

разца определены соответствующую графическую зависимость.

Полученные данные свидетельствуют, что любой значимый связь между  $A^d$  и  $\Theta$  отсутствует, коэффициент корреляции незначительный ( $r = 0,28$ ). Таким образом, преобладающим фактором гидратации обогащенного угля являются свойства его органической массы. Корреляционная связь между  $\Theta$  и выходом летучих веществ  $V^{daf}$  и содержанием витринита  $V_t$  также незначителен – коэффициент корреляции составляет соответственно до 0,43 и 0,50. Тесная связь краевого угла смачивания обнаружена с коэффициентом отражения витринита  $R_o$  ( $r = 0,72$ ), внутренней влажностью угля после 14 часов насыщения в воде  $W_{вн}$  ( $r = 0,65$ ) и прочностью трамбованного угольного образца на срез  $\sigma_{ос}$  ( $r = 0,68$ ).

Ключевые слова: уголь, способность к гидратации, краевой угол смачивания, органическая масса угля, минеральные примеси, плотность, прочность.

Автор для корреспонденции В.М. Кузниченко, e-mail: [ko@ukhin.org.ua](mailto:ko@ukhin.org.ua)

DOI: 10.31081/1681-309X-2021-0-1-10-19

Спеціальність 161. УДК 66-913:669.014.84

## ВПЛИВ ВОЛОГОСТІ ВУГІЛЬНОЇ ШИХТИ НА ЇЇ НАСИПНУ ГУСТИНУ

© Н.А. Десна<sup>1</sup>

Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

Д.В. Мірошніченко<sup>2</sup>

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна

І.В. Мірошніченко<sup>3</sup>

ПРАТ «МК «Азовсталь», 87500, м. Маріуполь, вул. Лепорського, 1, Україна

В.І. Мещанін<sup>4</sup>, В.В. Коваль<sup>5</sup>

Державне підприємство «Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)», 61023, м. Харків, вул. Весніна, 7, Україна

1. Десна Наталя Анатоліївна, канд. техн. наук, в.о. зав. вугільним відділом (ВВ), e-mail: [desnana@ukr.net](mailto:desnana@ukr.net)

2. Мірошніченко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф., зав. каф. технологій переробки нафти, газу та твердого палива, e-mail: [dvmir79@gmail.com](mailto:dvmir79@gmail.com)

3. Мірошніченко Ігор Володимирович, заступник директора по КХВ, e-mail: [igor.miroshnichenko@azovstal.com.ua](mailto:igor.miroshnichenko@azovstal.com.ua)

4. Мещанін Валерій Іванович, провідн. інженер ВВ, e-mail: [valerameshchanin@gmail.com](mailto:valerameshchanin@gmail.com)

5. Коваль Валентин Валерійович, провідн. інженер ВВ, e-mail: [kovalen79@gmail.com](mailto:kovalen79@gmail.com)

Аргументовано необхідність визначення насипної густини кам'яновугільного завантаження для розрахунку роботи коксових печей, оскільки цей показник впливає на фізико-хімічні властивості коксу та на продуктивність коксових печей. Надано

схему апарату та наведено методикку визначення насипної густини вугільної шихти. Кожне отримане значення є середнім з п'яти паралельних визначень.

Виконано дослідження залежності насипної густини від вологості для двох дослідних коксівних шихт різного марочного складу, що були складені з участю вітчизняних та імпортованих марок вугілля

Для шихти № 1 зроблено висновок, що величина насипної густини вугільної шихти істотно залежить від її робочої вологості. Мінімальна величина насипної густини ( $798 \text{ кг/м}^3$ ) досягається при величині робочої вологості, яка становить близько 7 %. При зниженні величини робочої вологості до 4 % або її зростанні до 12 %, значення насипної густини вугільної шихти зростає до  $820$  і  $871 \text{ кг/м}^3$  відповідно. Мінімальну величину насипної густини шихти № 2 ( $779 \text{ кг/м}^3$ ) досягнуто при значенні робочої вологості 7–8 %. При зниженні величини робочої вологості до 4,5 % або її зростанні до 12 %, значення насипної густини вугільної шихти зростає до  $845$  і  $892 \text{ кг/м}^3$  відповідно.

На основі узагальнення отриманих результатів розроблено математичні та графічні залежності, що описують вплив збільшення вологості вугільних шихт на вміст в них класу менше 0,5 мм, а також величин середнього діаметра вугільних зерен та насипної густини. Встановлено, що вугільні шихти характеризуються мінімальною насипною густиною при вологості 7,2 %. При збільшенні вологості вугільних шихт до 12 % відбувається різке зниження вмісту в них класу менше 0,5 мм. Це відбувається внаслідок огрудовування дрібних вугільних зерен, що виражається в збільшенні їх середнього діаметру.

Ключові слова: кам'яновугільна шихта, насипна густина, вологість, гранулометричний склад, математичні залежності.

Автор для листування Н.А. Десна, e-mail: [desnana@ukr.net](mailto:desnana@ukr.net)

\*\*\*\*\*

Згідно ДСТУ ГОСТ 17070:2019 ГОСТ 17070–2014 «Вугілля. Терміни та визначення» насипна густина визначається як відношення маси вугілля до його об'єму, визначеного у встановлених умовах заповнення ємності. Насипна густина вугілля – величина відносна. Це виражається в тому, що результат визначення залежить від умов проведення випробування, від конструкції і розмірів апаратури, способу завантаження вугілля і таке інше. При однакових умовах проведення випробування величина насипної густини вугілля залежить від вологості, гранулометричного складу проби, дійсної і уявної густини [1, 2]. Залежно від цих чинників насипна густина вугілля змінюється у відносно широких межах.

Визначення насипної густини вугільного завантаження необхідне для розрахунку роботи коксових печей. Відомо, що насипна густина вугільного завантаження впливає на фізико-хімічні властивості коксу та на продуктивність коксових печей.

З огляду на постійне вдосконалення процесу підготовки вугільних шихт [3–9], нами було проведено спеціальні дослідження щодо визначення впливу вологості вугільних шихт низки підприємств на їх насипну густина. Для визначення насипної густини вугільної шихти використовували установку, представлену на рис. 1.

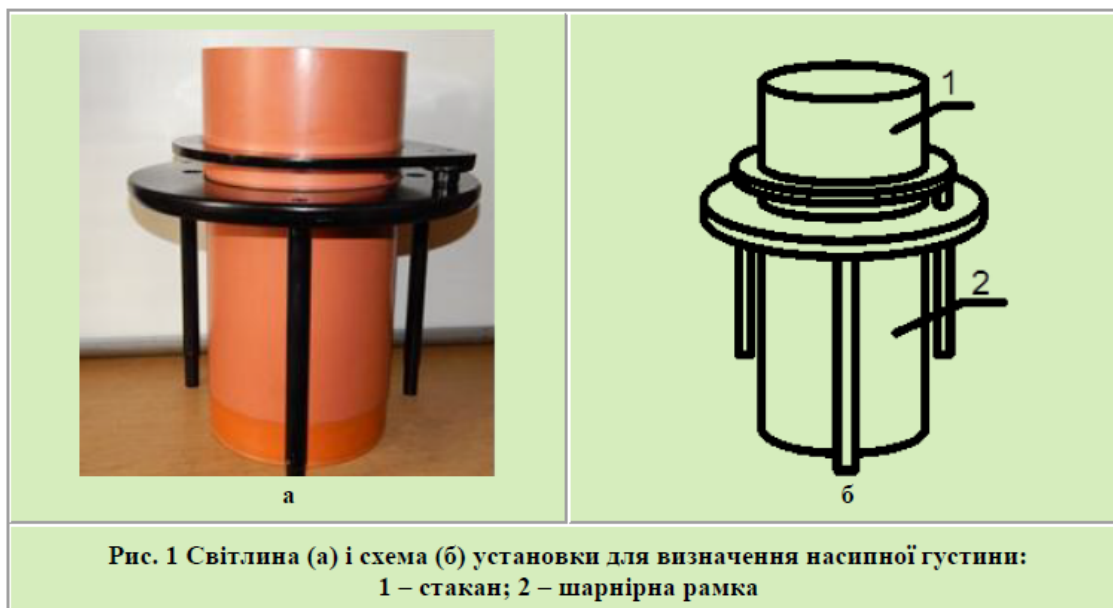


Рис. 1 Світлина (а) і схема (б) установки для визначення насипної густини:  
1 – стакан; 2 – шарнірна рамка

Місткість стакану становить  $0,008 \text{ м}^3$  (діаметр – 20 см); шарнірна рамка має висоту 12 см. Вугільну шихту засипають вільно з висоти верхнього краю шарнірної рамки до її заповнення. Обережно поворотом шарнірної рамки матеріал зрізують по краю стакану, після чого зважують з матеріалом з точністю  $\pm 25 \text{ г}$ . При цьому необхідно оберегти стакан від поштовхів і ударів для збереження значення насипної густини. Всього робиться п'ять визначень.

Насипну густину вугільної шихти ( $BD^r$ ) в  $\text{кг/м}^3$ , розраховують за формулою:

$$BD^r = \frac{P_1 - P_2}{V} \cdot 1000, \quad (1)$$

де  $P_1$  – вага стакану з вугільною шихтою, кг;

$P_2$  – вага порожнього стакану, кг;

$V$  – об'єм стакану,  $\text{м}^3$ .

За отриманими п'ятьма значеннями розраховується середньоарифметичне значення.

Для дослідження використовувались дві кам'яновугільні шихти, марочні і компонентні склади котрих наведено в табл. 1.

До складу вугільної шихти № 1 входили 25 % вугілля газової групи (марки «Г» і «ГЖП»), 25 % вугілля марки «Ж», 40 % вугілля марки «К» і 10 % вугілля марки «ПС». До складу вугільної шихти № 2 входили 31 % вугілля газової групи (марка ГЖП), 25 % вугілля марки «Ж», 38 % вугілля марки «К» і 6 % вугілля марки «ПС».

У табл. 2 та на рис. 2 наведено результати визначення насипної густини вугільної шихти № 1 при вмісті в ній робочої вологи від 4 до 12 %.

Аналізуючи дані, наведені в табл. 2 і на рис. 2, можна зробити висновок, що величина насипної густини вугільної шихти № 1 істотно залежить від її робочої вологи. Мінімальне значення насипної густини ( $798 \text{ кг/м}^3$ ) досягається при величині робочої вологи, яка дорівнює  $\sim 7 \%$ . При зниженні робочої вологи до 4 % або при її зростанні до 12 % значення насипної густини вугільної шихти зростає до 820 і  $871 \text{ кг/м}^3$  відповідно.

Таблиця 1

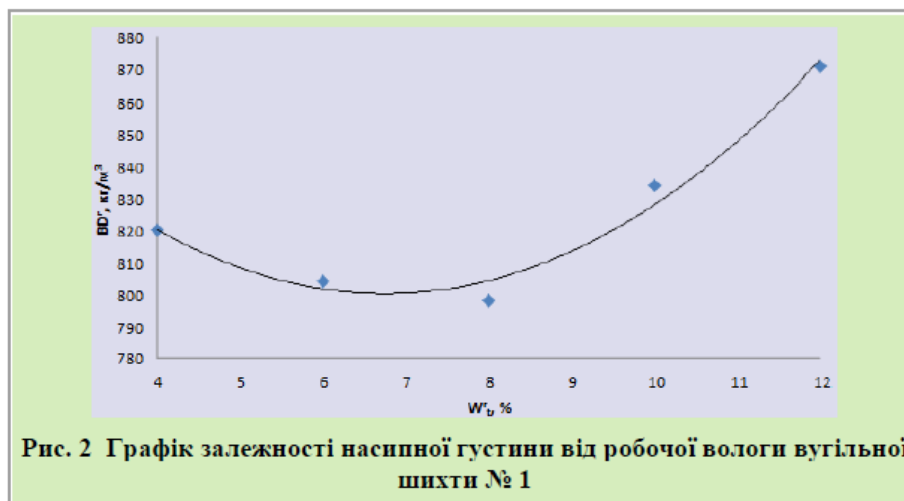
## Марочні та компонентні склади дослідницьких вугільних шихт

Постачальник, країна	Марка	Частка, %	
		№ 1	№ 2
ЦЗФ «Жовтнева», Україна	Г	3,0	0
ТОВ «Ресурс», РФ	ГЖП	0	31,0
ТОВ «ТАЛТЭК», РФ	ГЖП	19,0	0
ЦЗФ «Добропільська», Україна	ГЖП	3,0	0
Wellmore, США	Ж	25,0	8,0
Carter Roag, США	Ж	0	17,0
ЗФ «Свято-Варваринська», Україна	К	26,0	30,0
Res Coal, США	К	14,0	0
Deep Mine # 41, США	К	0	8,0
Pocahontas, США	ПС	10,0	6,0
Разом		100,0	100,0

Таблиця 2

## Вплив робочої вологості на насипну густину вугільної шихти

Варіант	Робоча волога, %	Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>
	$W_t^r$	$BD^r$
1	4,0	820
2	6,0	804
3	8,0	798
4	10,0	834
5	12,0	871



Рівняння (2) описує вплив вологості вугільної шихти № 1 на її насипну густину:

$$BD^r = 2,6429 \cdot (W_t^r)^2 - 35,686 \cdot W_t^r + 920,6; R^2 = 0,9752. \quad (2)$$

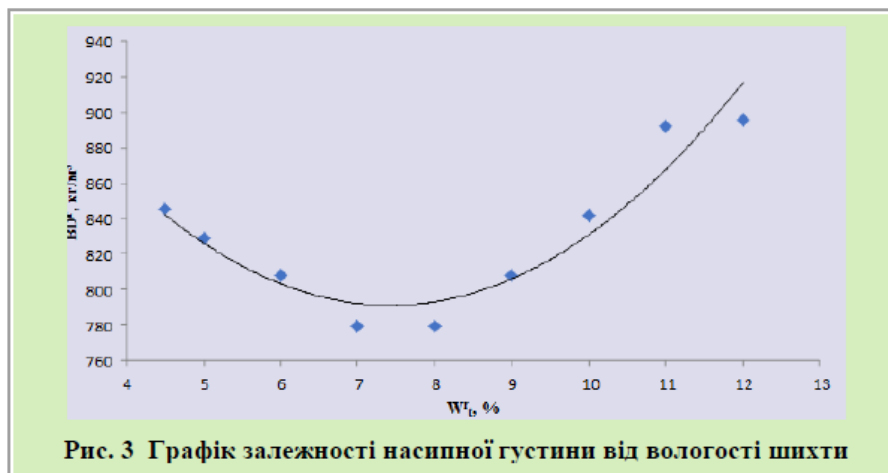


Рис. 3 Графік залежності насипної густини від вологості шихти

У табл. 3 та на рис. 3 наведені результати визначення насипної густини і гранулометричного складу вугільної шихти № 2 при вмісті в ній робочої води від 4,5 до 12 %. Визначен-

ня гранулометричного складу проводили шляхом розсіву проби вугільної шихти фактичної вологості в механічному апараті протягом 5 хв.

Таблиця 3

Вплив вмісту робочої води на насипну густину і гранулометричний склад вугільної шихти № 2

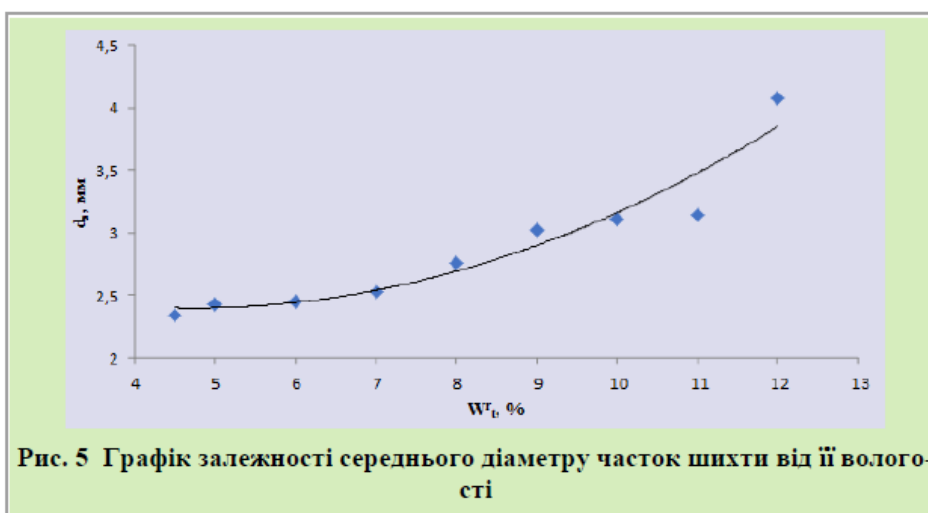
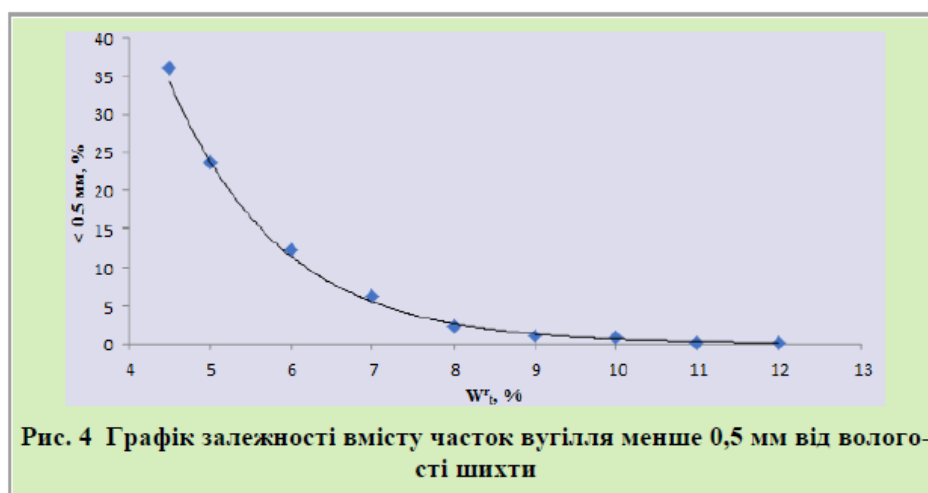
№	Робоча вода, $W_t^r$ , %	Насипна густина, $BD^r$ , $\text{кг/м}^3$	Гранулометричний склад (мм), %					Середній діаметр вугільних часток, мм
			>6	3–6	1–3	0,5–1	<0,5	$d_s$
1	4,5	845	12,6	9,7	24,3	17,3	36,1	2,34
2	5,0	819	11,8	12,3	24,0	28,2	23,7	2,43
3	6,0	808	9,3	16,0	28,1	34,3	12,3	2,45
4	7,0	779	10,2	15,1	28,3	40,2	6,2	2,53
5	8,0	779	11,8	16,1	30,9	39,1	2,2	2,76
6	9,0	808	13,5	16,6	37,6	31,3	1,0	3,02
7	10,0	842	11,1	21,3	47,7	19,2	0,8	3,11
8	11,0	892	12,1	21,7	41,3	24,6	0,2	3,14
9	12,0	896	17,9	29,9	50,7	1,3	0,2	4,07

Аналізуючи дані, наведені в табл. 3 і на рис. 3 можна зробити висновок, що величина насипної густини вугільної шихти № 2, як і в випадку з вугільною шихтою № 1, також істотно залежить від її робочої вологості. Мінімальна величина насипної густини ( $779 \text{ кг/м}^3$ ) до-

сягається при значенні робочої вологості, яка дорівнює  $\sim 7-8 \%$ . При зниженні величини робочої вологості до  $4,5 \%$  або при її зростанні до  $12 \%$ , значення насипної густини вугільної шихти зростає до  $845$  та  $892 \text{ кг/м}^3$  відповідно.

Рівняння (3) описує вплив вологості вугільної шихти на її насипну густину:

$$BD^r = 5,9926 \cdot (W_t^r)^2 - 88,959 \cdot W_t^r + 1121,2; R^2 = 0,8948. \quad (3)$$



Таблиця 4

## Математичні залежності

№	Вид рівняння	Статистична оцінка
		$R^2$
4	$< 0,5 \text{ мм} = 917,72 \cdot e^{-0,731 \cdot W_t^r}$	0,9851
5	$d_s = 0,0276 \cdot (W_t^r)^2 - 0,2617 \cdot W_t^r + 3,0184$	0,9202

На рис. 4 та 5 наведено графічні, а в табл. 4 – математичні залежності вмісту часток вугілля менше 0,5 мм і їх середнього діаметру від вологості шихти.

Можна зробити висновок, що збільшення вологості вугільної шихти з 4,5 до 12 % призводить до стрімкого зниження вмісту класу менше 0,5 мм. На нашу думку, це викликано огрудковуванням вугільних зерен цього класу крупності. Підтвердженням цьому служить збільшення, в першу чергу, величини серед-

нього діаметра вугільних частинок з 2,34 до 4,07 мм.

З огляду на подібність залежностей, наведених на рис. 2 і 3, а також математичних рівнянь (2) і (3), результати, отримані при визначенні впливу вологості вугільних шихт № 1 і № 2 на їх напісну густину були об'єднані до загальної вибірки.

На рис. 6 наведено графічну залежність впливу вологості на напісну густину вугільних шихт № 1 і № 2.

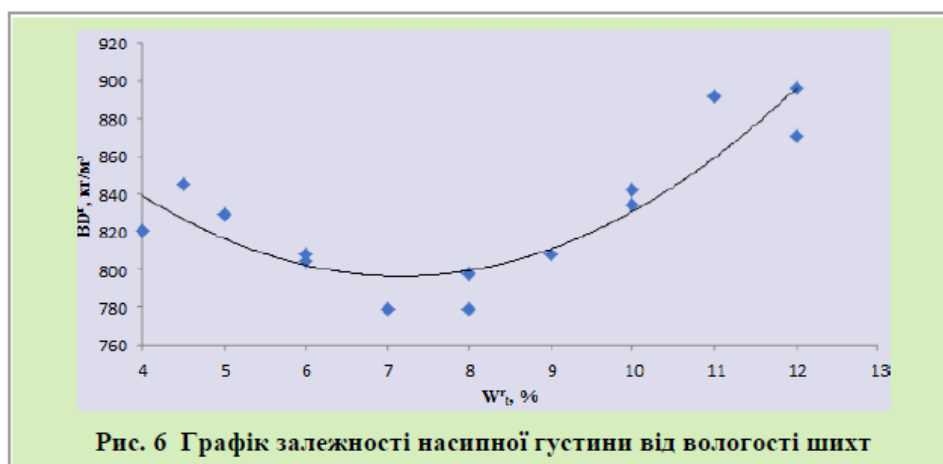


Рис. 6 Графік залежності напісної густини від вологості шихт

Рівняння (6) описує наведену на рис. 6 графічну залежність.

$$BD^r = 4,2545 \cdot (W_t^r)^2 - 60,935 \cdot W_t^r + 1014,6; R^2 = 0,8091. \quad (6)$$

З огляду на той факт, що перша похідна рівняння (6) дорівнює 7,2, можна стверджувати, що мінімальне значення напісної густини

досягається при значенні робочої вологості шихти, що дорівнює 7,2 %.

На підставі проведених досліджень можна сформулювати наступні основні висновки:

1. Розроблено математичні та графічні залежності, що описують вплив збільшення вологості вугільних шихт на вміст в них класу менше 0,5 мм, а також величин середнього діаметра вугільних зерен і насипної густини.

2. Встановлено, що вугільні шихти характеризуються мінімальною насипною густиною при їх вологості, рівній 7,2 %. Зниження або збільшення вологості вугільних шихт в інтервалі від 4 до 12 % призводить до зростання їх насипної густини.

3. При збільшенні вологості вугільних шихт до 12 % відбувається стрімке зниження вмісту в них класу менше 0,5 мм. Ця обставина має місце внаслідок огрудовування частинок дрібних вугільних класів, що відображується в збільшенні значення середнього діаметру вугільних частинок.

#### Бібліографічний список

1. Белошанка И.В. Влияние качества угольных концентратов на их насыпную плотность / И.В. Белошанка, И.И. Сикан, Б.Я. Василенко, Н.В. Мукина, С.С. Селин, О.А. Кобзарь, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошніченко, Е.В. Иванова, Н.А. Десна // Углехимический журнал. – 2011. – № 3–4. – С. 9–12.

2. Скрипченко Н.П. Разработка метода определения насыпной плотности углей в УПЦ-2 ПАО «АКХЗ» / Н.П. Скрипченко, А.П. Худокормов, А.В. Косминский, А.А. Суханов, Д.В. Мирошніченко, В.И. Мещанин // Углехимический журнал. – 2013. – № 5. – С. 23–27.

3. Дроздник И.Д. Совершенствование схем подготовки углей в условиях межбассейновой сырьевой базы коксования / И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошніченко, В.М. Ладыжинский, Ю.В. Бессчастный, Н.И. Топоркова // Углехимический журнал. – 2010. – № 3–4. – С. 17–24.

4. Бехтер А.А. Разработка практических рекомендаций по минимизации затрат электроэнергии на измельчение угля и уменьшению содержания класса менее 0,5 мм в измельченной шихте ЧАО «ЗАПОРОЖКОКС» / А.А. Бехтер, В.В. Плохотников, Т.В. Корецкая, Е.Т. Ковалев, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошніченко, Н.А. Десна, В.В. Коваль // Углехимический журнал. – 2019. – № 1. – С. 12–23.

5. Войтенко Б.И. Совершенствование схемы подготовки угольной шихты на ОАО «ЗАПОРОЖКОКС» / Б.И. Войтенко, Ю.А. Чернышев, Ю.В. Ермак, А.В. Поддубный, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошніченко, Ю.С. Кафтан, В.М. Ладыжинский, Ю.В. Бессчастный // Углехимический журнал. – 2009. – № 1–2. – С. 37–47.

6. Рубчевский В.Н. Анализ технологических свойств углей и оптимизация схемы их подготовки в условиях ПАО «ЗАПОРОЖКОКС» / В.Н. Рубчевский, А.С. Гайдаенко, Ю.А. Чернышев, Ю.В. Ермак, Е.В. Бондаренко, А.В. Поддубный, С.Н. Постол, И.Д. Дроздник, Д.В. Мирошніченко, Н.А. Десна, В.В. Коваль // Углехимический журнал. – 2015. – № 1. – С. 3–11.

7. Miroshnichenko I.V. Calorific value of coke. 2. Influence of the Packing Density of coal batch / I.V. Miroshnichenko, D.V. Miroshnichenko, I.V. Shulga, Y.S. Balaeva // Coke and Chemistry. – 2019. – Vol. 62. – P. 234–239.

8. Miroshnichenko I.V. Calorific value of coke. 3. Influence of Coal Storage / I.V. Miroshnichenko, D.V. Miroshnichenko, I.V. Shulga, Y.S. Balaeva // Coke and Chemistry. – 2019. – Vol. 62. – P. 402–407.

9. Drozdник I.D. Coking of batch with elevated gas-coal content at Azovstal Iron and steel Works / I.D. Drozdник, I.V. Miroshnichenko, S.V. Fatenko, D.V. Miroshnichenko // Coke and Chemistry. – 2020. – Vol. 63 (9). – P. 415–422.

Рукопис надійшов до редакції 12.12.2020

## INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT OF COAL CHARGE ON ITS BULK DENSITY

© **N.A. Desna, PhD in Technical Sciences** (State Enterprise "Ukrainian State Research Coal Chemical Institute (UKHIN)", 61023, Kharkov, Vesnina st., 7, Ukraine), **D.V. Miroschnichenko, Doctor of Technical Sciences** (National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", 61002, Kharkov, Kirpicheva st., 2, Ukraine), **I.V. Miroschnichenko** (PJSC "AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS", 87500, Mariupol, Leporskogo st., 1, Ukraine), **V.I. Meshchanin, V.V. Koval** (SE "UKHIN")

*The necessity of determining the bulk density of the coal charge for calculating the operation of coke ovens is argued, since this indicator affects the physicochemical properties of coke and the productivity of coke ovens. The diagram of the apparatus is provided and the method for determining the bulk density of the coal charge is presented. Each value obtained is the average of five parallel determinations.*

*There has been presented the study of the dependence of the bulk density on moisture content for two research coal blends of different grades, compiled with the participation of domestic and imported grades of coal.*

*For charge No. 1, it was concluded that the bulk density of the coal charge significantly depends on its working moisture. The minimum bulk density ( $798 \text{ kg/m}^3$ ) is achieved at a working moisture of about 7 %. With a decrease in the value of the working moisture to 4 % or its growth to 12 %, the value of the bulk density of the coal charge increases to 820 and  $871 \text{ kg/m}^3$ , respectively. The minimum value of the bulk density of charge No. 2 ( $779 \text{ kg/m}^3$ ) is noted at a working moisture of 7-8%. With a decrease in the value of the working moisture to 4.5 % or its increase to 12 %, the value of the bulk density of the coal charge increases to 845 and  $892 \text{ kg/m}^3$ , respectively.*

*Based on the generalization of the results obtained, mathematical and graphic dependencies have been developed. They describe the effect of an increase in the moisture content of coal charges on the content of a class less than 0.5 mm in them, as well as the values of the average diameter of coal grains and bulk density. It was found that coal charges are characterized by a minimum bulk density at a moisture content of 7.2 %. With an increase in the moisture content of coal charges to 12 %, there is a sharp decrease in the content of the class less than 0.5 mm. This is due to the pelletization of small coal grains, which is reflected in an increase in their average diameter.*

**Keywords:** coal charge, bulk density, moisture content, particle size distribution, mathematical relationships.

*Corresponding author N.A. Desna, e-mail: [desnana@ukr.net](mailto:desnana@ukr.net)*

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ УГОЛЬНОЙ ШИХТЫ НА ЕЕ НАСЫПНУЮ ПЛОТНОСТЬ**

© **Н.А. Десна, к.т.н.** (Государственное предприятие «Украинский государственный научно-исследовательский углехимический институт (УХИН)», 61023, г. Харьков, ул. Веснина, 7, Украина), **Д.В. Мирошникенко, д.т.н.** (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 61002, г. Харьков, ул. Кирпичева, 2, Украина), **И.В. Мирошникенко** (ЗАО «МК «Азовсталь», 87500, г. Мариуполь, ул. Лепорского, 1, Украина), **В.И. Мешанин, В.В. Коваль** (ГП «УХИН»)

*Аргументирована необходимость определения насыпной плотности каменноугольного загрузки для расчета работы коксовых печей, поскольку этот показатель влияет на физико-химические свойства кокса и на производительность коксовых печей. Предоставлена схема аппарата и приведена методика определения насыпной плотности угольной шихты. Каждое полученное значение является средним из пяти параллельных определений.*

*Выполнены исследования зависимости насыпной плотности от влажности для двух исследовательских каменноугольных шихт разного марочного состава, составленных с участием отечественных и импортируемых марок угля.*

*Для шихты № 1 сделан вывод о том, что величина насыпной плотности угольной шихты существенно зависит от ее рабочей влаги. Минимальная величина насыпной плотности ( $798 \text{ кг/м}^3$ ) достигается при величине рабочей влаги, которая составляет около 7 %. При снижении величины рабочей влаги до 4 % или ее росте до 12 % значение насыпной плотности угольной шихты возрастает до 820 и  $871 \text{ кг/м}^3$  соответственно. Минимальная величина насыпной плотности шихты № 2 ( $779 \text{ кг/м}^3$ ) отмечена при значении рабочей влаги 7-8 %. При снижении величины рабочей влаги до 4,5 % или ее возрастании до 12 % значение насыпной плотности угольной шихты увеличивается до 845 и  $892 \text{ кг/м}^3$  соответственно.*

*На основании обобщения полученных результатов разработаны математические и графические зависимости, описывающие влияние увеличения влажности угольных шихт на содержание в них класса менее 0,5 мм, а также величин среднего диаметра угольных зерен и насыпной плотности. Установлено, что угольные шихты характеризуются минимальной насыпной плотностью при влажности 7,2 %. При увеличении влажности угольных шихт до 12 % происходит резкое снижение содержания в них класса менее 0,5 мм. Это происходит вследствие окомковывания мелких угольных зерен, что выражается в увеличении их среднего диаметра.*

**Ключевые слова:** каменноугольная шихта, насыпная плотность, влажность, гранулометрический состав, математические зависимости.

**Автор для корреспонденции** Н.А. Десна, e-mail: [desnana@ukr.net](mailto:desnana@ukr.net)