

EDN: <https://elibrary.ru/fhqvra>DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458>

УДК 669.71:66-911.38:614.7

© Коллектив авторов, 2022

Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В.

Характеристика образующихся аэрозольных взвесей — комплексов при традиционной и модернизированной технологиях электролиза алюминия

ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 12а микрорайон, 3, Ангарск, 665826

Введение. Оценка профессионального риска и механизмов нарушения здоровья работников в связи с воздействием сложных аэрозольных взвесей определяет необходимость углубленного изучения физико-химических свойств пылевых частиц в воздухе.

Цель исследования — комплексная оценка дисперсного и химического состава сложных аэрозольных взвесей, воздействующих на работников при традиционной и модернизированной технологиях получения алюминия.

Материалы и методы. Выполнен мониторинг загрязнения воздуха рабочей зоны растворимыми и нерастворимыми фторидами, аэрозолями триоксида алюминия с применением стандартных методов анализа, изучен дисперсный и химический состав аэрозольных взвесей с помощью сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа.

Результаты. Наибольшая среднесменная концентрация фторидов, превышающая ПДК в 4,7–12,5 раз, наблюдалась в рабочей зоне профессий, обслуживающих электролизеры и аноды, с преобладанием содержания нерастворимых фторидов над растворимыми. Отмечены случаи превышения ПДК триоксида алюминия в 1,9–2,6 раза. Взвешенная в воздухе рабочей зоны пыль состояла из высоко- и ультрадисперсных аэрозольных смесей различной химической природы, включающих частицы наноразмерного диапазона, примеси тяжелых металлов и токсических соединений. В воздухе цехов с традиционной технологией электролиза алюминия доминировали высокодисперсные частицы пыли, преимущественно глинозема и фторуглеродных соединений, при модернизированной — микро- и наночастицы, состоящие, в основном, из криолита и смеси фторида алюминия с глиноземом.

Заключение. Воздействие сложных многокомпонентных аэрозольных микстов алюминиевого производства может представлять опасность для здоровья работников, что требует углубленного анализа химического и дисперсного состава аэрозолей при оценке экспозиции пылевого фактора и усовершенствовании комплексов профилактических мероприятий по предупреждению развития заболеваний.

Ключевые слова: производство алюминия; воздух рабочей зоны; аэрозольные взвеси

Для цитирования: Шаяхметов С.Ф., Рукавишников В.С., Лисецкая Л.Г., Меринов А.В. Характеристика образующихся аэрозольных взвесей — комплексов при традиционной и модернизированной технологиях электролиза алюминия. *Мед. труда и пром. экол.* 2022; 62(7): 452–458. <https://elibrary.ru/fhqvra> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458>

Для корреспонденции: Шаяхметов Салим Файзыевич, вед. науч. сотр. Восточно-Сибирского института медико-экологических исследований, д-р мед. наук, профессор. E-mail: salimf53@mail.ru

Участие авторов:

Шаяхметов С.Ф. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование;

Рукавишников В.С. — концепция и дизайн исследования, редактирование;

Лисецкая Л.Г. — сбор и обработка данных, написание текста;

Меринов А.В. — сбор и обработка данных, написание текста.

Финансирование. Работа выполнена в рамках средств, выделяемых для выполнения государственного задания ФГБНУ ВСИМЭИ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 02.07.2022 / Дата принятия к печати: 03.08.2022 / Дата публикации: 15.08.2022

Salim F. Shayakhmetov, Victor S. Rukavishnikov, Lyudmila G. Lisetskaya, Alexey V. Merinov

Characteristics of generated aerosol suspensions-complexes at traditional and modernized aluminum electrolysis technologies

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, 3, 12a microdistrict, Angarsk, 665826

Introduction. Assessment of occupational risk and mechanisms of workers' health disorders due to exposure to complex aerosol suspensions determines the need for in-depth study of the physicochemical properties of dust particles in the air.

The study aim was the assessment of the dispersion and chemical composition of complex aerosol suspensions affecting workers in traditional and modernized aluminum production technologies.

Materials and methods. The monitoring of air pollution of the working area with soluble and insoluble fluorides, aluminum trioxide aerosols was carried out using standard analysis methods, the dispersed and chemical composition of aerosol suspensions was studied using scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray microanalysis.

Results. The highest average shift concentration of fluorides, exceeding the occupational exposure limit by 4.7–12.5 times, are observed in the working area of professions serving electrolyzers and anodes, with a predominance of insoluble fluorides over soluble ones. Cases of exceeding the occupational exposure limit of aluminum trioxide by 1.9–2.6 times were noted. Dust suspended in the air of the working area consists of highly and ultradispersed aerosol mixtures of various chemical nature, including particles of the nanoscale range, impurities of heavy metals and toxic compounds. Highly dispersed dust particles, mainly alumina and fluorocarbon compounds, dominated in the air of workshops with traditional aluminum electrolysis technology, while micro- and nanoparticles, consisting mainly of cryolite and a mixture of aluminum fluoride with alumina, dominated in the modernized one.

Conclusion. The exposure of complex multicomponent aerosol mixtures of aluminum production can pose a danger to the health of workers, which requires an in-depth analysis of the chemical and dispersed composition of aerosols when

assessing the exposure of the dust factor and improving the complexes of preventive measures to prevent the development of diseases.

Keywords: *aluminum production; working area air; aerosol suspensions*

For citation: Shayakhmetov S.F., Rukavishnikov V.S., Lisetskaya L.G., Merinov A.V. Characteristics of generated aerosol suspensions-complexes at traditional and modernized aluminum electrolysis technologies. *Med. truda i prom. ecol.* 2022; 62(7): 452–458. <https://elibrary.ru/fhqvra> <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2022-62-7-452-458> (in Russian)

For correspondence: *Salim F. Shayakhmetov*, leading researcher of laboratory of analytical ecotoxicology and biomonitoring of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Dr. of Sci. (Med.), professor. E-mail: salimf53@mail.ru

Information about the authors: Shayakhmetov S.F. <https://orcid.org/0000-0001-8740-3133>

Rukavishnikov V.S. <https://orcid.org/0000-0003-2536-1550>

Lisetskaya L.G. <https://orcid.org/0000-0002-0876-2304>

Merinov A.V. <https://orcid.org/0000-0001-7848-6432>

Contribution:

Shayakhmetov S.F. — the concept and design of the study, writing a text, editing the article;

Rukavishnikov V.S. — the concept and design of the study, editing the article;

Lisetskaya L.G. — collection and processing of material, writing a text;

Merinov A.V. — collection and processing of material, writing a text.

Funding. Financing of the work was carried out at the expense of funds allocated for the state assignment of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Received: 02.07.2022 / Accepted: 03.08.2022 / Published: 15.08.2022

Введение. Производство первичного алюминия относят к категории наиболее вредных и опасных предприятий металлургической промышленности [1]. Преобладающей формой профессиональной патологии у работников алюминиевых заводов являются хронические необструктивный бронхит и обструктивная болезнь легких, астма, риск развития которых во многом определяется физико-химическими свойствами производственных аэрозолей [2–5].

В производстве алюминия одним из основных неблагоприятных факторов, воздействующих на работников, является комплекс вредных химических веществ, загрязняющих воздух рабочей зоны: газообразные и твердые фториды, оксиды металлов, углерода и серы, смолистые вещества, аэрозоли дезинтеграции и конденсации [6–9]. Значительное поступление аэрозолей в воздух рабочей зоны происходит в периоды проведения основных производственных операций: разрушение поверхности корки электролита, уборка пыли с поверхностей электролизеров и др., а также при образовании в воздухе аэрозолей конденсации паров компонентов электролита. По данным ряда авторов, в воздухе электролизных цехов могут идентифицироваться сложные смеси, состоящие из оксида алюминия и криолита, а также агломераты сажи с включением других дополнительных фаз высокодисперсных аэрозолей [8, 10–12].

Для оценки профессионального риска и механизмов нарушения здоровья работников в связи с воздействием сложных аэрозольных взвесей в производстве алюминия важное значение имеет всесторонняя гигиеническая оценка пылевого фактора (в том числе подробная характеристика химического состава и размеров пылевых частиц в воздухе рабочей зоны). Это могло бы дать возможность выявления роли различных типов аэрозольных частиц в формировании профессиональных бронхолегочных заболеваний у работников. В выполненных ранее исследованиях [7, 10–14], внимания к оценке фракционного состава образующихся смесей, а также структуре и элементному составу газопылевых комплексов в их естественном виде при различных технологиях получения алюминия уделялось недостаточно.

Цель исследования — комплексная оценка дисперсного и химического состава сложных аэрозольных взвесей, воздействующих на работников при традиционной и модернизированной технологиях получения алюминия.

Материалы и методы. Исследования проводились на одном из крупнейших алюминиевых заводов в Восточной Сибири, осуществляющем производство первичного алюминия методом Содерберга, путем электролитического разложения глинозема (Al_2O_3), растворенного в расплавленном криолите (Na_3AlF_6) в электролизерах с различными соевыми добавками (NaF , CaF_2 , AlF_3 и др.) при температуре 950–965°C и силе постоянного тока от 140 до 300 КА. На предприятии используются как старые электролизеры малой мощности с традиционной технологией самообжигающихся анодов (ТТСА), так и более мощные с модернизированной технологией с предварительно обожженными анодами (МТОА). В цехах с ТТСА основными рабочими профессиями являются электролизники расплавленных солей, анодники и машинисты штыревых кранов. В цехах с МТОА работают операторы автоматизированного процесса производства алюминия по обслуживанию электролизных ванн (операторы электролизники), по перетяжке анодных рам (операторы-рамщики) и операторы грузоподъемных механизмов (операторы-крановщики).

Гигиеническая оценка содержания пылевого аэрозоля в воздухе электролизных цехов алюминиевого завода проводилась по данным санитарно-промышленной лаборатории и собственных исследований за четырехлетний период. Уровни содержания исследованных веществ оценивали фотометрическими методами^{1,2}. Всего было проанализировано и систематизировано 3948 измерений концентраций растворимых фторидов (NaF), 6061 — нерастворимых фторидов (CaF_2 , AlF_3), 646 — аэрозоля триоксида алюминия (Al_2O_3) в воздухе рабочей зоны в цехах с ТТСА и МТОА.

Для изучения фракционного и компонентного состава аэрозольных взвесей пробы пыли отбирали непосредственно на рабочих местах основных профессий при

¹ МУ 2247-80 Методические указания на фотометрическое определение растворимых и нерастворимых в воде солей фтористоводородной кислоты в воздухе. В кн.: *Методические указания на определение вредных веществ в воздухе. Выпуск XVI*. М.; 1980: 169–76.

² МУ 3110-84 Методические указания по раздельному фотометрическому измерению концентраций магния, алюминия и их оксидов в воздухе рабочей зоны. В кн.: *Методические указания по измерению вредных веществ в воздухе. Выпуск XX*. М.; 1984: 52–60.

выполнении технологических операций на фильтры типа PTFE, представляющие собой мембранные тефлоновые гидрофильные фильтры (Millipore, Германия). Время и условия отбора проб пыли во всех случаях определялись с учетом вида технологических операций, продолжительности их выполнения и уровней запыленности воздуха. Для электролизников это соответствовало пробивке корки, обрубке горнисажей, подтягиванию осадка и гартованию. Технологические операции анодников включали в себя обдувку оборудования, перестановку штырей, загрузку анодной массы. Дальнейшие исследования частиц аэрозоля проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения (3,5 нм) FEI Company Quanta 200 в центре коллективного пользования «Ультрамикроанализ» Иркутского научного центра СО РАН ФГБУН Лимнологического института СО РАН.

Элементный анализ частиц аэрозольных взвесей проводили с использованием системы локального элементного энергодисперсионного рентгеновского микроанализа EDAX. Соотношение элементов вычислялось с помощью программного обеспечения прибора EDAX Genesis методом ZAF. Обработано и исследовано 14 фильтров, проведена оценка размеров 7340 частиц.

Статистическую обработку результатов гигиенических и физико — химических исследований осуществляли с помощью программы Microsoft Excel и Statistika 6.1. Межгрупповые сравнения количественных показателей осуществляли с использованием критерия Стьюдента.

Результаты. Анализ результатов исследований показал, что среднесменные концентрации растворимых фторидов в воздухе рабочей зоны электролизников расплавленных солей, анодников, машинистов штыревых кранов и в проходах между электролизерами в цехах с ТТСА составляли 0,11–0,20 мг/м³ и не превышали ПДК (табл. 1). В то же время в цехах с МТОА превышение ПДК растворимых фторидов в среднем в 1,6–2,0 раз отмечалось на рабочих местах операторов-электролизников и операторов-рамщиков, а также в проходах между электролизерами (0,40±0,02 и 0,31±0,09 мг/м³ соответственно). В кабине операторов грузоподъемных кранов уровни растворимых фторидов соответствовали гигиеническому нормативу.

Содержание нерастворимых фторидов в воздухе рабочей зоны основных профессий и в проходах между электролизерами в цехах с ТТСА и МТОА варьировались от

0,12±0,09 до 0,72±0,05 мг/м³. Наибольшие среднесменные концентрации нерастворимых фторидов, превышающие ПДК в 1,2–1,4 раз, отмечались в воздухе рабочей зоны электролизников в цехах с ТТСА (0,72±0,05 мг/м³), а также операторов электролизников-рамщиков в цехах с МТОА (0,62±0,03 мг/м³). При этом средние уровни содержания нерастворимых фторидов на рабочих местах машинистов штыревых кранов при ТТСА и операторов кранов при МТОА в основном не превышали гигиенический норматив.

В цехах с ТТСА и МТОА концентрация аэрозоля триоксида алюминия в рабочей зоны основных профессий находилась в пределах допустимых значений (2,87±0,17–5,68±1,14 мг/м³). В отдельные периоды смены при выполнении технологических операций, сопровождающихся наибольшим пылевыделением, достигали более высоких уровней, превышающих ПДК в 1,9–2,6 раз.

Сравнительный анализ дисперсного состава пылей, образующихся на рабочих основных групп электролизных цехов показал, что при выполнении различных технологических операций на рабочих местах электролизников и анодников при ТТСА, а также операторов-электролизников и операторов-рамщиков при МТОА преобладали респираторные фракции пылевого микста до 10 мкм — 62,5 и 65,4%, 68,2 и 62,1% соответственно, со средним размером частиц от 3,62 до 4,27 мкм (табл. 2). В данном дисперсном диапазоне наибольшее количество, взвешенных в воздухе частиц пыли на рабочих местах имели размеры 1–3 мкм, доля которых от общего числа частиц составила соответственно при ТТСА 41,9 и 42,7%, при МТОА 43,8 и 31,8%.

В кабине машинистов штыревых кранов при ТТСА и операторов-крановщиков при МТОА доля респираторных частиц пыли с размером до 10 мкм составляла соответственно 95,7 и 91,4% от общего числа частиц, из них 50,1 и 65,3% приходилось на долю фракций до 1 мкм. Следует отметить, что наибольшую долю в дисперсном составе пыли на рабочих местах машинистов кранов составляли частицы размером от 0,5 до 1,0 мкм (34,7%) и 1–3 мкм (34,3%), а операторов-крановщиков — до 0,5 мкм (46,2%), включая частицы с размером 67–100 нм.

Результаты микроскопирования и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа показали, что в полученных образцах пыли обнаруживались единичные и

Таблица 1 / Table 1

Среднесменные концентрации аэрозольных частиц в воздухе рабочей зоны работников электролизных цехов ($M \pm m$, мг/м³)

Average shift concentrations of aerosol particles in the air of the working area of workers of electrolysis shops ($M \pm m$, mg/m³)

Рабочее место	Растворимые фториды, (ПДК _{ср} =0,2)	Нерастворимые фториды, (ПДК _{ср} =0,5)	Триоксид алюминия, (ПДК _{ср} =6,0)
Технология самообжигающихся анодов			
Электролизник	0,18±0,01	0,72±0,05	3,61±0,18
Анодчик	0,20±0,01	0,56±0,08	4,47±0,27
Машинист крана	0,11±0,01	0,41±0,04	5,68±1,14
Проход	0,14±0,01	0,53±0,03	3,20±0,16
Технология предварительно обожженных анодов			
Оператор электролизник-рамщик	0,40±0,024	0,62±0,03	2,87±0,17
Оператор-крановщик	0,049±0,010	0,12±0,09	3,67±2,30
Проход	0,31±0,09	0,48±0,03	Нет данных

Таблица 2 / Table 2

Параметры дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны основных профессиональных групп работников при ТТСА и МТОА (доля, %)

Parameters of the dispersed composition of dust in the air of the working area of the main professional groups of workers at TTSA and MTBA (share, %)

Профессия	До 0,5 мкм	0,5–0,9 мкм	1,0–3,0 мкм	4,0–6,0 мкм	7,0–9,0 мкм	10,0 и более мкм
Технология самообжигающихся анодов						
Электролизник	1,2	7	41,9	12,9	7,6	29,3
Анодник	4,8	11,5	42,7	16,1	6,6	18,3
Машинист крана	15,4	34,7	34,3	9,1	2,2	4,3
Технология предварительно обожженных анодов						
Оператор-электролизник	8,6	12,8	43,8	17,5	6,9	10,4
Оператор-рамщик	5,3	9	31,8	21,2	9	23,6
Оператор-крановщик	46,2	19,1	18	5,8	2,3	8,6

собранные в агломераты частицы аэрозоля дезинтеграции многогранной кристаллической формы и аэрозоля конденсации овальной и округлой формы (рис. 1, 2). Подавляющее число взвешенных в воздухе пылинок представляли собой частицы глинозема (оксид алюминия), криолита, фторуглеродистых соединений, сажи или их смеси.

Как видно из рисунка 2, при ТТСА преобладающей группой частиц были глинозем (36,3%) и фторуглеродные соединения (29,8%), а при МТОА — криолит (29,6%), смесь фторида алюминия и глинозема (19,2%) и фторуглеродные соединения (16,0%). Чаще всего встречались в пробах агломераты криолита с налипшими микрочастицами сажи, с вкраплениями примесей соединений фтора, калия, магния, железа, никеля, хрома, серы и кремния. Агломераты фторуглеродных частиц имели включения микрочастиц компонентов фтора и углерода (сажу), а также примеси соединений натрия, алюминия, железа, магния, никеля, серы. Фторид алюминия чаще находился в смесях

с глиноземом с налипшими частицами сажи с примесью натрия, никеля, железа, кремния и серы.

Обсуждение. Как показали результаты проведенных исследований, количественная и качественная характеристика взвешенной пыли на рабочих местах определяется, в основном, применяемой технологией электролиза алюминия, эффективностью систем газопылеудаления и герметичностью укрытий электролизных ванн, а также физико-химическим составом аэрозолей. Наиболее высокая среднесменная концентрация растворимых и нерастворимых фторидов, превышающая ПДК (соответственно по максимальным среднесменным значениям в 10,0–12,5 и 4,7–5,4 раза) отмечалась на рабочих местах работников, занятых обслуживанием электролизеров в цехах с ТТСА и МТОА. При этом практически на всех рабочих местах и в проходах между электролизерами наблюдалось преобладание содержания нерастворимых фторидов (CaF_2 , AlF_3) над растворимыми (NaF). Отдельные случаи превышения макси-

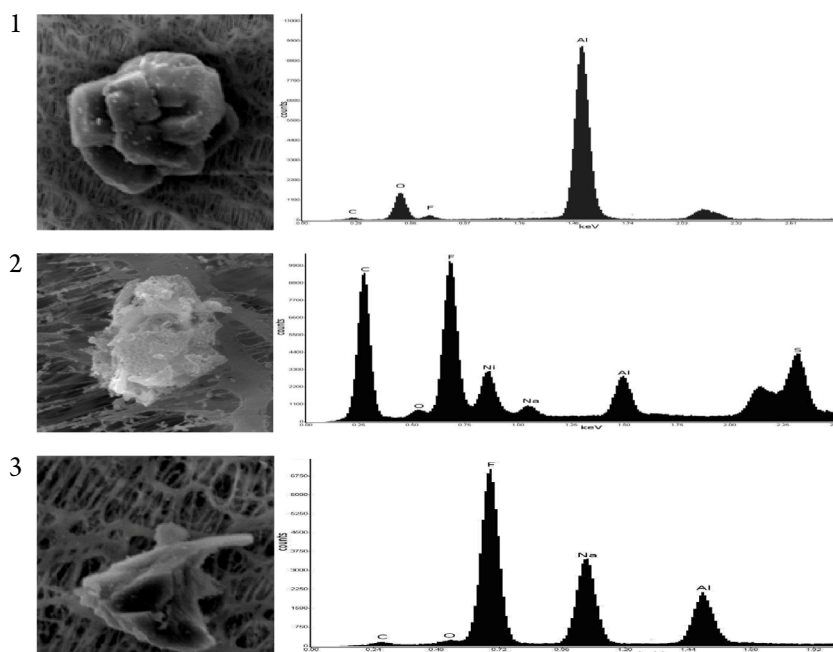


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения и спектры частиц глинозема (1), фторуглеродного соединения (2), криолита (3)

Fig. 1. Electron microscopic images and spectra of particles of alumina (1), a fluorocarbon compound (2), cryolite (3)

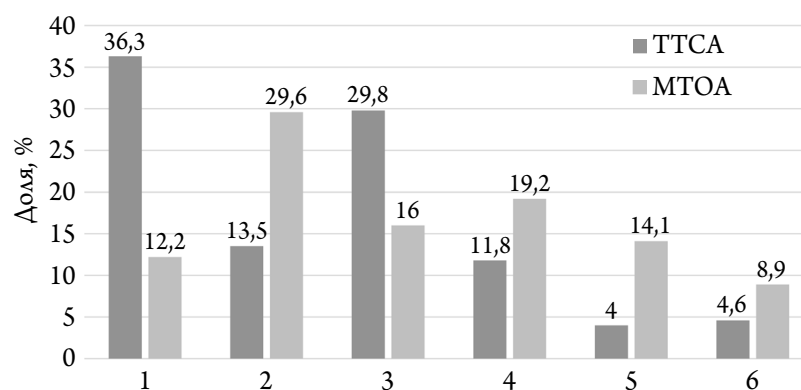


Рис. 2. Доля групп пылевых частиц различного химического состава от всей витающей пыли в воздухе рабочей зоны при TTCA и MTOA.

Fig. 2. The proportion of groups of dust particles of different chemical composition from all the dust floating in the air of the working area during TTCA and MTOA

Примечания: 1 — оксид алюминия (глинозем); 2 — криолит; 3 — фторуглеродные соединения; 4 — смесь фторида алюминия и глинозема; 5 — смесь оксида алюминия и криолита; 6 — частицы других смесей и соединений.

Notes: 1 — aluminum oxide (alumina); 2 — cryolite; 3 — fluorocarbon compounds; 4 — a mixture of aluminum fluoride and alumina; 5 — a mixture of aluminum oxide and cryolite; 6 — particles of other mixtures and compounds.

мальной среднесменной концентраций триоксида алюминия на уровни 1,5–2,5 ПДК отмечались в воздухе старых и новых электролизных корпусов. Результаты исследований подтверждают данные других авторов [7, 10, 15], свидетельствующих о наличии в воздухе большого количества плохо растворимых солей фтористоводородной кислоты.

Несомненно, наиболее важным результатом было наблюдаемое явное различие дисперсного и химического состава витающей пыли на рабочих местах основных профессий при применении технологий с самообжигающимися и предварительно обожженными анодами. Так, в рабочей зоне работников, обслуживающих электролизеры в цехах с TTCA и MTOA доминировали высокодисперсные частицы пыли размером 1–3 мкм (31,8–43,8%), а у машинистов кранов при TTCA — 0,5–3,0 мкм (69%). В то же время на рабочем месте оператора-крановщика при MTOA преобладали ультратонкие частицы с размером до 0,5 мкм (46,2%), включая частицы наноразмерного диапазона (67–100 нм). Пылевые частицы имели кристаллическую и сферическую формы, в виде отдельных или собранных в агломераты микро- и наноструктурированных комплексов пылинки. Такие агломераты ультрадисперсных пылевых частиц, поступая в организм могут распадаться и их действие может быть аналогично негативному действию отдельных наноаэрозолей [16–18].

Следует отметить, что многие исследованные нами пылевые частицы преимущественно состояли из частиц оксида алюминия (глинозем), криолита, фторида алюминия, фторуглеродных соединений или их смесей. Причем, в цехах с традиционной технологией производства алюминия доминирующей группой частиц являлись глинозем (36,3%) и фтористоводородные соединения (29,8%), а при модернизированной — криолит (29,6%), смесь фторида алюминия с глиноземом (19,2%) и в меньшей степени фторуглеродные соединения (16,0%). Основными типичными элементами в них были фтор, углерод, алюминий с примесью натрия, калия, железа, магния, хрома, никеля, серы, кремния. Ряд исследователей [10, 12, 19] отмечали на поверхностях многих агломератов и частиц своеобразные покрытия, содержащие фторид, а также веро-

ятность адсорбирования сернистого ангидрида и фтористого водорода, которые могут поступать в торакальную и глубокую зону легких вместе с пылью. Следовательно, такие сложные аэрозольные взвеси — миксты частиц пыли могут оказывать как фиброгенное, токсическое, так и канцерогенное действие на организм работников. Важно заметить, что в ранее проведенном исследовании С. Voisin и соавторы [20] идентифицировали высокие уровни алюминиевых волокон, как в легочной ткани, так в бронхоальвеолярных смывах у работников электролизных цехов алюминиевого производства. Авторы отмечали, что наиболее вероятным составом данных волокон может являться оксид алюминия (Al_2O_3) из-за отсутствия Na в рентгеновских спектрах. Указанное определяет необходимость дальнейших исследований по изучению физико-химических свойств и эффектов воздействия аэрозольных взвесей — комплексов алюминиевого производства в эксперименте на животных и на организм работников.

Заключение. Таким образом, образующийся в условиях производства алюминия аэрозоль характеризуется высокими уровнями вредных химических соединений с преобладанием в воздухе рабочей зоны высоко- и ультрадисперсных аэрозольных смесей различной химической природы, включающие частицы наноразмерного диапазона, примеси тяжелых металлов и токсических соединений. В воздухе цехов с традиционной технологией электролиза алюминия доминируют высокодисперсные частицы пыли, преимущественно глинозема и фторуглеродных соединений, а при модернизированной технологии отмечаются микро- и ультратонкие наноструктурированные частицы, состоящие в основном из криолита и смеси фторида алюминия с глиноземом. Воздействие таких сложных многокомпонентных аэрозольных микстов может представлять наибольшую опасность для здоровья работников алюминиевых производств. С целью проведения объективных оценок возможных рисков для здоровья работников и обоснования совершенствования действующих ПДК пылевого микста в воздухе рабочей зоны обследованных производств, необходимо детальное и углубленное изучение химического и дисперсного состава аэрозолей при различных технологических процессах производства алюминия.

Список литературы

1. Измеров Н.Ф., Бухтияров И.В., Прокопенко А.В., Кузьмина Л.П., Соркина Н.С., Бурмистрова Т.Б. и др. Современные аспекты сохранения и укрепления здоровья работников, занятых на предприятиях по производству алюминия. *Мед. труда и пром. экол.* 2012; 11: 1–7.
2. Sorgdrager B., De Loeff A.J.A., Pal T.M., Van Dijk F.J.H., De Monchy J.G.R. Factors affecting FEV1 in workers with potroom asthma after their removal from exposure. *Int Arch Occup Environ Health.* 2001; 74(1): 55–8. <https://doi.org/10.1007/s004200000180>
3. Taiwo O.A., Sircar K.D., Slade M.D., Cantley L.F., Vegso S.J., Rabinowitz P.M. et al. Incidence of asthma among aluminum workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine.* 2006; 48(3): 275–82. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000197876.31901.f5>
4. Бейгель Е.А., Катаманова Е.В., Шаяхметов С.Ф., Ушакова О.В., Павленко Н.А., Куку А.Н. и др. Влияние длительного воздействия промышленных аэрозолей на функциональное состояние бронхолегочной системы у работников алюминиевого производства. *Гигиена и санитария.* 2016; 95(12): 1160–3. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-12-1160-1163>
5. Shaaban L.H., Zayet H.H., Aboufaddan H.H., Elghazally S.A. Respiratory hazards: clinical and functional assessment in aluminum industry workers. *Egyptian Journal of Chest Diseases and Tuberculosis.* 2016; 65(2): 537–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejcdt.2016.01.004>
6. Чеботарёв А.Г., Прохоров В.А. Условия труда и профессиональная заболеваемость рабочих предприятий по производству алюминия. *Мед. труда и пром. экол.* 2009; 2: 5–9.
7. Рослый О.Ф., Лихачева Е.И., ред. *Медицина труда при электролитическом получении алюминия.* Екатеринбург: Екатеринбургский медицинский научный центр профилактики и охраны здоровья рабочих промпредприятий; 2011.
8. Шаяхметов С.Ф., Лисецкая А.Г., Меринов А.В. Оценка токсико-пылевого фактора в производстве алюминия (аналитический обзор). *Мед. труда и пром. экол.* 2015; 4: 30–5.
9. Федорук А.А., Рослый О.Ф., Цепилов Н.А., Слышкина Т.В. Гигиеническая характеристика условий труда при эксплуатации современных электролизеров повышенной мощности. *Уральский медицинский журнал.* 2008; 8: 139–43.
10. Höflich B.L., Weinbruch S., Theissmann R., Gorzawski H., Ebert M., Ortner H.M. et al. Characterization of individual aerosol particles in workroom air of aluminium smelter potrooms. *J. Environ. Monit.* 2005; 7(5): 419–24. <https://doi.org/10.1039/b418275h>
11. Thomassen Y., Koch W., Dunkhorst W., Ellingsen D.G., Skaugset N.P., Jordbekken L. et al. Ultrafine particles at workplaces of a primary aluminium smelter. *J. Environ. Monit.* 2006; 8(1): 127–33. <https://doi.org/10.1039/b514939h>
12. Weinbruch S., Benker N., Koch W., Ebert M., Drablos P.A., Skaugset N.P. et al. Hygroscopic properties of the workroom aerosol in aluminium smelter potrooms: a case for transport of HF and SO₂ into the lower airways. *J Environ Monit.* 2010; 12(2): 448–54. <https://doi.org/10.1039/b919142a>
13. Федорук А.А., Рослый О.Ф., Плотно Э.Г. Условия труда при эксплуатации алюминиевых электролизеров различной мощности. *Мед. труда и пром. экол.* 2017; 9: 201.
14. Лисецкая А.Г., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В. Гранулометрический и морфологический анализ взвешенных частиц в воздухе алюминиевого производства. *Мед. труда и пром. экол.* 2017; 10: 50–3.
15. Федорук А.А., Рослый О.Ф., Слышкина Т.В., Плотно Э.Г., Лемяшев М.Ф. Актуальные вопросы гигиены труда при эксплуатации сверхмощных электролизеров для получения алюминия. *Медицина труда и промышленная экология.* 2012; 11: 13–7.
16. Уланова Т.С., Антипова М.В., Забирова М.И., Волкова М.В. Определение частиц нанодиапазона в воздухе рабочей зоны металлургического производства. *Анализ риска здоровью.* 2015; 1: 77–81.
17. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Степанков М.С., Игнатьева А.М. Оценка токсичности и потенциальной опасности наночастиц оксида алюминия для здоровья человека. *Экология человека.* 2018; 5: 9–15. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-5-9-15>
18. Zheng W., Antonini J.M., Lin Y.-C., Roberts J.R., Kashon M.L., Castranova V. et al. Cardiovascular effects in rats after intratracheal instillation of metal welding particles. *Inhal Toxicol.* 2015; 27(1): 45–53. <https://doi.org/10.3109/08958378.2014.982309>
19. L'vov B.V., Polzik L.K., Weinbruch S., Ellingsen D.G., Thomassen Y. Theoretical aspects of fluoride air contaminant formation in aluminium smelter potrooms. *J. Environ. Monit.* 2005; 7(5): 425–30. <https://doi.org/10.1039/b501302j>
20. Voisin C., Fisekci F., Buclez B., Didier A., Couste B., Bastien F. et al. Mineralogical analysis of the respiratory tract in aluminium oxide-exposed workers. *Eur Respir J.* 1996; 9(9): 1874–9. <https://doi.org/10.1183/09031936.96.09091874>

References

1. Izmerov N.F., Bukhtiarov I.V., Prokopenko L.V., Kuz'mina L.P., Sorkina N.S., Burmistrova T.B. et al. Contemporary aspects of maintenance and promotion of health of the workers employed at the aluminum production enterprises. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2012; 11: 1–7 (in Russian).
2. Sorgdrager B., De Loeff A.J.A., Pal T.M., Van Dijk F.J.H., De Monchy J.G.R. Factors affecting FEV1 in workers with potroom asthma after their removal from exposure. *Int Arch Occup Environ Health.* 2001; 74(1): 55–8. <https://doi.org/10.1007/s004200000180>
3. Taiwo O.A., Sircar K.D., Slade M.D., Cantley L.F., Vegso S.J., Rabinowitz P.M. et al. Incidence of asthma among aluminum workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine.* 2006; 48(3): 275–82. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000197876.31901.f5>
4. Beygel E.A., Katamanova E.V., Shayakhmetov S.F., Ushakova O.V., Pavlenko N.A., Kuks A.N. et al. The impact of the long-term exposure of industrial aerosols on clinical and functional indices of the broncho-pulmonary system in aluminum smelter workers. *Gigiena i Sanitariya.* 2016; 95(12): 1160–3. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-12-1160-1163> (in Russian).
5. Shaaban L.H., Zayet H.H., Aboufaddan H.H., Elghazally S.A. Respiratory hazards: clinical and functional assessment in aluminum industry workers. *Egyptian Journal of Chest Diseases and Tuberculosis.* 2016; 65(2): 537–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejcdt.2016.01.004>
6. Tchegotaryov A.G., Prokhorov V.A. Work conditions and occupational morbidity in workers of aluminium production enterprises. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2009; 2: 5–9 (in Russian).
7. Roslyi O.F., Likhacheva Ye.L., eds. *Medicine of labor for electrolytic aluminum production.* Ekaterinburg: Ekaterinburgskiy meditsinskiy nauchnyy tsentr profilaktiki i okhrany zdorov'ya rabochikh prompredpriyatiy; 2011 (in Russian).
8. Shayakhmetov S.F., Lisetskaya L.G., Merinov A.V. Evaluation of toxic dust factor in aluminium production (analytic review). *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya.* 2015; 4: 30–5 (in Russian).
9. Fedoruk A.A., Rosly O.F., Tsepilov N.A., Slyshkina T.V. Hygienic characteristic of labor conditions in the operation of

- modern high-power electrolyzers. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*. 2008; 8: 139–43 (in Russian).
10. Höflich B.L., Weinbruch S., Theissmann R., Gorzawski H., Ebert M., Ortner H.M. et al. Characterization of individual aerosol particles in workroom air of aluminium smelter potrooms. *J. Environ. Monit.* 2005; 7(5): 419–24. <https://doi.org/10.1039/b418275h>
 11. Thomassen Y., Koch W., Dunkhorst W., Ellingsen D.G., Skaugset N.P., Jordbekken L. et al. Ultrafine particles at workplaces of a primary aluminium smelter. *J. Environ. Monit.* 2006; 8(1): 127–33. <https://doi.org/10.1039/b514939h>
 12. Weinbruch S., Benker N., Koch W., Ebert M., Drabløs P.A., Skaugset N.P. et al. Hygroscopic properties of the workroom aerosol in aluminium smelter potrooms: a case for transport of HF and SO₂ into the lower airways. *J Environ Monit.* 2010; 12(2): 448–54. <https://doi.org/10.1039/b919142a>
 13. Fedoruk A.A., Rosly O.F., Plotko E.G. Working conditions in operation of aluminium cells varying in power. *Meditsina truda i promyshlennaia ekologiya*. 2017; 9: 201 (in Russian).
 14. Lisetskaya L.G., Shayakhmetov S.F., Merinov A.V. Granulometric and morphologic analysis of suspended particles in the air of aluminum production. *Meditsina truda i promyshlennaia ekologiya*. 2017; 10: 50–3 (in Russian).
 15. Fedoruk A.A., Rosly O.F., Slyshkina T.V., Plotko E.G., Lemyasev M.F. Issues of occupational health in the aluminium plant with superpower equipment. *Meditsina truda i promyshlennaia ekologiya*. 2012; 11: 13–7 (in Russian).
 16. Ulanova T.S., Antipyeva M.V., Zabirowa M.I., Volkova M.V. Determination of nanoscale particles in the air of working zone at the metallurgical production. *Analiz riska zdorov'yu*. 2015; 1: 77–81 (in Russian).
 17. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Stepankov M.S., Ignatova A.M. Scientific forecasting of toxicity and evaluation of hazard potential of aluminum oxide nanoparticles for human health. *Ekologiya Cheloveka (Human Ecology)*. 2018; 5: 9–15. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2018-5-9-15> (in Russian)
 18. Zheng W., Antonini J.M., Lin Y.-C., Roberts J.R., Kashon M.L., Castranova V. et al. Cardiovascular effects in rats after intratracheal instillation of metal welding particles. *Inhal Toxicol.* 2015; 27(1): 45–53. <https://doi.org/10.3109/08958378.2014.982309>
 19. L'vov B.V., Polzik L.K., Weinbruch S., Ellingsen D.G., Thomassen Y. Theoretical aspects of fluoride air contaminant formation in aluminium smelter potrooms. *J. Environ. Monit.* 2005; 7(5): 425–30. <https://doi.org/10.1039/b501302j>
 20. Voisin C., Fisekci F., Buclez B., Didier A., Couste B., Bastien F. et al. Mineralogical analysis of the respiratory tract in aluminium oxide-exposed workers. *Eur Respir J.* 1996; 9(9): 1874–9. <https://doi.org/10.1183/09031936.96.09091874>