

Информационные, управляющие и измерительные системы

Information, Control and Measurement Systems

Научная статья

DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15105>

УДК 681.518.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ГАЗОТВОДЯЩЕМ ТРАКТЕ ПЕЧИ НА ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

В.Ю. Бажин¹, О.Н. Масько² ✉

^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ olgamasko.17@gmail.com

Аннотация. Технологический процесс восстановительной плавки кремния в рудно-термической печи (РТП) имеет особенности, препятствующие осуществлению адекватного контроля за управлением всем технологическим процессом. Высокая температура и резкие изменения её значения затрудняют процедуру получения объективных данных о параметрах плавки и состоянии расплава в печи. Основным фактором, обуславливающим сложность контроля за управлением процессом – образование больших объёмов побочных компонентов. Выбросы угольной и кремнеземной пыли с отходящими газами достигают 40–50 % от количества готового продукта – технического кремния. Статья посвящена анализу зависимости температуры отходящих газов РТП кремниевого производства от концентрации твердых частиц в них посредством компьютерного моделирования. Описано решение следующих задач: предварительная оценка влияния концентрации твердых частиц на температуру дисперсной среды; разработка модели вычислительной гидродинамики (CFD) модели газотводящего тракта РТП с помощью ПО ANSYS Fluent; моделирование поведения отходящих газов при различных концентрациях микросилики. В результате анализа результатов моделирования получена полиномиальная зависимость температуры отходящих из РТП газов от концентрации в них микросилики.

Ключевые слова: производство кремния, рудно-термическая печь, газоочистка, модель вычислительной гидродинамики, ANSYS Fluent, температура, микросилика

Для цитирования: Бажин В.Ю., Масько О.Н. Оценка влияния концентрации твердых частиц в газотводящем тракте печи на изменение температуры с помощью модели вычислительной гидродинамики // Computing, Telecommunications and Control. 2022. Т. 15, № 1. С. 51–63. DOI: 10.18721/JCSTCS.15105

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15105>

UDC 681.518.5

EVALUATING THE EFFECT OF PARTICULATE MATTER CONCENTRATION IN THE FURNACE EXHAUST DUCT ON TEMPERATURE CHANGE USING A COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS MODEL

V.Yu. Bazhin¹, O.N. Masko² ✉

^{1,2} Saint-Petersburg Mining University,
St. Petersburg, Russian Federation

✉ olgmasko.17@gmail.com

Abstract. The technological process of carbothermic silicon reduction in an ore-thermal furnace (OTF) has features that hinder adequate monitoring and control of the entire technological process. High temperature makes it difficult to obtain objective data on melting parameters in the furnace. The main factor contributing to the difficulty of controlling the process is the formation of large volumes of by-product components. Coal and silica dust emissions in the flue gases reach 40–50 % of the finished product – technical silicon. The article is devoted to analysis of dependence of temperature of exhaust gases of OTF silicon production on concentration of solids in them by means of computer simulation. The paper describes the solution of the following tasks: a preliminary assessment of the effect of the concentration of solids on the temperature of the dispersed medium; development of a computational fluid dynamics (CFD) model of the gas exhaust duct of OTF using the ANSYS Fluent software; simulation of the behavior of exhaust gases at different concentrations of silica fume. As a result of analysis of the simulation results, a polynomial dependence of the exhaust gas temperature on the concentration of silica fume in the exhaust gas from the OTF was obtained.

Keywords: silicon production, ore-thermal furnace, gas cleaning, CFD model, ANSYS Fluent, temperature, silica fume

Citation: Bazhin V.Y., Masko O.N. Evaluating the effect of particulate matter concentration in the furnace exhaust duct on temperature change using a computational fluid dynamics model. *Computing, Telecommunications and Control*, 2022, Vol. 15, No. 1, Pp. 51–63. DOI: 10.18721/JCSTCS.15105

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Введение

Восстановительная плавка кремния в рудно-термической печи (РТП) представляет определенные сложности для контроля и эффективного управления процессом из-за критической запыленности рабочей среды и высокой температуры процесса. Фактически, процесс представляет собой «черный ящик», где контролируются только данные на входах и выходах из печи и газоотводящего тракта.

Цель работы – поиск способов контроля выбросов микросилики в производстве технического кремния через косвенные параметры.

Наиболее удобным способом для поиска необходимых зависимостей является компьютерное моделирование. Использование цифровых моделей, адекватно моделирующих процесс восстановительной плавки кремния в РТП и распределение температур в системе отвода отходящих газов, позволяет определить параметры регулирования процесса восстановления кремния до определенной марки без проведения ряда дорогостоящих промышленных экспериментов [1–3].

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: создание CFD-модели газоотводящего тракта РТП, проведение цифровых экспериментов с различной концентрацией микросилики в отходящих газах для определения зависимости от неё температуры дисперсной среды.

Применение цифровых моделей реальных технологических процессов позволяет решить ряд важнейших производственных задач, в том числе и для производства кремния. Существуют различные подходы для моделирования подобных сред.

1. Вертикальная и горизонтальная системная интеграция.

Моделирование используется для осуществления вертикальной и горизонтальной интеграции систем и оборудования, которое можно применять для проектирования, тестирования и оценки интегрированных систем.

2. Цифровая модель также может использоваться для анализа данных для диагностики, прогнозирования и анализа принятых решений.

Анализ отклонений и недостатков посредством имитационного моделирования конкретного агрегата дает представление о причинах предполагаемых остановок производства. На основе анализа накопленного массива данных (BigData) модель может имитировать любые изменения, возникающие в технологическом процессе, вследствие произошедших в системе событий и сбоев, и ответить на вопросы о причине изменений.

3. Цифровые модели физических агрегатов также разрабатываются для обучения обслуживающего персонала для устойчивой работы оборудования, в том числе для корректирующих действий операторов автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) [4–6].

При осуществлении работы в условиях агрессивной среды контроль выполнения производственных операций затруднен. Из-за недостаточной доступности контроля процесса персоналу приходится работать на уровне интуиции или с большим количеством ручных замеров параметров, что нередко приводит к серьезным поломкам дорогостоящего оборудования, к ущербу здоровья работников. В данном случае цифровая модель позволяет избежать множества проблем, имитируя последствия принятия решений по прогнозной модели.

Контроль содержания микросилики в системе газоочистки РТП

В процессе восстановления кремния в РТП происходит вынос больших объёмов ценных компонентов (микросилики), объём которых не контролируется. В табл. 1 представлен усредненный состав пылевых выбросов ЗАО «Кремний» [7–9].

Системы контроля выбросов в производстве кремния сталкиваются с проблемами, вызванными агрессивностью рабочей среды. Высокая температура (более 500 °С) и скорость течения газов, критическая запыленность приводят к искажению результатов измерения и быстрому износу оборудования [10–12].

Принимая во внимание описанные условия течения в атмосфере печи и в системе газоходов до ГОУ, возникает вопрос об оценке влияния величины пылевых выбросов на скоростные и температурные поля [13–17].

Отходящие газы являются дисперсной системой, которая, в зависимости от концентрации частиц микросилики, имеет различную теплоёмкость [18, 19].

Так как дисперсная система состоит из частиц и среды, то общее количество теплоты, переданной системе, равно сумме теплоты, переданной частицам и самой дисперсионной средой. Тогда теплоёмкость дисперсной системы будет равна:

$$c_{\text{дс}} = \frac{c_{\text{ч}} \cdot M_{\text{ч}} \cdot \Delta T + c_{\text{г}} \cdot M_{\text{г}} \cdot \Delta T}{M_{\text{дс}} \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

где $M_{дс}$ – масса системы, кг; ΔT – изменение температуры, К; $c_{ч}$ – теплоёмкость частиц, Дж/кг*К; $M_{ч}$ – масса частиц, кг; $c_{г}$ – теплоёмкость газовой смеси, Дж/кг*К; $M_{г}$ – масса газовой смеси, кг.

Ключевой показатель для теплоёмкости дисперсной системы – массовая доля твердых частиц в системе, которая практически является неконтролируемым параметром [20, 21]:

$$e_m = \frac{M_{ч}}{M_{ч} + M_{г}}. \quad (2)$$

Таким образом, зависимость теплоёмкости дисперсной системы от массовой доли частиц в системе может дать представление о текущей ситуации процесса:

$$C_{дс} = C_{ч} \cdot e_m + C_{г} \cdot (1 - e_m). \quad (3)$$

Косвенным параметром контроля массовой доли частиц выступает температура среды. Определив потери тепла на участке отводящего газопровода, можно определить величины выбросов микросилики, а также степень управляющего воздействия для регулирования параметров.

Компьютерное моделирование гидродинамики пылегазового потока

Суть эксперимента заключается в моделировании температурного поля пылегазовой смеси при различных концентрациях твердых частиц от 0 до 20 % при выходе их из печи и во время нахождения в газоходной системе до улавливания в системе ГОУ в электрофильтрах.

Для проведения эксперимента выбрали программный пакет ANSYS Fluent, разработанный для решения задач гидрогазодинамики. Данный модуль обладает высокой точностью и позволяет сохранять значения потока благодаря методу конечных элементов, используемому для решения уравнений.

Поскольку течение сильно турбулентное, для моделирования выбрали решатель ANSYS Fluent по давлению и локальную модель вихревой вязкости Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity (WALE). WALE учитывает нестационарность турбулентных течений и адаптирована для учета пристеночных потоков.

В качестве исходных компонент имеются следующие граничные условия для моделирования системы газоотвода РТП, а именно стальных газоходов, указанные в табл. 1–3.

Таблица 1
Усредненный состав пыли кремниевого производства ЗАО «Кремний» [23–25]

Table 1

Average composition of silicon dust produced by CJSC “Silicon” [23–25]

Химический компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	SiC
%	85,41	0,46	0,30	1,50	1,24	6,09	0,08	0,16	0,12	0,31	0,02	5,03

Разработанная CFD-модель позволяет оценить влияние концентрации пылевых частиц в смеси на распределение скоростных и температурных полей, и установить параметры регулирования газовым потоком и температурным режимом.

Таблица 2

Исходные данные для модели

Table 2

Source data for the model

Объём (газов), Нм ³ /ч	250 000
Температура газов на выходе из печи, °С	500
Давление, кПа	450
Температура, °С	35–45

Таблица 3

Средний состав отходящих газов [22]

Table 3

Average composition of exhaust gases [22]

Компонент смеси	%
СО	88,61
СО ₂	4,81
СН ₄	1,42
N ₂	2,52
H ₂	2,67

Модель газохода без водяного охлаждения

Моделируемая часть системы газоотводящего тракта состоит из участков газоходов с жестким стальным каркасом и шиберной заслонки, которая выполняет функцию регулятора скорости газового потока и располагается в месте соединения газоходов (исходные данные модели представлены в табл. 4). Данная часть представляет наибольший интерес для моделирования и последующего анализа, поскольку именно здесь прогнозируется наличие устойчивых зон [26–28], и возможна установка приборов для контроля и управления всем газовым потоком при помощи регулируемого автоматизированного привода заслонки.

Модель турбулентности WALE требует высокого качества сетки (рис. 1). Количество элементов сетки должно быть не менее миллиона, также для моделирования пограничного слоя должна применяться опция inflation. В противном случае в результате численного моделирования будут получены некоррелированные данные.

В цифровой (расчетной) модели насчитывается 2 739 629 элементов сетки. Сетка построена с опцией inflation, имеет приемлемое для расчетной модели среднее ортогональное качество 0,79, что позволяет использовать данную модель.

Для учета изменения плотности газовой смеси в зависимости от температуры применили уравнение реального газа Соаве-Редлиха-Квонга.

Для моделирования твердой фазы (частиц микросилики) в отходящих из РТП газах использован метод Лагранжа [29, 30]. Моделируются частицы микросилики, имеющие диаметр 250 мкм и теплопроводность 0,09 Вт/(м*К).

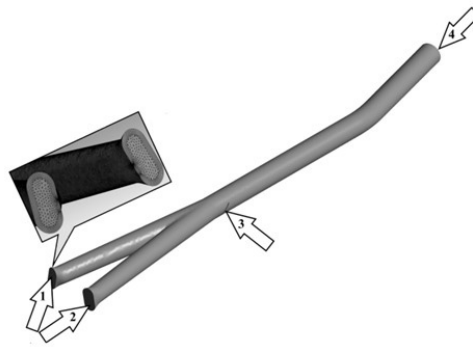


Рис. 1. Параметры сетки модели газоходов
(1, 2 – massflow_inlet, 3 – шиберная заслонка, 4 – pressure_outlet)

Fig. 1. Mesh parameters of the gas duct model
(1, 2 – massflow_inlet, 3 – sliding shutter, 4 – pressure_outlet)

Таблица 4

Граничные условия модели

Table 4

Boundary conditions of the model

Параметры	Вход	Выход
Тип граничных условий	massflow_inlet	pressure_outlet
Гидравлический диаметр, м	3	2,7
Массовый расход, кг/с	15,54	–
Избыточное давление, Па	–	0
Температура, °C (на входе в стальную часть газоходов)	430	–
Критерий Re	117255,6	266330
Интенсивность турбулентности потока, %	3,72	3,35

Таким образом, баланс сил, действующих на частицу, прогнозирует траекторию частиц дискретной фазы путем интегрирования баланса сил на частицу, который записывается в системе отсчета по Лагранжу. Этот баланс силы уравнивает величину инерции с силами, действующими на частицу, и может быть представлен (для направления в декартовой системе координат) как [31, 32]

$$\frac{dU_q}{dt} = F_c (U - U_q) + \frac{g_x \cdot (\rho_q - \rho)}{\rho_q}, \quad (4)$$

где $F_c (U - U_q)$ – сила сопротивления на единицу массы частицы; U – скорость дисперсионной среды, м/с; U_q – скорость частицы, м/с; ρ_q – плотность дисперсионной среды, кг/м³; ρ – плотность частицы, кг/м³; g_x – ускорение свободного падения, м/с².

Рис. 2 отражает распределение пылевых частиц в объеме газоходной системы.

На графиках распределения температур, представленных на рис. 3, видно, что температура на выходе из газохода повышается при росте общего содержания твердых частиц. Зависимость температуры отходящих газов от концентрации твердых частиц представлена на графике (рис. 4).



Рис. 2. Траектория движения твердых частиц в потоке газа
Fig. 2. Trajectory of particulate matter in the gas stream

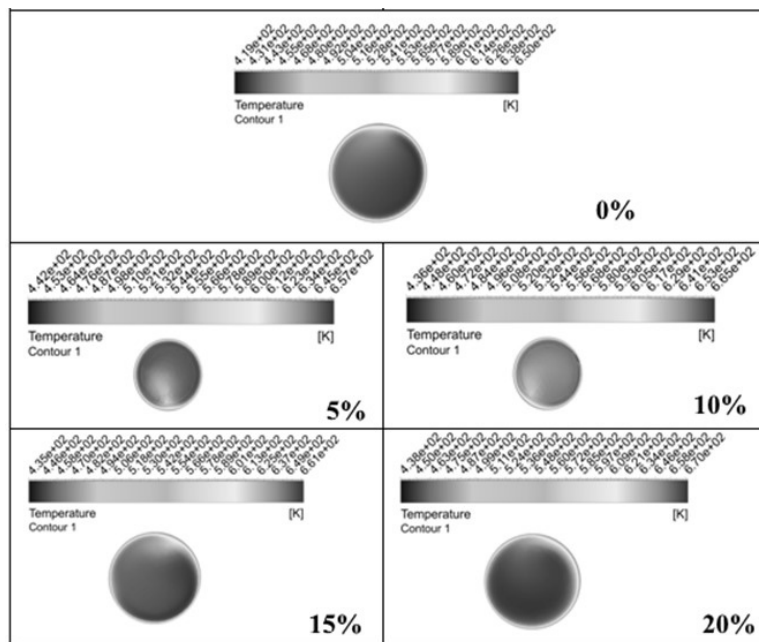


Рис. 3. Распределение температурных полей на выходе из газохода при различных концентрациях твердых частиц в отходящих газах от 0 до 20 %
Fig. 3. Distribution of temperature fields at the gas outlet at different concentrations of particulate matter in flue gases from 0 to 20 %

На графике представлена полиномиальная зависимость температуры от концентрации, выраженная уравнением:

$$T = 0,008C^3 - 0,2286C^2 + 2,3714C + 649,97. \quad (5)$$

Это подтверждает предложенную гипотезу о влиянии теплоёмкости пылегазовой смеси на изменение температуры в газовом тракте печи.

Выводы

Повышение эффективности производства металлургического кремния в РТП напрямую зависит от объёмов пылевых выбросов ценной для предприятия и губительной для окружающей среды и здоровья человека микросилики. Непрерывный контроль концентрации твердых частиц в отходящих газах вызывает затруднения ввиду агрессивности среды (высокая температура и критическая запыленность) [33–35].

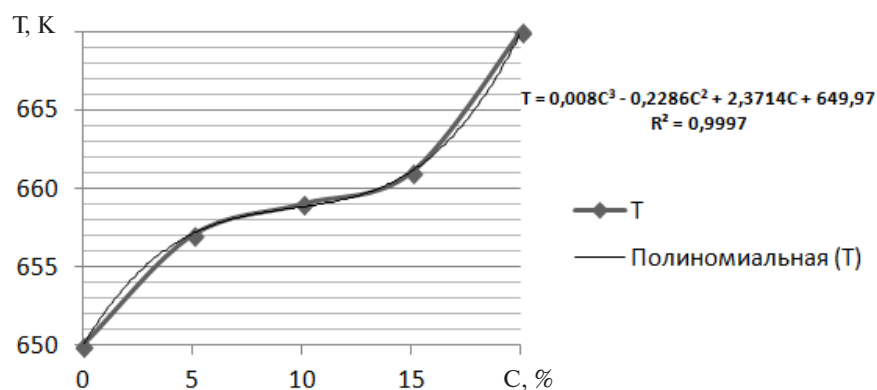


Рис. 4. Зависимость температуры отходящих газов от содержания твердых частиц
 Fig. 4. Dependence of flue gas temperature on particulate matter content

Для подтверждения возможности косвенной оценки этого показателя посредством контроля тепловых потерь на участках отводящего газопровода проведено CFD-моделирование газоходов РТП в ANSYS Fluent.

С помощью метода Лагранжа получены температурные профили отходящих газов при различных концентрациях твердых частиц (от 0 до 20 %), в результате чего выведена полиномиальная зависимость, позволяющая определить влияние концентрации микросилики на температуру. Данная зависимость даёт возможность осуществлять непрерывный контроль выбросов микросилики посредством измерения косвенного параметра – температуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спирин Н.А., Рыболовлев В.Ю., Лавров В.В., Гурин И.А., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В. Научные проблемы создания интеллектуальных систем управления технологическими процессами в пирометаллургии на основе концепции «Индустрия 4.0» // *Металлург*. 2020. № 64 (5-6). С. 574–580. DOI: 10.1007/s11015-020-01029-1
2. Rossi F., Rovaglio M., Manenti F. Model predictive control and dynamic real-time optimization of steam cracking units // *Mathematical Modelling of Gas-Phase Complex Reaction Systems: Pyrolysis and Combustion*. 2019. Pp. 873–896. DOI: 10.1016/B978-0-444-64087-1.00018-8
3. Abburu S., Berre A.J., Jacoby M., Roman D., Stojanovic L., Stojanovic N. COGNITWIN – hybrid and cognitive digital twins for the process industry // *IEEE Internat. Conf. on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*. 2020. 8 p. DOI: 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198403
4. Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilieva N. A simulator for educating the digital technologies skills in industry. Part 1. Dynamic simulation of technological processes // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(22). Pp. 10855–10855. DOI: 10.3390/app112210885
5. Gubin V.V., Darin A.A. Interactive training simulator as means of increasing economic efficiency of enterprises // *Internat. J. of Management (IJM)*. 2019. Vol. 2(10). Pp. 122–126. DOI: 10.34218/IJM.10.2.2019.011
6. Fedorova E.R., Darin A.A., Gubin V.V. Methods of training simulators development in aspect of increasing efficiency and safety production // *Internat. J. of Management (IJM)*. 2019. Vol. 2 (10). Pp. 117–121. DOI: 10.34218/IJM.10.2.2019.010

7. **Saevarsdottir G., Kvande H., Magnusson T.** Greenhouse gas emissions from silicon production – development of carbon footprint with changing energy systems // *Infacon XVI: International Ferro-Alloys Congress*. 27-29 Sept. 2021. Pp. 1–11. DOI: 10.2139/ssrn.3926088
8. **Nemchinova N., Hoang V.V., Tyutrin A.** Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. 969:012038. DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012038
9. **Немчинова Н.В., Хоанг В.В., Апончук И.И.** Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки // *Вестник ИрГТУ*. 2021. Т. 25 (2). С. 252–263. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-2-252-263
10. **Kero I., Dahl S., Tranell G.** Airborne emissions from Si/FeSi production // *J. of Metals*. 2017. Vol. 69 (2). Pp. 365–380. DOI:10.1007/s11837-016-2149-x
11. **Zhao Ya., Akolekara H.D., Weatheritta J., Michelassib V., Sandberg R.D.** RANS turbulence model development using CFD-driven machine learning // *J. of Computational Physics*. 2020. 19 p. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109413
12. **Mishra P., Aharwal K.W.** A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018. 402(1):012145. DOI: 10.1088/1757-899X/402/1/012145
13. **Евсеев Н.В., Тютрин А.А., Пастухов М.П.** Гранулирование пылевых отходов кремниевого производства для возврата в технологический процесс // *Вестник ИрГТУ*. 2019. Т. 23. № 4. С. 805–815. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-805-815
14. **Kondrat'ev V.V., Konstantinova M.V., Kononenko R.V., Kolosov A.D.** Nanostructures based on carbon and silicon dioxide to improve the properties of building and structural materials // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2021. 1159(1):012046. DOI: 10.1088/1757-899X/1159/1/012046
15. **Karlina A.I., Kondrat'ev V.V., Balanovsky A.E., Kolosov A.D., Ivanchik N.N.** Results of modification of cast iron by carbon nanostructures of gas cleaning dust of silicon production // *Advances in Engineering Research*. AviaENT. 2018. Vol. 158. Pp. 169–173. DOI: 10.2991/avent-18.2018.33
16. **Ёлкин К.С., Ёлкин Д.К., Карлина А.И.** Повышение экологической безопасности производства кремния // *Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии*. 2018. Вып. 41. С. 232–238.
17. **Вологин А.С., Тютрин А.А.** Пыль газоочистки кремниевого производства: области применения // *Молодёжный вестник ИрГТУ*. 2021. Т. 11. № 2. С. 19–22.
18. **Ryagay I.N., Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A.** Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al_2O_3 - SiO_2 catalyst supports // *Catalysts*. 2022. Vol. 12 (162). 13 p. DOI: 10.3390/catal12020162
19. **Гембицкая И.М., Гвоздецкая М.В.** Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков // *Записки Горного института*. 2021. Т. 249. С. 401–407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9
20. **Асанов Д.А., Запасный В.В., Ермакова А.Т., Маратова Г.Р., Иванов А.А., Черепанов Н.И.** Современное состояние и пути улучшения работы систем пылеулавливания в плавильном цехе № 1 Аксуского завода ферросплавов // *Металлург*. 2018. Т. 62. С. 391–400. DOI: 10.1007/s11015-018-0673-3
21. **Масько О.Н., Горленков Д.В.** Анализ состояния автоматизации управления материальными потоками в производстве кремния // *Computing, Telecommunications and Control*. 2020. Vol. 13. No. 4. Pp. 66–77. DOI: 10.18721/JCSTCS.13406
22. **Рагулина Р.И., Емлин Б.И.** Электротермия кремния и силумина. М.: Металлургия, 1972. 239 с.
23. **Leonova M.S., Timofeeva S.S.** Environmental and economic damage from the dust waste formation in the silicon production // *IOP Conf. Series Earth and Environmental Science*. 2019. 229:012022. DOI: 10.1088/1755-1315/229/1/012022

24. **Leonova M.S., Timofeeva S.S., Murzin M.A.** Dust load in silicon production and occupational risks // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 687(6):066012. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066012
25. **Leonova M.S., Timofeeva S.S.** Impact of dust emissions from the silicon production on working conditions // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 408(1):012026. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012026
26. **Beloglazov I.I., Morenov V.A., Leusheva E.L.** Flow modeling of high-viscosity fluids in pipeline infrastructure of oil and gas enterprises // Egyptian Journal of Petroleum. 2021. No. 11. Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.ejpe.2021.11.001
27. **Картанова А.Дж., Сулайманова С.М.** Компьютерное моделирование течения сжимаемого газа в сопле // Современные проблемы механики. 2019. Вып. 36 (2). С. 31–39.
28. **Tânia S., Ferreira C., Arts T., Croner E.** On the influence of high turbulence on the convective heat flux on the high-pressure turbine vane LS89 // Int. J. Turbomach. Propuls. Power. 2019. Vol. 4 (4). 19 p. DOI: 10.3390/ijtpp4040037
29. **Kühnen J., Song B., Scarselli D., Budanur N.B., Riedl M., Willis A., Avila M., Hof B.** Destabilizing turbulence in pipe flow // Nature Physics. 2018. Vol. 14. Pp. 386–390. DOI: 10.1038/s41567-017-0018-3
30. **Мельникова Т.В., Преображенский А.П., Львович Я.И.** Моделирование и оптимизация процессов турбулентности // Матер. междунар. конф. Наноматериалы и технологии. 2019. С. 1–4.
31. **Duraisamy K., Iaccarino G., Xiao H.** Turbulence modeling in the age of data // Annu. Rev. Fluid Mech. 2019. Vol. 51. Pp. 357–377. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010518-040547
32. **Угольников А.В., Макаров Н.В.** Применение системы автоматизации для контроля и учета показателей энергоэффективности эксплуатации компрессорного хозяйства горных предприятий // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 245–248. DOI: 10.31897/pmi.2019.2.245
33. **Litvinenko V., Molodtsov K.V.** The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // Eurasian Mining. 2020. Vol. 1. Pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07
34. **Недосекин А.О., Рейшахрит Е.И., Козловский А.Н.** Стратегический подход к оценке экономической устойчивости объектов минерально-сырьевого комплекса России // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 354–360. DOI: 10.31897/pmi.2019.3.354
35. **Litvinenko V.** Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector // Natural Resources Research. 2019. Vol. 29 (1). DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4

REFERENCES

1. **Spirin N.A., Rybolovlev V.Yu., Lavrov V.V., Gurin I.A., Schnayder D.A., Krasnobaev A.V.** Scientific problems in creating intelligent control systems for technological processes in pyrometallurgy based on industry 4.0 concept. *Metallurgist*, 2020, Vol. 64 (5-6), Pp. 574–580. (rus). DOI: 10.1007/s11015-020-01029-1
2. **Rossi F., Rovaglio M., Manenti F.** Model predictive control and dynamic real-time optimization of steam cracking units. *Mathematical Modelling of Gas-Phase Complex Reaction Systems: Pyrolysis and Combustion*, 2019, Pp. 873–896. DOI: 10.1016/B978-0-444-64087-1.00018-8
3. **Abburu S., Berre A.J., Jacoby M., Roman D., Stojanovic L., Stojanovic N.** COGNITWIN – hybrid and cognitive digital twins for the process industry. *IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 2020, 8 p. DOI: 10.1109/ICE/ITMC49519.2020.9198403
4. **Koteleva N., Kuznetsov V., Vasilieva N.** A simulator for educating the digital technologies skills in industry. Part 1. Dynamic Simulation of Technological Processes. *Applied Sciences*, 2021, Vol. 11 (22), Pp. 10855–10855. DOI: 10.3390/app112210885

5. **Gubin V.V., Darin A.A.** Interactive training simulator as means of increasing economic efficiency of enterprises. *International Journal of Management (IJM)*, 2019, Vol. 2 (10), Pp. 122–126. DOI: 10.34218/IJM.10.2.2019.011
6. **Fedorova E.R., Darin A.A., Gubin V.V.** Methods of training simulators development in aspect of increasing efficiency and safety production. *International Journal of Management (IJM)*, 2019, Vol. 2 (10), Pp. 117–121. DOI: 10.34218/IJM.10.2.2019.010
7. **Saevarsdottir G., Kvande H., Magnusson T.** Greenhouse gas emissions from silicon production – development of carbon footprint with changing energy systems. *Infacon XVI: International Ferro-Alloys Congress*, 27-29 Sep. 2021, Pp. 1–11. DOI: 10.2139/ssrn.3926088
8. **Nemchinova N., Hoang V.V., Tyutrin A.** Formation of impurity inclusions in silicon when smelting in ore-thermal furnaces, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 969:012038. DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012038
9. **Nemchinova N., Hoang V.V., Aponchuk I.I.** Research into the chemical composition of refinery slag from silicon production for its efficient recycling. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2021, Vol. 25 (2), Pp. 252–263. (rus). DOI: 10.21285/1814-3520-2021-2-252-263
10. **Kero I., Dahl S., Tranell G.** Airborne emissions from Si/FeSi production. *Journal of Metals*, 2017, Vol. 69 (2), Pp. 365–380. DOI: 10.1007/s11837-016-2149-x
11. **Zhao Ya., Akolekara H.D., Weatheritta J., Michelassib V., Sandberg R.D.** RANS turbulence model development using CFD-driven machine learning. *Journal of Computational Physics*, 2020, P. 19. DOI: 10.1016/j.jcp.2020.109413
12. **Mishra P., Aharwal K.W.** A review on selection of turbulence model for CFD analysis of air flow within a cold storage. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 402(1):012145. DOI: 10.1088/1757-899X/402/1/012145
13. **Evseev N.V., Tyutrin A.A., Pastukhov M.P.** Granulation of silicone production dust waste for recycling. *Proceedings of ISTU*, 2019, Vol. 23 (4), Pp. 805–815. (rus). DOI: 10.21285/1814-3520-2019-4-805-815
14. **Kondrat'ev V.V., Konstantinova M.V., Kononenko R.V., Kolosov A.D.** Nanostructures based on carbon and silicon dioxide to improve the properties of building and structural materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, 1159 (1):012046. DOI: 10.1088/1757-899X/1159/1/012046
15. **Karlina A.I., Kondrat'ev V.V., Balanovsky A.E., Kolosov A.D., Ivanchik N.N.** Results of modification of cast iron by carbon nanostructures of gas cleaning dust of silicon production. *Advances in Engineering Research. AviaENT*, 2018, Vol. 158, Pp. 169–173. DOI: 10.2991/avent-18.2018.33
16. **Yolkin K.S., Yolkin D.K., Karlina A.I.** Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti proizvodstva kremniya [Improving the environmental safety of silicon production]. *Bulletin of the Mining and Metallurgy Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Department of Metallurgy*, 2018, Vol. 41, Pp. 232–238. (rus)
17. **Vologin A.S., Tyutrin A.A.** Pyl' gazoochistki kremnievogo proizvodstva: oblasti primeneniya [Silicon flue gas cleaning dust: applications]. *IrSTU Youth Bulletin*, 2021, Vol. 11 (2), Pp. 19–22. (rus)
18. **Pyagay I.N., Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A.** Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al₂O₃-SiO₂ catalyst supports. *Catalysts*, 2022, Vol. 12 (162), 13 p. DOI: 10.3390/catal12020162
19. **Gembitskaya I.M., Gvozdetskaya M.V.** Transformation of grains of technological raw materials in the process of obtaining fine powders. *Journal of Mining Institute*, 2021, Vol. 249 (3), Pp. 401–407. (rus). DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9
20. **Asanov D.A., Zapasnyi V.V., Ermekova A.T., Maratova G.R., Ivanov A.A., Cherepanov N.I.** Current status of dust collection systems in aksu ferroalloy plant smelting shop 1 and functional improvement to these systems. *Metallurgist*, 2018, Vol. 62, Pp. 391–400. (rus). DOI: 10.1007/s11015-018-0673-3

21. **Masko O.N., Gorlenkov D.V.** Analysis of the state of automation of material flow control in silicon production. *Computing, Telecommunications and Control*, 2020, Vol. 13, No. 4, Pp. 66–77. DOI: 10.18721/JCSTCS.13406
22. **Ragulina R.I., Emlin B.I.** *Elektrotermiya kremniya i silumina [Electrothermization of silicon and silumin]*. Moscow: Metallurgy Publ., 1972. 239 p. (rus)
23. **Leonova M.S., Timofeeva S.S.** Environmental and economic damage from the dust waste formation in the silicon production. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2019, 229:012022. DOI: 10.1088/1755-1315/229/1/012022
24. **Leonova M.S., Timofeeva S.S., Murzin M.A.** Dust load in silicon production and occupational risks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 687(6):066012. DOI: 10.1088/1757-899X/687/6/066012
25. **Leonova M.S., Timofeeva S.S.** Impact of dust emissions from the silicon production on working conditions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 408(1):012026. DOI: 10.1088/1755-1315/408/1/012026
26. **Beloglazov I.I., Morenov V.A., Leusheva E.L.** Flow modeling of high-viscosity fluids in pipeline infrastructure of oil and gas enterprises. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2021, Vol. 11, Pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.ejpe.2021.11.001
27. **Kartanova A.Dzh., Sulejmanova S.M.** Komp'yuternoe modelirovanie techeniya szhimaemogo gaza v sople [Computer simulation of compressible gas flow in a nozzle]. *Sovremennye problemy mekhaniki*, 2019, Vol. 36(2), Pp. 31–39. (rus)
28. **Tânia S., Ferreira C., Arts T., Croner E.** On the influence of high turbulence on the convective heat flux on the high-pressure turbine vane LS89. *Int. J. Turbomach. Propuls. Power*, 2019, Vol. 4 (4), 19 p. DOI: 10.3390/ijtpp4040037
29. **Kühnen J., Song B., Scarselli D., Budanur N.B., Riedl M., Willis A., Avila M., Hof B.** Destabilizing turbulence in pipe flow. *Nature Physics*, 2018, Vol. 14, Pp. 386–390. DOI: 10.1038/s41567-017-0018-3
30. **Melnikova T.V., Preobrazhenskij A.P., L'vovich Ya.I.** Modelirovanie i optimizaciya processov turbulentnosti [Modelling and optimisation of turbulence processes]. *International Conf. on Nanomaterials and Technology*, 2019, Pp. 1–4. (rus)
31. **Duraisamy K., Iaccarino G., Xiao H.** Turbulence modeling in the age of data. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2019, Vol. 51. Pp. 357–377. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010518-040547
32. **Ugolnikov A.V., Makarov N.V.** Application of systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation. *Journal of Mining Institute*, 2019, Vol. 236, Pp. 245–248. (rus)
33. **Litvinenko V., Molodtsov K.V.** The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*, 2020, Vol. 1, Pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07
34. **Nedosekin A.O., Rejshahrit E.I., Kozlovskij A.N.** Strategic approach to assessing economic sustainability objects of mineral resources sector of Russia. *Journal of Mining Institute*, 2019, Vol. 237, Pp. 354–360. (rus). DOI: 10.31897/pmi.2019.3.354
35. **Litvinenko V.** Digital economy as a factor in the technological development of the mineral sector. *Natural Resources Research*, 2019, Vol. 29 (1). DOI: 10.1007/s11053-019-09568-4

INFORMATION ABOUT AUTHORS / СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бажин Владимир Юрьевич
Vladimir Yu. Bazhin
E-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

Масько Ольга Николаевна
Olga N. Masko
E-mail: olgamasko.17@gmail.com

Поступила: 04.04.2022; Одобрена: 23.05.2022; Принята: 30.05.2022.

Submitted: 04.04.2022; Approved: 23.05.2022; Accepted: 30.05.2022.