

ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

УДК 551.510.41; 614

doi: 10.31498/2225-6733.38.2019.181495

© Лухтура Ф.И.*

ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ АТМОСФЕРЫ ВОКРУГ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНОВ г. МАРИУПОЛЯ

В работе представлена попытка аналитического определения распределения концентраций кислорода в приземных слоях атмосферы вокруг мест стока кислорода из атмосферы на металлургических предприятиях г. Мариуполя, приведена аналитическая модель стока кислорода из приземного слоя на основе теории «обратной струи» в одномерной постановке. Получены соответствующие изолинии концентраций на различных расстояниях от мест стока кислорода. При этом концентрация кислорода снижается обратно пропорционально расстоянию от стока, что позволяет достаточно просто оценивать распределение концентраций в приземном слое атмосферы вокруг металлургических предприятий при известных координатах мест его стока в безветренную погоду. Проанализирована пространственная изменчивость и эпизоды аномального содержания кислорода в приземном воздухе в контексте их возможного влияния на самочувствие людей.

Ключевые слова: металлургические комбинаты, атмосфера, кислород, концентрация, вредные выбросы, аномальная жара, самочувствие населения, смертность населения.

Лухтура Ф.И. Про екологічний стан атмосфери навколо промислових районів м. Маріуполя. Вміст кисню в атмосферному повітрі міст, а також в житлових, офісних і виробничих приміщеннях є найважливішим фактором самопочуття і здоров'я городян. При високій температурі і високій абсолютній вологості приземного повітря вміст кисню в атмосферному повітрі мінімальний, і люди можуть відчувати ознаки гіпоксії. У промислових південних містах, до яких відноситься м. Маріуполь (Україна), існують додаткові чинники, що ускладнюють дихання людини: більш висока (щодо території, що оточує місто) температура повітря і забрудненість атмосфери, в т. ч. чадним газом і зваженими частинками. Це призводить в умовах аномальної спеки і промислових викидів до підвищення захворюваності і смертності міського населення. Точні виміри парціального тиску і парціальної густини кисню вимагають спеціального обладнання і методик, оскільки процентний вміст кисню в атмосферному повітрі досить великий, а його зміни відносно малі. Більшість сучасних приладів, які використовуються міськими службами моніторингу атмосфери, орієнтовані на вимір істотних відхилень вмісту кисню від норми. Служби моніторингу складу повітря зазвичай не вимірюють цільність кисню, мабуть, через неявного припущення нікчемного впливу зміни метеоумов на його утримання. Крім того, вимірювання малих змін вмісту кисню в приземному повітрі є досить складним технічним завданням. У роботі представлена спроба аналітичного визначення розподілу концентрацій кисню в приземних шарах атмосфери навколо місць стоку кисню з атмосфери на металургійних підприємствах Маріуполя, приведена аналітична модель стоку кисню з приземного шару на основі теорії «зворотного струменя» в одновимірній постановці. Отримано відповідні ізолінії концентрацій на різних відстанях від місць стоку кисню. При цьому концентрація кисню знижується обернено пропорційно відстані від стоку, що дозволяє досить просто оцінювати ро-

* ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь
luhturaelena@gmail.com

зподіл концентрацій в приземному шарі атмосфери навколо металургійних підприємств при відомих координатах місць його стоку в безвітряну погоду. Проаналізовано просторову мінливість і епізоди аномального вмісту кисню в приземному повітрі в контексті їх можливого впливу на самопочуття людей.

Ключові слова: атмосфера, металургійні комбінати, кисень, концентрація, шкідливі викиди, аномальна спека, самопочуття населення промислових міст, смертність населення.

F.I. Lukhtura. On the ecological state of the atmosphere around the industrial areas of Mariupol. *The oxygen content in the atmospheric air of cities, as well as in residential, office and industrial premises is the most important factor in the health and well-being of citizens. With high temperature and high absolute humidity of the surface air, the oxygen content in ambient air is minimal, and people may suffer hypoxia. In the industrial southern cities to which the city of Mariupol (Ukraine) belongs, there are additional factors that impede human breathing: higher (relative to the territory surrounding the city) air temperature and pollution of the atmosphere, including carbon monoxide and suspended particles. This results in an increase in the morbidity and mortality of the urban population under the conditions of abnormal heat and industrial emissions. Accurate measurements of partial pressure and partial density of oxygen require special equipment and techniques, since the percentage of oxygen in ambient air is large enough, and its changes are relatively small. Most modern instruments used by urban atmospheric monitoring services are focused on measuring significant deviations of oxygen content from the norm. Air quality monitoring services do not usually measure the density of oxygen, apparently due to the implicit assumption of the negligible effect of weather conditions changes on its content. In addition, the measurement of small changes in the oxygen content in the surface air is a rather complicated technical task. The paper presents an attempt to analytically determine the distribution of oxygen concentrations in the surface layers of the atmosphere around the places of oxygen runoff from the atmosphere at metallurgical enterprises of Mariupol, provides an analytical model based on the theory of «reverse flow» in a one-dimensional formulation of oxygen flow from the surface layer. The corresponding concentration contour lines were obtained at various distances from the oxygen sink sites. In doing so, the oxygen concentration decreases inversely with the distance from the drain, which makes it quite easy to estimate the distribution of concentrations in the surface layer of the atmosphere around the metallurgical enterprises at known coordinates of its drain points in calm weather. The spatial variability and episodes of anomalous oxygen content in the surface air have been analyzed from considerations of their possible effect on people's well-being.*

Key words: atmosphere, metallurgical plants, oxygen, concentration, harmful emissions, abnormal heat, well-being of the population of industrial cities, population mortality.

Постановка проблеми. Восточная Украина – это индустриальное сердце Украины, где формируется более 30% общего ВВП страны. Это Донецкая, Луганская, Днепропетровская и Запорожская области. При этом на промышленных предприятиях региона в большей степени используются устаревшие технологии. Вследствие этого здесь загрязнение окружающей среды, в т. ч. эмиссия парниковых газов, значительно превышает среднеевропейские показатели [1].

Особенно высокая степень загрязнения окружающей среды наблюдается в г. Мариуполе (Донецкая область), где проживает до 0,5 млн. человек и где находится крупнейший промышленный потенциал региона, в состав которого входят два металлургических предприятия ПАО «ММК им. Ильича» и ПАО «ММК «Азовсталь», являющиеся «градообразующими». В связи с наличием этих предприятий, вредные выбросы которых в окружающую среду составляют порядка 98% от общегородских, экологическая обстановка в городе, оцениваемая комплексным индексом загрязнения атмосферы (КИЗА), достаточно сложная. За 2007-2011 годы этот индекс по данным [2] составлял очень высокое значение, а за 2012 и 2013 годы – высокое значение. Так, в 2011 году в атмосферный воздух города было выброшено почти 382 тыс. т вредных веществ, 2012 году – более 350 тысяч тонн (для сравнения за 2016 год количество выбросов со-

ставило 256 тысяч тонн) [1]. Подробные данные по выбросам вредных веществ в окружающую среду в открытой печати за последние годы практически отсутствуют. Существуют нормы ПДК (предельно допустимых концентраций) веществ в воздухе [2], которые отслеживают специальные органы (лаборатория загрязнения окружающей среды) и принимают соответствующие меры: от штрафа до закрытия предприятия. Санитарно-эпидемиологическая станция (СЭС) г. Мариуполя осуществляет периодический контроль загрязнения атмосферы под факелами предприятий и на постах контроля в Ильичевском (ныне Кальмиусском) и Жовтневом (ныне Центральном) районах города. Остальные меры – штрафы, попытки закрытия предприятий – в большинстве своем скрыты от общественности.

В рейтинге по уровню загрязненности среди городов Украины за 2012 год г. Мариуполь опустился с 1 на 7-ое место, за 2013 год – на 16 место, но оценивается, как высокий [2]. В [2] и на рис. 1 в соответствии с данными Центральной геофизической обсерватории г. Киева в 2014 г. представлена динамика КИЗА г. Мариуполя за период 2000-2013 гг.

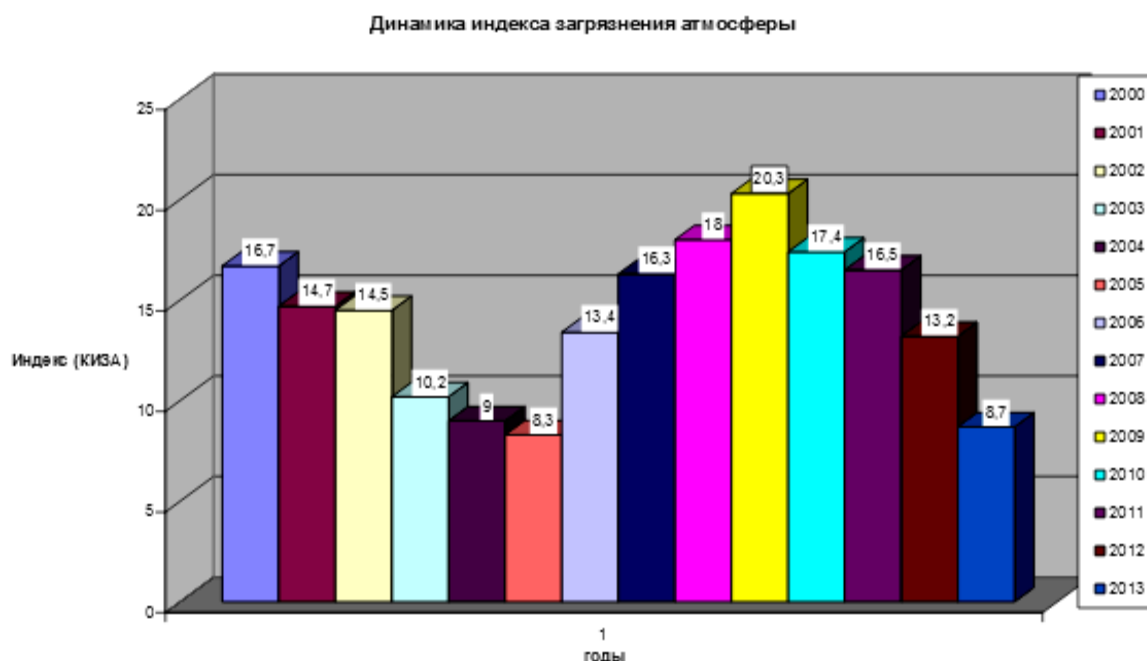


Рис. 1 – Динамика комплексного индекса загрязнения атмосферного воздуха г. Мариуполя с 2000 г. по 2013 г. [2]

На диаграмме представлена динамика падения КИЗА в период с 2000 по 2005 гг. и последующий его рост, связанный с ростом производства в 2006-2009 годах. Падение КИЗА в период с 2009 по 2012 год, когда наблюдался рост объемов производства на комбинатах, связывают в [2] с принятием соответствующих мер по снижению концентраций загрязняющих веществ в атмосфере согласно [1]. В большей степени и в первую очередь это связано с полным демонтажем трех коксовых батарей №№ 5, 7 в июне и октябре 2012 года, батареи № 6 в ноябре этого же года и огромного мартеновского цеха с уникальными качающимися печами (12 печей) на комбинате «Азовсталь» по данным Пресс-центра Группы Метинвест от 25 мая 2011 г. При этом более всего загрязнен воздух в зоне влияния металлургических комбинатов и прилегающих к МК им. Ильича жилых кварталах Ильичевского (ныне Кальмиусского) района и части Жовтневого (Центрального) района города (Кировский жилмассив), расположенного в непосредственной близости от МК «Азовсталь».

Тем не менее, как было указано выше, металлургическая отрасль города находится на ведущем месте среди всех других отраслей промышленности в городе по выбросам в атмосферу. Главной причиной экологических проблем, возникающих в результате деятельности металлургических гигантов, является именно загрязнение атмосферы (рис. 2 и 3). Выбросы из труб приводят к загрязнениям атмосферы, воды и почвы отходами производств, уничтожению расти-

тельности и образованию техногенных зон вокруг предприятий. К тому же, экологические проблемы обостряются в отечественной металлургии из-за устаревших технологий и износа оборудования. До 70% всех мощностей в отечественной металлургии, по некоторым данным, являются устаревшими, изношенными и убыточными.



Рис. 2 – Атмосфера на МК «им. Ильича» в моменты выбросов



Рис. 3 – МК «Азовсталь» загрязняет воздух, воду (шлаковыми отвалами) и почву

Анализ экологической ситуации в г. Мариуполе свидетельствует, что работа металлургических предприятий в области природоохранных мероприятий недостаточно компенсирует выбросы вредных веществ в окружающую среду и необходимо продолжить работы по снижению техногенной нагрузки и модернизации оборудования. Эффект снижения уровня загрязнения воздуха связан, к сожалению, в большей степени со снижением производства в кризисный период и демонтажем основного оборудования комбинатов. Таким образом, выбросы в последние годы сократились в основном не за счёт целенаправленной деятельности по борьбе с ними, а за счёт общей деиндустриализации металлургических комбинатов, т. е. предприятиями используется в основном экстенсивный, а не интенсивный подход к решению экологических проблем. Несмотря на это, они по-прежнему больше всех загрязняют окружающую среду. Кроме того, часто встречающийся в современных условиях непрофессионализм управленческого персонала меткомбинатов в производственных вопросах в некоторых случаях также может привести к повышению (или иногда к снижению) вредных выбросов.

В контексте вышесказанного и вне зависимости от объемов промышленного производства должно обеспечиваться высокое качество очистки вредных выбросов согласно установленным нормам и инструкциям.

Нельзя сказать, что в экологию города металлурги ничего не вкладывают. По данным статистики [1] инвестиции металлургических предприятий в охрану окружающей среды достаточно весомые. Однако вложенные инвестиции не могут решить всех проблем. К тому же в общем объеме экологических инвестиций доля металлургической промышленности постепенно падает. И хотя промышленные предприятия и декларируют, что на природоохранные цели вы-

деляются большие суммы, крайне редко общественности удается узнать, куда именно идут эти деньги. В отношениях же с промышленными гигантами государство проявляет принципиальность пока только в налоговых вопросах.

Наконец, загрязнение атмосферы в Мариуполе является существенным недостатком для развития экономики города, осложняющим поиск новых инвесторов, а с усугубляющимся экономическим фактором – низкой заработной платой основного (рабочего) персонала – и попытки удержать на предприятиях и в городе квалифицированную рабочую силу. Высокий уровень загрязнения окружающей среды препятствует также развитию в регионе туризма [2].

Кроме вышесказанного, население города ощущает также недостаток кислорода (O_2) для дыхания, вызванный высокой температурой воздуха в летний период, экологическими факторами, в т. ч. в первую очередь повышенной концентрацией в городском воздухе угарного газа [3-6] и взвешенных частиц (аэрозолей), мешающих нормальному усвоению кислорода человеческим организмом. А основным фактором, определяющим самочувствие человека, является содержание O_2 , необходимого для дыхания, в окружающем воздухе. Недостаток кислорода в воздухе вызывает у человека кислородное «голодание» (гипоксию) – пониженное содержание кислорода в организме [7-10].

В настоящей статье авторы попытались суммировать и проанализировать полученные расчетные данные о пространственной неоднородности и эпизодах аномального содержания кислорода в приземном воздухе в контексте их возможного влияния на самочувствие людей. Т. к. происходящие в городе процессы загрязнения способствуют более частому возникновению различных аномальных ситуаций, такое исследование актуально не только для мариупольчан. В условиях сильной летней жары в городе и техногенной обстановки в зоне влияния металлургических комбинатов на ближайших территориях от промышленных предприятий в последние несколько лет оказывались, кроме мариупольчан, жители и других городов Украины, например, г. Донецка, Днепропетровска (ныне Днепр), Кривого Рога и Днепродзержинска (ныне Каменское).

Анализ последних исследований и публикаций. Черная металлургия – один из крупнейших потребителей кислорода (технического и технологического). Концентрация кислорода в окружающей атмосфере в силу этих обстоятельств ниже нормы. Кроме того, в городе воздух очень сильно загрязняется вредными выбросами промышленных предприятий. Человек при этом полностью не осознает всю опасность такого положения. Известно [7-10] и как указано в [11], что наиболее эффективно обеспечение кислородом живых организмов, участвующего в окислительно-восстановительных процессах, происходит в тех случаях, когда объемная концентрация кислорода в воздухе составляет не менее 20,8%. Такое содержание кислорода, к сожалению, в условиях города Мариуполя не реализуется. Реализуется лишь в удаленных городских парках (20,8%), загородных зонах (до 21,6%), в т. ч. на берегу моря (до 21,9%). В то же время, в городских районах высокого риска, в жилых и служебных помещениях содержание (концентрация) кислорода в воздухе значительно меньше (20%), что приводит к возникновению у людей гипоксии (кислородной недостаточности). Поскольку недостаток кислорода в 1,5-2,0% вызывает повышенную утомляемость, головную боль, сонливость и другие нарушения активности головного мозга [8], то естественно, что горожан преследуют эти недуги и на улице, и дома, и на работе.

В связи с этим, в медицине [10] разработана классификация типов погоды по воздействию на самочувствие человека (табл.). Среди критериев, определяющих самочувствие человека, используется и концентрация кислорода. На этом основании выделяют погоду трех основных типов [10] (табл.).

Недостаток кислорода в промышленных, герметично замкнутых объемах жилых и служебных помещениях и на открытом воздухе объясняется одинаковыми термодинамическими процессами, но по-разному протекающими.

Массовая концентрация кислорода в приземном воздухе, важная для правильного дыхания, зависит от давления, температуры и влажности воздуха и для совершенного газа и в естественных условиях описывается классическими формулами термодинамики [11].

Поскольку процентное содержание O_2 в атмосферном воздухе достаточно велико, а его изменения в приземном слое атмосферы относительно малы, точные измерения парциальных давления и плотности O_2 требуют специальных методик и дорогостоящего оборудования. Из-

меряется в большинстве случаев не собственно содержание O_2 в воздухе, а отношение его содержания к содержанию азота (N_2) – O_2/N_2 . При этом явно или неявно предполагается, что, на основании меньшей относительной изменчивости азота по сравнению с кислородом, содержание N_2 в атмосферном воздухе неизменно или его изменениями можно пренебречь, т. к. N_2 в воздухе почти в 4 раза больше, чем O_2 . Существуют также более оперативные методы определения отношения O_2/N_2 insitu, позволяющие получать информацию с большим пространственным и временным разрешением, но они обладают значительно меньшей точностью [11].

Таблица

Классификация типов погоды по влиянию на самочувствие людей по отклонениям плотности атмосферного кислорода от его среднего (285 г/м^3) значения в атмосфере Земли [10]

Типы погоды по медицинской общепринятой классификации	Абсолютные отклонения $\Delta\rho$, г/м^3	Самочувствие людей и неблагоприятные симптомы
Благоприятная	5	Хорошее
Умеренно-неблагоприятная	5-10	Утомляемость, сонливость
Неблагоприятная	10-15 и более	Головная боль, потеря сознания

Службы мониторинга состава воздушной атмосферы обычно не проводят измерения плотности кислорода, по-видимому, из-за неявного предположения ничтожного влияния изменения метеоусловий и наличия вредных веществ в воздухе на его содержание. Измерение малых изменений концентраций кислорода в приземном воздухе, кроме того, является достаточно сложной технической задачей. Большинство современных приборов, используемых городскими службами мониторинга атмосферы, предназначены для измерения существенных отклонений концентрации кислорода от нормы в атмосфере.

Кроме того, если некоторые промышленные вредные выбросы (пылевые частицы, конденсат различных веществ и др.) можно заметить визуально, например, как показано на рис. 2, 3, то вредные газообразные компоненты и изменение состава газовой атмосферы в приземном слое визуально заметить практически невозможно. К тому же, в [1, 2] в приведенных данных периодического контроля загрязнения атмосферы санитарно-эпидемиологической станцией (СЭС) г. Мариуполя отсутствуют данные по содержанию кислорода в приземном слое атмосферы, играющего колоссальную роль в самочувствии населения города, на постах контроля в Ильичевском и Жовтневом районах (ныне Кальмиусском и Центральном) и в подфакельных исследованиях качества атмосферного воздуха в зоне влияния металлургических комбинатов.

Цель работы – попытка аналитического определения распределения концентрации O_2 в приземном слое атмосферы на территории металлургических предприятий г. Мариуполя и в их окрестности в связи с большими расходами кислорода на нужды металлургических комбинатов. В этой связи ставится задача аналитически рассчитать распределение концентраций кислорода в приземном слое вокруг промплощадок основных его стоков из окружающего воздуха на металлургических комбинатах (ТЭЦ-ПВС, ПЭВС + БР, и др.) на основе метода (теории) «обратной струи».

Изложение основного материала. Содержание кислорода в атмосферном воздухе города и в различных помещениях (жилых, офисных и производственных) является ключевым фактором как самочувствия, так и здоровья горожан. Для качественного регулирования роли этого фактора городским СЭС необходимо развитие системы мониторинга, оценки и прогноза концентрации (или парциальной плотности) кислорода в городском воздухе, а также информирование населения об аномальных ситуациях, возникающих при недостатке кислорода, особенно в критические периоды образования в приземном слое инверсионных слоев, когда имеют место неблагоприятные метеоусловия (НМУ) для рассеивания и распространения в атмосфере поступающих в нее от предприятий вредных веществ.

Поскольку на самочувствие человека непосредственное влияние оказывает массовая концентрация кислорода, изменяющаяся как в приземном слое атмосферы вокруг промышленных предприятий, так и при изменении метеорологических условий, возникает необходимость унификации информации о качестве воздуха для дыхания. Окончательную информацию удобно

давать в терминах парциальной плотности кислорода (предпочтительней в $г/м^3$), для которых уже существует медицинская классификация [10]. Необходимо уделять особое внимание случаям минимальной концентрации кислорода в воздухе, которая соответствует высокой температуре, низкому давлению, высокой абсолютной влажности приземного воздуха, загрязненности атмосферы угарным газом и взвешенными частицами и самому главному в условиях промышленного производства – стоку кислорода из атмосферы для технологических нужд металлургических предприятий. Присутствие этих характерных признаков затрудняет дыхание горожан, приводит к повышению заболеваемости и смертности.

Для самочувствия человека важна величина парциальной плотности кислорода в приземной атмосфере, которая определяется уравнением состояния для сухой части воздуха [11]:

$$\rho_{nO_2} = C_{O_2} \frac{(P - e)}{R_g T}, \quad (1)$$

где ρ_{nO_2} – парциальная плотность кислорода;

C_{O_2} – объемное содержание (парциальное давление) кислорода в приземном воздухе;

T , P и e – соответственно, температура, давление и упругость водяного пара в приземном воздухе;

R_g – газовая постоянная воздуха.

В соответствии с (1) и как указывалось выше, содержание кислорода во вдыхаемом человеком воздухе в зависимости от метеорологических условий падает при понижении давления в атмосфере и росте температуры воздуха. Поэтому его минимальных значений следует ожидать, кроме фактора влияния промышленных предприятий, и в циклональных условиях, когда давление резко понижается, например, перед грозой. У многих людей в такие периоды возникает ощущение затрудненного дыхания.

Ниже, на основе представленной теории «обратной струи», представлены результаты расчета распределения концентраций кислорода в атмосфере вокруг промплощадки (ТЭЦ-ПВС, ПЭВС, компрессорные станции блока разделения кислородного цеха и др. цехов металлургических предприятий) его потребителей, где происходит сток кислорода из окружающего воздуха, а также расчетные данные о пространственной изменчивости концентрации O_2 в приземном воздухе в контексте ее возможного влияния на самочувствие человека.

В связи со сложностью определения массовой концентрации (парциальной плотности) кислорода измерительными устройствами в приземном слое атмосферы и отсутствием данных городской СЭС в [1, 2] по ним, оценим возможное уменьшение количества кислорода в связи со стоком его из окружающей атмосферы на металлургических предприятиях аналитически. Пусть происходит это через точечное «отверстие стока» конечных размеров сосредоточенным оттоком массы кислорода из неподвижной окружающей воздушной атмосферы в приземном слое (в безветренную погоду). При этом это «отверстие» заменяет воздушные всасывающие линии компрессоров (турбокомпрессоров, электрокомпрессоров и др.) указанных потребителей и предполагается, что обратно в эту же область атмосферы весь азот этого всасываемого воздуха возвращается. В связи с этим можно считать, что из приземного слоя воздушной атмосферы происходит лишь сток кислорода. Для определения распределения концентрации O_2 в приземном слое атмосферы применим метод «обратной струи» в квазиодномерной постановке. Воспользуемся законом сохранения массового расхода газа [12, 13], допуская, что линии постоянной скорости (изотакси) и концентрации в «обратной струе» имеют вид полуокружностей. Центром этих окружностей является центр тяжести отверстия. Живое сечение струи – боковая поверхность полушара ($F = 4\pi R^2$). В такой постановке, принимая равномерное распределение скорости по живому сечению, являющемуся поверхностью полушара, это уравнение приобретает вид:

$$m = \int_F \rho u \Delta C dF = \rho_{оме} u_{оме} \Delta C_{оме} F_{оме},$$

или учитывая равномерное распределение скорости по живому сечению F

$$\rho u \Delta C \cdot 4\pi R^2 = \rho_{оме} u_{оме} \Delta C_{оме} \cdot 4\pi R_{оме}^2,$$

где ρ – плотность газа;

u – скорость газа;

$\Delta C = C - C_{атм}$ – избыточная концентрация кислорода в живом сечении сточной струи.

Индекс «омв» отражает параметры в отверстии. Допуская, что толщины динамического и диффузионного слоев одинаковы, т. е. числа Прандтля и Шмидта равны ($Pr = Sc$), и сточный поток несжимаем ($\rho = const$), получим

$$\Delta C = \Delta C_{омв} \cdot \frac{R_{омв}}{R} = \frac{\Delta C_{омв}}{\bar{R}}, \quad (2)$$

где $\Delta C_{омв} = C_{омв} - C_{атм}$ – избыточная концентрация кислорода в живом сечении отверстия стока;

$C_{атм}$ – концентрация кислорода в атмосфере в дальнем поле струи;

$R_{омв}$ – радиус «отверстия»;

\bar{R} – радиус сточного потока («струи») в калибрах отверстия.

В связи с совпадением толщин динамического и диффузионного слоев при этом соблюдается соотношение

$$\frac{u}{u_{омв}} = \frac{\Delta C}{\Delta C_{омв}}.$$

К такому же соотношению (2) можно прийти, используя закон сохранения импульса сточной «струи».

С учетом сжимаемости (изменения плотности) газа ($\rho \neq const$) уравнение (2) в дальнем поле «струи» принимает вид

$$\Delta C = \Delta C_{омв} \cdot \frac{R_{омв}}{R} \sqrt{\frac{\rho_{омв}}{\rho_{\infty}}} = \frac{\Delta C_{омв}}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\rho_{омв}}{\rho_{\infty}}}. \quad (3)$$

Таким образом, с ростом расстояния от стока кислорода избыточная концентрация кислорода в подсосываемом в «отверстие» потоке уменьшается.

Парциальную плотность кислорода в приземной атмосфере (в среднем на земном шаре она составляет около 285 г/м^3), которая определяется уравнением (1) состояния для сухой части воздуха [11], представим в виде:

$$\rho_n = C_{O_2} \frac{(P - p_{нп})}{R_2 T}.$$

Согласно соотношению (3)

$$C_{O_2} = C_{O_2 \text{ атм}} + (0 - C_{O_2 \text{ атм}}) \cdot \frac{R_{омв}}{R} \sqrt{\frac{\rho_{омв}}{\rho_{\infty}}} = C_{O_2 \text{ атм}} \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\rho_{омв}}{\rho_{\infty}}} \right), \quad (4)$$

где C_{O_2} и $C_{O_2 \text{ атм}}$ – соответственно, объемное содержание кислорода в приземном воздухе и в дальнем поле приземного воздуха;

P , T и $p_{нп}$ – соответственно, давление, температура и упругость водяного пара в приземном воздухе;

R_2 – газовая постоянная.

Тогда в соответствии с выражением (4) парциальная плотность кислорода в приземном слое будет

$$\rho_n = C_{O_2 \text{ атм}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{\rho_{омв}}{\rho_{\infty}}} \right) \cdot \frac{(P - p_{нп})}{R_2 T}. \quad (5)$$

На рис. 4 приведены результаты расчета по (4) изменению концентрации кислорода в приземном слое вокруг цехов двух металлургических предприятий г. Мариуполя, где наблюдается сток кислорода (ТЭЦ-ПВС, ПЭВС, компрессорные станции блока разделения кислородного цеха (БР) и др + БР). При этом диаметр «отверстия» принят на основании существующих на предприятиях действительных расходов кислорода и воздуха при известных допустимых скоростях движения газов во всасывающих линиях компрессоров.

На рис. 4 приведены концентрические изолинии (равной) концентрации кислорода на различных расстояниях от его стока, соответственно, в системе ТЭЦ-БР на территории комби-

ната им. Ильича – 450, 900, 1800 м, и ПЭВС на территории комбината «Азовсталь» – 450, 1000, 2250 м. При этом концентрация кислорода в дальнем поле окружающей атмосферы принята равной 21%, что является завышенной и на территории комбинатов не наблюдается.

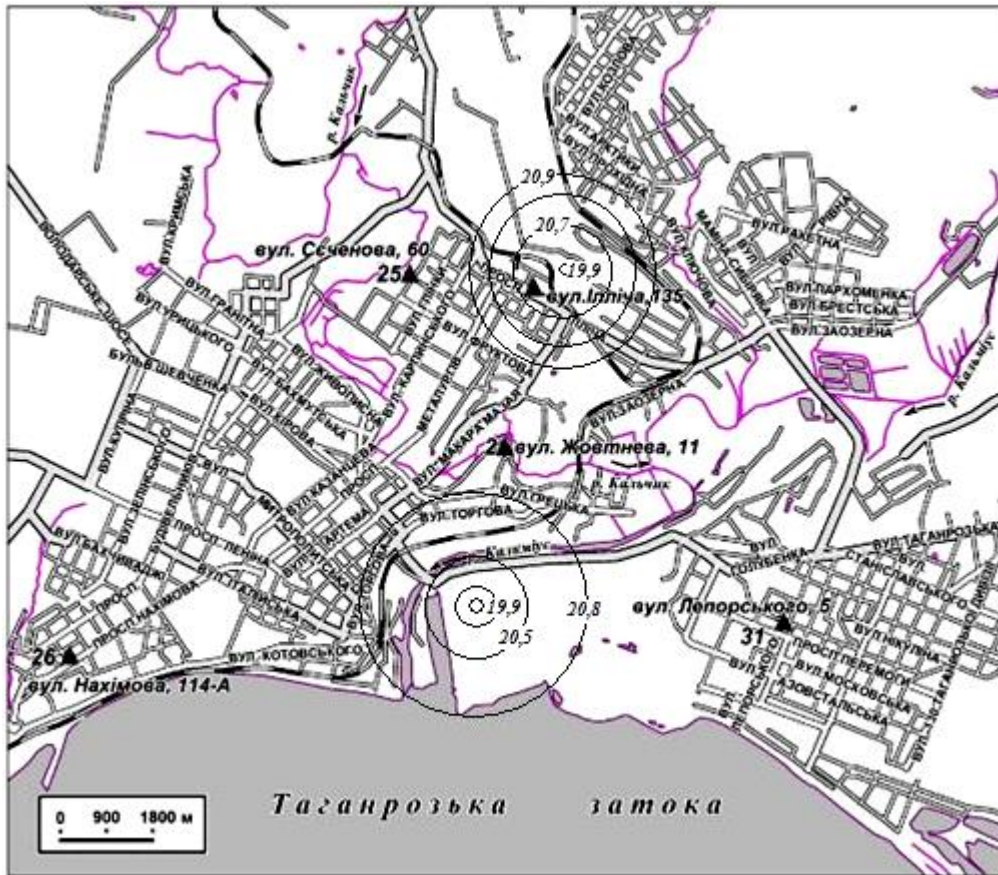


Рис. 4 – Пример распределения пространственной изменчивости содержания (концентраций) кислорода в приземном слое воздуха вокруг мест расположения его стоков на ТЭЦ-ПВС комбината им. Ильича и ПЭВС МК «Азовсталь» (○) и схема расположения постов (▲) Мариупольской гидрометеорологической обсерватории на карте г. Мариуполя

При этом концентрация кислорода снижается обратно пропорционально расстоянию от стока, что позволяет достаточно просто оценивать распределение концентраций в приземном слое атмосферы вокруг металлургических предприятий при известных координатах мест его стока в безветренную погоду. Результаты расчета показывают, что на расстоянии от места стока в 100-200 м концентрация кислорода находится ниже нормы ($15 \div 17\%$ по объему), что подтверждается замерами.

Следует отметить, что при определении концентрации кислорода в приземном слое и наличии близких друг другу стоков применим принцип суперпозиции (наложения полей концентраций).

Таким образом, представленный подход достаточно точно оценивает распределение O_2 в окружающей среде вокруг мест его стока. Преимущество данной методики – отсутствие измерительных средств для определения концентрации O_2 .

Выводы

1. С использованием представленной аналитической модели пространственного распределения содержания (концентраций) кислорода в приземном слое воздуха вокруг мест расположения его стоков определены основные параметры такого режима. Оценены величины концентрации и парциальной плотности кислорода на различных расстояниях от мест усилен-

ных его стоков. Показано, что «эффективность» кислородного голодания в совокупности с наличием вредных выбросов, в т. ч. угарного газа, растет.

2. Для создания полной картины распределения параметров (плотности, массовой концентрации и др.) кислорода необходимо продолжить исследования по распределению стоков (или притоков) других составляющих атмосферного воздуха (азот, углекислый газ и др.) и производительности агрегатов для производства сжатого технологического и технического кислорода, а также сжиженного с уточнением представленной модели.
3. При дальнейших исследованиях в рассматриваемом направлении целесообразным является учет направления ветра, влажности, температуры и давления в атмосфере, что позволит получить более точные данные по распределению парциальной плотности кислорода в приземном слое, разработать более эффективные методы для защиты окружающей среды и снижения вредного воздействия на персонал металлургических комбинатов и население близлежащих к ним жилых районов г. Мариуполя.

Список использованных источников:

1. Программа охраны и оздоровления окружающей среды Мариуполя на 2012-2020 гг. – Мариуполь, 2011. – 93 с. – Режим доступа : <http://userdocs.ru/geografiya/11131/index.html?>
2. Мастер-план «Чистый воздух для Мариуполя» / М. Шмидт, В. Белоус, Т. Венцова, А. Капустин. – Мариуполь, 2015. – 75 с. – Режим доступа : <http://www.lib.knigi-x.ru/23raznoe/85693-1-1-master-plan-chistiy-vozduh-dlya-mariupolya-otchet-mihael-shmidt-prof-aleksey-k.php>.
3. Российская энциклопедия по охране труда : в 3 т. / рук. проекта М.Ю. Зурабов; отв. ред. А.Л. Сафонов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : НЦ ЭНАС, 2007. – 2 т. – 408 с.
4. Отравление монооксидом углерода (угарным газом) / Под ред. Ю.В. Зобнина. – СПб. : Тактик-Студио, 2011. – 86 с.
5. Тиунов Л.А. Токсикология окиси углерода / Л.А. Тиунов, В.В. Кустов. – М. : Медицина, 1980. – 288 с.
6. Steinbach J. Enhancing the usability of atmospheric oxygen measurements through emission source characterization and airborne measurements : Dissertation Dr. Rer. Nat. / Julia Steinbach. – 2010. – 145 p. – Mode of access: DOI: 10.4126/98-004421250.
7. Атмосфера : Справочник (справочные данные, модели) / Под ред. Ю.С. Седунов [и др.]. – Л. : Гидрометеоиздат, 1991. – 509 с.
8. Гипоксия. Адаптация, патогенез, клиника / Под ред. Ю.Л. Шевченко. – СПб. : Элби-СПб, 2000. – 384 с.
9. Замолодчиков Д.Г. Кислород – основа жизни / Д.Г. Замолодчиков // Вестник РАН. – 2006. – Т. 76, № 3. – С. 209-218.
10. Овчарова В.Ф. Гомеокинез в погодную гипоксию и гипероксию / В.Ф. Овчарова // Климат и здоровье человека : труды Межд. симпозиума ВМО/ВОЗ/ЮНЕП СССР (22-26 сентября 1986 г.; Ленинград). – Л. : Гидрометеоиздат, 1988. – Т. 2. – С. 142-149.
11. Содержание кислорода в атмосфере крупных городов и проблемы дыхания / А.С. Гинзбург, [и др.] // Геофизические процессы и биосфера. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 5-19. – Режим доступа: DOI: 10.1134/S0001433814080040.
12. Капустин Е.А. Одномерная теория струй газа / Е.А. Капустин, Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ПДТУ. – Мариуполь, 2001. – № 11. – С. 243-249.
13. Лухтура Ф.И. О закономерностях затопленных струйных течений / Ф.И. Лухтура // Вісник Приазовського державного технічного університету : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – № 30, т. 1. – С. 202-212. – (Серія : Технічні науки).

References:

1. *Programma okhrany i ozdorovleniia okruzhaiushchei sredy Mariupolia na 2012-2020 gg* [Program of Mariupol environment protection and improvement for 2012-2020]. Mariupol, 2011. 93 p. (Rus.) Available at: <http://userdocs.ru/geografiya/11131/index.html?> (accessed 15 October 2018). (Rus.)
2. Schmidt M., Belous V., Ventsova T., Kapustin A. *Master-plan «Chistyi vozdukh dlia Mariupolia»* [Master Plan «Clean Air for Mariupol»]. Mariupol, 2015, 75 p. Available at: <http://www.lib.knigi->

- x.ru/23raznoe/85693-1-1-master-plan-chistiy-vozduh-dlya-mariupolya-otchet-prof-mihael-shmidt-prof-aleksey-k.php (accessed 01 December 2018). (Rus.)
3. *Rossiiskaia entsiklopediia po okhrane truda* [Russian encyclopedia on labor protection]. Moscow, NTS ENAS Publ., 2007, vol. 2. 408 p. (Rus.)
 4. Zobnin Yu.V. *Otravleniye monooksidom ugleroda (ugarnym gazom)* [Carbon monoxide poisoning (carbon monoxide)]. St. Petersburg, Taktik-Studio Publ., 2011. 86 p. (Rus.)
 5. Tiunov L.A., Kustov V.V. *Toksikologiya okisi ugleroda* [Toxicology of carbon monoxide]. Moscow, Meditsina Publ., 1980. 288 p. (Rus.)
 6. Steinbach J. Enhancing the usability of atmospheric oxygen measurements through emission source characterization and airborne measurements. Dissertation Dr. Rer. Nat. 2010. 145 p. **doi: 10.4126/98-004421250.**
 7. *Atmosfera: Spravochnik (spravochnyye dannyye, modeli)* [Atmosphere: Reference (reference data, models)]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991. 509 p. (Rus.)
 8. Shevchenko Yu.L. *Gipoksiya. Adaptatsiya, patogenez, klinika* [Hypoxia. Adaptation, pathogenesis, clinic]. St. Petersburg, Elbi-SPB Publ., 2000. 384 p. (Rus.)
 9. Zamolodchikov D.G. Kislород – osnova zhizni [Oxygen - the basis of life]. *Vestnik RAN – Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2006, vol. 76, no. 3, pp. 209-218. (Rus.)
 10. Ovcharova V.F. Gomeokinez v pogodnuyu gipoksiyu i giperoksiyu. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma VMO/VOZ/YUNEP SSSR* [Gomeokinez in weather hypoxia and hyperoxia. Proceedings of the International WMO / WHO / UNEP Symposium of the USSR]. Leningrad, 1988, vol. 2. pp. 142-149. (Rus.)
 11. Ginzburg A.S., Vinogradova A.A., Fodorova Ye.I., Nikitich Ye.V., Karpov A.V. Soderzhaniye kisloroda v atmosfere krupnykh gorodov i problemy dykhaniya [Oxygen content in the atmosphere of large cities and respiratory problems]. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera – Geophysical processes and biosphere*, 2014, vol. 13, no. 2, pp. 5-19. **doi: 10.1134/S0001433814080040.** (Rus.)
 12. Kapustin E.A., Lukhtura F.I. Odnovymirna teoriya strumeniv hazu [One-dimensional theory of gas jets]. *Visnyk Pryazovs'koho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, 2001, iss. 11, pp. 243-249. (Rus.)
 13. Lukhtura F.I. O zakonomernostyakh zatoplennykh struynykh techeniy [On the laws of flooded stream flows]. *Visnyk Pryazovs'koho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Seriya: Tekhnichni nauki – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, 2015, iss. 30, vol. 1, pp. 202-212. (Rus.)

Рецензент: Н.Ю. Елистратова
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.04.2019