

Современные приборы АО «СоюзЦМА» для контроля аэрозолей и фиксации разливов агрессивных сред

УДК [681.5.08+004.896]:331.453



Е. А. Оксенгойт,
заведующий лабораторией¹,
канд. техн. наук,
эл. почта: Okseng37@mail.ru



Н. А. Куницкий,
инженер¹,
эл. почта:
Kunickiy00@mail.ru



П. А. Петров,
декан факультета переработки
минерального сырья²,
канд. техн. наук,
эл. почта:
Petrov_PA3@pers.spmi.ru



А. К. Шестаков,
аспирант кафедры автоматизации
технологических процессов
и производств²,
эл. почта: s195017@stud.spmi.ru

¹ АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.», Москва, Россия

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Приведены данные о новых, не имеющих аналогов разработках АО «СоюзЦМА». Представлено описание приборов, предназначенных для определения концентрации аэрозолей серной кислоты и гидроксида натрия в воздухе рабочей зоны промышленных предприятий.

Отражена ситуация, вызванная необходимостью разработки эталонного генератора для проведения испытаний. Приведены описания и особенности разработанных и включенных в Госреестр генератора ГРАНТ-А и сигнализатора ГРАНТ-КЩ.

Показана важность решения проблемы контроля потенциальных ситуаций, связанных с разливом серной кислоты. Был создан сигнализатор разлива серной кислоты САКС-1. Действие прибора основано на измерении тока, протекающего через чувствительный элемент, или потенциала, возникающего на его электроде. Сигнализатор САКС-1 состоит из блока управления и преобразователей с электрохимическими датчиками, помещенными в специальные адаптеры. Число преобразователей зависит от количества потенциальных точек утечки и составляет от 1 до 8. Прибор включен в Госреестр РФ и его поставляют на многие предприятия.

Ключевые слова: сигнализатор, генератор, концентрация, аэрозоль, серная кислота, гидроксид натрия, выбросы предприятий, аварийный сигнал.

DOI: 10.17580/tsm.2023.04.08

Введение

Газоанализаторы для определения концентрации водорода, аммиака, кислорода, хлористого и фтористого водорода, оксидов азота, углерода и серы нашли широкое применение в промышленности [1]. Измерение в них проводится с помощью электрохимических сенсоров, в которых определяемая субстанция вредных выбросов находится в виде пара. Кроме пара в выбросах многих химических производств содержатся аэрозоли разных веществ. В статье приведено расширенное описание их влияния на окружающую среду, а также технические средства, предназначенные для обнаружения аэрозолей, выделяющихся при проведении разных химико-металлургических процессов, и измерения их концентрации. Рассмотрено различие между физическим состоянием пара и аэрозоля.

Пар — это газообразное состояние вещества в условиях, когда газовая среда может находиться в равновесии с жидкой или твердой фазой вещества. Аэрозоли — системы, состоящие из дисперсионной среды и твердой или жидкой дисперсной фазы, либо это взвесь твердых или жидких частичек в газах [2, 3].

Определение концентрации аэрозолей серной кислоты (H_2SO_4) и едкой щелочи ($NaOH$) в выбросах

предприятий имеет важное значение. Серная кислота — мощный окислитель [4–6]. Ее используют в разных промышленных отраслях: при изготовлении удобрений, солей и кислот, красителей, в металлургической и нефтяной отраслях, в пищевой промышленности, в научных исследованиях. В сернокислотном производстве перерабатывают также сероводород H_2S , оксиды серы SO_2 , SO_3 . Эти вещества отрицательно сказываются на здоровье людей, губительно действуют на растения, разрушают постройки [7, 8].

Щелочи находят широкое применение во многих отраслях: в качестве электролитов, для производства удобрений, в медицине, химических, косметических производствах, в рыбоводстве для стерилизации прудов, для омыления жиров, для изготовления масел в процессе нефтепереработки, в качестве катализатора и реактива в химических реакциях [9].

Едкие щелочи обладают свойством разъедать кожу, оставляя сильные ожоги. Водные оксиды щелочных металлов проникают глубоко в ткани, вызывая обширные поражения. Щелочи разъедают слизистые оболочки рта, пищевода и желудка, при попадании в глаза могут вызвать слепоту.

Ввиду вредного и опасного воздействия серной кислоты и щелочей на здоровье людей и окружающую среду важное значение приобретают определение их концентрации в воздухе рабочей зоны и принятие мер для защиты людей, окружающей среды и оборудования [10, 11]. Для воздуха рабочей зоны ПДК серной кислоты равна 1 мг/м^3 , ПДК гидроксида натрия — $0,5 \text{ мг/м}^3$.

Описание и характеристики приборов

В АО «Союзцветметавтоматика им. Топчаева В. П.» (АО «СоюзЦМА») разрабатывают и изготавливают газоаналитическую аппаратуру для исследования воздуха рабочей зоны. Создание отечественных приборов и систем автоматизированного контроля качества воздуха рабочей зоны соответствует обозначенным проблемам минерально-сырьевого комплекса [12]. Задача контроля отходящих газов [13], в том числе выбросов аэрозолей серной кислоты и гидроксида натрия, актуальна для многих предприятий по производству химической [14] и металлургической продукции [15, 16], включая заводы по производству первичного алюминия [17–19]. Ранее определяли концентрацию аэрозолей по сложным и трудоемким методикам отбора, подготовки и обработки проб. В АО «СоюзЦМА» был создан сигнализатор ГРАНТ-КЩ [20]. Реализованная в нем задача определения концентрации аэрозолей решена путем автоматического отбора пробы аэрозоля, подачи ее в прибор, преобразования в жидкую форму, измерения концен-

трации и выдачи аварийных сигналов [21]. Блок-схема сигнализатора ГРАНТ-КЩ представлена на **рис. 1**.

Измерительный блок служит для формирования сигнала, пропорционального концентрации аэрозоля отобранной пробы. В ячейку с установленным электродом подается дистиллированная вода. Аэрозоль растворяется в дистиллированной воде. С помощью блока управления сигнал электрода преобразуется в напряжение, передаваемое в блок согласования и далее — в управляющее устройство. Полный цикл работы сигнализатора составляет 13 мин. При концентрации аэрозоля в отобранной пробе более 2ПДК формируется первый аварийный сигнал, однако цикл работы сигнализатора продолжается. После завершения отбора пробы раствор в измерительной ячейке отстаивается в течение 60 с. На табло управляющего устройства высвечивается концентрация аэрозоля в отобранной пробе и выдаются соответствующие ей аварийные сигналы (звуковой, световой и релейный). В начале нового цикла отбора пробы проводится промывка ячейки и электрода, заливается измерительная порция дистиллированной воды и цикл с отбором пробы продолжается. Напряжение, пропорциональное концентрации аэрозоля в отобранной пробе, высвечивается на табло управляющего устройства, и выдается сформированный аварийный сигнал.

При необходимости информацию об измеренных значениях концентрации аэрозоля можно передавать на центральный компьютер фирмы, где работает этот сигнализатор.

Сигнализатор ГРАНТ-КЩ можно применять также для контроля содержания аэрозолей щелочи в воздухе рабочей зоны. При этом его конструкция и схемотехника аналогичны приведенным выше. Различие заключается только в градуировке.

Выполнен расчет показателей надежности сигнализатора [22]. Результаты расчета были использованы в целях оптимизации конструкции некоторых узлов и уменьшения их стоимости.

Для проведения испытаний на утверждение типа средства измерений сигнализатора ГРАНТ-КЩ был разработан эталонный прибор — формирователь аэрозолей ГРАНТ-А. Созданный АО «СоюзЦМА» генератор ГРАНТ-А представлен на **рис. 2**.

Он состоит из двух устройств: источника формирования аэрозолей ИФА-1 и блока управления БУ-7. Принцип работы генератора следующий. В ИФА-1 заливают раствор расчетной концентрации (серная кислота или щелочь в зависимости от назначения). С помощью генератора формируется соответствующий аэрозоль, который с определенным постоянным расходом выходит из ИФА-1. Подготовленная концентрация аэрозоля зависит от концентрации реагента, залитого в ИФА-1 (серная кислота или гидроксид натрия), и положения переключателя в блоке БУ-7. Аэрозоль в генераторе образуется путем диспергирования жидкости (серная кислота или гидроксид натрия).

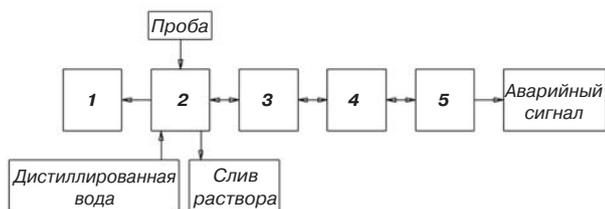


Рис. 1. Блок-схема сигнализатора ГРАНТ-КЩ:
1 — блок компрессора; 2 — блок измерения; 3 — блок управления; 4 — блок согласования; 5 — управляющее устройство

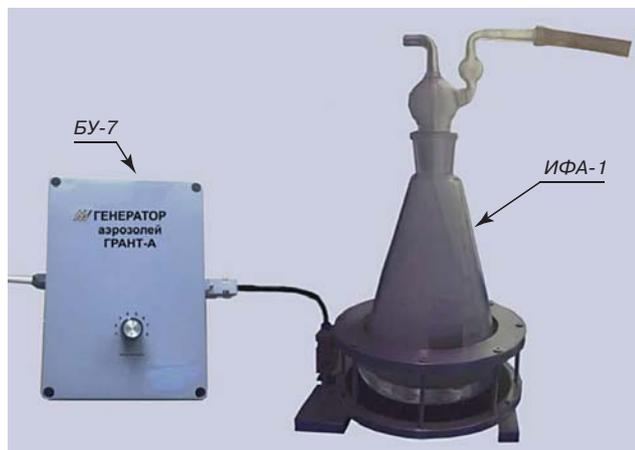


Рис. 2. Генератор аэрозолей ГРАНТ-А

При этом обеспечивается стабильность концентрации частиц аэрозоля и его дисперсность. Средний размер частиц аэрозоля равен 3,3 мкм. Он определяется по формуле Ланга [23]:

$$D_{\text{ср}} = 0,34 \cdot \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma}{\rho f^2}}, \text{ м}, \quad (1)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; ρ — плотность раствора, кг/м³; f — частота колебаний, кГц.

Конструкция устройства формирования аэрозолей обеспечивает относительно небольшой разброс размеров частиц аэрозоля.

Требуемый диапазон концентраций аэрозоля может быть установлен в пределах от 0,5 до 10 ПДК рабочей зоны (от 1 до 10 мг/м³ для серной кислоты и от 0,5 до 10 мг/м³ для гидроксида натрия). Определение величины осуществляют при помощи разработанной в АО «СоюзЦМА» и утвержденной ВНИИМ им. Д. И. Менделеева методики измерений массовой концентрации аэрозолей серной кислоты и гидроксида натрия титриметрическим методом МИ МКА-02-2020 (свидетельство № 2053/242-RA.RU.310494-2020). Относительная погрешность измерения при этом не превышает 2 %.

Серная кислота имеет агрессивные, вредные для здоровья персонала и окружающей среды свойства, поэтому важное значение имеет максимально быстрое получение индикации в случае ее аварийного разлива. В АО «СоюзЦМА» создан сигнализатор разлива серной кислоты САКС-1 [24], его схема представлена на **рис. 3**.

Сигнализатор САКС-1 предназначен для сигнализации утечек серной кислоты при производстве химических реагентов, на складах хранения, при выполнении погрузочно-разгрузочных работ, связанных с кислотой. Использование этого устройства позволяет избежать потерь, обусловленных разливом больших масс серной кислоты, а также травм обслуживающего персонала.

При проливе кислоты формируется электрический сигнал, передаваемый на чувствительный элемент преобразователя. Диапазон концентраций, в котором работает сигнализатор, составляет от 55 до 100 %.

Полезный сигнал формируется также в присутствии олеума. Действие прибора основано на измерении тока, протекающего через чувствительный элемент, или потенциала, возникающего на электроде. Сигнализатор состоит из блока управления и преобразователей с электрохимическими датчиками, помещенными в специальные адаптеры. Число преобразователей определяется количеством потенциальных точек утечки и составляет от 1 до 8. Сигналы от преобразователей могут передаваться при расстоянии их от блока управления до 1000 м. Сигнализатор поставляют на многие предприятия, в том числе АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания», ПАО «Территориальная генерирующая компания № 2», АО «Лыткаринский завод оптического стекла», МХП «Йошкар-Олинская ТЭЦ-1», АО «Тихвинский вагоностроительный завод», МП «Тепло-

центральный», ОАО «Алтай-кокс», ОАО «Марийский целлюлозно-бумажный комбинат» и другие. Аналоги рассмотренных приборов отсутствуют. Указанные устройства включены в Госреестр РФ (генератор ГРАНТ-А — № 82815-21; сигнализатор ГРАНТ-КЩ — № 87125-22; САКС-1 — № 75749-10).

Следует отметить, что в связи с отсутствием аналогов сигнализатора САКС-1 в нормативных документах Ростехнадзора отсутствуют требования к характеристикам приборов, предназначенных для фиксации разлива агрессивных жидкостей. Поэтому требование Ростехнадзора об измерении ПДК серной кислоты при ее разливе представляется необоснованным.

Одним из возможных промышленных объектов, на которых рационально использование сигнализатора аэрозолей серной кислоты и едкой щелочи ГРАНТ-КЩ является завод по производству первичного алюминия, так как в процессе производства глинозема проводят выщелачивание бокситов.

Использование сигнализатора аэрозолей серной кислоты и едкой щелочи ГРАНТ-КЩ в совокупности с разработанной на кафедре автоматизации технологических процессов и производств в Санкт-Петербургском горном университете автоматической системой обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода повысит контроль качества воздуха в рабочих зонах предприятия.

Системы технического зрения [25] и нейронные сети [26, 27] успешно применяют на отечественных металлургических предприятиях [28–30] для измерения параметров [31–33], контроля технологических операций [34, 35], в средствах управления для повышения качества итоговой продукции [36–38].

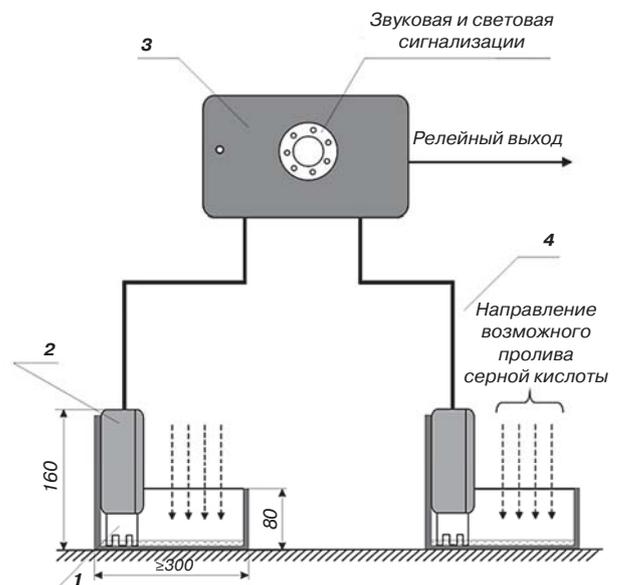


Рис. 3. Схема расположения сигнализатора разлива серной кислоты САКС-1:

1 — адаптер с датчиком; 2 — преобразователь; 3 — блок управления; 4 — кабель сечением 1,5 мм², длина ≤150 м. Источник: официальный сайт АО «СоюзЦМА». <http://www.scm.ru/ru/products/1-11.html>

Несмотря на использование на предприятиях электролизеров с боковыми створчатыми укрытиями и систем сухой газоочистки, которые создают разряжение внутри аппарата, в атмосферу цеха поступают опасные загрязняющие вещества: твердые фториды, перфторуглероды, смолистые вещества, плавиковая кислота [17, 19, 28]. Если на заводе отсутствует этап фильтрации, то при разгерметизации электролизера (в случае планового обслуживания, нарушения работы системы сухой газоочистки, сплошности (целостности) криолитоглиноземной корки [29]), возникновении анодного эффекта значительно увеличивается поступление опасных веществ в атмосферу. Для оперативного обнаружения аварийных ситуаций такого рода была разработана автоматическая система обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода.

В разработке использована система технического зрения и сверточная пирамидальная нейронная сеть `ssd_resnet50_v1_fpn_640x640_coco17_tpu-8` [39–41]. Для обучения последней использовали программную библиотеку TensorFlow (применяют в задачах, требующих автоматического нахождения и классификации образов) для языка программирования Python [42]. При обучении нейронной сети использовали 1000 фотографий (80 % для обучения, 20 % для тестирования) масштабной модели электролизера с разными вариациями внешних условий (освещенность, концентрация дыма, размер загрязняющего облака) [43–45]. Точность обученной нейронной сети по классификации составила 96 %, по локализации — 98,7 %, общая точность — 94,752 %.

Разработанная система технического зрения обладает преимуществом перед традиционными средствами обнаружения выбросов с использованием датчиков из-за большой площади электролизных цехов (возможно неравномерное распространение загрязняющего облака, поэтому потребуется установка большого числа датчиков возле каждого электролизера). Использование камеры с углом обзора 120° позволяет захватывать изображение пяти электролизеров одновременно. Для автономной работы нейронной сети использован одноплатный компьютер NVIDIA Jetson Nano с 4 Гб видеопамяти. Для повышения надежности, отказоустойчивости и возможности резервирования устройств разработана и применена распределенная архитектура сети.

Однако в ситуациях, когда выделение загрязняющих веществ не сопровождается видимым облаком, а также для количественного их определения невозможно обойтись без датчиков и сигнализаторов аэрозолей.

Таким образом, оптимальным решением для повышения уровня контроля ПДК и снижения выбросов вредных веществ в воздух рабочей зоны алюминиевого завода является комбинированное использование системы технического зрения на основе нейронной сети и сигнализатора аэрозолей кислоты и щелочи ГРАНТ-КЩ.

Информация о разработке АО «СоюзЦМА» нового класса приборов изложена в докладах на международных конференциях «Сера и серная кислота» в 2017 и 2022 г. Достижения компании и Санкт-Петербургского горного университета были представлены на V Международном семинаре «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогательном производстве, металлургии и экологии» (Москва) [46].

Заключение

При выделении аэрозолей и разливе кислот и щелочей на предприятиях они оказывают вредное влияние на здоровье персонала и окружающую среду. В АО «СоюзЦМА» и Санкт-Петербургском горном университете проводят научно-исследовательские работы, направленные на создание эталонных приборов для получения аэрозолей кислот и щелочей, сигнализаторов для формирования аварийных сигналов, а также разработку автоматической системы обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе алюминиевого завода на основе технического зрения и нейронной сети.

Компания АО «СоюзЦМА» продолжает пополнять линейку газоаналитической аппаратуры новыми устройствами для создания систем автоматического мониторинга качества воздуха на предприятиях цветной металлургии, а тесная кооперация с предприятиями позволяет дорабатывать и улучшать существующие приборы и решения. Полная линейка выпускаемой продукции представлена на официальном сайте компании [47].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

См. англ. блок

ЦМ

Tsvetnye Metally. 2023. No. 4. pp. 61–65
DOI: 10.17580/tsm.2023.04.08

MODERN EQUIPMENT BY SOYUZTSVETMETAVTOMATIKA FOR DETECTING AEROSOLS AND SPILLS OF HARMFUL POLLUTANTS

Information about authors

E. A. Oksengoyt, Head of Laboratory¹, Candidate of Technical Sciences, e-mail: Okseng37@mail.ru
N. A. Kunitskiy, Engineer¹, e-mail: Kunickiy00@mail.ru
P. A. Petrov, Dean of the Minerals Processing Faculty², Candidate of Technical Sciences, e-mail: Petrov_PA3@pers.spmi.ru
A. K. Shestakov, Postgraduate Student at the Department of Process and Plant Automation², e-mail: s195017@stud.spmi.ru

¹ Soyuztsvetmetavtomatika JSC, Moscow, Russia.

² Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.

Abstract

This paper describes new, unparalleled developments by Soyuztsvetmetavtomatika JSC, and namely new devices designed to determine the concentration of sulphuric acid and sodium hydroxide aerosols in the air of industrial sites.

A situation is described related to the need to develop a reference generator for conducting tests. The paper contains descriptions of the developed GRANT-A generator and GRANT-KShch detector, which were included in the State Register.

The authors point out the importance of keeping under control potential situations related to sulphuric acid spills. For this, a sulphuric acid spill detector SAKS-1 has been developed. This device measures the magnitude of the current flowing through the sensitive element, or the electrode potential.



The SAKS-1 device comprises a control unit and transducers with electrochemical sensors placed in special adapters. The number of transducers corresponds to the number of potential leakage points and can range from 1 to 8. The device is included in the State Register of the Russian Federation and is supplied to many production sites.

Key words: detector, generator, concentration, aerosol, sulphuric acid, sodium hydroxide, industrial emissions, alarm.

References

- Oksengoyt E. A., Borisov B. N., Fokina E. Yu. Multifunctional Grant series gas detector for monitoring the workspace air. *Tsvetnye Metally*. 2005. No. 10. Special issue. pp. 28–30.
- Prishchepov F. A. Detecting aerosols of caustic alkali: Candidate of Technical Sciences dissertation. Ufa State Petroleum University, Ufa, 2019.
- Atmospheric pollution monitoring: A 2018 progress review. Central Geophysical Observatory. St Petersburg, 2019.
- Johnson J., Coty N., Jen. A sulfuric acid nucleation potential model for the atmosphere. 2022, Jan. DOI: 10.5194/acp-2022-35.
- Bersenev S. A., Gryazin V. I. Physics of atmospheric aerosols. Lecture course. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2008. 228 p.
- Sulphuric acid chemist's handbook. Ed. by K. M. Malin. 2nd edition. Moscow, 1971. 744 p.
- Vasiliev B. T., Otvagina M. I. Sulphuric acid technology. Moscow, 1985. 384 p.
- Guidelines on measuring the concentration of hazardous substances in the workspace air. Moscow, 1994.
- Sulfuric acid. The Essential Chemical Industry. Available at: <https://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/sulfur.html> (Accessed: 16.02.2023).
- Williams M. M., Loyalka S. K. Aerosol science: theory and practice. Oxford: Pergamon press, 1991. 463 p.
- Sheldon K., Friedlander. Smoke, dust and haze. Fundamentals of aerosol dynamics. New York, Oxford, 2000. 431 p.
- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V. et al. Analyzing the role of the state in the mineral resources management. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Bazhin V., Masko O. Monitoring of the behaviour and state of nanoscale particles in a gas cleaning system of an ore-thermal furnace. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/SYM14050923.
- Dubovikov O. A., Beloglazov I. I., Alekseev A. A. Specific features of the use of pulverized coal fuel in combined chemical processing. *Obogashchenie Rud*. 2022. No. 6. pp. 32–38. DOI: 10.17580/or.2022.06.06.
- Milla Gravalos E. Introduction to physics of aerosols. 2nd ed. Madrid: Edition personal, 2003.
- Pshenin V., Liagova A., Razin A., Skorobogatov A. et al. Robot crawler for surveying pipelines and metal structures of complex spatial configuration. *Infrastructures*. 2022. Vol. 7. p. 75. DOI: 10.3390/infrastructures7060075.
- RUSAL Sustainability Report 2020. Available at: <https://rusal.ru/sustainability/report/> (Accessed: 14.12.2022).
- Best available techniques (BAT) reference document for the non-ferrous metals industries. Aluminium production in Russian Federation (2019). Available at: <http://burondt.ru/index/its-ndt.html> [Accessed: 04.04.2022]
- The program for improving the environmental efficiency of the Branch Office ff PJSC RUSAL Bratsk in Shelekhov (2019). Available at: https://minpromorg.gov.ru/common/upload/docVersions/5defb7bf31ef/actual/ppa_11_compressed.pdf (Accessed: 04.04.2022).
- Oksengoyt E. A., Borisov B. N., Fokina E. Yu., Shipatov V. T. New devices for air emissions control in the working area of enterprises and their standards for settings and checking. *Tsvetnye Metally*. 2015. No. 9. pp. 42–47. DOI: 10.17580/tsm.2015.09.06.
- Oksengoyt-Gruzman E. A., Fokina E. Yu., Borisov B. N., Fokin M. Yu. Soyuzsvetmetavtomatika safeguarding the environment. *Tsvetnye Metally*. 2021. No. 3. pp. 22–27.
- Borovikov S. M., Tsyrelchuk I. N., Troyan F. D. Reliability calculation for radioelectronic devices. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2010. 68 p.
- Kalinchak V. V., Kontush S. M., Chernenko A. S., Shchekatolina S. A. Applied physics of aerosols: Learner's guide. Odessa: Odesskiy natsionalnyi universitet im. Mechnikova, 2015. 130 p.
- Oksengoyt-Gruzman E. A., Soloviev Yu. F., Borisov B. N., Shipatov V. T. Sulphuric acid detector. Patent RF, No. 75749. Applied: 29.02.2008. Published: 20.08.2008.
- Kashin D. A., Kulchitskiy A. A. Image-based quality monitoring of metallurgical briquettes. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 9. pp. 92–98. DOI: 10.17580/tsm.2022.09.13.
- Zakharov L., Martyshev D., Ponomareva I. N. Predicting dynamic formation pressure using artificial intelligence methods. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 23–32. DOI: 10.31897/PMI.2022.11.
- Boikov A., Payor V., Savelev R., Kolesnikov A. Synthetic data generation for steel defect detection and classification using deep learning. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. DOI: 10.3390/sym13071176.
- Mann V., Buzunov V., Pingin V., Zherdev A. et al. Environmental Aspects of UC RUSAL's Aluminum Smelters Sustainable Development. *Light Metals*. 2019. pp. 553–563. DOI: 10.1007/978-3-030-05864-7_70.
- Zherdev A., Svoevskiy A., Pingin V., Shakhmatov V. et al. Environmental enhancement of potroom processes by using a machine vision system. *Light Metals*. 2022. pp. 979–984. DOI: 10.1007/978-3-030-92529-1_127.
- Non-destructive testing systems: How they help produce on continuous production lines. Available at: <https://habr.com/ru/company/severstal/blog/567516/> (Accessed: 15.01.2023).
- Vasilyeva N. V., Boikov A. V., Erokhina O. O., Trifonov A. Y. Automated digitization of radial charts. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 82–87. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.9.
- Vasilyeva N., Fedorova E., Kolesnikov A. Big data as a tool for building a predictive model of mill roll wear. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. DOI: 10.3390/sym13050859.
- Fedorova E., Pupysheva E., Morgunov V. Modelling of red-mud particle-solid distribution in the feeder cup of a thickener using the combined CFD-DPM Approach. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/sym14112314.
- Cabascango V. E. Q., Bazhin V. Y., Martynov S. A., Pardo F. R. O. Automatic control system for thermal state of reverberatory furnaces in production of nickel alloys. *Metallurgist*. 2022. Vol. 66. pp. 104–116. DOI: 10.1007/S11015-022-01304-3.
- Awrejcewicz J., Oikonomou V. K., Boikov A., Payor V. The present issues of control automation for levitation metal melting. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. DOI: 10.3390/sym14101968.
- Martynov S. A., Masko O. N., Fedorov S. N. Innovative ore-thermal furnace control systems. *Tsvetnye Metally*. 2022. No. 4. pp. 87–94. DOI: 10.17580/TSM.2022.04.11.
- Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M. Yu. Modeling the disintegration process for ball mills using DEM. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022. No. 6–2. pp. 268–282. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.
- Nguyen H. H., Bazhin V. Y. Optimization of control system for electrolytic copper refining with digital twin during dendritic precipitation. *Metallurg*. 2023. No. 1. pp. 49–56. DOI: 10.52351/00260827_2023_01_49.
- Chen L. C. et al. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. IEEE Computer Society*. 2018. Vol. 40, No. 4. pp. 834–848. DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2699184.
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2017. Vol. 60, No. 6. pp. 84–90. DOI: 10.1145/3065386.
- He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2016. pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90.
- Paszke A., Gross S., Massa F., Lerer A. et al. PyTorch: An imperative style, high-performance deep learning library. *33 Conference on Neural Information Processing Systems*. Vancouver. 2019.
- Chen C., Chen Q., Xu J., Koltun V. Learning to see in the dark. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. pp. 3291–3300. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00347.
- Zhao S., Xie Y., Yue W., Chen X. A machine learning method for state identification of superheat degree with flame Interference. *10th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. 2019. pp. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-030-05955-2_19.
- Töreyn B. U., Çetin A. E. Online detection of fire in video. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2007. DOI: 10.1109/CVPR.2007.383442.
- New automation means and systems in mining, metallurgical and environment sectors: *Proceedings of the 5th international conference*. Moscow, October 2022. Available at: <http://www.scma.ru/ru/products/Material%20seminar.pdf> (Accessed: 20.11.2022).
- Soyuzsvetmetavtomatika. Available at: <http://www.scma.ru/ru/products/index.html> (Accessed: 01.03.2023).