріву камери печі димовими газами. Саме тому задача дослідження впливу розрідження на процес нагріву камери печі димовими газами, а тому і на всю кампанію випалювання є важливою науковою задачею.

### Аналіз досліджень і публікацій

Відповідно до праць [5–6] наведені теоретичні та експериментальні результати дослідження впливу коефіцієнта поглинання димових газів, ступеня чорноти газових каналів, співвідношення між радіаційним і конвективним теплообміном, комбінованої пересипки, схеми завантаження камери печі, геометрії внутрішньої поверхні склепіння печі на процес випалювання електродної продукції в багатокамерних печах випалювання.

У наведених вище працях не розглядається етап нагріву камери печі димовими газами, як окрема складова кампанії випалювання та відповідно не розглядаються впливи керуючих технологічних параметрів, що впливають на даний процес.

**Метою** дослідження процесу нагрівання камери печі димовими газами є визначення впливу розрідження на перепад температур по заготовкам та по камері печі загалом, впливу розрідження на швидкість росту мінімальної та макси-

мальної температур у заготовках, а також виявлення зон з мінімальними та максимальними температурами.

#### Основна частина

У зв'язку з тим, що виконати дослідження, задачі якого сформульовані вище, на промисловому обладнанні неможливо за технічних та еко-

номічних причин, як метод дослідження використовувалося математичне моделювання на основі моделі [7].

Для подальшого числового моделювання прийнято наведені в табл. 1–4 фізичні властивості матеріалів печі випалювання та її завантаження відповідно до праць [8–10].

Таблиця 1

Теплофізичні властивості вогнетривкого шамоту

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1900	675	0,84
323	1900	797	–
373	1900	877	–
423	1900	933	–
473	1900	975	–
523	1900	1008	0,99
773	1900	1111	1,14
1023	1900	1176	1,29
1273	1900	1230	1,44
1523	1900	1279	1,59

Таблиця 2

Теплофізичні властивості матеріалу заготовок

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1635	690	8
400	1635	893	–
500	1635	1160	8,3
600	1635	1315	–
700	1635	1423	–
800	1635	1501	8,5
900	1635	1566	–
1000	1635	1620	8,8
1100	1635	1669	–
1200	1635	1710	9,3
1400	1635	1790	–

Таблиця 3

## Теплофізичні властивості теплоізоляційної шихти

$T, K$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	800	690	0,35
400	800	893	–
500	800	1160	–
600	800	1315	–
700	800	1423	–
800	800	1501	0,73
900	800	1566	–
1000	800	1620	–
1100	800	1669	–
1200	800	1710	1,25
1400	800	1790	–

Таблиця 4

## Теплофізичні властивості повітря

$T, K$	$c_p, \text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$
273	1005	0,0244
373	1009	0,0321
473	1026	0,0393
573	1047	0,046
673	1068	0,0521
773	1093	0,0574
873	1114	0,0622
973	1135	0,0671
1073	1156	0,0718
1173	1172	0,0763
1273	1185	0,0807
1373	1197	0,085
1473	1210	0,0915

Із праці [4] відомо, що розрідження повинно бути таким, щоб гази, які протягуються через піч, могли досягти потрібної швидкості для подолання сили тертя при проходженні через ряд камер та всі борова.

Крім того, гази, що відходять, віддаючи тепло у камерах, покидають піч з порівняно низькою температурою, із-за чого природна тяга може виявитись недостатньою. Для нормальної роботи печі потрібне штучне розрідження.

Розрідження безпосередньо за піччю повинно бути не менш як  $60 \cdot 9,80665$  Па. Моделювання проводиться над камерою, у яку завантажено 5 заготовок діаметрами 300, 400, 500, 600, 700 мм та висотою 2100 мм, розміщені в касеті зліва направо.

Тривалість дослідження 480 год за максимальної температури димових газів, що подаються у камеру печі, 1300 К. Початкова температура заготовок, пересипки та інших складових печі прийнято 300 К.

Дослідження впливу розрідження на процес випалювання вуглецевих виробів відбувається для порівняння результатів моделювання за різного розрідження, а саме при 100 та 200 Па.

#### Дослідження 1 (при розрідженні 200 Па)

Як видно з результатів моделювання (рис. 1), наприкінці дослідження має місце холодна область печі. Найвищою є температура стінок вогневого колодязя 1020 К при розрідженні 200 Па,

мінімальною є температура протилежної стінки — 897,13 К. Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 122,87.

Максимальна та мінімальна температури по всьому об'ємові пересипки становлять 983,72 К та 921,87 К відповідно. Перепад температури по пересипці — 61,87 К. Як впливає з результатів моделювання, показаних на рис. 2, у температурному полі пересипки прослідковується наявність холодної області. Температура заготовок зменшується зверху до низу печі, що пояснюється зменшенням температури димових газів, при проходженні газового тракту камери печі.

Очевидним є перепад температури від більш теплої сторони печі до більш холодної. Результати числового моделювання температурних полів заготовок показано на рис. 3.

Температура заготовок приймає значення 925–967 К, перепад температури по заготовках становить 42 К відповідно.

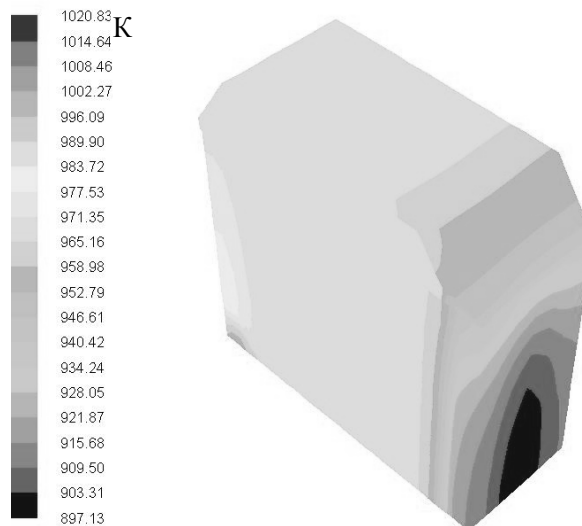


Рис. 1. Температурне поле камери печі при розрідженні 200 Па

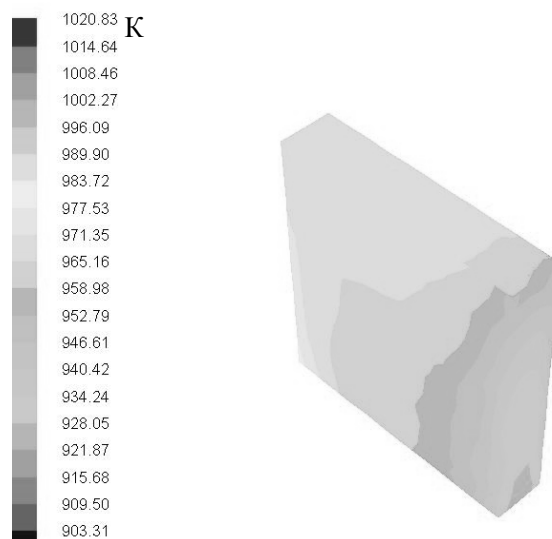


Рис. 2. Температурне поле пересипки при розрідженні 200 Па

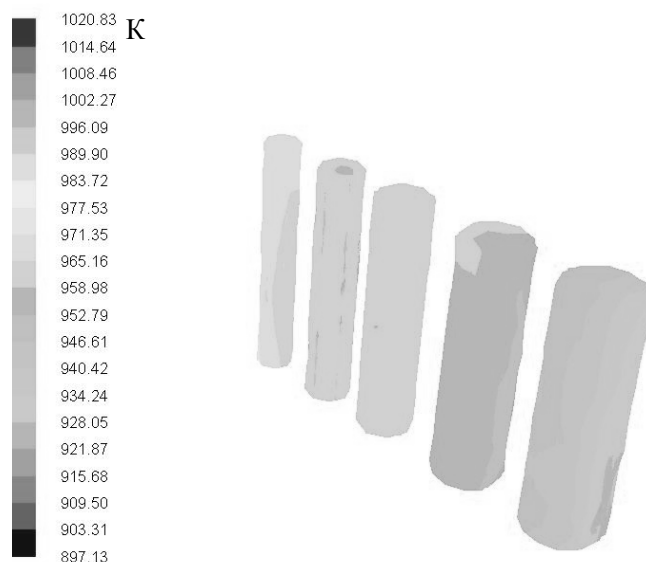


Рис. 3. Температурні поля заготовок при розрідженні 200 Па

На рис 4–5 наведені графіки швидкості зростання мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом усього дослідження за наявності розрідження 200 Па.

Як видно з результатів найдовше нагрівається заготовка 5.

Це можна пояснити розташуванням цієї заготовки у холодній області печі, де значення температур значно нижче.

Середня швидкість підводу теплоти становить 3.9 К/год.

**Дослідження 2 (при розрідженні 100 Па)**

З отриманих результатів (рис. 6) дослідження видно, що при зменшенні розрідження темпера-

тура по об'єму печі порівняно з дослідженням 1 збільшилась.

Найвищою є температура стінок вогневого колодязя 1021 К, мінімальною є температура протилежної стінки 897,39 К.

Перепад температури по всьому об'ємі камери печі сягає 123,61 К.

Порівняно з результатами попереднього дослідження, можна сказати, що перепад температури по всьому об'єму пересипки незначно змінився, та для даного дослідження становить 60 К, що говорить про несуттєвий вплив розрідження на температуру пересипки. Результати моделювання наведено на рис. 7.

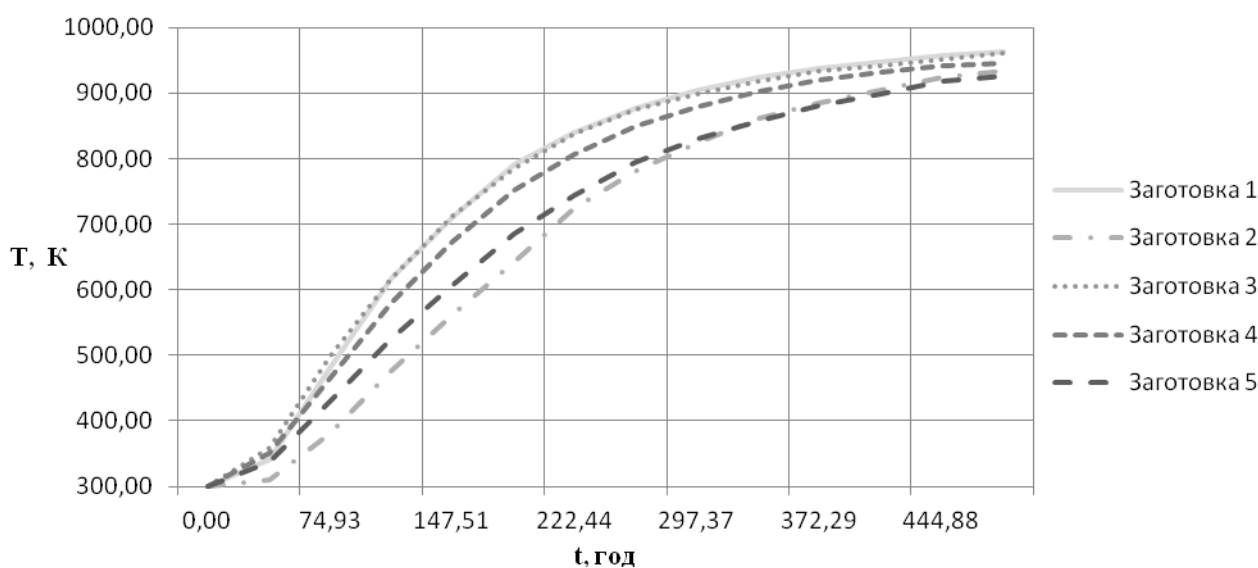


Рис. 4. Графік зміни мінімальної температури по заготовках при розрідженні 200 Па

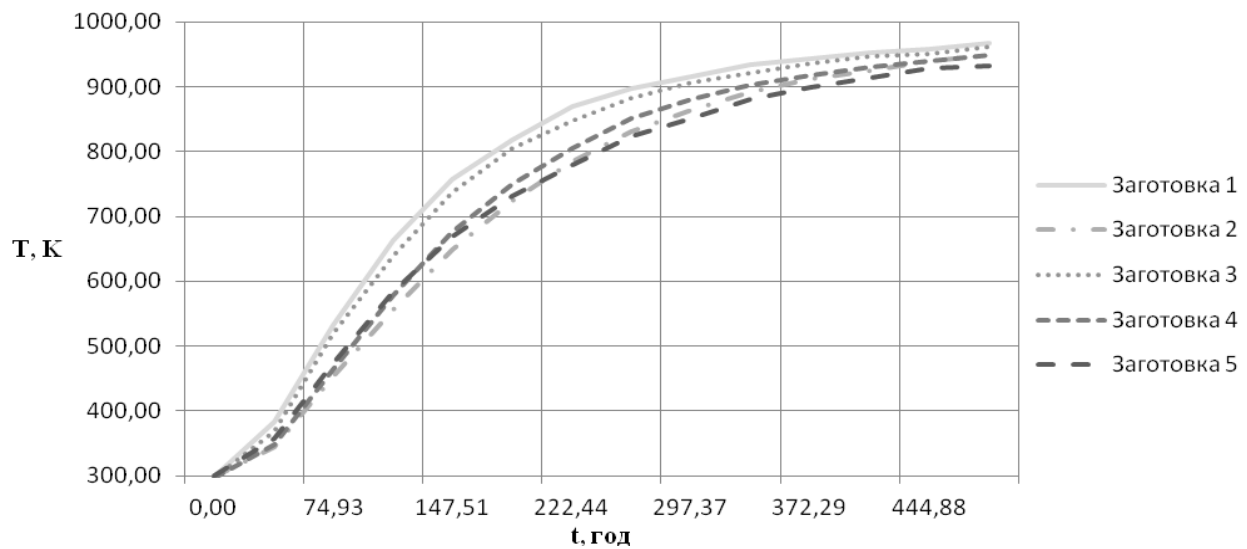


Рис. 5. Графік зміни максимальної температури по заготовках при розрідженні 200 Па

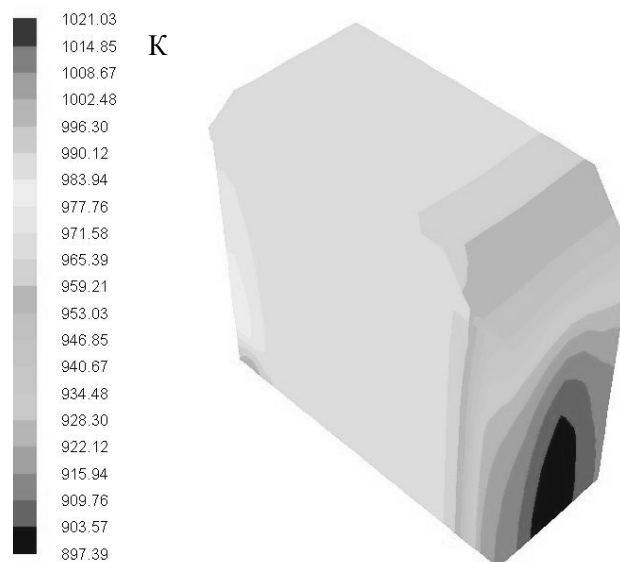


Рис. 6. Температурне поле камери печі при розрідженні 100 Па

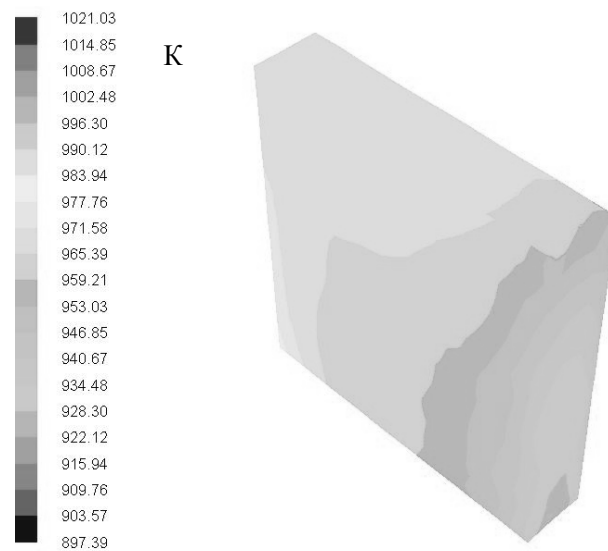


Рис. 7. Температурне поле пересипки при розрідженні 100 Па

Результати числового моделювання температурних полів заготовок показано на рис. 8.

Температура заготовок приймає значення 922–962 К. Середнє значення перепаду температур порівняно з попереднім дослідженням зменшилось на 2 К.

На рис. 9–10 наведені графіки швидкості зростання мінімальної та максимальної температур у заготовках протягом усього процесу нагрівання камери печі при розрідженні 100 Па.

Середня швидкість підведення теплоти становить 3,88 К/год.

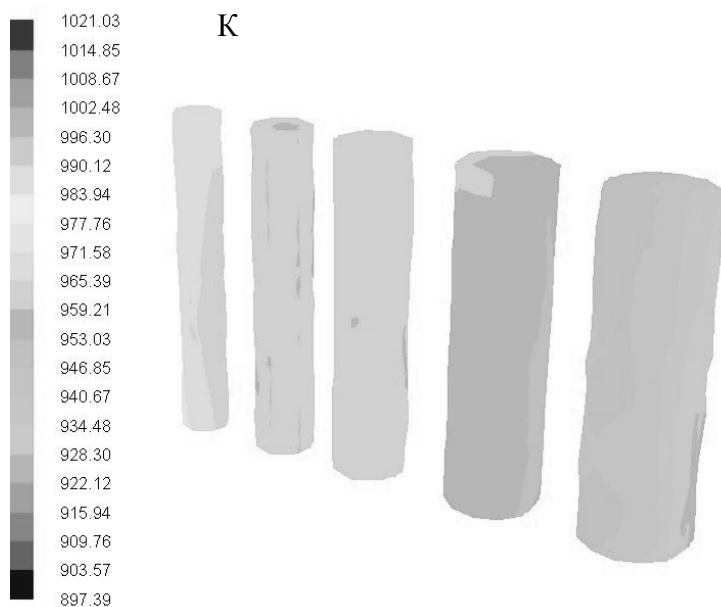


Рис. 8. Температурні поля заготовок при розрідженні 100 Па

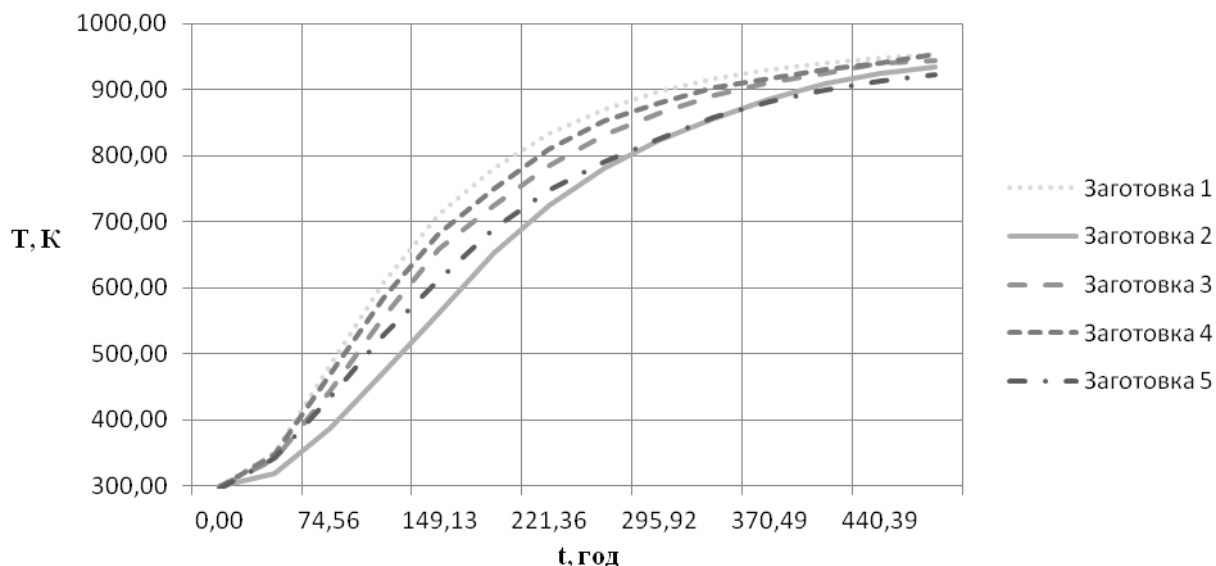


Рис. 9. Графік зміни мінімальної температури по заготовках при розрідженні 100 Па

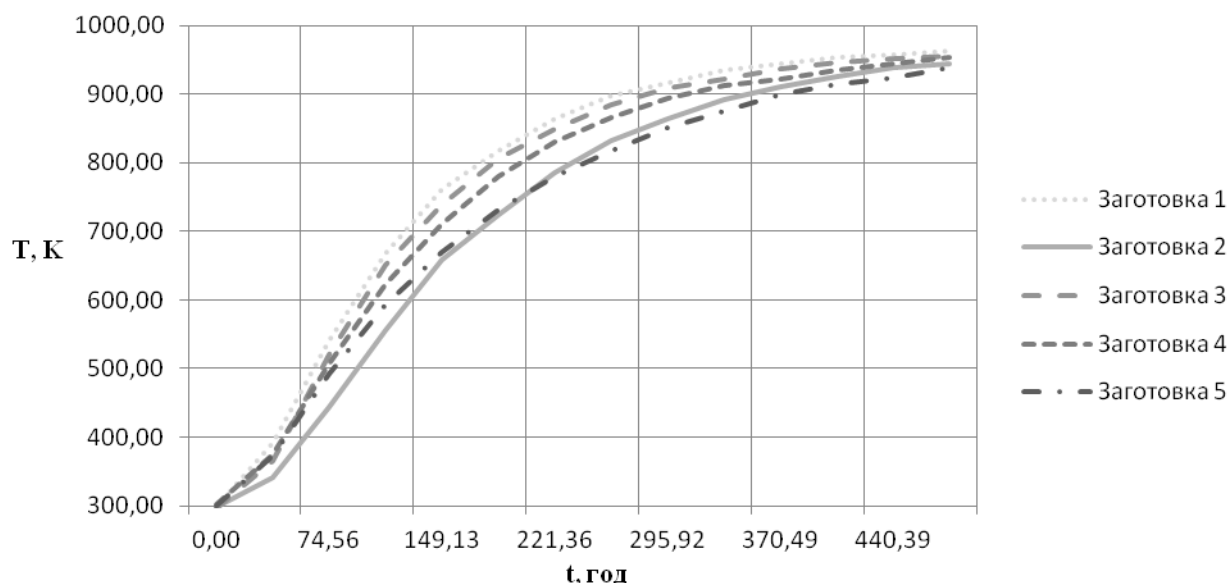


Рис. 10. Графік зміни максимальної температури по заготовках при розрідженні 100 Па

### Висновки

Наведені результати показують, що підведення розрідження має позитивний ефект.

Перепад температури за збільшення розрідження по всьому об'єму пересипки і заготовок збільшується.

Для даного дослідження ця зміна становить 1–2 К, проте збільшення розрідження призводить і до більш інтенсивнішого нагрівання заготовок, та камери печі загалом.

Збільшення розрідження удвічі призвело до збільшення швидкості підведення теплоти на 9–2 % протягом усього часу дослідження та на кінець дослідження становить 1,98 та 1,96 К/год при розрідженні 200 та 100 Па відповідно.

Підведення розрідження до камери печі призводить до покращення теплового режиму, проте є обмеження по розрідженню, адже за значних значеннях розрідження зростає швидкість димових газів.

Це, у свою чергу, призводить до зменшення часу, потрібного димовим газам для проходження газового тракту і часу теплопередачі відповідно.

У результаті маємо більшу температуру вихідних димових газів, що є позитивним ефектом з точки зору їх використання у наступній камері підігріву та відповідно меншу температуру по об'єму даної печі, що очевидно є негативним ефектом, адже дані втрати теплоти необхідно буде компенсувати на етапі «камера під вогнем», що призводить до додаткових енергозатрат.

Подальші дослідження мають бути присвячені дослідженню температурних полів за інших етапів та зміні інших факторів, що впливають на процес випалювання вуглецевих виробів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Малахов С. А. Совершенствование технологии обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах обжига закрытого. — Владикавказ, 2004.
2. Сухоруков И. Ф. Температурный график обжига заготовок в многокамерных печах / И. Ф. Сухоруков // Цветная металлургия. — 1963. — № 22.
3. Исследование обжига углеграфитовых заготовок / Т. Л. Молокова, Г. Д. Харлампович, И. Ф. Сухоруков // Химия твердого топлива. — 1977. — № 6. — С. 114–120.
4. Чалых Е. Ф. Печи электродных заводов: учеб. пособие / Е. Ф. Чалых, Л. Ф. Пашенкова. — М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1983. — 76 с.
5. Совершенствование регламентов обжига с учетом динамики газовой выделения обжигаемых заготовок / А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, И. В. Пулинец [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 6/5 (54). — С. 42–45.
6. Power saving at production of electrode products / Ye. N. Panov, S. V. Kutuzov, A. Ya. Karvatsky, I. L. Shilovich, G. N. Vasilchenko, T. B. Shilovich, S. V. Leleka, S. V. Danilenko, I. V. Pulinets, T. V. Chirka, T. V. Lazarev // XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia», (Krasnoyarsk, Russia, Sept. 7–9, 2011) : Proceedings of the Intern. Congress, Krasnoyarsk : «Verso», 2011. — P. 412–423.
7. Математична модель теплогідродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок / А. Я. Карвацький, І. В. Пулінець, І. Л. Шилович // Восточно-Европейский журнал передовых технологий — 2012. — №1 (4) С. 33–37.



8. **Лутков А. И.** Тепловые и электрические свойства углеродных материалов / А. И. Лутков. — М.: Металлургия, 1990. — 175 с.

9. А.с. 1755025 СССР. Способ укрытия теплоизоляционной шихты печи графитации / П. П. Сапко, В. П. Овсянников (СССР). — Открытия. Изобретения; опубл. 1992. Бюл. № 30.

10. Угольные и графитовые электроды для электропечей и электролизеров / (Систематическое собрание патентов, сост. М. Б. Шварцберг). — Л.-М., 1938.

#### REFERENCES

1. **Malahov S. A.** Sovershenstvovanie tehnologii obzhiga uglegrafitovoy produkcii v mnogokamnyh pechah obzhiga zakrytogo. — Vladikavkaz, 2004.

2. **Suhorukov I. F.** Temperaturnyj grafik obzhiga zagotovok v mnogokamnyh pechah / I. F. Suhorukov // Cvetnaja metallurgija. — 1963. — № 22.

3. Issledovanie obzhiga uglegrafitovyh zagotovok / T. L. Molokova, G. D. Harlampovich, I. F. Suhorukov // Himija tverdogo topliva. — 1977. — №6. — S. 114–120.

4. **Chalyh E. F.** Pechi jelektrodnyh zavodov: ucheb. posobie / E. F. Chalyh, L. F. Pashhenkova. — М.: МНТИ им. Д.И. Менделеева, 1983. — 76 с.

5. Sovershenstvovanie reglamentov obzhiga s uchedom dinamiki gazovydelenija obzhigaemyh zagotovok / A. Ja. Karvackij, S. V. Leleka, I. V.

Pulinec [i dr.] // Vostochno-Evropskij zhurnal pereodnyh tehnologij. — 2011. — № 6/5 (54). — S. 42–45.

6. Power saving at production of electrode products / Ye. N. Panov, S. V. Kutuzov, A. Ya. Karvatsky, I. L. Shilovich, G. N. Vasilchenko, T. B. Shilovich, S. V. Leleka, S. V. Danilenko, I. V. Pulinet, T. V. Chirka, T. V. Lazarev // XVII Intern. Conf. «Aluminium of Siberia», V Conference «Metallurgy of Non-Ferrous and Rare Metals», VII Symposium «Gold of Siberia», (Krasnoyarsk, Russia, Sept. 7–9, 2011): Proceedings of the Intern. Congress, Krasnoyarsk : «Verso», 2011. — P. 412–423.

7. Matematichna model' teplo-gidrodinamichnogo stanu bagatokamernoї pechi pri vipaljuvanni elektrodnyh zagotovok / A. Ja. Karvac'kij, I. V. Pulinec', I. L. Shilovich // Vostochno-Evropskij zhurnal pereodnyh tehnologij — 2012. — №1 (4). — S. 33–37.

8. **Lutkov A. I.** Teplovyje i jelektricheskie svojstva uglerodnyh materialov / A. I. Lutkov. — М.: Металлургия, 1990. — 175 с.

9. А.с. 1755025 SSSR. Sposob ukrytija teploizoljacionnoj shihty pechi grafitacii / P. P. Sapko, V. P. Ovsjannikov (CCCR). — Otkrytija. Izobrenenija ; opubl. 1992, Bjul. № 30.

10. Ugol'nye i grafitovye jelektrody dlja jelektrorpechej i jelektrolizerov / (Sistematicheskoe sobranie patentov, sost. M. B. Shvareberg). — Л.-М., 1938.

**Жученко О. А., Коротинський А. П.**

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗРІДЖЕННЯ НА ПРОЦЕС НАГРІВУ БАГАТОКАМЕРНОЇ ПЕЧІ ВИПАЛЮВАННЯ ДИМОВИМИ ГАЗАМИ

*Зміна параметрів технологічного режиму процесу випалювання вуглецевих виробів дозволяє досягнути якісний тепловий режим, що повною мірою визначає якісні показники продукції. Дослідження зв'язку температурного поля печі залежно від технологічних параметрів та їх раціональне використання дозволяє досягти меншого виходу бракованої продукції. Тому важливим є моделювання цих процесів з урахуванням максимальної кількості факторів впливу, що дозволить мінімізувати час та вартість виробництва готової продукції.*

*Проведено дослідження впливу розрідження на температурні поля камери печі випалювання та процес нагріву димовими газами загалом. Виявлено закономірності зміни середнього значення перепаду температур по заготовкам за різних режимах роботи. Основну увагу дослідження було приділено питанням однорідності температурного поля заготовок, що суттєво впливає на їх якість.*

**Ключові слова:** димові гази; багатокамерна піч; розрідження; температурні поля; вуглецеві вироби.

**Zhuchenko O., Korotynskiy A.**

#### INVESTIGATION THE UNDERPRESSURE EFFECT ON THE PROCESS OF HEATING OF MULTI-CHAMBER BAKING FURNACE WITH FLUE GASES

*Changing the parameters of the technological mode of the process of baking carbon products allows to achieve a qualitative thermal mode, which fully determines the quality of products. Investigation of the temperature field of the furnace which depend on the technological parameters, and their rational use allows to achieve a lower output of defective products. Therefore, it is important to model these processes taking into account the maximum number of factors that will minimize the time and cost of finished products.*

*The investigation of the influence of underpressure on the temperature fields of the furnace chamber and the process of heating the flue gases in general have been carried out. The regularities of the change in the mean value of the temperature drop across the blanks under different operating conditions were revealed. The main attention of the research was paid to the issues of homogeneity of the temperature field of blanks, which significantly affects their quality.*

**Keywords:** flue gases; multi-chamber furnace; underpressure; temperature fields; carbon products.

Жученко А. А., Коротынский А. П.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗРЕЖЕНИЯ НА ПРОЦЕСС НАГРЕВА МНОГОКАМЕРНОЙ ПЕЧИ ОБЖИГА ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ

*Изменение параметров технологического режима процесса обжига углеродных изделий позволяет достичь качественный тепловой режим, который в полной мере определяет качественные показатели продукции. Исследование связи температурного поля печи в зависимости от технологических параметров и их рациональное использование позволяет достичь меньшего выхода бракованной продукции. Поэтому важно моделирование этих процессов с учетом максимального количества факторов влияния, которое позволит минимизировать время и стоимость производства готовой продукции.*

*Проведено исследование влияния разрежения на температурные поля камеры печи обжига и процесс нагрева дымовыми газами в целом. Выявлены закономерности изменения среднего значения перепада температур по заготовкам при различных режимах работы. Основное внимание исследования было уделено вопросам однородности температурного поля заготовок, которое существенно влияет на их качество.*

**Ключевые слова:** дымовые газы; многокамерная печь; разрежения; температурные поля; углеродные изделия.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2018 р.

Прийнято до друку 04.06.2018 р.

Рецензент — д-р техн. наук, доц. Корнієнко Б. Я.