

Розроблення енергоефективного процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевих матеріалів в електричних печах

Разработка энергоэффективного процесса высокотемпературной обработки сыпучих углеродных материалов в электрических печах

The development of energy-efficient process for the high-temperature processing of bulk carbon materials in electric furnaces

1. Номер державної реєстрації теми - 0117U000462,

2. Науковий керівник - д.т.н., проф. Панов Є.М., Панов Е.Н., Panov Evgen M.

3. Суть розробки, основні результати.

(укр.)

Сформульовано фізичну та математичну моделі динаміки щільного руху сипкого середовища та теплоелектричного стану шахтної однофазної електропечі під час високотемпературного термооброблення вуглецевого матеріалу, на підставі яких розроблено відповідні дискретну та континуальну числові моделі фізичних полів електрокальцинатора з урахуванням щільного руху сипкого середовища та хімічної взаємодії. На основі верифікації цих числових моделей встановлено, що похибка числових розв'язків має такі значення: для повного електричного опору і сили струму не перевищує 14 %; для значень температури за відсутності локальних перегрівів не більше 17 %. Експериментально визначено температурні залежності питомого електричного опору та коефіцієнта теплопровідності антрациту та нафтового коксу, що оброблюються в електрокальцинаторах, та виконано їх порівняння з літературними даними.

Проведено експериментальні кампанії високотемпературного оброблення антрациту і нафтового коксу в електрокальцинаторах змінного струму різної конструкції та виконано детальний аналіз отриманих експериментальних даних. Розроблено систему безрозмірних технологічних і геометричних параметрів роботи електрокальцинаторів різних конструкцій та призначення, що є потужним інструментом для розробки ресурсоенергоефективних технічних рішень з модернізації технології високотемпературного оброблення вуглецевмісних наповнювачів.

Розроблено ресурсоенергоефективні регламенти пуску та експлуатації електрокальцинаторів для прожарювання антрациту та нафтового коксу, що забезпечують високу якість кінцевого продукту. На підставі порівняльного аналізу енергоефективності конструкцій електрокальцинаторів постійного і змінного струму встановлено, що електропечі постійного струму порівняно з печами змінного струму характеризуються значно меншими питомими витратами енергії. Доведено можливість отримання карбюризаторів європейського рівня якості в електрокальцинаторах ПрАТ «Укрграфіт».

(рос.)

Сформулированы физическая и математическая модели динамики плотного движения сыпучей среды и теплоэлектрического состояния шахтной однофазной электропечи при высокотемпературной термообработке углеродного материала, на основании которых разработаны соответствующие дискретная и континуальная численные модели физических полей электрокальцинатора с учетом плотного движения сыпучей среды и химического взаимодействия. В верификацией численных моделей установлено, что погрешность численных решений имеет следующие значения: для полного электрического сопротивления и силы тока не превышает 14%; для значений температуры при отсутствии локальных перегревов не более 17%. Экспериментально определены температурные зависимости удельного электрического сопротивления и коэффициента теплопроводности антрацита и нефтяного кокса, обрабатываемых в электрокальцинаторах, и выполнено их сравнение с литературными данными.

Проведены экспериментальные кампании высокотемпературной обработки антрацита и нефтяного кокса в электрокальцинаторах переменного тока различной конструкции и

выполнен анализ полученных экспериментальных данных. Разработана система безразмерных технологических и геометрических параметров работы электрокальцинаторов различных конструкций и назначения, являющаяся мощным инструментом для получения ресурсоэнергоэффективных технических решений по модернизации технологии высокотемпературного обработки углеродсодержащих наполнителей. Разработаны ресурсоэнергоэффективные регламенты пуска и эксплуатации электрокальцинаторов для прокаливания антрацита и нефтяного кокса, обеспечивающие высокое качество конечного продукта. На основе сравнительного анализа энергоэффективности конструкций электрокальцинаторов постоянного и переменного тока показано, что электропечи постоянного тока по сравнению с переменным характеризуются значительно меньшими удельными затратами энергии. Доказана возможность получения карбюризаторов европейского уровня качества в электрокальцинаторах ЧАО «Укрграфит».

(англ.)

The physical and mathematical models of the dynamics of the dense motion of a granular medium and the thermoelectric state of a single-phase mine electric furnace during high-temperature heat treatment of carbon material are formulated, on the basis of which the corresponding discrete and continuum numerical models of the physical fields of the electric calciner are developed taking into account the dense motion of the granular medium and chemical interaction. Verification of numerical models showed that the error in numerical solutions has the following meanings: for total electrical resistance and current strength does not exceed 14%; for temperature values in the absence of local overheating no more than 17%. The temperature dependences of the electrical resistivity and thermal conductivity coefficient of anthracite and petroleum coke processed in electric calciners were experimentally determined, and their comparison with published data was performed. Experimental campaigns for the high-temperature treatment of anthracite and petroleum coke in alternating current electric calculators of various designs were carried out and a detailed analysis of the obtained experimental data was performed. A system of dimensionless technological and geometric parameters for the operation of electric calciners of various designs and purposes has been developed, which is a powerful tool for obtaining resource-efficient technical solutions for upgrading the technology of high-temperature processing of carbon-containing fillers. Resource-energy-efficient regulations have been developed for the launch and operation of electric calciners for calcining anthracite and petroleum coke, ensuring high quality of the final product. Based on a comparative analysis of the energy efficiency of DC and AC electric calciners, it was found that direct current electric furnaces are characterized by significantly lower specific energy costs compared to AC furnaces. The possibility of obtaining European-level carburetors of quality in electric calciners of JSC "Ukrgrafit" is proved.

4. Наявність охоронних документів на об'єкти права інтелектуальної власності.

- Пат. 125502 U Україна, МПК B65G 65/40 (2006.01). Живильник сипкого матеріалу / І. О. Мікульонок, А. Я. Карвацький, В. В. Шевченко ; заявники і патентовласники – вони же. № u201712370; заявл. 13.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9. 2 с.
- Пат. 125503 U Україна, МПК G01F 11/18 (2006.01). Живильник сипкого матеріалу / І. О. Мікульонок, А. Я. Карвацький, Д. І. Степаник ; заявники і патентовласники – вони же. № u201704102; заявл. 13.12.2017; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9. 2 с.
- Пат. 127003 U Україна, МПК (2018.01) B02C 17/00. Завантажувальна цапфа барабанного млина / І. О. Мікульонок, С. В. Лелека, А. О. Гур'єва ; заявники і патентовласники – вони же. № u201801831; заявл. 23.02.2018; опубл. 10.07.2018, Бюл. № 13. 3 с.
- Пат. 129134 U Україна, МПК (2018.01) C04B 35/52 (2006.01) C01B 32/20 (2017.01) F27B 13/00. Спосіб одержання графітованих виробів / Є.М. Панов, А.Я. Карвацький, І.О. Мікульонок, С.В. Лелека, В.В. Деркач, О.В. Тютюнник ; заявники і патентовласники – ПрАТ «Укрграфіт». – № u201803364; заявл. 30.03.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 2 с.

5. Порівняння зі світовими аналогами.

Результати НДР відповідають аналогам таких провідних світових виробників як Elcem A Bluestar Company (Норвегія), IBIDEN (Японія), SLG (Германія), Datong Xincheng New Material (Китай), зокрема, за рівнем питомих витрат енергії, продуктивності та показниках якості готової продукції і захищені відповідними охоронними документами на об'єкти права інтелектуальної власності (4 патенти) та опубліковані в журналах, що входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus (3 статті).

6. Економічна привабливість для просування на ринок

Застосування розробок НДР у вигляді числових моделей фізичного стану обладнання під час відпрацювання енергоефективних конструкцій та регламентів експлуатації електротермічного обладнання для одержання високосних вуглецевмісних наповнювачів та карбюраторів має вагомі техніко-економічні переваги, порівняно з експериментальними дослідженнями:

- в першу чергу це відмова від виконання великої серії коштовних експериментальних досліджень, що забезпечує економію матеріальних та часових ресурсів, підвищує конкурентоспроможність підприємства;
- по-друге застосування методів наукоємного комп'ютерного інжинірингу надає змогу віртуально досліджувати теплоелектричний та механічний стан електродпей прожарювання антрациту та нафтового коксу з метою відпрацювання раціональних конструкцій та регламентів експлуатації промислового обладнання з великим ступенем достовірності отримуваних даних;
- в цілому техніко-економічні оцінки показують, що промислова реалізація технічних рішень з високотемпературного оброблення сипких вуглецевмісних матеріалів дасть змогу підвищити конкурентоздатність технологічних циклів виробництв у електродній та металургійній галузях промисловості, створити нові робочі місця та підвищити ВВП країни.
- вартість реалізації проекту складає близько 50 млн грн;
- терміни впровадження та окупності складають 1-2 роки і 5 років, відповідно.

7. Потенційні користувачі (галузі, міністерства, підприємства, організації).

Підприємства електродної та металургійної галузей – ПрАТ «Укрграфіт», МК «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) та ін.

8. Стан готовності розробки.

Робота у вигляді технічних рішень, ескізних проектів і програмного забезпечення для виконання числового аналізу теплоелектричних та механічних полів під час високотемпературного оброблення сипких вуглецевмісних наповнювачів в електрокальцинатах з метою визначення раціональних конструкцій та регламентів пуску та експлуатації обладнання готова до впровадження.

9. Існуючі результати впровадження.

Основні теоретичні положення роботи, що пов'язані з фізичними властивостями вуглецевмісних сипких матеріалів і математичними моделями фізичних полів обладнання, викладені у монографіях: «Advanced Thermoelectric Materials. Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials» і «Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера». За матеріалами роботи захищено докторську дисертацію доц. Щербини В.Ю. на тему «Розвиток теорії та удосконалення технологічних процесів при виробництві будівельних матеріалів у високотемпературних агрегатах» та кандидатська дисертація асп. Стрельцової Ю. В. на тему «Характеристики металевих пористих матеріалів: вплив на теплообмін у теплових трубах хімічно-енергетичного призначення». Результати роботи впроваджено у виробництво на ПрАТ «Укрграфіт», м. Запоріжжя. Предметом впровадження є: числові моделі фізичних полів процесу високотемпературного оброблення сипких матеріалів, що використовуються для розробки енергоефективних конструкцій і регламентів експлуатації обладнання; експериментальні дані з фізичних властивостей сипких вуглецевмісних матеріалів; система безрозмірних технологічних і геометричних параметрів разом з числовим аналізом фізичних полів

електрокальцинаторів різних конструкцій та призначення, що є потужним інструментом для розробки ресурсоенергоєфективних технічних рішень з модернізації технології високотемпературного оброблення вуглецевмісних наповнювачів; науково-обґрунтовані енергоєфективні конструкції і технологічні регламенти прожарювання антрациту та нафтового коксу в електрокальцинаторах змінного та постійного струму.

10. Форма участі інвестора. В реалізації результатів проекту частка інвестора 100%, а частка від прибутку 75%.

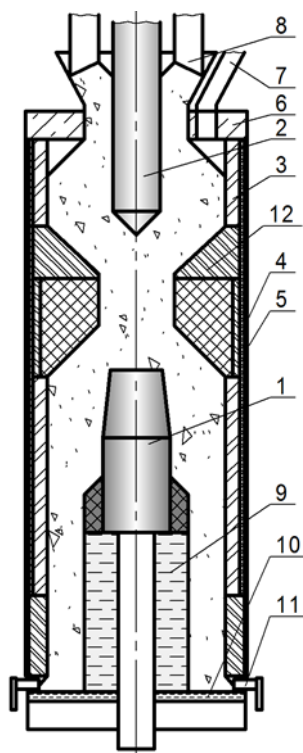
11. Обсяг інвестицій \$2,000,000.

12. Мета інвестицій – забезпечення капітальних вкладень для переходу на виробництво вуглецевмісних наповнювачів електродних виробів та карбюризаторів європейського рівня якості (придбання сучасного помельного та випалювального пічного обладнання, модернізація корпусу підприємства, будівництво модернізованих електрокальцинаторів, придбання сучасного електроживильного обладнання), впровадження раціональних регламентів пуску та експлуатації електротермічного обладнання, тренінг користувачів програмного забезпечення.

13. Назва підрозділу, телефон, e-mail

науково-дослідний центр «Ресурсозберігаючі технології» (НДЦ «РТ»), КПІ ім. Ігоря Сікорського, інженерно-хімічний факультет, 204-83-09, admin@rst.kpi.ua

14. Графічна презентація розробки

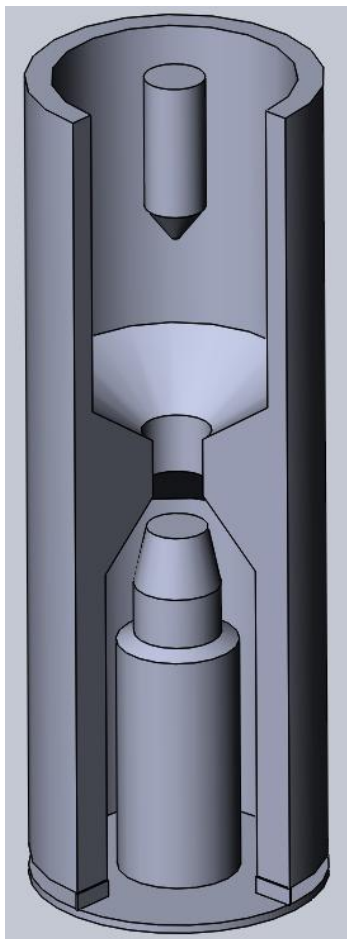


1 – нижній електрод; 2 – верхній електрод; 3 – вогнетривка футеровка; 4 – теплоізоляція;
5 – сталеві обичайки; 6 – бетонна пробка; 7 – газохід; 8 – живильник;

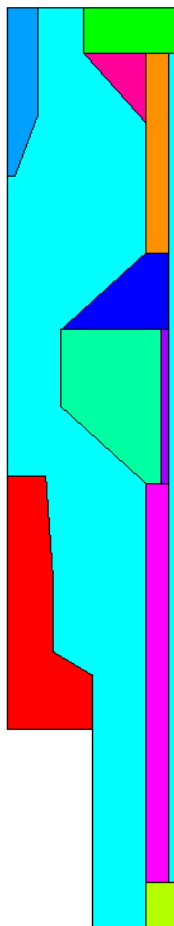
9 – водоохолоджуваний п'єдестал нижнього електрода; 10 – розвантажувальний стіл;

11 – розвантажувальний механізм; 12 – дросельовальний пристрій – дросель-шайба

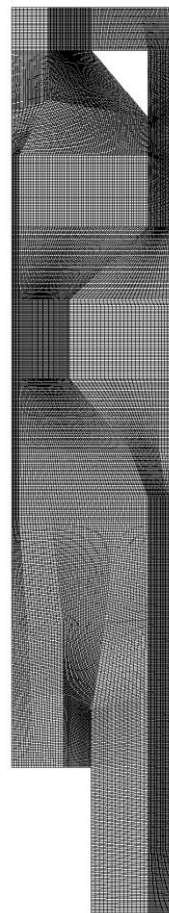
Схема шахтної однофазної електропечі для прожарювання вуглецевмісного наповнювача



a – геометрична модель для прогнозування руху сипкого матеріалу

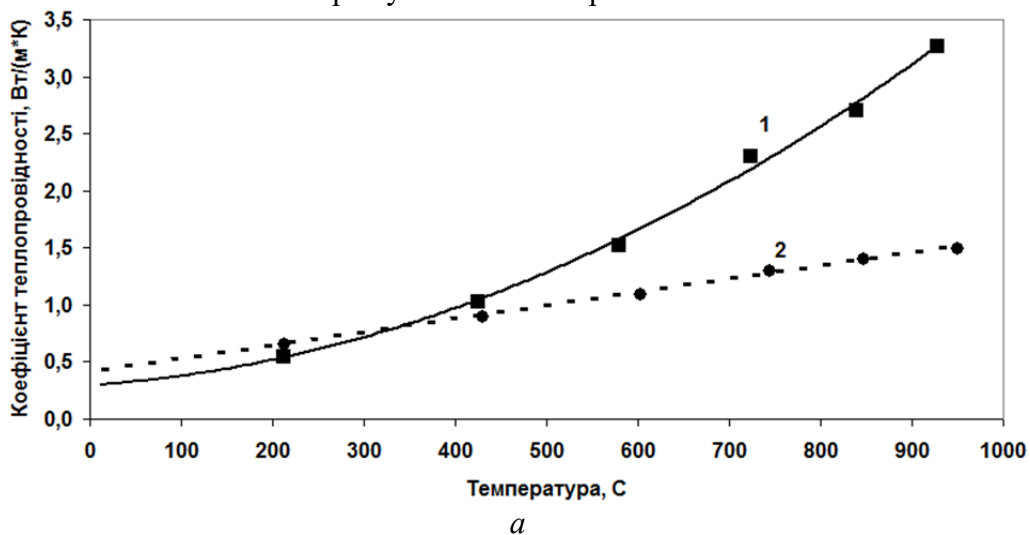


б – вісесиметрична геометрична модель

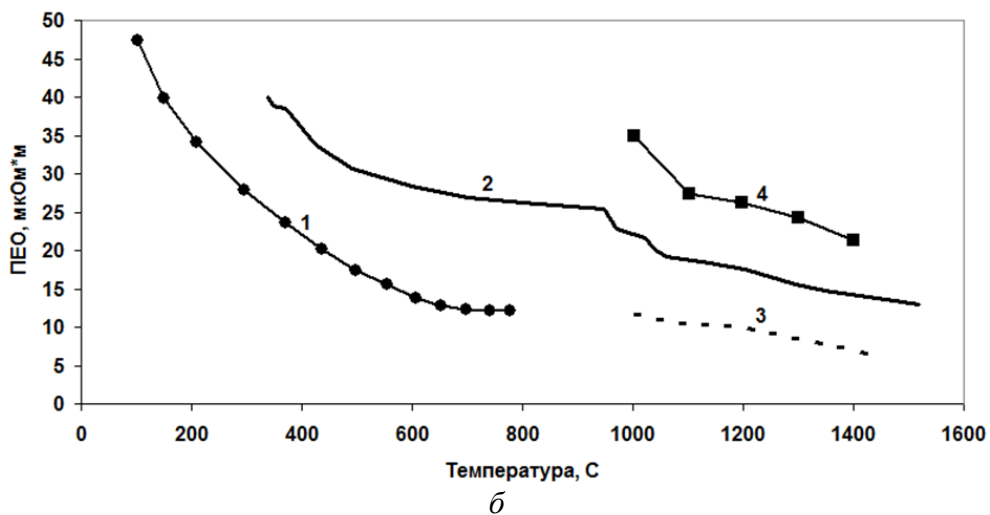


в – дискретизована вісесиметрична модель

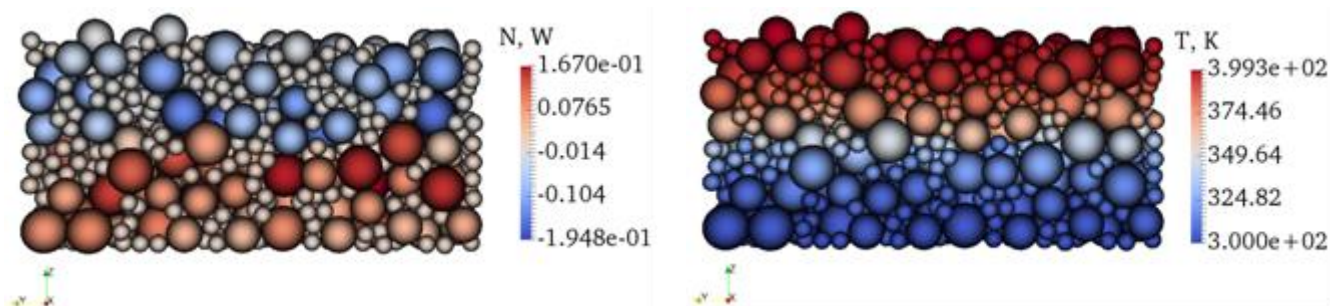
Геометричні параметри та дискретизація числових моделей для розрахунків динаміки сипкого матеріалу та теплоелектричних полів



a



Температурні залежності коефіцієнта теплопровідності (a) та ПЕО (b) вуглецевих матеріалів



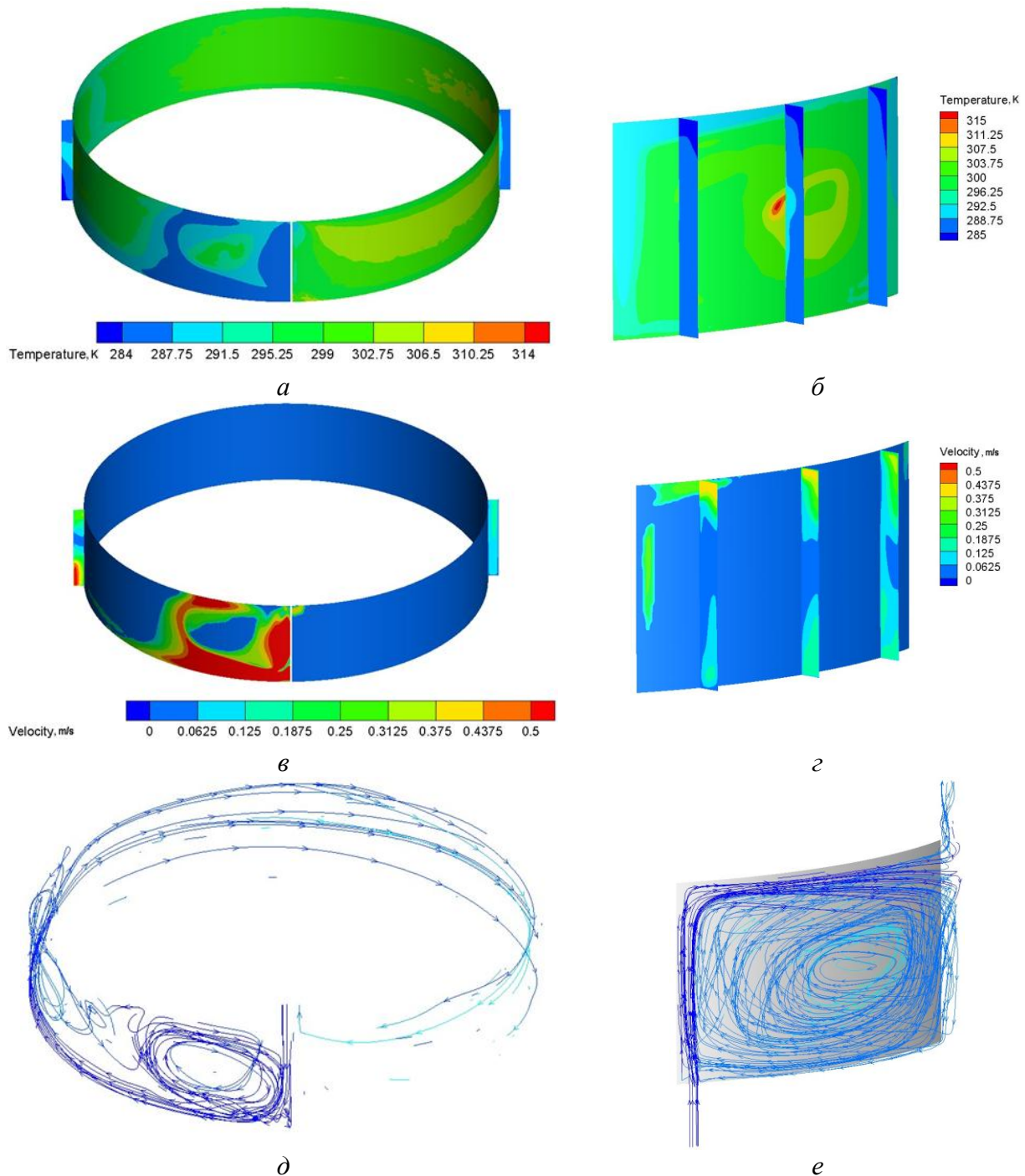
a – температура

b – потужність теплового потоку

Результати числового моделювання теплообміну між частинками сипкого матеріалу під час процесу адіабатного урівноваження температури



Схема розміщення поясів водяного охолодження термонапружених зон обичайки електрокальцинатора для графітування нафтового коксу



a, в, д – односекційна система; *б, г, е* – багатосекційна система; *a, б* – поле температур;
в, г – поле швидкості; *д, е* – лінії потоку
 Результати розрахунків систем примусового охолодження електрокальцинаторів

15. Перелік публікацій за матеріалами досліджень за період виконання розробки

1. Thermoelectric Properties of Granular Carbon Materials / A. Ya. Karvatskii, G. M. Vasilchenko, E. M. Panov, S. V. Leleka, T. V. Lazariiev, A. Yu. Pedchenko, T. V. Chirka // Advanced Thermoelectric Materials / Chong Rae Park (ed.). Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., Beverly, MA 01915-6106 : Scrivener Publishing LLC, 2019. P. 437–468. <https://doi.org/10.1002/9781119407348.ch10> ISBN: 9781119407355
2. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Каствнера [Електронний ресурс]: монографія / А. Ю. Педченко, Є. М. Панов, А. Я. Карвацький та ін. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 174 с.
3. Карвацький А. Я. Наукова робота за темою магістерської дисертації. Методи та інструменти числового аналізу фізичних полів обладнання хімічних виробництв та пакувальної техніки: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна

- механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 234 с.
4. Карвацький А. Я. Механіка суцільних середовищ. Теоретичні основи навчальної дисципліни: навч. посіб. для студ. спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання пакування», «Інжиніринг, комп'ютерне моделювання та проектування обладнання виробництв полімерних і будівельних матеріалів і виробів». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 290 с.
 5. Determining efficient values for the thermophysical properties of bulk materials / A. Karvatskii, Ye. Panov, G. Vasylenko, V. Vytvytskyi, K. Korolenko // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 2. No 5(98). P. 55–62. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.164791
 6. Estimation of the effect of temperature, the concentration of oxygen and catalysts on the oxidation of the thermoanthracite carbon material / Ye. Panov, N. Gomelia, O. Ivanenko, A. Vahin, S. Leleka // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 2. No 6(98). P. 43–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.162474
 7. Modification of implicit algorithm for solving a problem on the elastic plasticity of bulk materials / A. Ya. Karvatskii, E. M. Panov, A. Yu. Pedchenko, V. I. Shkil // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5, No 7(89). P. 17–23. DOI:10.15587/1729-4061.2017.109550
 8. Modeling and analysis of the process of polymeric film cooling on the drum with a liquid cooling agent / I. Mikulionok, O. Gavva, A. Karvatskii, M. Yakymchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol, 5, No 5 (89). (2017) P. 67–74. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.110687
 9. Panov, E., Lazarev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Mikulionok, I., Derkach, V., & Tiutiunnik, P. (2019). The current state of resource and energy saving in the technology of production of carbon-based filler of electrode products (review). *Energy Technologies & Resource Saving*, (1), 17-34.
 10. Вплив вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера / А. Я. Карвацький, А. Ю. Педченко, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2018. № 1. С. 24–29.
 11. Відновлення теплофізичних властивостей сипких матеріалів за допомогою розв'язання зворотної задачі теплопровідності / А.Я. Карвацький, Г.М. Васильченко, Т.В. Чирка, К.М. Короленко // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. 2017. Т. 251, № 4. С. 159–166.
 12. Investigation of the current state of isostatic graphite production technology / A. Karvatskii, S. Leleka, A. Pedchenko, T. Lasariev // *Technology audit and production reserves*. 2017. № 2/1(34). P. 16–21. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.98125

16. Ключові слова: Вуглецевмісний наповнювач, антрацит, нафтовий кокс, числове моделювання, електрокальцинатор, енергоефективність