

Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор)

© 2022. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с., Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Вятский государственный агротехнологический университет,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

³Институт биологии Коми научного центра

Уральского отделения Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

Контроль запахового загрязнения (ЗЗ) воздуха представляет сложную проблему. Обычное газоаналитическое оборудование можно использовать для выявления и измерения концентрации отдельных запахообразующих веществ (ЗОВ) в воздухе, но констатировать наличие или отсутствие запаха на основании показаний соответствующих приборов практически невозможно. Это обусловлено субъективным восприятием запахов, сложным многокомпонентным составом ЗЗ, эффектами синергизма, маскировки, нейтрализации, проявляющимися при сочетанном воздействии различных ЗОВ на органы обоняния человека. В настоящее время применяется ольфактометрический метод, в котором для оценки концентрации запаха привлекается группа экспертов. Концентрация запаха, измеренная ольфактометрическим методом, выражается в единицах запаха на кубический метр (ЕЗ/м³). Результаты ольфактометрических исследований могут быть использованы для установления нормативов ЗЗ. Кроме инструментальных методов для контроля ЗЗ находят применение и методы, не требующие специального приборного оснащения. К таким методам можно отнести опросы населения, анализ жалоб на ЗЗ, а также метод гражданской науки (привлечение волонтеров к решению проблемы под руководством учёных). Опыт различных стран свидетельствует о том, что нормативные акты, направленные на контроль и минимизацию ЗЗ, могут быть установлены на региональном уровне. Такой подход позволяет максимально полно учесть социально-экономические особенности конкретных территорий и оптимизировать затраты бюджета и предприятий – источников ЗОВ на реализацию мероприятий по защите окружающей среды и населения от ЗЗ.

Ключевые слова: запаховое загрязнение, атмосферный воздух, ольфактометрия, восприятие запахов, анализ запаха, контроль запахов.

Control of odor pollution of atmospheric air (review)

© 2022. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760[†]

L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146[†]

T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky Prospekt, Kirov, Russia, 610017,

³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru

Monitoring of odor pollution (OP) of air is a complex problem. Standard gas analysis equipment can be used to detect and measure the concentration of individual odor-forming substances (OFS) in the air. However, the presence or absence of odor because of instrument readings is practically impossible to prove. The reasons are the subjective perception of odors, the complex multicomponent composition of the OP, the effects of synergism, masking, neutralization, which are manifested in the combined effect of various OFS on the human olfactory system. Today olfactometric method is used to measure the concentration of odors (group of experts are used as sensors). Measured by the olfactometric method the

concentration of odor is expressed in odor of units per cubic meter (OU/m³). The most objective information about the OP can be obtained on the basis of a combined approach, including olfactometric and physicochemical research methods. The results of olfactometric research can be used to construct mathematical models of the dispersion of odors and to establish standards for OP. In addition to instrumental methods for monitoring the OP, the methods that do not require special equipment are used. There are methods of public opinion, analysis of people's complaints about OP and "Citizen Science" method (inviting volunteers to solve the problem under the guidance of scientists). Citizen Science is scientific work (collection of information, analysis of array of information, joint decision-making and so on). Citizen Science is carried out by citizens (volunteers) together with scientists or under the guidance of scientists. The experience of various countries shows that regulations aimed at control and minimization of OP can be established at the regional level. This approach will allow maximally taking into account the socio-economic characteristics of specific territories and optimizing the costs of the budget and enterprises – sources of OFS for the implementation of measures to protect the environment and the people from OP.

Keywords: odor pollution, atmospheric air, olfactometry, odor perception, odor analysis, odor control.

Разработка и внедрение эффективных систем контроля и защиты атмосферного воздуха от запахового загрязнения (ЗЗ) входит в число актуальных и острых проблем, которые на территории РФ не решены до настоящего времени. Сложность проблемы обусловлена особенностями соответствующего вида загрязнения. Интенсивность и характер ЗЗ практически невозможно измерить и оценить с помощью объективных методов контроля, поскольку запах как таковой представляет собой субъективное ощущение, вызываемое внешними раздражителями, воспринимаемыми органами обоняния [1]. Ощущение запаха теснейшим образом связано с эмоциональной сферой человека [2, 3]. Несмотря на то, что запах обусловлен объективными факторами – содержанием в воздухе специфических летучих веществ, реакция каждого человека на соответствующие вещества индивидуальна [4, 5]. Различная чувствительность людей к запахообразующим веществам (ЗОВ) и широкий диапазон эмоциональных реакций существенно затрудняют установление объективных гигиенических нормативов допустимого уровня ЗЗ. Ситуация осложняется тем, что ЗЗ формируется обычно не одним ЗОВ, а комплексом различных, в том числе трудно идентифицируемых веществ, присутствующих в воздухе в ничтожном, часто не поддающемся объективному контролю, количестве. О психофизиологических и нейробиологических механизмах, управляющих восприятием сложной смеси ЗОВ, до настоящего времени известно очень мало [6]. Многочисленные исследования свидетельствуют о выраженном влиянии ЗЗ на здоровье и качество жизни населения [7–9]. Под влиянием навязчивых запахов развиваются негативные стрессорные реакции, усиливается чувство незащищенности, формируется негативное восприятие действительности [10]. Люди, проживающие вблизи источников неприятных или навязчи-

вых запахов, вынуждены обращаться в контролирующие органы с жалобами на качество воздуха. Успешное разрешение возникающих конфликтных ситуаций и принятие обоснованных управленческих решений по обеспечению необходимого качества окружающей среды, возможно только на основе соответствующей законодательной и нормативной базы. Отсутствие нормативов на ЗЗ в РФ не позволяет в полной мере реализовать право граждан на благоприятную среду обитания.

Целью настоящей работы является анализ особенностей ЗЗ и методов его количественной оценки, а также выявление перспективных подходов, позволяющих снизить эмиссию ЗОВ и их неблагоприятное воздействие на население.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – особенности ЗЗ атмосферного воздуха, методы контроля и основные подходы к нормированию и регулированию ЗЗ селитебных территорий.

Для достижения поставленной цели использовали обзорно-аналитический метод. Подбор информации осуществляли по ключевым словам в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics) и eLIBRARY.RU. Поиск источников осуществляли в поисковых системах Yandex и Google. В обзор методов контроля ЗЗ и подходов к его регулированию включены источники, опубликованные не позднее 2001 г.

Особенности запахового загрязнения

Принципиальным отличием ЗЗ от других видов загрязнений, является ограниченность или невозможность применения аналитических приборов для измерения концентрации и характера запаха. Ощущение запаха воз-

никает в результате субъективного восприятия органом обоняния некоторых летучих веществ. Запахи различаются по интенсивности (слабый – сильный) и характеру воздействия на человека – гедонистическому тону (приятный – безразличный – неприятный) [11]. Гедонистический тон оказывает существенное влияние на формирование психологических реакций человека. Наибольшее раздражение вызывают так называемые навязчивые запахи [12]. Различные люди воспринимают интенсивность и характер запаха по-разному. Реакция на запах формируется на основе имеющегося опыта и ожиданий и выражает степень раздражения, вызванного наличием ЗОВ. Минимальное содержание ЗОВ в воздухе, воспринимаемое обонянием человека, называется порогом обнаружения (ПО) (восприятия) запаха. Соответствующая характеристика обычно учитывается при обосновании предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ (ЗВ) в воздухе [13]. Перечень ПДК ЗВ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений, установленных СанПин 1.2.3685-21,

включает 716 наименований. В таблице приведены примеры, характеризующие максимально разовые значения ПДК (ПДК_{мр}) и ПО некоторых распространённых ЗОВ.

Из приведённых примеров видно, что ПО различных ЗОВ варьируют в широких пределах. Запах метилмеркаптана (запах «гнилой капусты»), этилмеркаптана («запах хряка»), сероводорода («запах тухлых яиц»), аммиака («запах нашатырного спирта»), хлора («удушливый запах»), триметиламина («запах тухлой рыбы») население может ощущать при их содержании в воздухе ниже установленных значений ПДК_{мр}.

Для многих дурнопахнущих веществ, попадающих в воздух при разложении биогенных отходов, ПДК не установлены. К таким веществам можно отнести индол и скатол – запах фекалий, путресцин и кадаверин – трупный запах, андростенон – запах пота и др. [16, 17]. При длительном воздействии на органы обоняния ПО многих ЗОВ могут существенно повышаться, таким образом, человек частично или полностью адаптируется к ЗЗ. При пре-

Таблица / Table

Предельно допустимые концентрации и пороги обнаружения некоторых запахообразующих веществ
Maximum allowable concentrations and detection thresholds for certain odor-forming substances

| Одорант / Odorant | Порог обнаружения, мг/м ³ [14] Detection threshold, mg/m ³ [14] | | ПДК _{мр} , мг/м ³ MPC _{ms} , mg/m ³ |
|---|--|----------------|--|
| | min | max | |
| Аммиак / Ammonia | 0,0266 | 39,6000 | 0,2 |
| Ацетон / Acetone | 47,47 | 1613,86 | 0,35 |
| Бензол / Benzene | 4,5 | 270,0 | 0,3 |
| Ванилин / Vanillin | 2,0 · 10 ⁻⁷ | | 0,03 |
| Диоксид серы / Sulfur dioxide | 1,175 | 12,500 | 0,5 |
| Диоксид азота / Nitrogen dioxide | 0,23 [15] | | 0,2 |
| Крезол (смесь изомеров) Cresol (isomers) | 0,0012 | 22,0000 | 0,005 |
| Метилмеркаптан Methyl mercaptan | 4,0 · 10 ⁻⁵ | 0,0820 | 0,006 |
| Масляная кислота Butyric acid | 0,0010 | 9,0000 | 0,015 |
| Скатол / Skatole | 4,0 · 10 ⁻⁷ | 0,268 | не установлена not installed |
| Сероводород / Sulfur | 0,0007 | 0,0140 | 0,008 |
| Триметиламин / Trimethyl amine | 0,0008 | | 0,15 |
| Уксусная кислота / Acetic acid | 2,5 | 250,0 | 0,2 (5*) |
| Фенол / Phenol | 0,1786 | 22,42 | 0,01 |
| Фурфурол / Furfural | 0,024 | 20,000 | 10* |
| Хлор / Chlorine | 0,03 | 15,00 | 0,1 |
| Этилмеркаптан / Ethyl mercaptan | 3,2 · 10 ⁻⁵ | 0,092 | 5 · 10 ⁻⁵ |

Примечание: жирным шрифтом выделены вещества, для которых ПДК_{мр} установлены ниже порога обнаружения; * – в воздухе рабочей зоны.

Note: bold type indicates substances for which MPC_{mr} are set below the detection threshold; * – in the air of the workplace.

кращении контакта с ЗОВ чувствительность к запахам чаще всего восстанавливается [18].

Восприятие смеси различных ЗОВ существенно отличается от восприятия каждого вещества по отдельности, при этом результат суммации может оказаться непредсказуемым [19]. При одновременном воздействии нескольких ЗОВ могут проявляться эффекты синергизма, маскировки или нейтрализации. Синергизм приводит к взаимному усилению двух или более ЗОВ, маскировка – к замене одного запаха на другой, нейтрализация (компенсация) – к исчезновению запаха или заметному снижению его интенсивности. Исследования взаимодействия ЗОВ ведутся в течение многих лет, однако до сих пор механизмы этих процессов не установлены [20]. Одоранты с выраженным неприятным запахом в смеси с другими летучими веществами могут создавать вполне приятные запаховые ощущения. Например, состав летучих компонентов, формирующих запах жареного кофе, включает более 50 различных веществ с приятным и неприятным индивидуальным запахом. Неприятный запах характерен для таких компонентов кофейного аромата, как изовалериановая кислота (прогорклый), диметилдисульфид и метилмеркаптан (капустный), фурфурилметилсульфид (луково-чесночный), 3-этилпиридин (запах тухлой рыбы) [21]. В экстрактах из свежего коровьего молока удалось выявить более 70 ЗОВ, включая ацетон, диметилсульфид, ацетальдегид (запах гнилых, прелых яблок), а также спирты, содержащие C_4 – C_7 атомов в молекуле (сивушный запах) [22, 23]. В козьем молоке было обнаружено 66 соединений с выраженным запахом, в том числе скатол [24]. Аромат сливочного масла обусловлен сложной композицией летучих веществ, включающей не менее 20 ЗОВ, в том числе сероводород, диметилсульфид, 3-метилбутаналь (горелый запах), гексановую (запах скотного двора) и бутановую (запах прогорклого масла) кислоты [25]. Чаще всего в приятных ароматах содержание дурнопахнущих ЗОВ незначительно, и запахи этих веществ существенно трансформируются в присутствии компонентов с приятным запахом.

Запахи, источниками которых являются отходы животноводства, канализационные стоки, целлюлозно-бумажное производство, свалки, бытовые отходы и т. п. также многокомпонентны, однако соответствующие запахи воспринимаются как крайне неприятные, навязчивые, раздражающие. В воздухе очистных сооружений канализационных систем иденти-

фицировано около 80 различных соединений, в том числе аммиак, сероводород, меркаптаны, предельные, непредельные, ароматические углеводороды и их производные, содержащие в молекулах атомы кислорода, азота, галогенов [26, 27]. Наибольший вклад в запах канализации вносят сероводород, метилмеркаптан, триметиламин [28]. В запахе свиного навоза идентифицировано более 230 компонентов, в том числе соединения серы, фенолы и индолы, летучие жирные кислоты, аммиак и амины. Запах этого отхода воспринимается как крайне неприятный [29–31].

Результаты научных исследований свидетельствуют о том, что смеси различных ЗОВ, в которых содержание отдельных компонентов ниже ПО, могут оказывать на человека вполне измеримое сенсорное воздействие, обусловленное синергическим эффектом. Соответствующий эффект в системах аналитического контроля ЗЗ пока учесть не удаётся [32].

Методы количественной оценки запахового загрязнения воздуха

Разработка методов анализа и количественной оценки запахов входит в число сложнейших задач современной аналитической химии. Для определения содержания ЗОВ в воздухе обычно используют 3 группы методов: инструментальные, сенсорные и математические. Инструментальные методы позволяют выявить и измерить концентрацию отдельных ЗОВ, сенсорные – определить наличие и характер запаха, а математические – оценить дисперсию ЗОВ в зависимости от рельефа и застройки территории с учётом природно-климатических факторов. Наиболее объективную информацию о характере и интенсивности ЗЗ можно получить на основе комбинированного подхода с применением сенсорных и инструментальных методов [33, 34]. Инструментальные методы базируются на применении различного газоаналитического оборудования. Основным достоинством этих методов является возможность разделения смеси ЗОВ на компоненты и измерение концентрации отдельных компонентов. К существенным недостаткам следует отнести невозможность выявления запаха как такового и количественного измерения его интенсивности и характера.

Для детекции ЗОВ в полевых или производственных условиях обычно применяют переносные газоанализаторы (ГА), предназначенные для определения концентрации

одного или нескольких летучих веществ в газовой смеси. С помощью ГА (датчиков загрязнения) можно измерять содержание в воздухе таких ЗОВ, как оксиды азота и серы, меркаптаны, сероводород, озон, формальдегид, этанол, фенолы и др. Для контроля широкого спектра ЗВ создаются системы газового контроля, которые могут включать десятки отдельных датчиков, работающих в автоматическом режиме [35]. Такие системы чаще всего используются в стационарных условиях. В настоящее время разработаны высокочувствительные ГА, позволяющие измерять содержание некоторых ЗОВ на уровне минимальных значений ПО. Основным недостатком таких приборов является ограниченный перечень детектируемых ЗОВ и высокая стоимость оборудования [36].

Более детальную информацию о ЗВ можно получить при использовании методов газовой хроматографии (ГХ), масс-спектрометрии (МС), спектрального анализа (СА). Газовая хроматография отличается высокой чувствительностью (до 10^{-2} – 10^{-3} мг/м³), точностью (погрешность измерений порядка $\pm 5\%$), универсальностью и экспрессностью. Современные хроматографы пригодны для выполнения анализа небольших по объёму проб газа (порядка 100 см³), позволяют эффективно разделять газовую смесь на отдельные компоненты и идентифицировать практически любые известные летучие соединения в составе смеси, испаряющиеся без разложения [37]. В настоящее время выпускаются портативные газовые хроматографы, пригодные для детектирования весьма широкого перечня ЗВ в полевых условиях [38]. Возможности ГХ существенно расширяются за счёт сочетания этого метода с МС методом [39]. Масс-спектрометрия находит применение для количественного определения в пробах воздуха различных органических веществ (в том числе термолабильных), изучения их состава и структуры [40]. Хромато-масс-спектрометрический анализ обеспечивает возможность разделения смеси компонентов, детектирование соответствующих компонентов и их идентификацию [41].

Весьма перспективными в плане анализа запахов могут стать методы СА. К их преимуществам можно отнести возможность проведения дистанционного анализа большого числа газов в масштабе реального режима времени, высокую чувствительность, отсутствие пробоподготовки, пригодность использования результатов анализа для построения трёхмерных карт содержания ЗВ в

атмосфере [42]. Оптическая система газового зондирования применяется в конструкции оптического электронного носа – устройства, предназначенного для обнаружения и измерения характера и интенсивности запахов [43].

Электронный нос (Electronic Nose, EN) представляет собой сложную систему, включающую набор датчиков (химических сенсоров) для обнаружения ЗОВ и блок обработки поступающих от сенсоров данных, предназначенный для идентификации и классификации запахов [44]. Для того чтобы EN мог не только выявлять ЗОВ в воздухе, но и определять интенсивность запаха и его характер, используются искусственные нейронные сети. Благодаря успехам в области разработки высокочувствительных компактных датчиков и эффективных технологий машинного обучения, исследования в сфере совершенствования EN считаются весьма перспективными [45, 46].

Несмотря на широкие аналитические возможности, физико-химические методы пока не могут заменить органы обоняния человека. Количественное измерение запахов, основанное на обонянии человека, реализуется в ольфактометрическом методе [47]. Для измерения запахов этим методом применяют специальные приборы – ольфактометры. Оценку запаха методом динамической ольфактометрии (ДО) выполняют в лабораторных условиях. В ольфактометре проба загрязнённого ЗОВ воздуха в стандартных условиях подвергается разбавлению нейтральным (не имеющим запаха) газом (обычно чистым воздухом или азотом) до уровня ниже ПО. Постепенно степень разбавления понижается. Пробы газа разной концентрации представляются экспертам для определения наличия запаха. Степень разбавления, при которой 50% экспертов обнаруживают наличие ЗОВ, считается ПО соответствующего запаха. Согласно ASTM E544-99, концентрация запаха представляет собой объём нейтрального газа (м³), необходимый для разбавления пробы одорированного газа до достижения ПО. Измерения запаха на ольфактометре позволяют выразить его концентрацию в единицах запаха (ЕЗ) на кубический метр (ЕЗ/м³). Согласно ГОСТ Р 58578-2019, ЕЗ представляет собой количество (смеси) одорантов в 1 м³ пахучего газа (при температуре 20 °С и давлении 101,3 кПа) при достижении порога выявления экспертной комиссии. На основании данных о концентрации запаха можно рассчитать параметры его рассеивания на конкретной территории в конкретных погодных-климатических

условиях [48, 49]. Метод ДО нашёл широкое применение в европейских странах, где принят специальный стандарт EN 13725:2003, регламентирующий процедуру выполнения ольфактометрических измерений. В США для оценки ЗЗ чаще используется метод полевой ольфактометрии, в Японии – метод «трёх мешков» (Triangle Odor Bag Method) [50]. Полевая ольфактометрия ориентируется на использование портативных ольфактометров, пригодных для выполнения замеров запаха в полевых условиях. За ЕЗ в этом методе принято отношение D/T , где D – объём отфильтрованного воздуха, используемого для разбавления воздуха с запахом до ПО; T – объём воздуха с запахом. Применение метода не требует отбора проб газа и транспортирования их в лабораторию для проведения измерений [51]. Метод «трёх мешков» (ТМ) отличается от метода ДО способом представления образцов воздуха экспертам. Разные дозы ЗОВ вводят в один из трёх мешков с чистым воздухом. Эксперты должны определить, в каком мешке находится ЗОВ. Количественно запах оценивается величиной, получившей название «индекс запаха», представляющей собой десятичный логарифм концентрации запаха. Соответствующая количественная оценка интенсивности выбросов запахов от источника принята Министерством окружающей среды Японии в 1995 г. Результаты, полученные методом ТМ, хорошо согласуются с результатами оценки запаха методом ДО [52, 53].

Кроме инструментальных методов для контроля ЗЗ находят применение и методы, не требующие специального приборного оснащения: опросы населения, анализ жалоб на ЗЗ, методы гражданской науки (Citizen Science). Гражданская наука представляет собой научную работу, которую выполняют граждане (волонтёры) совместно с учёными или под их руководством. Волонтёры привлекаются к сбору информации, анализу массивов данных, совместной выработке решений и т. п. В ЕС запущен проект под названием «Distributed Network for Odour Sensing Empowerment and Sustainability» (D-NOSES). Для борьбы с ЗЗ в рамках этого проекта создано партнёрство мирового уровня, объединяющее экспертов в области гражданской науки и совместного творчества, международные ассоциации, учёных, занимающихся исследованиями в области запахов, университеты, малые и средние предприятия, местную администрацию и государственные органы из 9 стран. Проект получил финансирование от

Европейского союза Horizon 2020 Science with & for Society Call (SwafS) в рамках грантового соглашения № 789315 [54].

Основные подходы к регулированию запахового загрязнения

Проблема регулирования ЗЗ приобрела наибольшую остроту в странах с высокой плотностью населения и развитым животноводством [55]. Многие государства контролируют ЗЗ на законодательном уровне, при этом принятые критерии оценки запахов в разных странах или территориальных образованиях одной страны (провинциях, городах, штатах и т. п.) существенно различаются между собой [56]. При разработке и корректировке законодательства о запахах, как правило, учитываются такие факторы, как устойчивое развитие, охрана окружающей среды, социально-экономические особенности конкретной территории или секторов экономики. В некоторых странах при нормировании ЗЗ в расчёт принимаются только неприятные запахи, вызывающие раздражение населения [57]. Для количественной оценки неприятных запахов широкое применение нашли такие характеристики как частота, интенсивность, продолжительность, гедонистический тон и местоположение (факторы FIDOL: Frequency, Intensity, Duration, Offensiveness and Location). Соответствующие характеристики предлагается учитывать при разработке нормативов ЗЗ. Например, можно допустить более продолжительное присутствие слабых запахов в атмосферном воздухе и ограничить время и частоту выброса интенсивных неприятных запахов [58, 59]. В Европе наблюдается тенденция к установлению количественных критериев ЗЗ с определением уровня, при котором «не существует обоснованной причины для раздражения населения». Основным условием успешной реализации соответствующего подхода является наличие надёжных методов измерения запаха [60].

Регулирование запахов на юридическом уровне обычно опирается на следующие подходы: сопоставление концентрации запаха и статистических данных по содержанию отдельных химических веществ в атмосферном воздухе с критериями их воздействия на население (стандарт максимального воздействия); установление определённых расстояний (защитных зон) от источников эмиссии ЗОВ до селитебных территорий (стандарт разделительных расстояний); установление

максимально допустимого уровня выбросов для смесей одорантов и отдельных химических веществ (максимальный стандарт выбросов); количество поступающих жалоб или уровень раздражения, определённый с помощью опросов населения (стандарт максимального раздражения); требование внедрения наилучших доступных технологий (НДТ) для минимизации выбросов ЗОВ (технологический стандарт). Наиболее широкое применение находит первый подход [61].

Опыт разных стран показывает, что законодательство о запахах при установлении допустимых уровней ЗЗ должно опираться на результаты ольфактометрических исследований, при утверждении новых проектов или расширении существующих производств следует использовать математические модели рассеивания ЗОВ, учитывать ограничения FIDOL и критерий соседства, предусматривать применение наилучших доступных технологий в сфере предотвращения ЗЗ [62].

Заключение

Обзор опубликованных источников, посвящённых проблеме ЗЗ, свидетельствует о наличии основательной научной базы, позволяющей разработать общую методологию и комплекс конкретных мер, направленных на защиту населения от раздражающих запахов. Специфика ЗЗ не позволяет констатировать наличие или отсутствие запахов на основании показаний обычного газоаналитического оборудования, однако это оборудование необходимо для определения компонентного состава запахов. Наиболее объективную информацию о наличии и концентрации запахов можно получить с помощью ольфактометрического метода. Опыт различных стран свидетельствует о том, что нормативные акты, направленные на контроль и минимизацию ЗЗ, могут быть приняты на региональном уровне. Такой подход позволяет максимально полно учесть социально-экономические особенности конкретных территорий и оптимизировать затраты бюджета и предприятий – источников ЗОВ на реализацию мероприятий по защите окружающей среды и населения от запахового загрязнения.

References

1. Sebastian S., Puranik N. Recent concepts about sense of smell, odorant receptors and physiology of olfaction-an insight // *Physiol Pharmacol*. 2016. V. 20. P. 74–82.

2. Herz R.S., Schankler C., Beland S. Olfaction, emotion and associative learning: effects on motivated behavior // *Motivation and Emotion*. 2004. V. 28. No. 4. P. 363–383. doi: 10.1007/s11031-004-2389-x

3. Weber S.T., Heuberger E. The impact of natural odors on affective states in humans // *Chemical Senses*. 2008. V. 33. No. 5. P. 441–447. doi: 10.1093/chemse/bjn011

4. Millot J.L., Brand G., Morand N. Effects of ambient odors on reaction time in humans // *Neuroscience Letters*. 2002. V. 322. No. 2. P. 79–82. doi: 10.1016/s0304-3940(02)00092-7

5. Berezina T.N. The emergence of positive and negative basic emotions under the influence of basic smells // *Vestnik moskovskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta im. M.A. Sholokhova. Pedagogika i psikhologiya*. 2011. No. 3. P. 59–69 (in Russian).

6. Gebicki J., Dymerski T., Rutkowski S. Identification of odor of volatile organic compounds using classical sensory analysis and electronic nose technique // *Environment Protection Engineering*. 2014. V. 40. No. 1. P. 103–116. doi: 10.5277/epe140108

7. Budarina O.V., Sabirova Z.F., Shipulina Z.V. Analysis of international experience of studying of the odour air pollution impact on population health // *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*. 2019. No. 5. P. 88–92 (in Russian).

8. Goshin M.E., Budarina O.V., Ingel F.I. The odours in the ambient air: analysis of the relationship with the state of health and quality of life in adults residing in the town with food industries // *Gigiena i Sanitaniya*. 2020. V. 99. No. 12. P. 1339–1345 (in Russian).

9. Terent'ev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Pilip L.V. Reducing the emission of odorous substances in industrial pig breeding enterprises // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 113–120. doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-113-120

10. Sucker K., Both R., Bischoff M., Guski R., Winneke G. Odor frequency and odor annoyance. Part I: assessment of frequency, intensity and hedonic tone of environmental odors in the field // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2008. V. 81. No. 6. P. 671–682. doi: 10.1007/s00420-007-0259-z

11. Dravnieks A., Jarke F. Odor threshold measurement by dynamic olfactometry: significant operational variables // *Air & Waste Management Association*. 1980. V. 30. No. 12. P. 1284–1289. doi: 10.1080/00022470.1980.10465182

12. Budarina O.V. The actual problems of odour regulation in ambient air and ways of their decision in modern conditions // *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*. 2013. No. 5 (42). P. 435–437 (in Russian).

13. Pinigin M.A., Budarina O.V., Safiulin A.A. The development of hygienic basis of odour regulation and control in ambient air and ways of harmonization in this field // *Gigiena i sanitaniya*. 2012. No. 5. P. 72–75 (in Russian).

14. Ruth J.H. Odor thresholds and irritation levels of several chemical substances: a review // *American Industrial Hygiene Association Journal*. 1986. V. 47. No. 3. P. 142–151. doi: 10.1080/15298668691389595
15. Silaeva P., Silaev A.V. Peculiarities of dispersion of nitrogen dioxide emissions by the energy complex enterprises and their impact on the population of megapolises // *Vestnik RUDN. Seriya: Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti*. 2018. No. 1. P. 63–72 (in Russian).
16. Hussain A., Saraiva L.R., Ferrero D.M., Ahuja G., Krishna V.S., Liberles S.D., Korsching S.I. High-affinity olfactory receptor for the death-associated odor cadaverine // *PNAS*. 2013. V. 110. No. 48. P. 19579–19584. doi: 10.1073/pnas.1318596110
17. Mahmoud M.A., Tybussek T., Loos H., Wagenstaller M., Buettner A. Odorants in fish feeds: A potential source of malodors in aquaculture // *Frontiers in Chemistry*. 2018. V. 6. Article No. 241. doi: 10.3389/fchem.2018.00241
18. Dalton P. Psychophysical and behavioral characteristics of olfactory adaptation // *Chemical Senses*. 2000. V. 25. No. 4. P. 487–492. doi: 10.1093/chemse/25.4.487
19. Carrera F., Donoso-Bravo A., Souto-Gonzalez J.A., Ruiz-Filippi G. Modeling the odor generation in WWTP: An integrated approach review // *Water, Air and Soil Pollut.* 2014. V. 225. No. 6. P. 1–15. doi: 10.1007/s11270-014-1932-y
20. Szulczynski B., Arminski K., Namiesnik J., Gebicki J. Determination of odour interactions in gaseous mixtures using electronic nose methods with artificial neural networks // *Sensors*. 2018. V. 18. No. 2. Article No. 519. doi: 10.3390/s18020519
21. Seninde D.R., Chambers E. Coffee flavor: A review // *Beverages*. 2020. V. 6. No. 3. Article No. 44. doi: 10.3390/beverages6030044
22. Toso B., Procida G., Stefanon B. Determination of volatile compounds in cows' milk using headspace GC-MS // *Journal of Dairy Research*. 2002. V. 69. No. 4. P. 569–577. doi: 10.1017/S0022029902005782
23. Bendall J.G. Aroma compounds of fresh milk from New Zealand cows fed different diets // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001. V. 49. No. 10. P. 4825–4832. doi: 10.1021/jf010334n
24. Siefarth C., Buettner A. The aroma of goat milk: seasonal effects and changes through heat treatment // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014. V. 62. No. 49. P. 11805–11817. doi: 10.1021/jf5040724
25. Peterson D.G., Reineccius G.A. Characterization of the volatile compounds that constitute fresh sweet cream butter aroma // *Flavour and Fragrance Journal*. 2003. V. 18. No. 3. P. 215–220. doi: 10.1002/ffj.1192
26. Zhu Y., Zheng G., Gao D., Chen T., Wu F., Niu M., Zou K. Odor composition analysis and odor indicator selection during sewage sludge composting // *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2016. V. 66. No. 9. P. 930–940. doi: 10.1080/10962247.2016.1188865
27. Dincer F., Muezzinoglu A. Odor-causing volatile organic compounds in wastewater treatment plant units and sludge management areas // *Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*. 2008. V. 43. No. 13. P. 1569–1574. doi: 10.1080/10934520802293776
28. Park S. Odor characteristics and concentration of malodorous chemical compounds emitted from a combined sewer system in Korea // *Atmosphere*. 2020. V. 11. No. 6. Article No. 667. doi: 10.3390/atmos11060667
29. Cho S., Hwang O., Park S. Effect of dietary protein levels on composition of odorous compounds and bacterial ecology in pig manure // *Asian-Australas J Anim Sci*. 2015. V. 28. No. 9. P. 1362–1370. doi: 10.5713/ajas.15.0078
30. Schiffman S.S., Bennett J.L., Raymer J.H. Quantification of odors and odorants from swine operations in North Carolina // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2001. V. 108. P. 213–240.
31. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effects of acidifying manure effluent on its microbiological characteristics // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 161–167. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
32. Miyazawa T., Gallagher M., Preti G., Wise P.M. Synergistic mixture interactions in detection of perithreshold odors by humans // *Chemical Senses*. 2008. V. 33. No. 4. P. 363–369. doi: 10.1093/chemse/bjn004
33. Giungatoa P., Gilio A.D., Palmisani J., Marzocca A., Mazzone A., Giua R., Gennaro G. Synergistic approaches for odor active compounds monitoring and identification: State of the art, integration, limits and potentialities of analytical and sensorial techniques // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2018. V. 107. P. 116–129. doi: 10.1016/j.trac.2018.07.019
34. Kim K.H., Park S. Y. A comparative analysis of malodor samples between direct (olfactometry) and indirect (instrumental) methods // *Atmospheric Environment*. 2008. V. 42. No. 20. P. 5061–5070. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.02.017
35. Air pollution monitoring [Internet resource] https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/app-briefs/Semtech_Enviro_AirPollution_AppBrief-FINAL.pdf / (Accessed: 30.11.2021).
36. Rybak V.A., Ryabichina O.P. Hardware-software complex for monitoring atmospheric air pollution and selecting optimal movement route // *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. No. 52. P. 6–17 (in Russian). doi: 10.17217/2079-0333-2020-52-6-17
37. Pavlenko A.A., Ryazantseva L.T. Gas chromatography as a method for monitoring the ecological safety of environmental objects // *Sovremennye tekhnologii obespecheniya grazhdanskoy oborony i likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy*. 2012. No. 1 (3). P. 122–124 (in Russian).
38. Anopchenko L.Yu., Lugovskaya A.Yu. The use of different methods for environmental monitoring of atmo-

- spheric air // *Interesko Geo-Sibir*. 2014. No. 2. P. 84–88 (in Russian).
39. Debonneville C., Chaintreau A. Quantitation of suspected allergens in fragrances: Part II. Evaluation of comprehensive gas chromatography–conventional mass spectrometry // *Journal of Chromatography A*. 2004. V. 1027. No. 1–2. P. 109–115. doi: 10.1016/j.chroma.2003.08.080
40. Pisarev D.I. Classical and modern methods of mass spectrometry // *Nauchnye vedomosti belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Meditsina. Farmatsiya*. 2012. No. 10–2 (129). P. 5–41 (in Russian).
41. Milman B.L., Zhurkovich I.K. Summarized criteria of chemical compounds identification using the chromatography-mass spectrometry // *Analitika i kontrol*. 2020. V. 24. No. 3. P. 164–173 (in Russian). doi: 10.15826/analitika.2020.24.3.003
42. Geiko P.P., Smirnov S.S. Atmosphere halogen oxides concentration retrieving by differential optical spectroscopy in the UV region of the spectrum // *Doklady TUSUR*. 2017. No. 4. P. 33–38 (in Russian).
43. Zhao Z., Tian F., Liao H., Yin X., Liu Y., Yu B. A novel spectrum analysis technique for odor sensing in optical electronic nose // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. V. 222. P. 769–779. doi: 10.1016/j.snb.2015.08.128
44. Karakaya D., Ulucan O., Turkan M. Electronic nose and its applications // *International Journal of Automation and Computing*. 2020. V. 17. No. 2. P. 179–209. doi: 10.1007/s11633-019-1212-9
45. Jia P., Meng F., Cao H., Duan S., Peng X., Xu M. Training technique of electronic nose using labeled and unlabeled samples based on multi-kernel LapSVM // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. V. 294. P. 98–105. doi: 10.1016/j.snb.2019.05.034
46. Wilson A.D. Applications of electronic-nose technologies for noninvasive early detection of plant, animal and human diseases // *Chemosensors*. 2018. V. 6. No. 4. Article No. 45. doi: 10.3390/chemosensors6040045
47. Brattoli M., De Gennaro G., De Pinto V., Loiotile A.D., Lovascio S., Penza M. Odour detection methods: olfactometry and chemical sensors // *Sensors*. 2011. V. 11. No. 5. P. 5290–5322. doi: 10.3390/s110505290
48. Farrell J.A., Murlis J., Long X., Li W., Card R.T. Filament-based atmospheric dispersion model to achieve short time-scale structure of odor plumes // *Environmental Fluid Mechanics*. 2002. V. 2. P. 143–169. doi: 10.1023/A:101628370283
49. Capelli L., Sironi S., Del Rosso R., Guillot J.M. Measuring odours in the environment vs. dispersion modeling: A review // *Atmospheric Environment*. 2013. V. 79. P. 731–743. doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.029
50. Svitskov S.V., Malikh O.S. World experience in odor regulation for water and wastewater treatment plants // *Nailuchshie dostupnye tekhnologii*. 2020. No. 4. P. 38–43 (in Russian).
51. Damuchalia A.M., Guob H. Evaluation of a field olfactometer in odour concentration measurement // *Biosystems Engineering*. 2019. V. 187. P. 239–246. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.09.007
52. Nagata Y. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method // *Ministry of the Environment, Government of Japan: Tokyo, Japan*, 2003. P. 118–127.
53. Ueno H., Amano S., Merecka B., Kośmider J. Difference in the odor concentrations measured by the triangle odor bag method and dynamic olfactometry // *Water Science & Technology*. 2009. No. 59 (7). P. 1339–1342. doi: 10.2166/wst.2009.112
54. Distributed network for odour sensing, empowerment and sustainability [Internet resource] <https://cordis.europa.eu/project/id/789315/> (Accessed: 08.12.2021).
55. Melsea R.W., Oginka N.W.M., Rulkens W.H. Overview of European and Netherlands' regulations on airborne emissions from intensive livestock production with a focus on the application of air scrubbers // *Biosystems Engineering*. 2009. V. 104. No. 3. P. 289–298. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.07.009
56. Analysis of existing regulations in odour pollution, odour impact criteria 1 [Internet resource] <https://dnoses.eu/wp-content/uploads/2019/10/D2.2-Analysis-of-existing-regulation-in-odour-pollution-odour-impact-criteria-1.pdf> / (Accessed: 03.12.2021).
57. Bokowa A., Diaz C., Koziel J.A., McGinley M., Barclay J., Schauburger G., Guillot J.M., Sneath R. Short introduction to the summary and evaluation of the odour regulations worldwide // *Chemical Engineering Transactions*. 2021. V. 85. P. 121–126. doi: 10.3303/CET2185021
58. Invernizzi M., Capelli L., Sironi S. Quantification of odour annoyance-nuisance // *Chemical Engineering Transactions*. 2016. V. 54. P. 205–210. doi: 10.3303/CET1654035
59. Nicell J.A. Assessment and regulation of odour impacts // *Atmospheric Environment*. 2009. V. 43. No. 1. P. 196–206. doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.033
60. Odor regulation and the history of odor measurement in Europe [Internet resource] <https://www.semanticscholar.org/paper/Odor-Regulation-and-the-History-of-Odor-Measurement-Harreveld-OdourNet/f82f17784ba9460ce9c3a73fd67d363bd7d2cd7a/> (Accessed: 03.12.2021).
61. Brancher M., Griffiths K.D., Franco D., de Melo Lisboa H. A review of odour impact criteria in selected countries around the world // *Chemosphere*. 2017. V. 168. P. 1531–1570. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.160
62. Loriato A.G., Salvador N., Santos J.M., Moreira D.M. Odour – a vision on the existing regulation // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. V. 30. P. 25–30. doi: 10.3303/CET1230005