УДК 551.510 EDN: NRHPVO

Кулакова С. И., *Павлов В. И., Кусайко Н. П.
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: pavlow2005@rambler.ru*

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ ЛНР

На территории южной части ЛНР риски загрязнения атмосферы Алчевским металлургическим комбинатом возрастают из года в год из-за наметившейся устойчивой тенденции роста в летний период количества безветренных дней и температуры приземной атмосферы. По болезненному состоянию старых деревьев отмечено накопление большого экологического вреда. На основе выполненного анализа факторов экологического риска и обзора публикаций в качестве первоочередного шага в оздоровлении атмосферы города Алчевска предложено создание многоуровневой автоматизированной системы мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: *черная металлургия, выбросы, факторы экологического риска, изменение климата, коэффициент трансформации выбросов, накопленный экологический вред, регулирование выбросов, система мониторинга.*

Финансирование: *исследования выполнены за счет средств федерального бюджета (код темы: FRRU-2024-0004 в ЕГИСУ НИОКТР).*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для города Алчевска градообразующими являются предприятия Южного горно-металлургического комплекса (ООО «ЮГМК»), включающие все современные технологии черной металлургии и коксохимического производства. Производство кокса сопровождается переработкой улавливаемого коксового газа и выпуском дополнительной продукции: фенола, аммиака, бензольных углеводородов и серной кислоты. Отходы черной металлургии (доменные и сталеплавильные шлаки, а также прокатная окалина) используются для производства агломерата, который в свою очередь используется для улучшения процесса выплавки чугуна. Для производства стали мартеновские печи заменены на боле экономичные и экологичные кислородно-конвертерные установки. Производство проката оснащено машиной непрерывного литья заготовок, которая позволяет значительно уменьшить затраты энергии на повторный разогрев стальных слябов перед прокатом, а также уменьшить выбросы в атмосферу парниковых газов.

В период наибольшей реализации производственной мощности после реконструкции ООО «ЮГМК» в 2013 г. общее количество выбросов составило 95 тыс. тонн, из них твердые вещества — 5,95 тыс. т, газообразные — 89,1 тыс. т. В настоящее время за границей санитарно-защитной зоны ООО «ЮГМК», которая для предприятий с полным металлургическим циклом составляет 1000 метров, городская атмосфера подвергается дополнительному интенсивному загрязнению, увеличивающемуся из года в год, объёмами выхлопных газов из-за непрерывного роста количества автомобильного транспорта.

Основной валовый объем загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу предприятиями ООО «ЮГМК», состоит из взвешенных веществ, включая аэрозоли, и различного уровня токсичности дымовых газов: оксида углерода (CO), диоксида азота (NO_2), диоксида серы (SO_2), сероводорода, бензола, фенолов, аммиака, нафталина, бензапирена, паров серной кислоты и еще целого ряда довольно ядовитых веществ. Бензапирен особо опасен для чело-

века даже при малой концентрации, поскольку обладает свойством биоаккумуляции. После начала боевых действий в городе не ведется мониторинг за выбросами загрязняющих веществ. Несмотря на снижение производственной деятельности металлургического комплекса, жителями города и ближайших населенных пунктов отмечаются периодические ощутимые загрязнения атмосферы. В связи с этим анализ факторов, вызывающих значимые загрязнения окружающей среды от выбросов ООО «ЮГМК», для принятия рациональных проектных решений по минимизации загрязнений является актуальной задачей.

Постановка задачи. Понятие экологического риска загрязнения окружающей среды рассмотрим в более широком аспекте по сравнению с традиционным пониманием. Обычно экологический риск оценивается вероятностью возникновения в атмосфере концентрации ядовитого газа, превышающей предельно допустимое значение. Безопасные приземные концентрации, меньше предельно допустимых, возникающие длительное время, также следует отнести к категории экологических рисков, как вероятность потери самоочистительной способности атмосферы. Понятие потери самоочистительной способности относится и к остальным составляющим окружающей среды, к почве и природным водным источникам. Ситуация такого антропогенного загрязнения окружающей среды постоянно расширяется и настолько актуальна в настоящее время, что в Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ «Об охране окружающей среды» введено специальное понятие — накопленный экологический вред окружающей среде. Таким образом имеют место две экологические ситуации: кратковременная с нарушением предельно допустимых норм и длительная без нарушения норм, но с концентрациями загрязнений близкими к ПДК. Обе ситуации являются следствием недостаточной защиты окружающей среды от антропогенного воздействия.

Целью данной работы является анализ факторов экологического риска загрязнения окружающей среды предприятиями металлургического комплекса на территории ЛНР и обоснование эффективных решений по его минимизации.

Объект исследования — состав выбросов предприятий черной металлургии.

Предмет исследования — физико-химические процессы в атмосфере, загрязненной выбросами предприятий черной металлургии на территории Луганской Народной Республики.

Задачи исследования:

– анализ научных публикаций по исследованиям физико-химических процессов в атмосфере, загрязненной выбросами промышленных предприятий, и нормативных документов по регулированию загрязнений атмосферы;

– установление тенденций в изменении метеорологических показателей, влияющих на концентрацию загрязняющих веществ в атмосфере;

– анализ факторов экологического риска, исходя из требований нормативных документов и тенденций в изменении метеорологических показателей;

– обоснование эффективных решений по минимизации экологического риска загрязнения городской среды предприятиями металлургического комплекса.

Методика исследования. Для анализа факторов экологического риска загрязнения городской среды промышленными предприятиями использован метод обобщения исследований физико-химических процессов в атмосфере, загрязненной выбросами промышленных предприятий, стандартные методы статистического анализа и математические модели, приведенные в нормативном документе ОНД-86.

Изложение материала. Наиболее опасные, трудно поддающиеся регулированию ситуации возникают при загрязнении атмосферы. Основные технологические решения по дымовым выбросам в атмосферу предприятиями металлургического комплекса

принимались, исходя из экологических требований нормативного документа 1987 г. [1], и не соответствуют современному приросту экологической нагрузки.

Влияние факторов на максимально разовую приземную концентрацию выбрасываемого в атмосферу вредного вещества из одного точечного источника предлагается оценить по формуле [1]

$$C_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m \cdot n \cdot \eta}{H^2 \cdot \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}}, \qquad (1)$$

где A — коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;

M — масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

F — безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;

m и n — коэффициенты, учитывающие условия выхода газовоздушной смеси из устья источника выброса;

H— высота дымовой трубы, м;

η — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

ΔT — разность между температурой выбрасываемой газовоздушной смеси $Тг$ и температурой окружающего атмосферного воздуха $Тв$, ºС;

V_1 (м^3/с) — расход газовоздушной смеси, м^3/с.

Коэффициент A отражает климатические условия местности. Для территории города Алчевска, который находится южнее северной широты 48,5°, А = 200. Широта определяет количество солнечного тепла, попадаемого на территорию. Исходя из анализа данных метеостанции г. Луганска, в настоящее время в летний период значительно повысилась климатическая норма температуры приземного воздуха на 1,2 ºС [2]. Если учесть, что климат становится более засушливым, лето более жарким, то значение коэффициента A для широты г. Алчевска повышается и вместо A = 200 необходимо принимать A = 230.

Выброс дымовой смеси зависит также от разности температур ΔT, которая уменьшается при увеличении летней температуры. Если учесть перечисленные параметры A и ΔT в формуле (1), то риски повышения расчетной величины $C_м$ из-за климатических изменений увеличиваются.

Другим негативным метеорологическим фактором является устойчивое уменьшение скорости приземного воздуха, которое описывается линейной зависимостью (рис. 1)

$$y = 0,4911x - 977,29, \qquad (2)$$

где y — количество безветренных дней в летний период;

R^2 — коэффициент детерминации, $R^2 = 0,4338$ (статистически надежный).

Уравнение (2) иллюстрирует учащение в летние периоды наиболее опасных атмосферных явлений для загрязнения атмосферы — увеличилась частота и длительность стояния над территорией ЛНР, включая и город Алчевск, блокирующих антициклонов. Опускающиеся массы воздуха из верхних слоев атмосферы в центр антициклона разгоняют облака, за счет чего устанавливается с высокой солнечной радиацией безветренная засушливая погода. Возникают опасно малые скорости ветра в диапазоне 0–3 м/с [3].

В случае малых опасных скоростей ветра величину $C_м$ следует рассчитывать по формуле [1]

$$C_M = \frac{A \cdot M \cdot F \cdot m' \cdot \eta}{H^{7/3}}. \qquad (3)$$

Значение $C_м$ (3) будет больше рассчитанного значения по (1), так как числитель увеличится ($m^1 > m$, n не учитывается, $n < 1$), а знаменатель уменьшится (не учитываются величины V_1 и ΔT).

Таким образом, наблюдаемое потепление климата буде способствовать на территории ЛНР повышению рисков возникновения запредельных приземных концентраций токсических компонентов в дымовых выбросах.

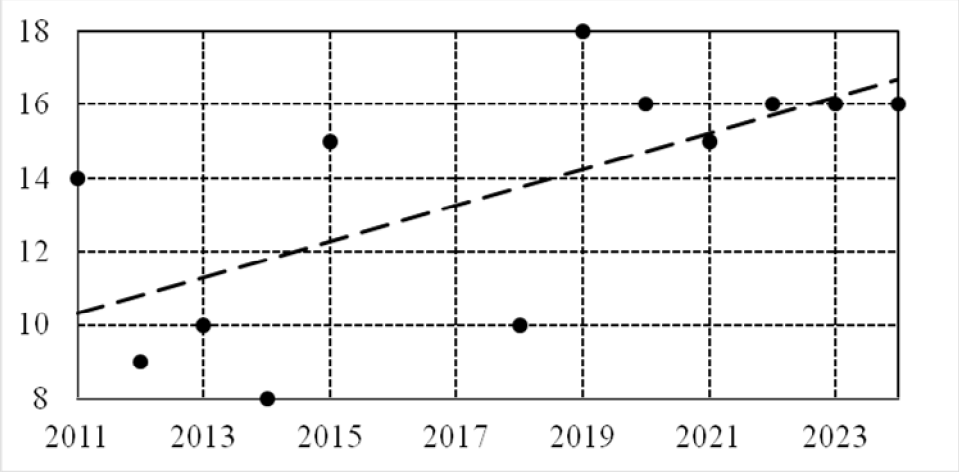

Рисунок 1 — Изменение количества безветренных дней в летние месяцы 2011–2024 гг. по данным метеостанции г. Шахты в Ростовской области

Неопасные приземные концентрации газовых компонент являются результатом рассеивания исходного факела выбросов. Однако в осенне-весенние периоды при наличии в атмосфере дождевых облаков в газовые компоненты дымовых выбросов CO_2, NO_2, SO_2 образуют с водяными парами кислоты и на почву выпадают кислотные дожди. Кроме того, дожди могут содержать растворимые в воде химические соединения фенола, сероводорода, аммиака. В природных условиях почва обладает определенной самоочистительной способностью. В городских условиях большая часть поверхности почвы покрыта асфальтом и тротуарной плиткой. Оставшаяся часть открытой почвы, на которой растут деревья и кустарники, принимает сравнительно большие объёмы дождевых осадков, насыщенных компонентами дымовых выбросов, поэтому со временем почва теряет способность самоочищения. Индикатором накопленного экологического вреда от длительного загрязнения городской среды могут служить старые деревья. На улицах, застроенных при восстановлении города Алчевска в послевоенный период, часто встречаются старые деревья, на стволах которых наблюдаются ракоподобные деформации-наросты (рис. 2). У городского населения одной из распространенных причин смерти стал рак.

Наблюдения за концентрацией выбросов в атмосфере проводятся сетью станций Росгидромета. Анализ накопленных данных свидетельствует о сложных химических преобразованиях, происходящих в атмосфере в газовых выбросах. Установлены противоречивые факты, когда рост промышленных и автомобильных выбросов не сопровождается увеличением концентрации диоксида азота и даже наблюдаются случаи её снижения. Росгидрометом отмечаются и опасные преобразования в атмосфере, когда регистрируются запредельные концентрации формальдегида в атмосфере городов при незначительных его объемах в промышленных выбросах [4]. Установлено, что потенциал химической активности атмосферы поддается оценке с помощью коэффициента трансформации (КТ). Например, для всех возможных химических соединений азота с кислородом (оксидов азота) КТ показывает, какая часть выбрасываемых в атмосферу этих соединений трансформируется (преобразуется) в ядовитый газ NO_2. В нормативном документе РД 34.02.305-98 указывается, что коэффициент трансформации может достигать 0,8. Отсюда следует, что расчетное значение $C_м$ по формуле (1) существенно занижается из-за отсутствия учета дополнительной трансформации других неядовитых оксидов азо-

та [5]. Анализ многолетних исследований коэффициента трансформации показал, что он увеличивается при повышении температуры [6] и солнечной радиации [7].

В работе [8] изучались размеры ореола и концентрации рассеивания аэрозольных выбросов при переработке полиметаллических руд на металлургических предприятиях комбината «Казцинк» в городах Усть-Каменогорск и Риддер Восточно-Казахстанской области. Установлено трансграничное загрязнение территории России в пределах Горного Алтая. Протяженность ореола загрязнения превышает 300 км, ширина составила 100–120 км. Исследования включали биоиндикацию по листьям тополя черного *(Populus nigra L)*. В золе листьев установлено превышение концентраций микроэлементов, которые содержатся в полиметаллических рудах, перерабатываемых в городах Усть-Каменогорск и Риддер, по сравнению со средним их содержанием вне ореола: цинка в 51,5 раза; кадмия в 14,1; сурьмы в 9,1; мышьяка в 5,3 раза. Установленные высокие концентрации микроэлементов в листьях тополя на расстояниях от источника выброса, многократно превышающих расчётные значения, свидетельствуют о трудно предсказуемых процессах в атмосфере.

На современном уровне технических государственных решений для минимизации влияния обозначенных факторов экологического риска требуются значительные экономические ресурсы, негативным результатом вложения которых будет повышение себестоимости продукции черной металлургии. Поэтому «информация об уровнях загрязнения, полученная от сети станций Росгидромета и других ведомств, представленная в Ежегодниках состояния загрязнения атмосферы, выступает как вспомогательная и необязательная. Эта информация используется, если подтверждает уменьшение выбросов, или считается недостоверной, если идет вразрез с результатами расчетов предельно допустимых выбросов (ПДВ)» [4].

Рисунок 2 — Деформационные наросты на стволах старых деревьев города Алчевска

В нормативном документе РД 52.04.52-85 изложены основные принципы разработки мероприятий по регулированию выбросов в зависимости от трех возможных категорий периодов неблагоприятных метеоусловий (НМУ). Основное мероприятие заключается во временном изменении режима работы предприятия по снижению ПДВ на период НМУ. Однако эффективная реализация этих принципов весьма проблематична, особенно для низкой и средней тяжести НМУ (1-й и 2-й категорий). Сложность заключается в том, что рассеивание выбросов по территории города неравномерно. В зависимости от ориентации высотных зданий с наветренной и особенно с подветренной стороны образуются аномалии скоплений дымовых выбросов. Распространенная планировка высотных зданий по кольцевому принципу может формировать из одиночных скоплений целые плохо проветриваемые зоны. Дополнительной проблемой является сложность и невысокая надежность прогноза периодов НМУ, право установления которых предписано органам Роскомгидромета. По перечисленным причинам часто сложно выполнимо главное требование — обеспечение оперативности принятия решений.

В приоритетных направлениях научно-технического развития Российской Федерации отмечается необходимость создания технологий мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды (Указ Президента РФ от 18.06.2024 г. № 529). Современная база программно-технических средств позволяет разработать и внедрить многоуровневую (от города до органов принятий решений) автоматизированную систему мониторинга всех компонентов окружающей среды (почвы, воды и воздуха) и расширение её функциональности. Основная функция мониторинга будет заключаться в непрерывном контроле загрязнений по всей территории города, регистрации и ситуационного зонирования территории в реальном времени по уровням загрязнений атмосферы. Информация должна быть доступна населению и техническим контрольным службам города для принятия соответствующих решений в текущей ситуации. Интегральная оценка текущих объемов выбросов, полученная на основе автоматического непрерывного мониторинга, должна быть положена в основу начисления налогов в бюджет города на компоненты дымовых выбросов. Значительные налоговые обложения необходимы для мотивации собственников предприятий к внедрению технических решений по снижению выбросов, а в противном случае к компенсации экологического ущерба здоровью населения и восполнению затрат города на экологический мониторинг.

Выводы и направление дальнейших исследований. Для принятия решений по минимизации экологического риска загрязнения городской атмосферы выбросами предприятий черной металлургии на территории ЛНР необходимо учесть на основании проведенного анализа следующие научные результаты.

1. В течение последних 10-ти лет наметилась опасная для рассеивания выбросов тенденция увеличения количества безветренных дней в летний период с одновременным повышением приземной температуры атмосферного воздуха.

2. Расчетное значение приземной концентрации загрязняющего вещества по нормативному документу ОНД-86 в южной части территории ЛНР увеличилось в связи с изменившимися климатическими условиями; климатический коэффициент А увеличился с 200 до 230.

3. Существуют риски превышения предельно допустимых выбросов по ОНД-86 из-за неучтенного коэффициента трансформации неопасных окислов NO_x в токсичную двуокись азота NO_2.

4. Ситуация накопленного экологического вреда за многолетний период от выбросов предприятиями черной металлургии проявляется в черте города и далеко за его пределами.

5. Первоочередным шагом в оздоровлении атмосферы города Алчевска является создание технологии автоматизированной системы мониторинга многофакторных физико-химических процессов рассеивания дымовых выбросов предприятий черной металлургии.

Список источников

1. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий / Госкомгидромет. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. 82 с.

2 Павлов В. И., Кусайко Н. П., Сергейчук О. В. Климатические особенности формирования стока малых рек ЛНР // Экологический вестник Донбасса. 2022. № 4. С. 31–40. EDN: RJIYKQ

3. Аргучинцева А. В., Кочугова Е. А. Потенциал самоочищения атмосферы // Известия Иркутского государственного университета. Серия : Науки о Земле. 2019. Т. 27. С. 3–15. DOI: 10.26516/2073-3402.2019.27.3. EDN: ZABYRV

4. Безуглая Э. Ю., Ивлева Т. П. Проблема сокращения выбросов в городах России // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2012. № 567. С. 225–233. EDN: QCNVQV

5. Безуглая Э. Ю., Ашмарин А. С. Трансформация оксидов азота в диоксид азота в городах с предприятиями энергетики // Инженерные системы. 2004. № 1. С 25–32.

6. Безуглая Э. Ю., Завадская Е. К., Ивлева Т. П. Роль климатических условий в формировании изменений загрязнения атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2013. № 568. С. 267–279. EDN: RUZXAT

7. Самукова Е. А. Тенденции временных изменений суммарной солнечной радиации в Европе // Труды ГГО. Вып. 565. 2012. С. 188–204. EDN: PGPFIF

8. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию горного Алтая / Ю. В. Робертус [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 9. С. 39–48. EDN: XHPYLT

© Кулакова С. И., Павлов В. И., Кусайко Н. П., 2025

Рекомендована к печати к.фарм.н., доц.. зав. каф. ЭБЖД ДонГТУ Федоровой В. С., начальником службы экологической безопасности и производственной санитарии управления охраны труда и промышленной безопасности ООО «ЮГМК» Красноносом Н. Н.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулакова Светлана Ивановна, *канд. техн. наук, доцент каф. высшей математики и естественных наук*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Павлов Валерий Иванович, *канд. техн. наук, доцент каф. экологии и безопасности жизнедеятельности*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: pavlow2005@rambler.ru

Кусайко Наталья Петровна, *директор научного центра мониторинга окружающей среды*
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Kulakova S. I., *Pavlov V. I., Kusayko N. P. *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: pavlow2005@rambler.ru)*

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL POLLUTION RISK FACTORS FROM EMISSIONS OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES IN THE LUGANSK PEOPLE'S REPUBLIC

The risks of air pollution in the southern part of LPR from the Alchevsk iron-and-steel works are increasing year by year because of the outlined stable trend in number of windless days and ground temperatures during the summer. On the diseased condition of old trees, a large accumulation of environmental damage was observed. Based on the analysis of environmental risk factors and a review of publications, the establishment of a multi-level automated environmental monitoring system is proposed as a priority step towards improving the atmosphere of Alchevsk.

Key words: *ferrous metallurgy, emissions, environmental risk factors, climate change, conversion rate of emissions, accumulated environmental damage, emission control, monitoring system.*

Funding: *the studies were carried out with funding from the federal budget (theme code: FRRU-2024-0004 in the Unified state information system for accounting the research, experimental and technical works).*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kulakova Svetlana Ivanovna, *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Higher Mathematics and Natural Sciences*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Pavlov Valery Ivanovich *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Ecology and Life Safety*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: pavlow2005@rambler.ru

Kusayko Natalia Petrovna *Director of the Scientific Center for Environmental Monitoring*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia