

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.88.33.010

УДК 614.71

© Е. С. Кулакова, А. М. Сафаров, В. И. Сафарова, 2025

Е. С. КУЛАКОВА

канд. техн. наук, доцент

Институт химических технологий и инжиниринга
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, г. Стерлитамак

e-mail: kulakova87@list.ru



А. М. САФАРОВ

д-р техн. наук, проф.

Институт химических технологий и инжиниринга
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, г. Стерлитамак

e-mail: safarov_a_m@mail.ru



В. И. САФАРОВА

д-р хим. наук, проф.

Институт химических технологий и инжиниринга
Уфимский государственный нефтяной технический
университет, г. Стерлитамак

e-mail: ugak2004@mail.ru



К ВОПРОСУ О ВЕРХОВЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЯХ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

В статье приведены результаты эксперимента по определению концентрации метана и оксида серы в атмосферном воздухе различных высотах при температуре воздуха 263, 273, 293 К, давлении 1 атм., скорости ветра 1 м/с, 4 м/с, 8 м/с, при выбросе с точечного источника 100 мг/с по гауссовому уравнению турбулентной диффузии. Выявлено, что при отсутствии осадков высокие концентрации веществ отмечаются на уровне источника выброса. Полученные результаты на основе математической модели наглядно отображают высокий риск негативного влияния высококонцентрированного промышленного газового облака на жизнедеятельность людей, проживающих в многоэтажных домах.

Ключевые слова: АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ, АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ, ВЕРХОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ, ВЫБРОС, ГАУССОВО УРАВНЕНИЕ, ТУРБУЛЕНТНАЯ ДИФФУЗИЯ, МЕТОД ГИЛЛЕЛЕНДА, СЕРНИСТЫЙ АНГИДРИД, МЕТАН.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос качества атмосферного воздуха в городах сегодня является достаточно острым. Люди непрерывно обращаются к органам государственной власти, организациям, уполномоченным в области охраны

окружающей среды при появлении посторонних запахов в воздухе.

Подача жалоб населением и их отработка ведутся в оперативном режиме ввиду повсеместной цифровизации общественных процессов. Любой житель города, почувствовав

Таблица 1

Статистические данные о результатах регионального экологического мониторинга атмосферного воздуха Республики Башкортостан

Год	Кол-во жалоб от населения	Кол-во нарушений воздухоохранного законодательства
2011	367	1127
2012	939	1180
2013	981	903
2014	1223	821
2015	1634	765
2016	1560	612
2017	1648	898
2018	–	649
2019	1734	796
2020	1583	291
2021	1860	1247
2022	1242	463

нехарактерный запах, сразу, посредством телефона, может заявить о проблеме в любое ведомство. Для примера приведены статистические данные о результатах регионального экологического мониторинга атмосферного воздуха Республики Башкортостан (табл. 1) [1].

В свою очередь, организации непрерывно в любое время суток получают обращения [2–6]. В данном процессе есть как положительные, так и отрицательные стороны. Быстрая подача жалобы позволяет своевременно на нее реагировать, устранить причины, выявить и наказать виновника. В случае выявления проблемы повышения концентрации токсикантов в атмосферном воздухе на место выезжает передвижной пост. Он осуществляет замеры, формирует требуемые протоколы. По результатам проверки направляются предписания в организации, имеющие источники выброса, с требованием изменения параметров выпуска загрязненных газовых смесей. Однако повсеместно люди в жалобах указывают, что воздух имеет неприятный запах на высоких этажах многоквартирных домов. Существующие системы мониторинга не позволяют проводить измерение и регистрацию загрязняющих веществ на высоте выше

3,5 м от земли [7–9]. Иными словами, органы, уполномоченные в области охраны окружающей среды, не имеют технической возможности провести требуемые работы по установлению качества атмосферного воздуха выше 2 этажа зданий. Маршрутный пост приедет на место обращения, проведет замеры на уровне 2–3,5 м от уровня земли. На высоту выше невозможно перенести станцию контроля и взять арбитражную пробу. Так, человек жалуется на загрязнение воздуха на высоте, а маршрутный пост или стационарная автоматизированная станция контроля не регистрируют нарушений. Подобные ситуации возникают повсеместно. Возникает конфликтная ситуация. Аналогичные случаи возникают в городах большой химии и нефтехимии.

На законодательном уровне в России контроль качества атмосферного воздуха осуществляется на высоте до 3,5 м. Это указано в Руководстве по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186–89 [10]. Техническая возможность проведения лабораторных исследований воздуха на высотах выше отсутствует. В условиях изменения условий жизнедеятельности населения, а именно этажность многоквартирных домов в среднем составляет

10–15 м, требуется разработка теоретической основы для изменения существующих методик автоматизированного мониторинга атмосферно воздуха.

Провести эксперимент по установлению закономерности изменения концентрации веществ в атмосферном воздухе на разных высотах на территории активного промышленного выброса затруднительно. Требуется установка, содержащая несколько стационарных поточных газоанализаторов, расположенных на различной высоте по вертикали, осуществляющая измерение и регистрацию показателей качества, метеорологические параметры. Методы математического моделирования позволяют имитировать процесс, провести виртуальный эксперимент, сделать соответствующие выводы.

Целью исследования является анализ изменения концентрации метана и сернистого ангидрида в атмосферном воздухе согласно гауссову уравнению турбулентной диффузии.

Материалы и методы

По гауссову уравнению турбулентной диффузии определено изменение содержания загрязняющих веществ в воздухе на различных высотах при выбросе с точечного источника 100 мг/с. Эффективная высота подъема выброса составляет 30 м. Условия внешней среды: температура 263, 273, 293 К, давление 1 атм., скорости ветра 1 м/с, 4 м/с, 8 м/с. Осадки отсутствуют. Объектами исследования являются концентрации газов CH_4 , SO_2 в атмосферном воздухе территории влияния промышленного выброса на расстоянии от 50 до 10 000 м.

Гауссово уравнение турбулентной диффузии примесей в приземном слое атмосферного воздуха описывается уравнением [11]:

$$C(x, y, z, t) = \frac{M}{8(k\pi t)^{3/2}} \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{4kt}} \cdot e^{-\frac{y^2}{4kt}} \cdot \left(e^{-\frac{(z-h)^2}{4kt}} + e^{-\frac{(z+h)^2}{4kt}} \right) \cdot e^{-\lambda t}$$

где M — мощность источника выброса, мг/с; t — время распространения выброса, с; k — коэффициент турбулентной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; v — скорость ветра, м/с; H — эффективная

высота подъема выброса, м; λ — коэффициент, учитывающий тип осадков (например, при отсутствии осадков $\lambda = 0$).

Коэффициент турбулентной диффузии вычислен по методу Гиллеленда [11]:

$$k = \frac{0.0043 \cdot T^{3/2}}{p(V_{m1}^{1/3} + V_{m2}^{1/3})^2} \cdot \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2}$$

где T — абсолютная температура воздуха, К; V_{m1} — молярный объем воздуха, $\text{м}^3/\text{моль}$; V_{m2} — молярный объем загрязнителя, $\text{м}^3/\text{моль}$; M_1 — молярная масса воздуха, г/моль; M_2 — молярная масса загрязнителя, г/моль; p — атмосферное давление, атм.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен расчет изменения концентрации сернистого ангидрида и метана в атмосферном воздухе на различных высотах в условиях выброса из точечного источника 150 мг/с при следующих метеорологических условиях: температура 0 °С, давление 1 атм., сила ветра 1 м/с, 4 м/с, 8 м/с, отсутствие осадков (рис. 1). Согласно полученным результатам, на высоте 27 метров и ниже, 33 метра и выше содержание загрязняющих веществ мало. Составляет менее 10^{-6} мг/м³.

Согласно полученным графикам с увеличением скорости газовое облако располагается дальше от источника выброса. Причем максимум концентрации токсиканта отмечается на высоте 30 м., на уровне промышленного источника. На высотах выше и ниже уровня 30 м концентрация метана снижается в 1000 раз, а оксида серы — в 5000 (для скорости ветра 1 м/с).

Согласно гауссову уравнению турбулентной диффузии при отсутствии осадков газовое облако, содержащее токсиканты в высокой концентрации, располагается на высоте 30 м на расстоянии от 500 м до 10000 м. Причем при скорости ветра 1 м/с содержание загрязняющих веществ в 5–10 раз меньше, чем при 4 м/с и 8 м/с. Так, на высоте 30 м и на расстоянии от источника до 10 км с наветренной стороны концентрация метана и оксида серы высока, кратна ПДК.

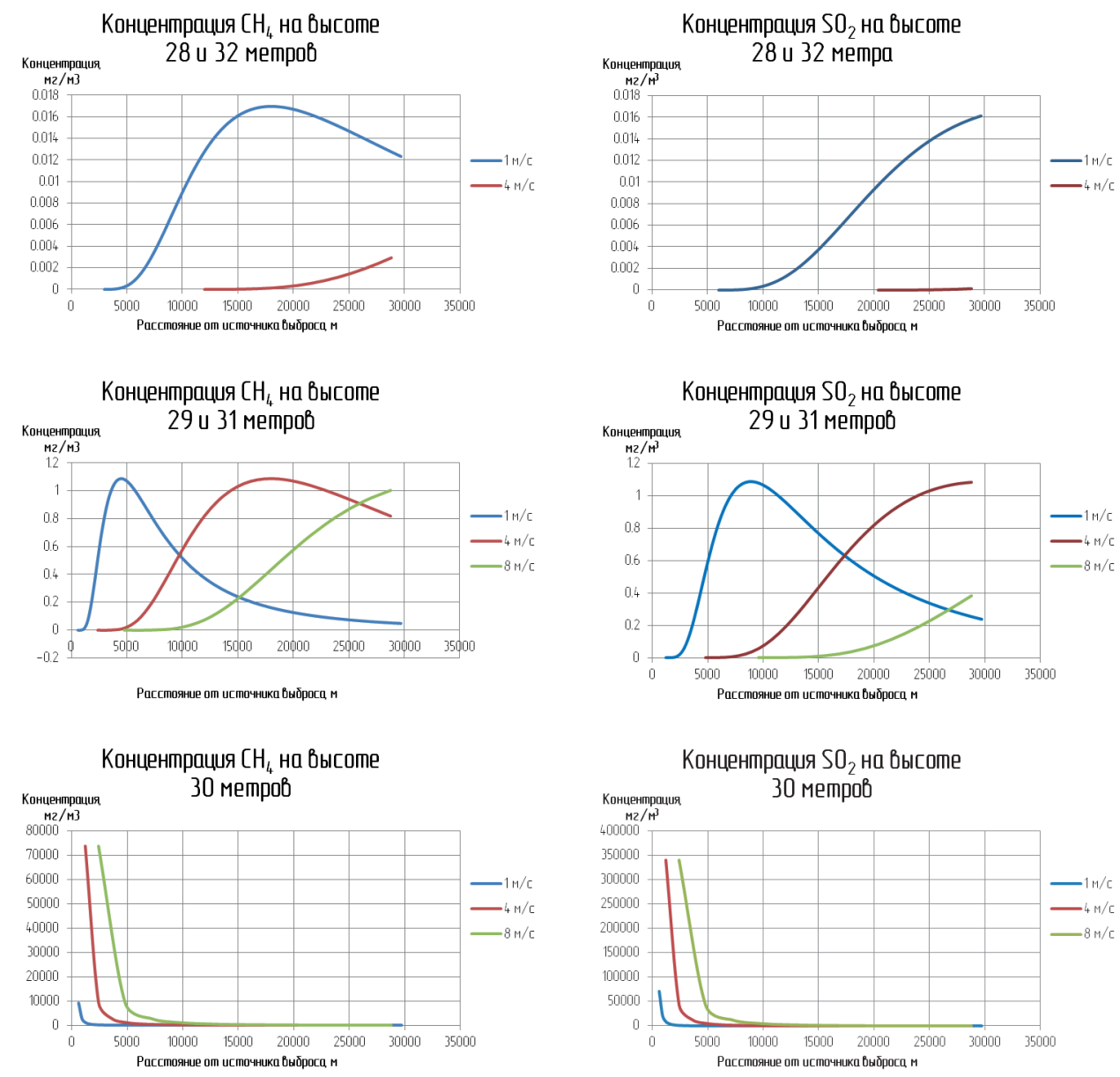


Рис. 1. Графики изменения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на высоте 27, 28, 30 и 31 м на расстоянии от 50 до 10 000 м при температуре 0 °С, давлении 1 атм., отсутствие осадков

Графики на рис. 1, 2, 3 наглядно демонстрируют снижение концентрации токсикантов на высоте 30 м с увеличением температуры, что обусловлено ускорением диффузии загрязненного газового облака. Например, содержание SO_2 при скорости ветра 4 м/с и температуре атмосферного воздуха -10°C в 1,26 раза больше, чем при $+10^\circ\text{C}$. На иных высотах изменение концентрации при различной температуре воздуха незначительно.

С высотой изменяются расстояния от источника, на которых получены

максимальные значения концентрации загрязняющего вещества. Наибольшая концентрация метана на высоте 28 м при скорости ветра 1 м/с отмечается на расстоянии 19 км от источника (оксида серы более 30 км), 29 м — 4,8 км (оксида серы 8 км), 30 м — 1 км (оксида серы 1,2 км).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическая модель движения загрязненного газового облака показывает расположение высотных зон увеличенной нагрузки на

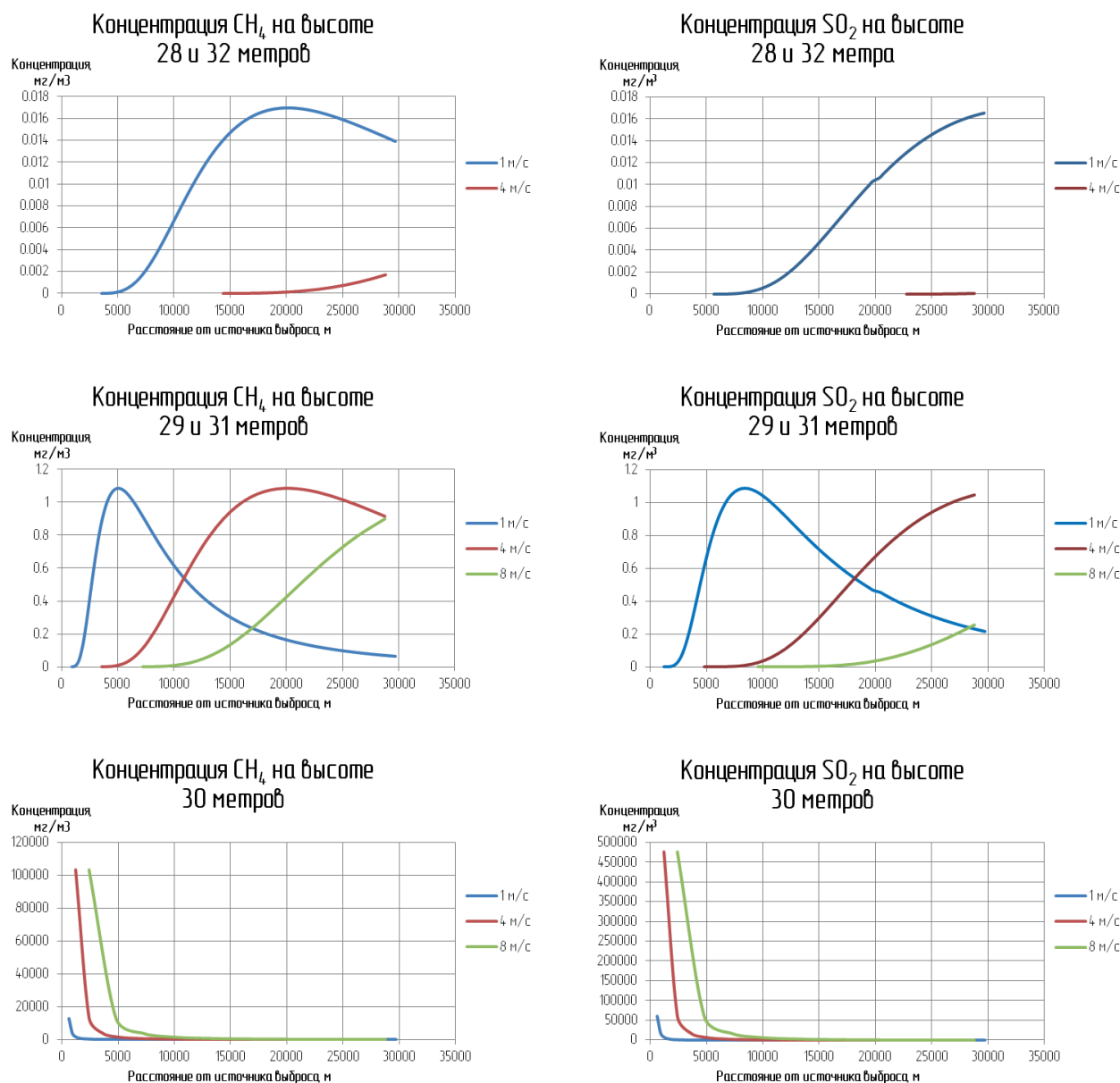


Рис. 2. Графики изменения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на высоте 27, 28 и 30 м, на расстоянии от 50 до 10000 м, при температуре -10°C , давлении 1 атм., отсутствие осадков.

качество атмосферного воздуха селитебной зоны. Выявлено, что при отсутствии осадков высокие концентрации веществ отмечаются на уровне источника выброса, например, 30 м. Она сохраняется на большом расстоянии от источника, до 20 км. Несмотря на то, что промышленные предприятия, в большинстве случаев, располагаются на окраине городов, загрязненное газовое облако, при определенных ветровых характеристиках, может пересекать городские жилые массивы. Полученные результаты на основе математической

модели наглядно отображают высокий риск негативного влияния высококонцентрированного промышленного газового облака на жизнедеятельность людей, проживающих в многоквартирных домах.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках программы Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «ПРИОРИТЕТ 2030» (Национальный проект «Наука и университет»).

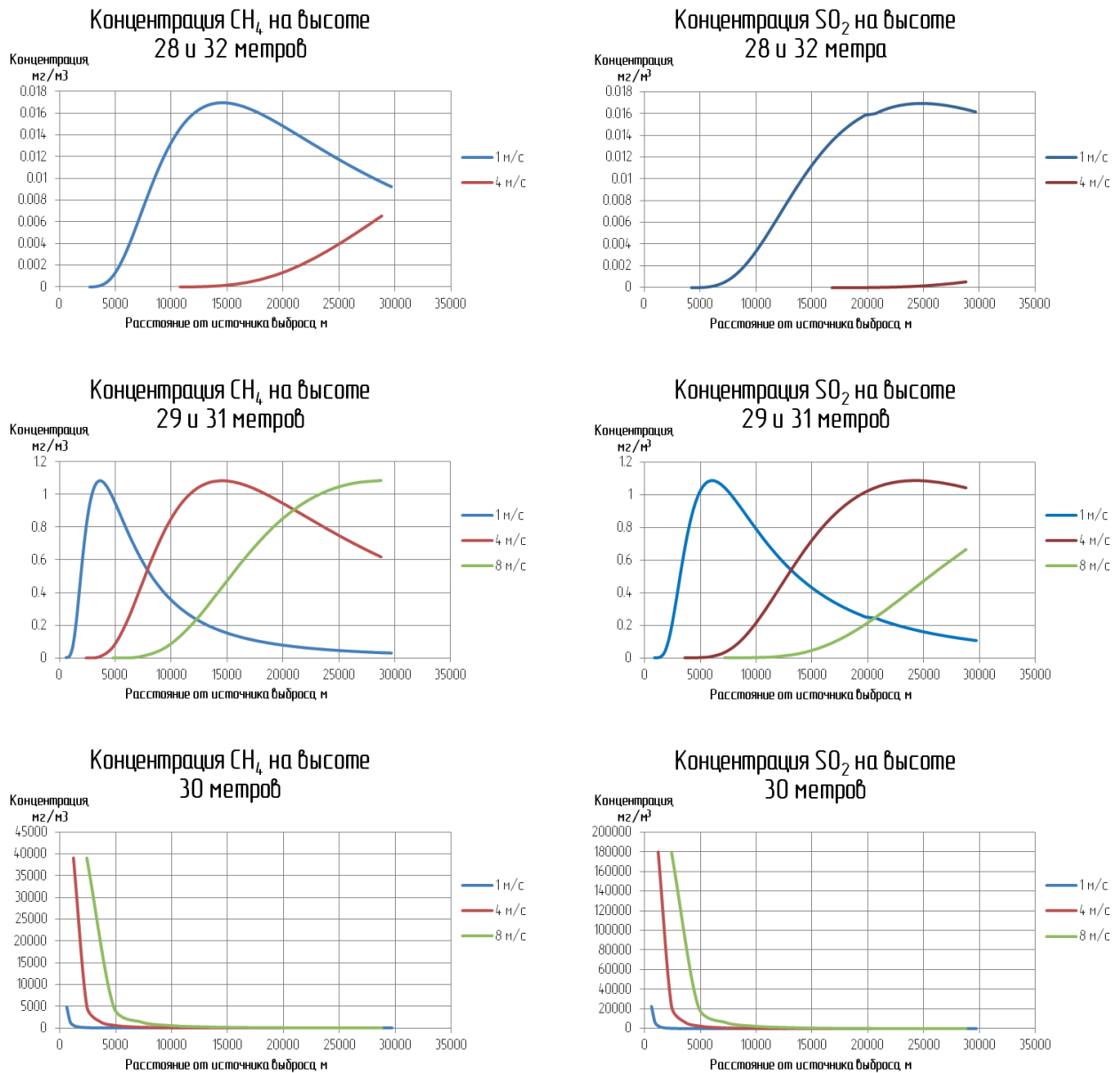


Рис. 3. Графики изменения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на высоте 27, 28 и 30 м, на расстоянии от 50 до 10 000 м, при температуре +20 °С, давлении 1 атм., отсутствие осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Государственные доклады о состоянии природных ресурсов и окружающей среды Республики Башкортостан в 2013–2022 годах, г. Уфа.

2 Карелин А. О., Ломтев А. Ю., Фридман К. Б. Выявление источников выбросов загрязняющих веществ, вызывающих жалобы населения на неприятные запахи // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98. № 6. С. 601–607.

3 Штриплинг Л. О., Баженов В. В., Баженова Н. С., Нор П. Е. Совершенствование системы мониторинга атмосферного воздуха в населенном пункте // Омский научный вестник. 2020. № 3(171). С. 80–85.

4 Рагозина Л. И., Сергеев М. Ю. Опыт и сложности при проведении мероприятий по снижению вредного влияния промышленного комплекса на атмосферный воздух деревни

Давыдово Орехово-зюевского района Московской области // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. 2018. № 3(300). С. 18–22.

5 Школьных Д. А., Кириллов С. Н., Холоденко А. В. Влияние предприятия черной металлургии на состояние санитарно-защитной зоны // Проблемы региональной экологии. 2021. № 2. С. 92–96.

6 Марцынковский О. А., Цибульский В. В., Снопковская О. В. Развитие подходов к управлению запахами в атмосферном воздухе // Стандарты и качество. 2024. № 3. С. 96–100.

7 Кулакова Е. С. Бензол и его гомологи в атмосферном воздухе города Бельской мегавпадины Предуралья восточно-Европейской равнины // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2022. № 4. С. 115–124.

8 Сафаров А. М., Шайдулина Г. Ф., Афанасьева Е. С. Построение моделей изменения концентрации веществ в атмосферном воздухе (на примере г. Стерлитамака) // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2018. № 1(21). С. 54–65.

9 Сафаров А. М., Сафарова В. И., Шайдулина Г. Ф., Афанасьева Е. С. Математическая оценка изменения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в условиях влияния нефтехимических предприятий // Экология урбанизированных территорий. 2014. № 4. С. 40–45.

10 РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Гидрометеиздат, 1991. 651 с.

11 Чернявский С. А. Экспериментальные методы расчета коэффициента турбулентной диффузии для анализа рассеивания химических загрязнителей в атмосфере // Экология урбанизированных территорий. 2020. № 1.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.88.33.010

UDC 614.71

© E. S. Kulakova, A. M. Safarov, V. I. Safarova, 2025

E.S. KULAKOVA

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor
Institute of Chemical Technologies and Engineering
Ufa State Petroleum Technical University, Sterlitamak
e-mail: kulakova87@list.ru

A. M. SAFAROV

Doctor of Engineering Sciences, Professor
Institute of Chemical Technologies and Engineering
Ufa State Petroleum Technical University, Sterlitamak
e-mail: safarov_a_m@mail.ru

V. I. SAFAROVA

Doctor of Chemical Sciences, Professor
Institute of Chemical Technologies and Engineering
Ufa State Petroleum Technical University, Sterlitamak
e-mail: ugak2004@mail.ru

ON THE ISSUE OF RIDING AIR POLLUTION

The article presents the results of an experiment to determine the concentration of methane and sulfur oxide in atmospheric air at various altitudes at an air temperature of 263, 273, 293 K, a pressure of 1 atm., wind speed of 1 m/s, 4 m/s, 8 m/s, with an emission from a point source of 100 mg/s according to the Gaussian equation turbulent diffusion. It was revealed that in the absence of precipitation, high concentrations of substances are observed at the level of the emission source. The results obtained on the basis of a mathematical model clearly show the high risk of a negative impact of a highly concentrated industrial gas cloud on the livelihoods of people living in multi-storey buildings.

Keywords: KEYWORDS: ATMOSPHERIC AIR, AUTOMATED CONTROL, TOP POLLUTION, EMISSION, GAUSSIAN EQUATION, TURBULENT DIFFUSION, GILLELAND METHOD, SULFUR DIOXIDE, METHANE.

REFERENCES

- 1 State reports on the state of natural resources and the environment of the Republic of Bashkortostan in 2013–2022, Ufa. [In Russ.].
- 2 Karelin A. O., Lomtev A. Yu., Fridman K. B. Identification of sources of pollutant emissions that cause public complaints about unpleasant odors // Hygiene and Sanitation [Gigiyena i sanitariya]. 2019. Vol. 98. No. 6. P. 601–607. [In Russ.].
- 3 Stripling L. O., Bazhenov V. V., Bazhenova N. S., Nor P. E. Improvement of the atmospheric air monitoring system in a populated area // Omsk Scientific Bulletin [Omskiy nauchnyy vestnik]. 2020. No. 3(171). P. 80–85. [In Russ.].
- 4 Ragozina L. I., Sergeev M. Yu. Experience and difficulties in carrying out measures to reduce the harmful effect of the industrial complex on the atmospheric air of the village of Davydovo, Orekhovo-Zuyevsky district, Moscow region // Population health and habitat – ZNiSO [Zdorovye naseleniya i sreda obitaniya – ZNiSO]. 2018. No. 3(300). P. 18–22. [In Russ.].
- 5 Shkolnykh D. A., Kirillov S. N., Kholodenko A. V. The influence of the ferrous metallurgy enterprise on the state of the sanitary protection zone // Problems of regional ecology [Problemy regionalnoy ekologii]. 2021. No. 2. P. 92–96. [In Russ.].
- 6 Martsinkovsky O. A., Tsybulsky V. V., Snopkovskaya O. V. Development of approaches to inventory management in atmospheric air // Standards and quality [Standarty i kachestvo]. 2024. No. 3. P. 96–100. [In Russ.].
- 7 Kulakova E. S. Benzene and its homologues in the atmospheric air of the city of the Belskaya megawall of the Pre-Ural trough of the East European plain // Bulletin of the VostNII Scientific Center for Industrial and Environmental Safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2022. No. 4. P. 115–124. [In Russ.].
- 8 Safarov A. M., Shaidullina G. F., Afanasyeva E. S. Construction of models of changes in the concentration of substances in atmospheric air (using the example of Sterlitamak) // News of higher educational institutions. Volga region. Natural sciences [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Yestestvennyye nauki]. 2018. No. 1(21). P. 54–65. [In Russ.].
- 9 Safarov A. M., Safarova V. I., Shaidullina G. F., Afanasyeva E. S. Mathematical assessment of changes in the concentration of pollutants in atmospheric air under the influence of petrochemical enterprises // Ecology of urbanized territories [Ekologiya urbanizirovannykh territoriy]. 2014. No. 4. P. 40–45. [In Russ.].
- 10 RD 52.04.186-89. Guidelines for the control of atmospheric pollution. Moscow: Gidrometeoizdat, 1991. 651 p. [In Russ.].
- 11 Chernyavsky S. A. Experimental methods for calculating the coefficient of turbulent diffusion for analyzing the dispersion of chemical pollutants in the atmosphere // Ecology of urbanized territories [Ekologiya urbanizirovannykh territoriy]. 2020. No. 1. [In Russ.].