

УДК 622.653-097

**А.И. Волошин**, чл.- кор. НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,

**А.В. Жевжик**, канд. техн. наук, доцент  
(ИГТМ НАН Украины)

**В.Н. Горячкин**, канд. техн. наук, доцент,

**И.Ю. Потапчук**, магистр  
(ДНУЖТ)

### **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ПРЯМОТОЧНОМ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ КАНАЛЕ РЕАКТОРА ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ТОПЛИВА**

**О.І. Волошин**, чл.- кор. НАНУ, д-р техн. наук, професор,

**О.В. Жевжик**, канд. техн. наук, доцент  
(ИГТМ НАН України)

**В.М. Горячкин**, канд. техн. наук, доцент,

**І.Ю. Потапчук**, магістр  
(ДНУЗТ)

### **ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ КОНЦЕНТРАЦІЇ ЧАСТИНОК ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ У ПРЯМОТОЧНОМУ ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ КА- НАЛІ РЕАКТОРА ТЕРМОХІМІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ ПАЛИВА**

**A.I. Voloshin**, Cor. Member NASU, D. Sc. (Tech.), Professor,

**A.V. Zhevzhik**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
(IGTM NAS of Ukraine)

**V.N. Goriachkin**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor

**I. Yu. Potapchuk**, M.S (Tech.)  
(DNURT)

### **STUDY UNEVEN CONCENTRATION OF COAL DUST PARTICLES IN CONTINUOUS-FLOW HORIZONTAL CHANNEL OF THERMOCHEMI- CAL FUEL PREPARATION REACTOR**

**Аннотация.** Целью исследований является определение изменения распределения частиц угольной пыли в сечении прямооточного горизонтального цилиндрического канала реактора термохимической подготовки топлива вследствие действия силы тяжести. Для этого на основе анализа сил, действующих на частицу, составлена методика расчета концентрации частиц и определено влияние их оседания на распределение в поперечном сечении канала реактора по его длине; определена доля частиц, выпадающих на стенки канала, в зависимости от температуры и расхода потока аэросмеси. Определено, что повышение температуры потока аэросмеси способствует уменьшению доли частиц, оседающих на нижнюю образующую канала, что приведет к уменьшению степени шлакования. Полученные результаты могут быть использованы для математического моделирования и оптимизации работы аппаратов термохимической подготовки и газификации твердого топлива.

**Ключевые слова:** термохимическая подготовка топлива, движение частиц, угольная пыль, концентрация частиц, прямооточный канал

Рост цен и дефицит используемого в теплоэнергетике природного газа вынуждает искать возможные пути его замены другими видами топлива. Учитывая значительные запасы, для Украины таким топливом может стать уголь и производимый из него синтез-газ. Поскольку основным препятствием широкомасштабного использования продуктов из угля является их относительно высокая стоимость, а математическое моделирование и оптимизация работы аппаратов термохимической подготовки (ТХП) и газификации позволяют снизить затраты на их производство, то выяснение теоретических закономерностей происходящих при этом процессов является актуальной задачей.

Аппараты для ТХП и газификации угля перед непосредственным сжиганием в котлах тепловых электростанций чаще всего имеют вид цилиндрического канала со спутным движением дискретной (угольная пыль) и сплошной (газ) фаз. Математическое моделирование и оптимизация на этой основе их работы требует расчета полей скоростей, концентраций, температур дискретной и сплошной фаз.

Одним из допущений при расчете потока дискретной фазы является равномерность распределения частиц относительно оси и по высоте канала. Так, в [1] моделирование процессов ТХП проводилось в приближении осесимметричности потока газа и частиц без учета влияния силы тяжести, что будет справедливым для ультрадисперсной угольной пыли. В [2], [3] приведены результаты расчетов, выполненных в известных CFD-пакетах (ANSYS, FLUENT) также в осесимметричной постановке.

В то же время очевидно, что распределение частиц в цилиндрическом горизонтальном канале, где обрабатывается угольная пыль, будет несимметричным вследствие действия силы тяжести. Учет неравномерности важен при дальнейшем расчете полей температур и концентраций газовых компонент, а также определения возможной степени шлакования вследствие оседания частиц на нижнюю образующую канала.

Таким образом, необходим анализ влияния неравномерности распределения дискретной фазы по высоте и относительно оси канала в аппаратах ТХП и газогенераторах с определением влияния на погрешность вычислений и усовершенствованием методик расчета.

Исходя из этого в работе поставлена цель – определить изменение распределения частиц угольной пыли в сечении прямоточного горизонтального цилиндрического канала реактора ТХП вследствие действия силы тяжести.

### УСТРОЙСТВО РЕАКТОРА ТХП

Реактор ТХП выполнен в виде цилиндрического канала, в который поступает аэрозоль, состоящая из воздуха и угольной пыли. Расчетная схема канала реактора показана на рис. 1.

Внутренний диаметр канала реактора  $d_{вн}$  для горелок котлов ТПП-210, применяемых в настоящее время на ТЭС Украины, исходя из конструкции, может

изменяться в пределах  $d_{\text{вн}}=0,2...0,3$  м, длина канала  $L=2...3$  м. Запорно-регулирующая арматура, установленная перед устройством подачи аэросмеси в горелку, позволяет при общем расходе первичного воздуха при нормальных условиях  $7200 \text{ м}^3/\text{ч}$ , изменять долю воздуха, пропускаемого через канал реактора, в пределах  $5...100$  %.

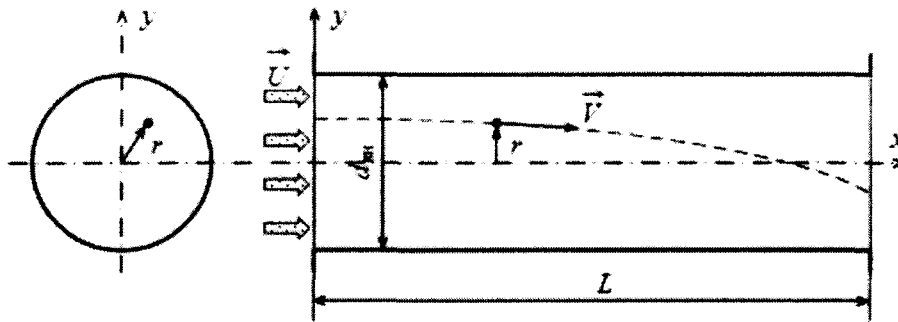


Рисунок 1 – Схема к расчету

### ОСЕДАНИЕ ЧАСТИЦЫ УГЛЯ В КАНАЛЕ РЕАКТОРА

Анализ сил, действующих на частицу угля в потоке аэросмеси, выполнен в работе [4]. К основным силам при движении частицы в прямоточном канале реактора относятся аэродинамическая сила, под действием которой частицы будут увлекаться потоком воздуха, и сила тяжести. Кроме них на частицу будет действовать сила Магнуса-Жуковского, связанная с вращением частиц, а также силы термофореза и турбофореза, обусловленные неравномерным полем температур и наличием пульсаций скорости в турбулентном потоке, однако этими силами в данном случае можно пренебречь в силу их малости.

Для оценки влияния силы тяжести на траекторию частиц определим время релаксации [5]

$$\tau_p = \frac{1}{18} \frac{\rho d^2}{\mu_v}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность частицы;  $d$  – эквивалентный диаметр частицы;  $\mu_v$  – динамическая вязкость воздуха. Как показано в [6], за время  $\tau_p$  скорость движения частиц достигает 63,8 %, а за  $7\tau_p$  – 99,9 % скорости седиментации.

Время пребывания  $\tau_n$  частиц угля в канале реактора определяется скоростью их движения вдоль оси канала. Если принять, что скорость движения частиц угля близка к средней скорости движения аэросмеси, то время пребывания

$$\tau_n = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2 L T_{\text{н.у.}}}{4 Q_{\text{н.у.}} T},$$

где  $d_{вн}$ ,  $L$  – внутренний диаметр и длина канала реактора;  $Q_{н.у.}$  – объемный расход воздуха, подаваемого с аэросмесью в канал реактора, приведенный к нормальным условиям;  $T$ ,  $T_{н.у.}$  – температура аэросмеси в канале и при нормальных условиях.

На рис. 2 показаны расчетные значения  $\tau_p$  для частиц угля с плотностью  $\rho=1100 \text{ кг/м}^3$ , движущихся в нагретом воздухе, а на рис. 3 – время пребывания частиц в канале реактора в зависимости от  $Q_{н.у.}$ . Из результатов расчета следует, что, например, для частиц угля размером 0,05 мм, отношение  $7\tau_p/\tau_n$  при расходе воздуха  $Q_{н.у.}=720; 1440; 2160 \text{ м}^3/\text{ч}$  изменяется в пределах от 0,063; 0,125; 0,188 при температуре аэросмеси 200 °С до 0,115; 0,230; 0,345 при температуре аэросмеси 2000 °С соответственно.

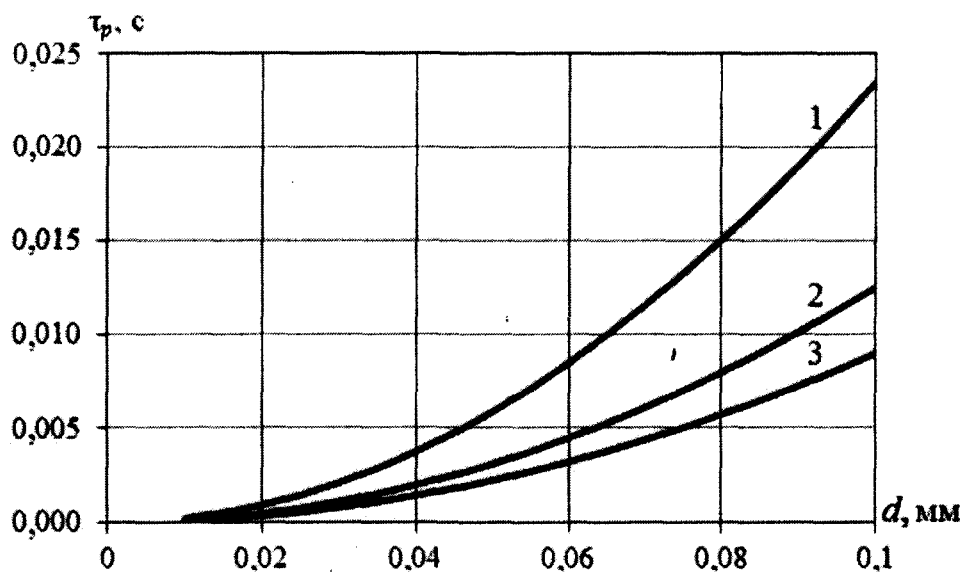


Рисунок 2 – Время релаксации: 1 – аэросмесь с температурой 200 °С, 2 – 1000 °С, 3 – 2000 °С

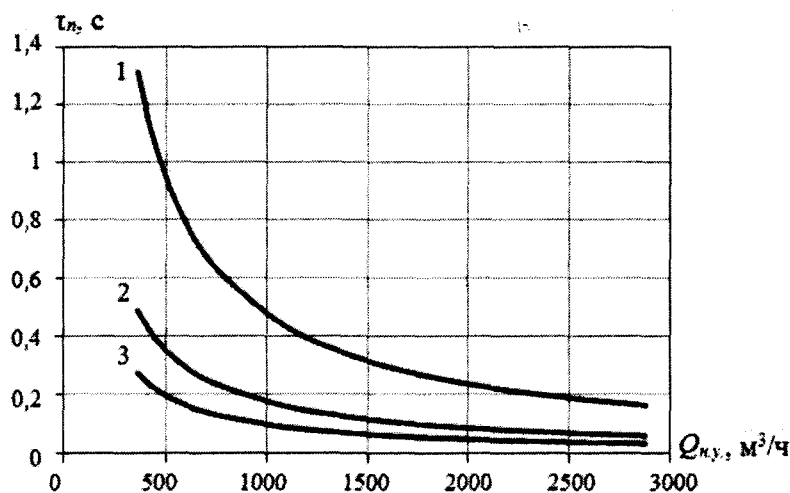


Рисунок 3 – Время пребывания частиц в канале реактора: обозначения см. рис. 2.

Таким образом, основная масса частиц угля большую часть времени будет двигаться с относительной скоростью близкой к скорости седиментации. Также необходимо отметить, что при росте температуры аэросмеси отношение  $7\tau_p / \tau_n$  увеличивается, в результате чего скорость седиментации для одних и тех же частиц будет достигаться на более длинном участке канала. Это связано с тем, что увеличение температуры воздуха, входящего в аэросмесь, приводит к уменьшению его плотности и, при сохранении постоянным расхода  $Q_{н.у.}$ , к увеличению скорости.

Вместе с тем, для крупных частиц при высоких температурах аэросмеси время пребывания в канале реактора может быть недостаточным для достижения скорости седиментации. Например, для частиц угля размером 0,1 мм при  $Q_{н.у.}=2160 \text{ м}^3/\text{ч}$  и температуре аэросмеси 1000 °С отношение  $7\tau_p / \tau_n = 1,073$ , а при 2000 °С – 1,378.

Расстояние, на которое опустится частица за время пребывания в канале реактора под действием силы тяжести, определим из уравнения движения частицы в гравитационном поле [5]

$$m \frac{dV}{d\tau} = -3\pi\mu Vd + mg.$$

Отсюда, учитывая, что скорость оседания частицы  $V = \frac{dy}{d\tau}$ , масса частицы  $m = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho$ , а также соотношение (1), и принимая начальную скорость оседания равной нулю, пройденное по высоте расстояние за время  $\tau$  определим как

$$y = g\tau_p^2 \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_p}} \right) + g\tau_p \tau. \quad (2)$$

Принимая в (2)  $\tau = \tau_n$  можем определить  $y_n$  – расстояние по высоте канала, на которое частицы угля под действием силы тяжести будут смещаться на выходе из канала реактора. Результаты расчета при  $Q_{н.у.}=1440 \text{ м}^3/\text{ч}$  показаны на рис. 4.

Из графика видно, что расстояние, которое успевает пройти частица угля под действием силы тяжести за время  $\tau_n$ , уменьшается с ростом температуры аэросмеси. Например, для частицы размером 0,05 мм пройденное расстояние составляет 0,019 м при температуре аэросмеси 200 °С и 0,004 м при 2000 °С. Частицы размером 0,1 мм, имеющие более высокую скорость седиментации, при тех же температурах аэросмеси успевают пройти расстояние 0,076 м и 0,017 м соответственно. Сравнивая полученные результаты с внутренним диа-

метром канала реактора  $d_{mp}=0,3$  м, получим, что в рассматриваемом диапазоне температур аэросмеси погрешность, вносимая в расчет траектории движения частиц угля при исключении силы тяжести на длине 3 м будет составлять для частиц размером 0,05 мм величину порядка 1,3...6,3 %, для частиц размером 0,1 мм – 5,7...25,3 %. При этом максимальное значение погрешности соответствует температуре аэросмеси 200 °С.

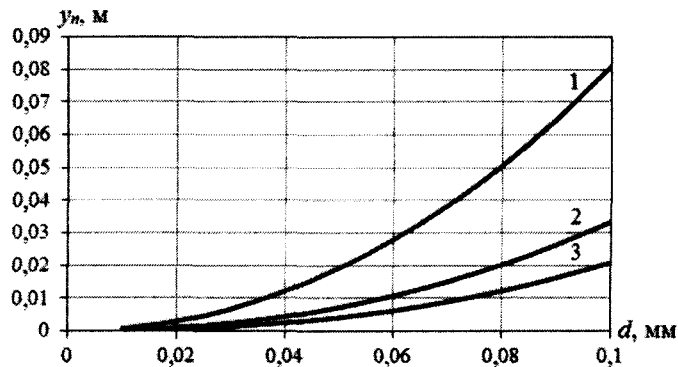


Рисунок 4 – Смещение частиц угля по высоте канала реактора: обозначения см. рис. 2

#### НЕРАВНОМЕРНОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ КАНАЛА РЕАКТОРА

Вследствие седиментации в потоке нагретого воздуха в прямоточном горизонтальном канале реактора будет наблюдаться смещение частиц угля по поперечному сечению. Для оценки влияния седиментации на движение частиц в потоке с учетом характеристики распределения, определяемой формулой Розина-Рамлера  $R_{0i} = e^{-bd_{0i}^n}$ , где  $R_{0i}$  – относительное массовое содержание (остаток на сите) частиц размером  $d_{0i}$  в исходной угольной пыли, а  $b$  и  $n$  – опытные коэффициенты, определенные на основании имеющихся данных по фракционному составу угольной пыли [4], было определено изменение распределения массовой концентрации  $C$  частиц в потоке аэросмеси в поперечном сечении канала реактора.

На рис. 5 показано безразмерное распределение массовой концентрации частиц  $\bar{C} = \frac{C}{C_0}$  в выходном сечении канала реактора, где  $C_0$  – массовая концентрация во входном сечении, принятая равномерной, при  $Q_{н.у.}=1440$  м<sup>3</sup>/ч. В расчете принималось, что частицы за время пребывания в канале реактора  $\tau_n$  смещаются относительно вертикальной оси на расстояние, определяемое формулой (2).

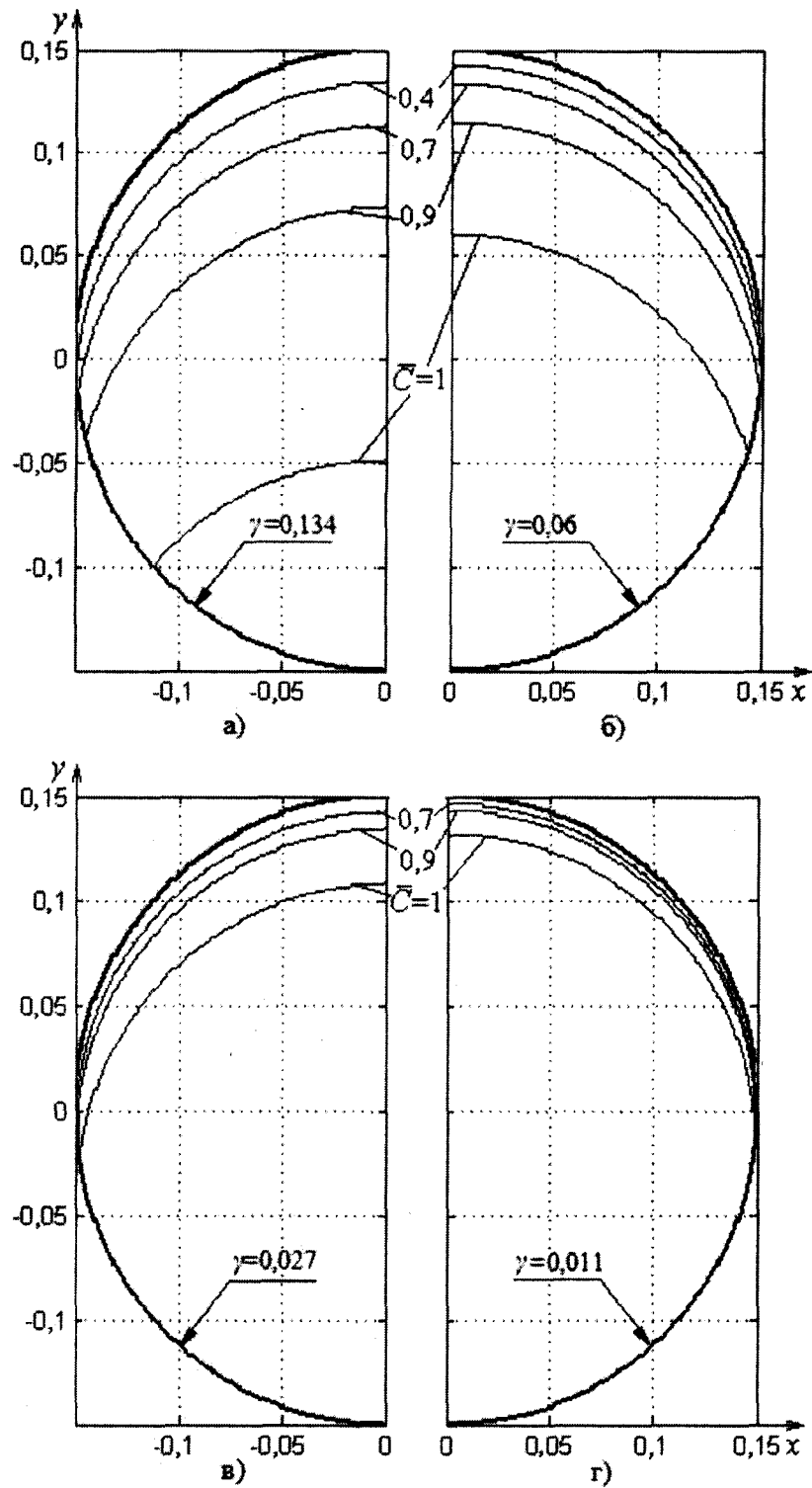


Рисунок 5 – Распределение массовой концентрации частиц в выходном сечении канала реактора: а – аэрозоль с температурой 200 °С, б – 500 °С, в – 1000 °С, г – 2000 °С

Кроме того, была определена массовая доля частиц угля, выпавших на стенки канала реактора,

$$\gamma = \frac{\sum m_s}{\sum m},$$

где  $\sum m$ ,  $\sum m_s$  – масса частиц, проходящих через входное сечение в единицу времени, и масса частиц, выпавших за время  $\tau_n$  на стенки канала реактора. Зависимость  $\gamma$  от расхода и температуры аэросмеси показана на рис. 6.

Как следует из результатов расчета, доля частиц, выпавших на стенки канала реактора, снижается при росте температуры аэросмеси и при температуре 1100...1200 °С, выше которой возможно начало шлакования, в зависимости от расхода воздуха, может приближаться к 5 %.

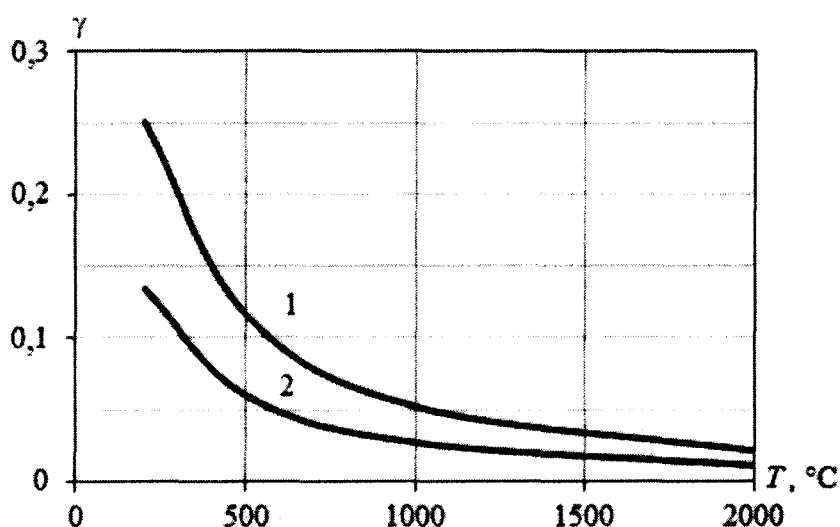


Рисунок 6 – Массовая доля частиц угля, выпавших на стенки канала реактора:  
1 -  $Q_{н.в.} = 720 \text{ м}^3/\text{ч}$ , 2 -  $1440 \text{ м}^3/\text{ч}$

## ВЫВОДЫ

1. Концентрация частиц угля в канале реактора вследствие действия силы тяжести существенно неравномерна. Неравномерность увеличивается с ростом диаметра частиц, снижением температуры потока аэросмеси и достигает 25,3% для частиц диаметром 0,1 мм.

2. Вследствие оседания увеличивается доля частиц аэросмеси, попадающих на нижнюю образующую канала реактора. Это ухудшает условия их прогрева и воспламенения, а при температуре аэросмеси более 1200 °С может приводить к шлакованию реактора.

3. Для снижения вероятности шлакования канала реактора целесообразен уклон канала под углом до 1,5...2°.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Булат, А.Ф. Численное и экспериментальное исследование процессов теплообмена при разработке технологии плазменного розжига пылеугольного топлива / А.Ф. Булат, А.И. Волошин, П.И. Кудинов // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25. – № 4. – С. 26-28.
2. Корчевой, Ю.П. Створення та підготовка до експериментальної експлуатації пілотних пальників енергетичного котлоагрегату для пилоподібного антрациту підвищеної зольності / Ю.П. Корчевой, Ю.П. Кукота, Н.І. Дунаєвська, М.М. Нехамін, Д.Л. Бондзик, В.Г. Дедов // Наука та інновації. – 2009. – Т. 5. – № 4. – С. 13-21.
3. Бондзик Д.Л. Попередня термічна обробка низькорекційного вугілля для його факельного спалювання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / Д.Л. Бондзик – Київ: Інститут газу НАНУ, 2012. – 20 с.
4. Жевжик, А.В. Исследование движения частиц аэросмеси в улитке пылеугольной горелки / Жевжик А.В., Горячкин В.Н., Потапчук И.Ю. // Системные технологии. – 2011. - № 5 (76). – С. 109-116.
5. Райст, П. Аэрозоли. Введение в теорию. Пер. с англ. / П. Райст – М., Мир, 1987. – 280 с.
6. Швыдкий, В.С. Очистка газов: Справочное издание / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

## REFERENCES

1. Bulat, A.F., Voloshin, A.I. and Kudinov, P.I. (2003), "Numerical and experimental research of heat and mass transfer at the depending of coal dust fuel burning", *Promishlennaia teplotekhnika*, vol. 25, no. 4, pp. 26-28.
2. Korchevoj, J. P., Kukota, J.P., Dunajevskaja, N.I., Nehamin, M.M., Bondzyk, D.L. and Dedov, V.G. (2009) "Creation and preparation to experimental operation of pilot burners for boilers with pulverized high ash anthracite", *Nauka ta innovatsii*, vol. 5, no. 4, pp. 13-21.
3. Bondzyk, D.L. (2012), Preliminary heat treatment of low-reactive coal for its pulverized combustion, Abstract Ph.D. dissertation, 05.15.06 «Technical thermo-physics and industrial heat engineering», The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.
4. Zhevzhik, A.V., Goriachkin, V.N. and Potapchuk, I.Yu. (2011), "Study of air mixture particle motion in the secondary air helix of coal dust burner", *Systemni tehnologii*, no. 5 (76), pp. 109-116.
5. Reist, P. (1987), *Aerologii. Vvedenie v teoriyu* [Introduction to aerosol science], Translated by Ogorodnikov B., Sadovskiy A., Budyka A. in Sadovskiy B. (ed.), Mir, Moscow, USSR.
6. Shvydky, V.S. and Ladygichev, M.G. (2002) *Ochistka gazov* [Gas cleaning], Teploenergetik, Moscow, Russia.

## Об авторах

**Волошин Алексей Иванович**, чл. - кор. Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, заместитель директора института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [worldlab.eg@gmail.com](mailto:worldlab.eg@gmail.com)

**Жевжик Александр Владиславович**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник в отделе Проблем механики вибропневмотранспортных систем и комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [teploenergopro@gmail.com](mailto:teploenergopro@gmail.com)

**Горячкин Вадим Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплотехники, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. В. Лазаряна (ДНУЖТ), Днепропетровск, Украина, [vgora@ukr.net](mailto:vgora@ukr.net)

**Потапчук Ирина Юрьевна**, магистр, ассистент кафедры теплотехники, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна (ДНУЖТ), Днепропетровск, Украина, [potapchuk@ua.fm](mailto:potapchuk@ua.fm)

## About the authors

**Voloshin Alexey Ivanovich**, Corresponding Member of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Deputy Director, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [worldlab.eg@gmail.com](mailto:worldlab.eg@gmail.com)

**Zhevzhik Alexandr Vladislavovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Senior Researcher in Department of Mechanics of Vibratory Transporting Systems and Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [teploenergopro@gmail.com](mailto:teploenergopro@gmail.com)

**Goriachkin Vadim Nikolaevich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Heat Engineering, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT), Dnepropetrovsk, Ukraine, [vgora@ukr.net](mailto:vgora@ukr.net)

**Potapchuk Irina Yur'evna**, Master of Science, Assistant at the Department of Heat Engineering, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (DNURT), Dnepropetrovsk, Ukraine, [potapchuk@ua.fm](mailto:potapchuk@ua.fm)

**Анотація.** Метою досліджень є визначення зміни розподілу частинок вугільного пилу у перетині прямого горизонтального циліндричного каналу реактора термохімічної підготовки палива внаслідок дії сили тяжіння.

Для цього на основі аналізу сил, які діють на частинку, створена методика розрахунку концентрації частинок і визначений вплив їх осідання на розподіл у поперечному перетині каналу реактора по його довжині; визначена доля частинок, які випадають на стінки каналу, в залежності від температури і витрати потоку аеросуміші.

Визначено, що підвищення температури потоку аеросуміші сприяє зменшенню долі частинок, які осідають на нижню утворюючу каналу, що приведе до зменшення ступеню шлакування. Отримані результати можуть бути використані для математичного моделювання і оптимізації роботи апаратів термохімічної підготовки і газифікації твердого палива.

**Ключові слова:** термохімічна підготовка палива, рух частинок, вугільний пил, концентрація частинок, прямоточний канал.

**Abstract.** Purpose of this research is to determine gravity-induced changes in distribution of particles of coal dust in horizontal cylindrical direct-flow channel of thermochemical fuel preparation reactor.

To this end, forces impacting the particles were analyzed; a method was established for calculating the particle concentration; effect of the particle deposition and their distribution in the cross section of the reactor channel over its length was defined; portion of particles settling down on the walls of the channel was determined depending on the fuel mixture temperature and flow rate.

It was determined that increased temperature of the fuel mixture flow reduced quantity of particles settled down on the bottom of the channel and, further, reduced rate of slag formation.

The findings can be used for mathematical modeling and optimization of thermochemical preparation and gasification of the solid fuels.

**Keywords:** thermochemical fuel preparation, movement of particles, coal dust, particle concentration, direct-flow channel.

*Статья поступила в редакцию 13.02. 2013*

*Статья рекомендована к печати д-ром техн. наук В.П. Надутым*