

КОНТРОЛЬ СУММАРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ВОЗДУХЕ НЕПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

В. Л. Будович, Е. Б. Полотнюк*

ООО «Бюро аналитического приборостроения «Хромдет-Экология», Москва, Россия,

*e-mail: vitaly_budovich@chromdet.ru

Поступила в редакцию 20.04.2019 г.

Аннотация – Обзорная статья посвящена вопросам оценки загрязненности воздуха производственных помещений летучими органическими веществами, многие из которых токсичны и могут представлять серьезную угрозу для здоровья людей. Несмотря на то, что показатель суммарного содержания летучих органических веществ в воздушной среде замкнутых помещений не характеризует однозначно опасность для здоровья человека, нормативы этого показателя введены во многих странах. Дан обзор работ, посвященных методам определения суммарного содержания летучих органических веществ в воздухе производственных помещений. Описаны подходы к измерению этого параметра и их практическая реализация. Отмечен рост использования переносных газоанализаторов для оперативного контроля состояния воздуха в этих условиях.

Ключевые слова: загрязнение воздуха, производственные помещения, летучие органические соединения, суммарное содержание летучих органических соединений, газоанализаторы, газовые хроматографы, сенсоры, фотоионизация.

MEASURING TOTAL VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS IN INDOOR AIR

V. L. Budovich, and E. B. Polotnyuk*

CHROMDET Analytical Instruments Ltd, Moscow, Russia,

*e-mail: vitaly_budovich@chromdet.ru

Received April 20, 2019

Abstract – An important issue of keeping control of indoor air pollution caused by volatile organic compounds (VOCs) is reviewed taking into consideration their potential toxicity and a possible threat to human health after long-term exposure. Unlike the established rules for regulating and control of VOCs in the working zone air of industrial enterprises, the air of non-industrial premises has always received much less attention, and the problem of its quality assessment does not appear to have been resolved completely. Despite the fact that a value of total volatile organic compounds of indoor air premises does not unambiguously characterize a human health hazard, the standards for this parameter have been introduced in many countries. Studies devoted to developing methods for determining the total content of volatile organic compounds in indoor air are reviewed. The known and new-coming approaches to measuring this parameter and their implementation are described. An increase in applying portable gas analyzers for on-line monitoring of indoor air characteristics is outlined.

Keywords: air pollution, indoor air, volatile organic compounds, total volatile organic compounds, gas analyzers, gas chromatographs, sensors, photoionization.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одной из актуальных проблем химической безопасности является контроль летучих органических соединений (ЛОС) в воздушной среде замкнутых помещений, используемых для непроизводственных нужд. В отличие от вопросов нормирования и контроля ЛОС в воздухе рабочей зоны промышленных предприятий, воздуху непроизводственных помещений всегда уделялось значительно меньше внимания, и на текущий момент этот вопрос до конца не решен. Прежде всего, речь идет о жилых и общественных помещениях, не подлежащих контролю со стороны комиссий по безопасности и охране труда в отношении загрязняющих веществ [1]. Далее в этой статье такие помещения будут называться непроизводственными.

Важность решения этой проблемы не вызывает сомнений, поскольку в непроизводственных помещениях каждый из нас проводит большую часть своего времени и подвергается многолетнему воздействию летучих химических веществ. Многие из веществ, содержащихся в воздухе таких помещений, токсичны и могут представлять серьезную угрозу для здоровья человека.

В данном обзоре рассмотрена современная ситуация в области контроля в воздухе замкнутых помещений суммарного содержания летучих органических соединений, обсуждаются различные критерии нормирования и подходы к контролю ЛОС, применяемые в настоящее время. Особое внимание уделяется известным методам анализа ЛОС и подчеркивается перспективность применения для данных целей газоанализаторов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Существует ряд различных определений летучих органических соединений (ЛОС), используемых в научной литературе, научно-исследовательских отчетах, а также нормативных документах различных национальных и международных организаций.

Так, например, в Директиве Европейского парламента [2], ЛОС определяются как все органические соединения, возникающие в результате человеческой деятельности, за исключением метана, которые способны производить фотохимические оксиданты в присутствии солнечного света.

Согласно документам EPA US (Агентство по охране окружающей среды США), ЛОС – это любое соединение углерода, кроме монооксида углерода, диоксида углерода, угольной кислоты, карбидов или карбонатов металлов и карбоната аммония, которое участвует в атмосферных фотохимических реакциях, за исключением тех, которые, согласно EPA, имеют незначительную фотохимическую активность [3]. В данном документе также указывается, что внутри помещений ЛОС испаряются при нормальных значениях давления и температуры.

ЛОС, содержащиеся в лакокрасочных материалах, согласно недавно введенному стандарту РФ [4], определяются как «любое органическое

соединение, имеющее начальную температуру кипения менее или равную 250°C, измеренную при нормальном давлении 101,3 кПа».

В документе [5] приводится классификация органических соединений, являющихся загрязнителями воздуха замкнутых помещений, введенная Всемирной организацией здравоохранения (WHO) [6].

Наиболее универсальной является классификация летучих органических соединений, основанная на степени их летучести. В зависимости от летучести органические соединения разделяются на высоколетучие, летучие, среднелетучие и органические соединения на твердых частицах (табл. 1).

Таблица 1. Классификация летучих органических соединений по степени их летучести

Группа органических соединений	Сокращение	Температура кипения, °C		Давление насыщенных паров при комнатной температуре, кПа
		от	до	
Высоколетучие органические соединения	ВЛОС	< 0	50–100	> 15
Летучие органические соединения	ЛОС	50–100	240–260	> 10 ⁻²
Среднелетучие органические соединения	СЛОС	240–260	380–400	10 ⁻² –10 ⁻⁸
Органические соединения на твердых частицах	ТОЧ	> 380	-	-

Приведенная классификация в настоящее время получила наибольшее распространение и используется в нормативных документах, практической деятельности и в научных работах.

НЕОБХОДИМОСТЬ КОНТРОЛЯ ЛОС

Хотя множество ЛОС были известны еще в 19 веке, их опасность для здоровья, необходимость контроля содержания этих веществ и введения предельных значений их концентрации в воздухе были осознаны значительно позже¹. Это связано с общей недооценкой влияния загрязнений, возникающих в результате хозяйственной деятельности, на человека и окружающую среду. В настоящее время вклад ЛОС в загрязнение воздуха общепризнан. Согласно [8], из 189 наиболее сильных загрязнителей воздуха примерно 100 относятся к ЛОС.

¹ Вообще, началом нормирования содержания вредных веществ в воздухе, вероятно, следует считать появление норм ПДК для хлористого водорода на заводах США в 1895 г. В нашей стране первые значения ПДК для воздуха рабочей зоны появились в 1922 г., а для воздуха жилой зоны в 1951 г. [7].

Объем исследований, касающихся влияния ЛОС на человека и окружающую среду и их нормирования, в течение последних десятилетий значительно вырос, что определяется увеличением количества ЛОС, их распространенностью, опасностью для здоровья человека, а также появлением новых методов контроля и очистки воздуха от этих соединений [9].

Необходимость контроля ЛОС обусловлена и другими обстоятельствами. Некоторые ЛОС, вступая в реакции с неорганическими соединениями, например оксидами азота [10], могут образовывать фотохимический смог, содержащий озон и другие высокотоксичные соединения. С ЛОС также часто связывают наличие запаха, поэтому при его появлении измеряют содержание ЛОС в воздухе [11].

Кроме рабочей зоны наиболее вероятным местом наличия повышенных концентраций ЛОС являются непроизводственные помещения, в которых концентрация ЛОС может быть существенно выше, чем в атмосферном воздухе за пределами данного помещения [12]. Однако вплоть до 70-х годов прошлого века содержание примесей в воздухе непроизводственных помещений практически не изучали. Основное внимание уделяли атмосферному воздуху, хотя большую часть времени человек проводит именно в помещении.

КРИТЕРИИ НОРМИРОВАНИЯ

Единственным критерием качества воздуха в непроизводственных помещениях долгое время было содержание в нем углекислого газа – так называемый показатель Петтенкофера. Считалось, что существует прямая корреляция между содержанием углекислого газа, определяемого дыханием людей, и уровнем химического и микробного загрязнения воздуха. На этом основании был установлен ряд нормативов. В частности, в США для «Indoor air» концентрация 1000 ppm (млн⁻¹) считается границей между «хорошим» и «плохим» воздухом [13], при достижении которой рекомендуется принимать меры по снижению концентрации CO₂, например, путем проветривания или использования приточно-вытяжной вентиляции.

Эта точка зрения отражена и в действующих в нашей стране нормативных документах. Согласно [14], определяющим вредным веществом является углекислый газ, выдыхаемый людьми. Эквивалентом вредных веществ, выделяемых, например, ограждениями, мебелью, коврами и т. п., также считается углекислый газ. Что касается других загрязнителей в помещениях, то действует документ [15], согласно которому «концентрация химических веществ в воздухе жилых помещений при вводе зданий в эксплуатацию не должна превышать среднесуточных предельно допустимых концентраций (далее ПДК) загрязняющих веществ, установленных для атмосферного воздуха населенных мест, а при отсутствии среднесуточных ПДК не должна превышать максимальных разовых ПДК или ориентировочных безопасных уровней воздействия (далее - ОБУВ)». Однако к помещениям, находящимся в эксплуатации, это отношения не имеет.

В РФ единственным документом, в котором регламентируются предельно допустимые концентрации ЛОС в эксплуатируемых жилых помещениях,

является Постановление Правительства РФ [16], согласно которому «концентрация вредных веществ в воздухе жилых помещений не должна превышать допустимых концентраций для атмосферного воздуха». Оценка соответствия помещения производится по ряду соединений, среди которых 12 ЛОС.

Использование концентрации углекислого газа в качестве главного показателя базовой величины при оценке качества воздуха в непроизводственных помещениях, как отмечается в [17], было справедливо до тех пор, пока не появились интенсивные источники ЛОС, не связанные с пребыванием людей и не выделяющие углекислый газ. При наличии таких не антропогенных источников корреляция между CO_2 и содержанием ЛОС может отсутствовать. В настоящее время имеются результаты исследований, в которых наличие связи между содержанием углекислого газа и ЛОС в воздухе, как подтверждается, так и опровергается. Например, в работе [18] сообщается о существовании корреляции между концентрацией углекислого газа и ЛОС, тогда как в диссертации [19] представлены убедительные экспериментальные данные, свидетельствующие о наличии такой корреляции в помещениях, где может находиться много людей, например, в школьных классах.

Имеется ряд работ, в которых этот вопрос обсуждается. Преобладает точка зрения, согласно которой в общем случае связь между содержанием диоксида углерода и ЛОС в воздухе непроизводственных помещений отсутствует, и необходим независимый контроль ЛОС, например, для включения систем вентиляции.

Следует отметить, что, несмотря на ограниченность нормативной базы, регулирующей предельные концентрации ЛОС в непроизводственных помещениях, опасность загрязнения воздуха жилой среды ЛОС вполне осознана и величины уровня загрязнения используются для оценки риска воздействия на здоровье населения [20].

Рост интереса к контролю содержания ЛОС в воздухе замкнутых помещений произошел в 80-х годах прошлого века, в том числе вследствие начала производства «ворсовых» ковров, изготовленных на основе полиэфирных волокон. В результате исследований было доказано, что ковровые изделия являются интенсивными источниками загрязнения в замкнутых помещениях [21].

Исследования в этой области инициировали также измерения концентрации ЛОС, выделяемых строительными материалами, красками, линолеумом и другими отделочными материалами. Со временем номенклатура ЛОС, присутствующих в помещениях, существенно расширилась из-за широко использования продуктов бытовой химии, косметики, упаковочных материалов, лекарств и т.п. [22]. В перечне ЛОС, наиболее часто встречающихся в непроизводственных помещениях, приведенном в [4], значится 67 веществ, а в [23] сообщается, что в воздухе помещений обычно содержится больше 100 ЛОС, причем концентрация половины из них более 5 мкг/м^3 .

ПОДХОДЫ К НОРМИРОВАНИЮ ЛОС В ЗАМКНУТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Поскольку при оценке степени опасности ЛОС для здоровья существуют разные подходы, общепринятых стандартов в настоящее время нет, что привело к появлению множества нормативных величин для пороговых значений содержания ЛОС в воздухе непроизводственных помещений, предлагаемых различными организациями и объединениями. Это отражено в приведенной в [24] таблице, которая частично воспроизведена ниже (табл. 2). Пороговые значения, принятые в разных странах, могут отличаться на порядки.

Таблица 2. Нормативные значения концентрации индивидуальных ЛОС в воздухе непроизводственных помещений

Организация	Вещество	Нормативное значение, мкг/м ³
WHO (Всемирная организация здравоохранения)	Толуол Бензол	260 UR: $6 \cdot 10^{-6}$, единичный коэффициент риска
French Agency for Environmental and Occupational Health Safety (Агентство охраны окружающей среды и охраны труда Франции) 2007, 2008	Толуол Ксилолы н-Гексан Терпены, например, лимонен 1-Бутанол 2-Этоксизтанол Кротоновый альдегид	300 (LCI*) 200 (LCI) 700 (LCI) 450 (LCI) 1500 (LCI) 70 (LCI) 1 (LCI)
The Committee for Health-related Evaluation of Building Products (2008)	Формальдегид Толуол Ксилолы н-Гексан Терпены, например, лимонен 1-Бутанол 2-Этоксизтанол Кротоновый альдегид	120 (LCI) 1900 (LCI) 2200 (LCI) 72 (LCI) 1500 (LCI) 3100 (LCI) 19 (LCI) 1 (LCI)
Office of Environmental Health Hazard Assessment (Офис оценки экологической опасности для здоровья) 1999, 2001, 2009	Толуол Ксилолы н-Гексан 2-Этоксизтанол Бензол	300 (CREL**) 700 (CREL) 7000 (CREL) 70 (CREL) 1300 (REL***) репродуктивная функция 60 (REL***) гематология и нервная система
An ad hoc working group (IRK, 2008)	Толуол Дихлорметан Пентахлорфенол Стирол Трис-(2-хлорэтилфосфат), бициклический терпен, нафталин)	300 (RW I****) 3000 (RW II*****) 200 (RW I) 2000 (RW II), (24 час) 0,1 (RW I) 1,0 (RW II) 30 (RW I) 300 (RW II) 5 (RW I) 50 (RW II)
Seifert, 1990	Алифатические углеводороды Ароматические углеводороды Терпены Эфиры Альдегиды и кетоны (кроме формальдегида)	100***** 50***** 30***** 20***** 20*****

Примечания: *LCI (Low Concentration of Interest) – наименьшая концентрация, при которой наблюдается воздействие;

**CREL (Chronic Inhalation Reference Exposure Levels) – постоянный стандартный уровень воздействия – концентрации или дозы, при которых или ниже которых неблагоприятные последствия для здоровья маловероятны;

***REL (Reference Exposure Levels) – стандартный уровень воздействия – концентрация, при которой или ниже которой не ожидается неблагоприятного воздействия на здоровье среди населения в целом;

****RW I – концентрация, превышение которой нежелательно с точки зрения состояния здоровья;

*****RW II – концентрация вещества, при которой или выше которой требуются немедленные действия (RW II K), либо как долгосрочное значение (RW II L) (IRK, 2008);

*****Применимо для производственных сред вне частных помещений, таких, как офисы, школы, детские сады и пр.

Еще более наглядно разница в нормах для ЛОС демонстрируется в табл. 3, взятой из [25], где представлены пороговые значения для некоторых соединений, установленные в Германии (Г), Франции (Ф) и Калифорнии, США (КА).

Таблица 3. Пороговые значения в мкг/м³ для некоторых ЛОС в Германии (Г), Франции (Ф) и Калифорнии, США (КА)

Вещество	LCI (Г, 2008),	LCI (Ф),	CREL (КА),
Толуол	1900	300	300
Ксилолы	2200	200	700
н-Гексан	72	700	7000
Терпены, например, Лимонен	1500	450	-
1-Бутанол	3100	1500	-
2-Этоксиэтанол	19	70	70
Кротоновый альдегид	1	1	-

Даже принимая во внимание особенности использования этих значений, авторы [25], считают различия пороговых величин чрезвычайно большими и не соответствующими уровню рисков для здоровья населения. Скорее они отражают разные научные мнения и подходы. Общее число ЛОС, для которых есть референтное значение, велико, например в 2008 г. оно составляло 164 в ФРГ и 190 во Франции [25]. Определение каждого индивидуального соединения в воздухе приводит к увеличению объема и стоимости исследований.

В такой ситуации естественным выглядело предложенное в 1986 г. введение норматива на суммарное (общее) содержание ЛОС в воздухе производственных помещений – **ОЛОС (Total Volatile Organic Compounds – TVOC)** [26].

Этот норматив предлагалось использовать в качестве главного показателя качества воздуха помещений, и поначалу такой подход был воспринят с энтузиазмом. Однако через некоторое время использование ОЛОС для этой

цели было признано неправильным. Подробно причины пересмотра изложены в [27].

Главные аргументы критиков использования концентрации ОЛОС в качестве показателя качества воздуха, следующие:

- отсутствует прямая связь между величиной ОЛОС и опасностью для здоровья (за исключением появления сенсорных раздражений);
- возможно значительное превышение допустимой концентрации индивидуальными токсичными соединениями при соблюдении разрешенной величины ОЛОС;
- изменение качественного состава ОЛОС может происходить с большой скоростью;
- отсутствуют единое определение ОЛОС и единая методика измерения.

Тем не менее, использование ОЛОС как некоего обобщенного показателя загрязненности воздушной среды ЛОС начало распространяться, и в настоящее время находит множество применений. Важную роль играет эта величина при измерении эмиссии ЛОС из строительных и отделочных материалов, где состав загрязняющей смеси примерно одинаков; при мониторинге концентрации загрязнения во вновь построенных зданиях; оптимизации работы вентиляции в офисных помещениях, учебных и лечебных учреждениях (см., например, обзор [28]).

Появились рекомендации по продолжительности пребывания людей в помещениях различных назначений в зависимости от концентрации ОЛОС. Так, Комитет Германии по нормативам для воздуха непромышленных помещений при Ведомстве по охране окружающей среды считает допустимым кратковременное пребывание человека в течение дня (например, во время уборки в квартире) при концентрации ОЛОС 10–25 мг/см³. При длительном пребывании рекомендуется величина ОЛОС не выше 1–3 мг/м³, а желательной считается концентрация, не превышающая 0,2–0,3 мг/м³ [29].

Имеет место даже практика дифференциации пороговых значений ОЛОС для разных категорий помещений. Например, в соответствии с Национальным стандартом КНР, гражданские помещения разделены на две категории, для одной из которых предельная величина ОЛОС равна 0,5 мг/м³, а для другой – 0,6 мг/м³ [30]. Во многих странах и в ряде организаций установлены предельные значения ОЛОС для воздуха непромышленных помещений. Однако всеобщий характер эта практика не приняла. В некоторых странах, в том числе РФ, к величине ОЛОС никаких требований не предъявляется, хотя имеются рекомендации по измерению этой величины.

В таблице 4 приведены нормативные значения ОЛОС, принятые в некоторых странах. В основном приведенные данные заимствованы из [31], а также из [32, 33].

Необходимо отметить, что в отличие от пороговых значений для индивидуальных соединений пороговое значение ОЛОС устанавливается не на основании токсикологических или других медицинских исследований, а как наименьшая реально достигаемая на практике величина [33].

Таблица 4. Предельные значения ОЛОС

Страна	Значение ОЛОС	Комментарии	Ссылка
Китай	0,5 мг/м ³ 0,6 мг/м ³	В зависимости от категории помещения	[30]
Гонконг	0,6мг/м ³ – среднее за 8 часов ----- 3,0 мг/м ³ – среднее за 8 часов	«Отличный» уровень ----- «Хороший» уровень	[31]
Кувейт	3 ppm		[31]
Малайзия	3 ppm – среднее за 8 часов		[31]
Сингапур	3 ppm по толуолу		[31]
Тайвань	0,56 ppm – среднее за 1 час		[32]
Австралия	0,5 мг/м ³ – среднее за 1 час		[31]
Канада	0,2 мг/м ³	Уровень комфорта	[31]
США	0,2 мг/м ³ – концентрация вне помещений		[31]
Финляндия	0,2 мг/м ³ 0,3 мг/м ³ 0,6 мг/м ³	Три уровня качества	[31]
Япония	0,4 мг/м ³		[33]
Великобритания	0,3 мг/м ³ – среднее за 8 часов		[31]

Признание ОЛОС как показателя качества воздуха подтверждается проведением массовых измерений в различных непроизводственных помещениях, в том числе и жилых. На рисунке, взятом из [34], приведены данные о содержании ОЛОС в жилых домах нескольких стран.

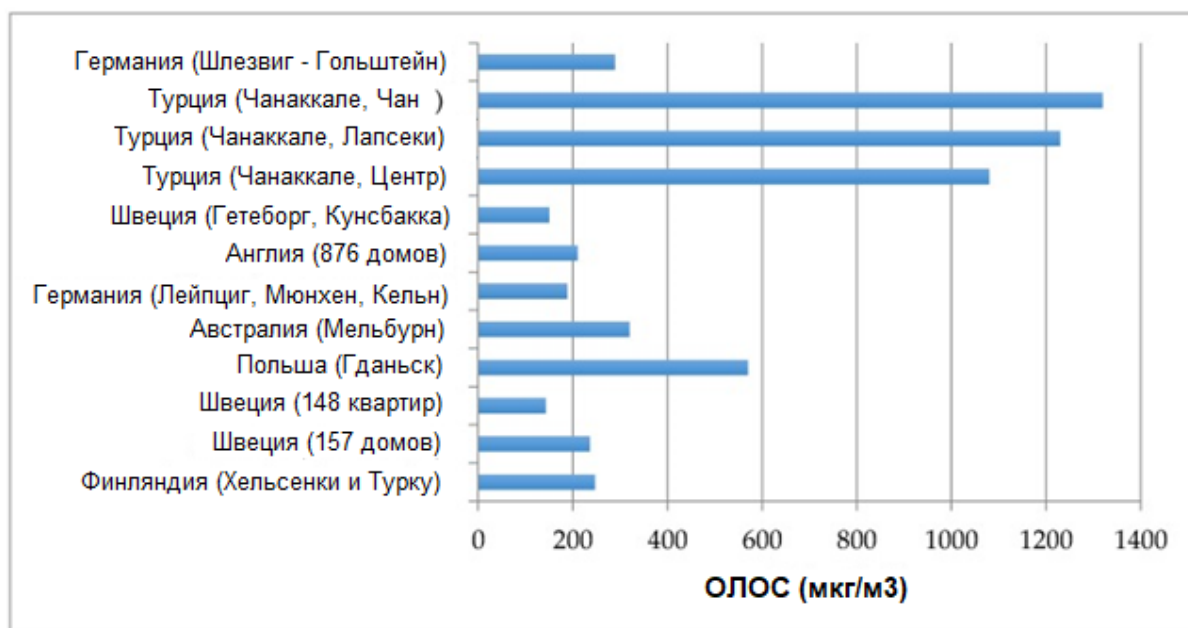


Рис. Средние значения концентрации ОЛОС, измеренные в жилых домах разных стран.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СУММАРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ЛОС В ВОЗДУХЕ

Основные методы определения ОЛОС в воздухе непромышленных помещений изложены в [27]. Они отличаются, как объемом информации, так и способом ее получения. Первый метод основан на хроматографическом разделении компонентов воздушно-паровой смеси с предварительным пробоотбором и пробоподготовкой. Второй – базируется на использовании приборов прямого измерения (direct reading) на месте, без разделения на компоненты. В данной статье такие приборы в соответствии с установившейся практикой будут называться газоанализаторами.

Согласно [27], при измерении ОЛОС хроматографическим методом не требуется идентификация всех зарегистрированных соединений, а к сумме концентраций идентифицированных компонентов внутри «аналитического окна» от гексана до гексадекана должна добавляться сумма концентраций неидентифицированных компонентов в том же окне, рассчитанная в толуольном эквиваленте. Здесь же приводится список из 62 веществ, которые обязательно должны учитываться при определении, и регламентируется способ отбора пробы (на сорбент) с последующей термодесорбцией.

Для детектирования ЛОС в хроматографии используются несколько типов детекторов, в основном пламенно-ионизационный (ПИД) и фотоионизационный (ФИД), а иногда электрозахватный и масс-спектрометрический детекторы. Для контроля карбонильных соединений применяется также высокоэффективная жидкостная хроматография. Результат анализа определяется многими факторами, в том числе условиями пробоотбора, количеством и типами детекторов, способом десорбирования пробы и т. д. В итоге это дает существенное различие результатов для одной и той же пробы. Например, если обычно в воздухе непромышленных помещений идентифицируется около 50 соединений [27], то при использовании двух колонок разной полярности и двух детекторов их число существенно больше [35].

Применение рекомендованной методики измерения ОЛОС, не требующей идентификации всех компонентов, а также индивидуальной калибровки по каждому идентифицированному соединению, приводит к тому, что величина концентрации ОЛОС зависит от эффективности разделения соединений и идентификации, а это является источником неопределенности и ограничивает использование данной методики в качестве инструмента сравнения данных об ОЛОС. Различия в величине ОЛОС, вызываемые разными требованиями к калибровке идентифицированных и не идентифицированных соединений, иллюстрируются примером, приведенным в [27]: сумма концентраций 65 веществ при индивидуальной калибровке составила 50% от суммы тех же веществ, полученной при общей калибровке по толуолу.

Упрощенная хроматографическая методика для измерения ОЛОС рекомендована в [36]. Согласно этой методике, идентификация компонентов не требуется; определяется суммарная площадь всех хроматографических пиков между C₆ и C₁₆, а для вычисления концентрации используется калибровка по толуолу (толуольный эквивалент). При этом величина ОЛОС может

значительно отличаться от истинной, но сопоставимость результатов будет лучше.

Другой подход – применение газоанализаторов, не требующих специальных методик измерений. Эти приборы не используют разделения смеси на компоненты: детекторы (сенсоры) измеряют суммарную концентрацию веществ. В [27] применение газоанализаторов рекомендуется в основном при массовых измерениях ОЛОС, а также для изучения динамики изменения интенсивности источников эмиссии или уровня загрязнения в тех случаях, когда состав загрязнителей меняется незначительно. Отмечается, что желательно наличие корреляции между показаниями газоанализатора и результатами хроматографического анализа. Тем самым, результаты измерений ОЛОС, полученные только с помощью газоанализатора, как бы не вполне признаются.

В то же время использование газоанализаторов имеет ряд существенных практических преимуществ при измерении ОЛОС. Преимущества следующие: анализ воздуха происходит в точке отбора, поэтому нет необходимости в отборе проб и их транспортировке; продолжительность анализа значительно меньше, чем при анализе на хроматографе; не требуется привлечение персонала высокой квалификации, не используются баллоны со сжатыми газами. Стоимость газоанализатора намного меньше стоимости хроматографа. Перечисленные преимущества обеспечивают в итоге существенно меньшие затраты при гораздо более высокой производительности. Последнее обстоятельство особенно важно при обследовании объектов, имеющих множество помещений, например, многоквартирных домов и образовательных учреждений, при изучении динамики изменения загрязнения, при поисках источников, выделяющих ЛОС.

Для измерения ОЛОС могут использоваться только высокочувствительные детекторы, которые способны измерять концентрации на уровне долей ppm (м.д.), и отвечать высоким требованиям в части стабильности и устойчивости к воздействию внешних факторов. В этих приборах результат измерения зависит от типа используемого детектора. Например, в [37] сообщается, что измерение ОЛОС одной и той же смеси с помощью фотоакустического детектора и пламенно-ионизационного детекторов (ПИД) дало настолько различающиеся значения ОЛОС, что их было невозможно сопоставить. В такой ситуации целесообразным выглядит, приведенное в [27] предложение указывать тип детектора, с помощью которого получена величина ОЛОС, например $ОЛОС_{ПИД}$. Следствием этого может явиться введение нормативов на ОЛОС для каждого типа детекторов.

Важным требованием к детекторам, применяемым для измерения ОЛОС, является неселективность к органическим соединениям и отсутствие чувствительности к неорганическим соединениям. По совокупности характеристик наиболее пригодны для этой цели ПИД и фотоионизационные детекторы (ФИД), а также полупроводниковые металло-оксидные сенсоры (МОС). Возможно также применение некоторых других типов сенсоров, удовлетворяющих перечисленным выше требованиям.

ПИД является основным детектором при измерении ОЛОС с помощью газовых хроматографов, поскольку имеет высокую чувствительность к большинству органических соединений. Приборы с ПИД надежны, имеют высокую стабильность измерений. Результаты измерений, полученные на приборах разных фирм, дают сопоставимые результаты. Однако газоанализаторы с ПИД не получили большого распространения, поскольку для работы этого детектора требуется источник водорода, что ограничивает возможности использования данных приборов. Поэтому в настоящее время в качестве приборов для прямого измерения ОЛОС они практически не применяются. Для этой цели в основном используются приборы, в которых установлены МОС и ФИД детекторы.

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОЛОС

У всех газоанализаторов для измерения ОЛОС есть общая проблема, связанная с тем, что калибровка приборов проводится по одному веществу, а измеряется суммарная концентрация многих веществ. При этом перечисленные выше сенсоры имеют разную относительную чувствительность к детектируемым соединениям, что вносит ошибку в результаты измерений. Анализируемую смесь можно охарактеризовать неким средним коэффициентом относительной чувствительности, и при изменении состава анализируемой смеси этот коэффициент может меняться, что повлияет на показания прибора, о чем предупреждают некоторые изготовители [38]. Эту проблему пытаются решить, используя калибровку не по отдельному веществу, а по смеси, как это предложено в [17]. Такой подход, однако, непрактичен, поскольку стоимость многокомпонентных смесей высока, а состав смеси может изменяться во времени. Поэтому некоторые производители подбирают индивидуальное вещество, чувствительность сенсора к которому близка к средней чувствительности смеси [39].

Еще одна проблема состоит в том, что даже однотипные сенсоры разных изготовителей могут иметь различную относительную чувствительность к веществам, относящимся к ЛОС. Это затрудняет сравнение результатов, получаемых приборами разных фирм, что особенно характерно для МОС.

Ныне весьма распространенные приборы с МОС в [27] даже не рассматривались в качестве устройств для измерения ОЛОС, что было связано в первую очередь с нестабильностью характеристик сенсоров. Однако за двадцать лет – с 1997 года благодаря интенсивным исследованиям в области физики полупроводников и технологическому прогрессу произошло существенное улучшение характеристик сенсоров: стабильности, чувствительности, устойчивости к каталитическим ядам и другим факторам [40, 41].

В результате появилось новое поколение МОС. Ряд фирм выпускает или готовится к выпуску специальных моделей сенсоров, предназначенных для измерения малых концентраций ЛОС. Среди этих компаний Figaro, Sensirion, IDT, Alphasense. Известен опыт успешного применения газоанализаторов с МОС для мониторинга ОЛОС [42]. Современные сенсорные платформы

обеспечивают высокое качество получаемой информации и ее обработки [39, 43].

Проблема, связанная, с различной чувствительностью МОС разных производителей, обусловлена прежде всего различием материалов, используемых при изготовлении сенсора. Характеристики сенсора определяются множеством факторов, среди которых химический состав чувствительного слоя, кристаллическая структура, материал подложки, параметры системы нагрева. Естественно, что при таком количестве варьируемых параметров значения чувствительности сенсоров, производимых разными предприятиями, могут существенно различаться.

В качестве примера в таблице 5 приведены значения относительной чувствительности сенсоров трех типов к этанолу и ацетону, определенные для концентраций 1 ppm и 5 ppm. В качестве стандарта использован толуол.

Таблица 5. Относительная чувствительность приборов МОС

Производитель	Тип сенсора	Концентрация, ppm	Относительная чувствительность		Ссылки
			этанол /толуол	ацетон /толуол	
Sensirion	SGP 30	1	2,5	1,3	[39]
IDT	ZMOD4410	5	2,2	0,7	[43]
Winsen Sensor	MP801	1	1,4	1,5	[44]

По мере развития технологии появляются новые типы полупроводниковых структур, что также не способствует стандартизации характеристик сенсоров².

Различие в чувствительности МОС разных изготовителей к одним и тем же веществам может привести к несовпадению результатов измерений ОЛОС приборами, в которых эти сенсоры установлены. Впрочем, результатов сравнительных испытаний в литературе нет, а различие в относительной чувствительности не является препятствием при использовании МОС, например, в системах управления вентиляцией [46].

Наиболее часто, особенно в последнее время, для измерения ОЛОС используются газоанализаторы, оснащенные ФИД (фотоионизационные газоанализаторы). С практической точки зрения это объясняется, в частности, тем, что эти газоанализаторы много лет успешно применяются для контроля органических и неорганических соединений в воздухе рабочей зоны, и накоплен большой опыт их эксплуатации. Чувствительности ФИД достаточно для измерения ОЛОС, и, в отличие от ПИД, он не требует применения источника водорода.

Чувствительность ФИД зависит от многих факторов, в том числе от класса химического соединения. Он, например, имеет высокую

² Здесь следует отметить, что при разработке химических полупроводниковых сенсоров, предназначенных для измерения индивидуальных веществ, обычно ставят задачу увеличения селективности [45], а для сенсоров, предназначенных для измерения ОЛОС по причинам, изложенным выше, желательна была бы одинаковая чувствительность сенсоров.

чувствительность к ароматическим соединениям и в то же время нечувствителен к метану и оксидам углерода, которые являются мешающими соединениями при измерении ЛОС. Относительная чувствительность ФИД к индивидуальным веществам может различаться в несколько раз.

Коэффициенты относительной чувствительности ФИД в основном зависят от характеристик источника излучения, применяемого в ФИД – фотоионизационной лампы, и, в первую очередь, от отношения интенсивностей линий излучения в области вакуумного ультрафиолета. Физика процессов в газовом разряде внутри лампы такова, что лампы, даже производимые разными фирмами, имеют сходные спектры излучения. Это приводит к тому, что величины коэффициентов относительной чувствительности у разных приборов в основном близки между собой. В работе [47] предложена модель для оценки относительной чувствительности ФИД, приведены результаты расчетов коэффициентов по этой модели и имеющиеся в литературе экспериментальные данные по нескольким типам приборов. Частично они представлены в табл. 6. Именно близость значений коэффициентов относительной чувствительности является основой для получения сопоставимых результатов при использовании приборов разных фирм.

Таблица 6. Коэффициенты R относительной чувствительности ФИД с лампой 10,6 эВ

Вещество	R (относительно изобутилена)					
	Данные из литературы					Расчет [47]
	[48]	[49]	[50]	[51]	[52]	
Ацетон	1,17	0,9	1,1	1,1	0,7	1,15
Бензол	0,53	0,47	0,5	0,5	0,5	0,38
1-Бутен	1,5	0,9	0,8–1,0	0,9	1,3	1,07
Гексан	3	5,1	4,3	4,3	4,2	3,9
Гептан	2,2	2,8	3	2,6	2,1	2,20
Изооктан	1,1	1,2	1,1	1,4	1,1	0,64
Метилацетат	7	6,6	-	-	5,2	5,4
Нонан	1,4	1,4	1,5	2,0	1,3	1,05
Толуол	0,56	0,45	0,53	-	0,5	-
Циклогексан	0,9	0,8	0,8–0,9	0,8	0,8	0,66
Этилацетат	4,5	3,2	5,1	4,6	3,6	4,1
Этилбензол	0,56	0,47	0,55	0,5	0,5	0,39

В работе [53] проводились параллельные измерения ОЛОС с помощью газового хроматографа, оснащенного ПИД, и фотоионизационного газоанализатора на реальном объекте (вновь построенные апартаменты), и было получено удовлетворительное совпадение.

Более детальное сопоставление результатов измерения ОЛОС двумя методами было выполнено в [54], где использовались хромато-масс-спектрометр и высокоэффективный жидкостный хроматограф (для определения карбонильных соединений), а также фотоионизационный газоанализатор. Измерения проводились в нескольких помещениях вновь построенного здания

непосредственно после окончания строительства и спустя три месяца, что является типичным для контроля ОЛОС в строительстве. Начальные концентрации ОЛОС, измеренные с помощью лабораторных приборов, составляли от 1200 мкг/м³ до 2400 мкг/м³, что совпадало с результатами, полученными с помощью газоанализатора. Через три месяца величины ОЛОС снизились более, чем на порядок и появилось существенное различие (в 2–4 раза) в результатах прямых и лабораторных анализов. Вероятной причиной этого является изменение количественного и качественного состава загрязняющей смеси во времени, что отразилось и на результатах хроматографического анализа. Если в первой серии измерений доля неидентифицированных соединений составляла примерно 50%, то во второй серии их было существенно меньше.

Свойства газоанализатора с ФИД как эффективного монитора реализуются при управлении устройствами для отбора пробы с целью последующего лабораторного анализа. В работе [55] показания газоанализатора с ФИД применены для расчетов по математической модели, предсказывающей появление высоких концентраций ЛОС. На основании полученных предсказаний производится включение пробоотборного устройства.

Использование приборов прямого измерения имеет настолько большие эксплуатационные преимущества перед лабораторным анализом, что появляется все больше работ, в которых для измерения ОЛОС применяются только газоанализаторы, большинство из которых фотоионизационные. Приборы используются для измерения ОЛОС в торговых помещениях [56, 32], жилых и общественных помещениях, в том числе в детских садах [19, 57–59]. Появились также работы, в которых фотоионизационные газоанализаторы используются в медицинских исследованиях при изучении влияния ЛОС на параметры работы сердца [60, 61], при контроле загрязненности воздуха во время проведения анестезии [62].

Все это свидетельствует о расширении применения фотоионизационных газоанализаторов при измерении ОЛОС. Существующая приборная база делает эти измерения доступными, обеспечивая оперативное получение информации об уровне загрязненности помещений ЛОС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема контроля ЛОС в воздухе, возникшая в 50-е годы XX века, остается важной и в настоящее время, несмотря на тенденцию вывода наиболее токсичных соединений из технологических процессов, полупродуктов, готовых химических продуктов. Контроль концентрации ЛОС особенно актуален для замкнутых помещений, где концентрация ЛОС может быть значительно выше, чем в воздухе за пределами помещений.

Величина ОЛОС не может характеризовать опасность для здоровья человека, но позволяет оценить общую загрязненность и в этом качестве используется в качестве характеристики воздушной среды непромышленных помещений. В связи с этим во многих странах и организациях уже введены или

готовятся к введению нормативы на содержание ОЛОС в воздухе производственных помещений.

Лабораторные методы измерения ОЛОС, рекомендуемые в ряде работ и нормативных документов, трудоемки, дороги, требуют привлечения квалифицированного персонала и недоступны при массовом контроле. Использование газоанализаторов существенно уменьшает стоимость и упрощает выполнение измерений ОЛОС, делая их широкодоступными. Наблюдается рост применения таких приборов там, где есть источники ЛОС.

Принцип действия и характеристики фотоионизационных газоанализаторов позволяют успешно применять их для массовых измерений ОЛОС. Расширяющееся использование фотоионизационных газоанализаторов создает основу для введения нормативных значений ОЛОС, получаемых с помощью этих приборов.

Список литературы:

1. ГОСТ Р ИСО 16000-1-2007. Воздух замкнутых помещений. Часть 1. Отбор проб. Общие положения.
2. Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Official Journal of the European Communities L 309, 27.11.2001. P. 0022.
3. Technical Overview of Volatile Organic Compounds. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds> (дата обращения 20.04.2019).
4. ГОСТ 28246-2017. Материалы лакокрасочные. Термины и определения.
5. ГОСТ Р ИСО 16000-5-2009. Воздух замкнутых помещений. Часть 5. Отбор проб летучих органических соединений (ЛОС).
6. WHO, World Health Organization Indoor Air Quality: Organic Pollutants. EURO Reports and Studies No. 111. Copenhagen: WHO Reg. Office for Europe, 1989.
7. Воробейчик Е.Л. Дис. ... докт. биол. наук. Екатеринбург: ИЭРиЖ, 2004.
8. MacKenzie A.R., Harrison R.M., Colbeck I., Hewitt C.N. // Atmospheric Environment. Part A. General Topics. 1991. V. 25. No. 2. P. 351. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90306-R](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90306-R).
9. Volatile Organic Compounds. <https://iaqscience.lbl.gov/voc-summary> (дата обращения 20.04.2019).
10. Филина Л.П. // Труды Псковского политехнического института. 1999, № 3.1. С. 21.
11. Laor Y., Parker D.B., Page T. // Reviews in Chemical Engineering. 2014. V. 30. No. 2. P. 139. DOI: <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0026>.
12. Brown S.K., Sim M.R., Abramson M.J., Gray C.N. // Indoor Air. 1994. V. 4. No. 2. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1994.tb01-2-00007.x>.
13. Indoor Air Quality Investigation. https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_2.html (дата обращения: 20.04.2019).
14. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
15. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях (с изменениями на 27 декабря 2010 года).
16. Постановление Правительства РФ от 28.01.2006 № 47 от 24.12.2018 (Ред.от 24.12.2018) «Об утверждении положения о признании помещения жилым помещением, жилого помещения непригодным для проживания, многоквартирного дома аварийным и подлежащим сносу или реконструкции, садового дома жилым домом и жилого дома садовым домом».

17. *Molhave L., Clausen G., Berglund B. et al.* // Indoor Air. 1997. No. 7, P. 225. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.00002.x>.
18. *Sassi P.* // Proceedings of 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant. Cumberland Lodge, Windsor, UK, 7-10 Apr. 2016. P. 782.
19. *Chatzidiakou E.* Ph.D. Thesis. London: Bartlett Univ. College, 2014.
20. *Губернский Ю.Д., Новиков С.М., Калинин Н.В., Мацюк А.В.* // Санитария и гигиена. 2002. № 6. С. 27.
21. *Hodgson A.T., Wooley J.D., Daisey J.M.* // Air Waste. 1993. V. 43. No. 3. P. 316.
22. *Weschler C.J.* // Atmospheric Environment. 2009. V. 43. P. 156. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.044.
23. Volatile Organic Compounds (VOC) Criteria for New Construction. White Paper Approved by AIHA Board: March 15, 2017. <https://www.aiha.org/government-affairs/PositionStatements/VOC%20White%20Paper.pdf> (дата обращения 20.04.2019).
24. *Salonen H.* Ph.D. Thesis. Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health, 2009.
25. *Oppl R., Neuhaus T.* // Proceedings of Indoor Air 2008, Copenhagen, Denmark. P. 17. https://www.eurofins.com/media/2273/emission_limit_values_in_critical_discussion_953.pdf (дата обращения 20.04.2019).
26. *Poppendieck D.G., Ng L.C., Schlegel M.P., Persily A.K.* // Proceedings of 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate Conference, Hong Kong, 2014. <https://www.nist.gov/publications/long-term-air-quality-monitoring-net-zero-energy-residential-test-facility-designed> (дата обращения: 20.04.2019).
27. European Commission, Report 19, 1997. http://www.inive.org/medias/ECA/ECA_Report19.pdf (дата обращения: 20.04.2019).
28. *Holøs S.B., Yang A., Lind M. et al.* // International Journal of Ventilation. 2018. DOI: 10.1080/14733315.2018.1435026.
29. German Committee on Indoor Guide Values. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-guide-values> (дата обращения: 20.04.2019).
30. *Bar Z., Jia C., Zhu T., Zhang J.* // Proceedings of Indoor Air 2002. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7659.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).
31. *Abdul-Wahab S.A., Fah En S.C., Elkamel A. et al.* // Atmospheric Pollution Research. 2015. V. 6. No. 5. P. 751. DOI: <https://doi.org/10.5094/APR.2015.084>.
32. *Chen Y-Y., Sung F.-C., Chen M.-L. et al.* // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2016. No. 13. P. 1200. DOI: 10.3390/ijerph13121200.
33. Committee on Sick House Syndrome: Indoor Air Pollution, Progress Report No. 4. Summary of Discussions from the 8th to 9th Meetings. <http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/situnai/kentoukai/rep-eng4.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).
34. *Mečiarová L., Vilčeková S., Křídlová Burdová E., Kiselák J.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. No. 12. P. 1443. DOI: 10.3390/ijerph14121443.
35. *Mattinen M-L., Tuominen J., Saarela K.* // Indoor Air. 1995. No. 5. P. 56. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1995.t01-1-00009.x>.
36. ГОСТ ISO 16000-6-2016 Воздух замкнутых помещений. Часть 6. Определение летучих органических соединений в воздухе замкнутых помещений и испытательной камеры путем активного отбора проб на сорбент Тенах ТА с последующей термической десорбцией и газохроматографическим анализом с использованием МСД/ПВД.
37. *Ayoko G.A., Wang H.* Volatile Organic Compounds in Indoor Air Pollution. Second Edition. Springer–Verlag, 2018.
38. Air Quality Sensors. <https://ams.com/air-quality-sensors> (дата обращения: 20.04.2019).
39. *Rüffler D., Hoehne F., Bühler J.* // Sensors. 2018. V. 18. No. 4. P. 1052. DOI: 10.3390/s18041052.

40. Mizsei J. // Proceedings of the 30th anniversary Eurosensors Conference – Eurosensors 2016, Budapest, Hungary. P. 221. <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-engineering/vol/168/suppl/C> (дата обращения: 20.04.2019).
41. Lin T., Lv X., Hu Z., Xu A., Feng C. // Sensors. 2019. V. 19. No. 2. P. 233. DOI: 10.3390/s19020233.
42. Hori H., Ishimatsu S., Fueta Y., Ishidao T. // Environ. Health Prev. Med. 2013. V. 18. No. 4. P. 285. DOI: 10.1007/s12199-012-0319-1.
43. ZMOD4410 Metal Oxide Gas Sensor for Indoor Air Quality. <https://www.idt.com/document/prb/zmod4410-metal-oxide-gas-sensor-indoor-air-quality-product-brief> (дата обращения: 20.04.2019).
44. MP905 Air-Quality Gas Sensor. <https://www.winsen-sensor.com/sensors/voc-sensor/mp905.html> (дата обращения: 20.04.2019).
45. Обвинцева Л.А. // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 2. С. 113.
46. Herberger S., Herold M., Ulmer H. // Proceedings of 4th Int. Symposium on Building and Ductwork Air Tightness, 30 AIVC Conference Trends in High Performance Building, October, 1-2, 2009 Berlin, Germany. <https://pdfs.semanticscholar.org/c36d/8a0fd76c1c5c2939d91543d6805a5ba69f7c.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).
47. Будович В.Л., Полотнюк Е.Б. Об относительной чувствительности фотоионизационного газоанализатора. <https://www.chromdet.ru/ru/librarys/articles-online/ob-otnositelnoj-chuvstvitelnosti-fotoionizatsionnogo-gazoanalizatora> (дата обращения: 20.04.2019).
48. Technical Note 09 Ion Science PID response factor. <https://www.ionscience.com/wp-content/uploads/2017/03/TA-02-Ion-Science-PID-Response-Factors-UK-V1.12.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).
49. Technical Note TN-106 RAE Systems Inc. https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/Technical-Note-106_A-Guideline-for-Pid-Instrument-Response.pdf (дата обращения: 20.04.2019).
50. BW Technologies, GasAlertMicro 5 PID, Correction Factors, 3 January 2006. <https://www.yumpu.com/en/document/read/11799064/micro-5-pid-correction-factors-enviromed-detection-services/3> (дата обращения: 20.04.2019).
51. PID correction factor. <http://www.intlsensor.com/pdf/PIDcorrectionfactors.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).
52. Application note TSI-148 (A4). <http://www.tsi.com> (дата обращения: 20.04.2019).
53. Kim K.H., Lee J.D., Hong Y.J., Choi Y.J. // Proceedings: Indoor Air 2005. P. 3400.
54. Noguchi M., Mizukoshi A., Yanagisawa Y., Yamasaki A. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2016. V. 13. No. 5. P. 736. DOI: 10.3390/ijerph13070736.
55. Oka K., Iizuka A., Inoue Y. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010. V. 7. No. 12. P. 4100. DOI: 10.3390/ijerph7124100.
56. Bocos-Bintintan V., Smolenschi A., Ratiu I.-A. // STUDIA UBB CHEMIA. 2016. V. LXI. No. 4. P. 203.
57. Vilčeková S., Apostoloski I.Z., Mečiarová L. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. No. 1. P. 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph14010037>.
58. Noguchi M., Mizukoshi A., Yanagisawa Y. // AIJ Journal of Technology and Design. 2011. V. 17. No. 36. P. 577. DOI: 10.3130/aijt.17.577.
59. Senitkova I.J. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 245. P. 082027. DOI: 10.1088/1757-899X/245/8/082027.
60. Mizukoshi A., Kumagai K., Yamamoto N. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010. V. 7. No. 12. P. 4127. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph7124127>.
61. Mizukoshi A., Kumagai K., Yamamoto N. et al. // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2015. V. 12. No. 10. P. 12446. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph121012446>.

62. Потиевская В.И, Попов А.А, Ушаков И.Л. // Научно-практический медицинский рецензируемый журнал Доктор.Ру. Гинекология. 2015. № 11 (112). С. 22. <https://rusmg.ru/images/11-1.pdf> (дата обращения: 20.04.2019).

References:

1. GOST [State Standard] R ISO 16000-1-2007. Indoor air. Part 1. Sampling. General [in Russian].
2. Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. Official Journal of the European Communities L 309, 27.11.2001. P. 0022.
3. Technical Overview of Volatile Organic Compounds. <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds> (accessed 20.04.2019).
4. GOST [State Standard] 28246-2017. Coating materials. Terms and definitions [in Russian].
5. GOST [State Standard] R ISO 16000-5-2009. Indoor air. Part 5. Sampling strategy for volatile organic compounds (VOCs) [in Russian].
6. WHO, World Health Organization Indoor Air Quality: Organic Pollutants. EURO Reports and Studies No. 111. Copenhagen: WHO Reg. Office for Europe, 1989.
7. Vorobeychick E.L. Dr. habil. Thesis (Biology). Ekaterinburg, 2004 [in Russian].
8. MacKenzie A.R., Harrison R.M., Colbeck I., Hewitt C.N. // Atmospheric Environment. Part A. General Topics. 1991. V. 25. No. 2. P. 351. DOI: [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90306-R](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90306-R).
9. Volatile Organic Compounds. <https://iaqscience.lbl.gov/voc-summary> (accessed 20.04.2019).
10. Filina L.P. Trudy Pskovskogo polytechn. instituta [Proceedings of Pskov Polytechnical Institute]. 1999. No. 3.1. P. 21 [in Russian].
11. Laor Y., Parker D.B., Page T. // Reviews in Chemical Engineering. 2014. V. 30. No. 2. P. 139. DOI: <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0026>.
12. Brown S.K., Sim M.R., Abramson M.J., Gray C.N. // Indoor Air. 1994. V. 4. No. 2. P. 123. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1994.t01-2-00007.x>.
13. Indoor Air Quality Investigation. https://www.osha.gov/dts/osta/otm/otm_iii/otm_iii_2.html (accessed 20.04.2019).
14. GOST [State Standard] 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures [in Russian].
15. Sanitary Regulations and Norms SanPiN 2.1.2.2645-10. Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises (amended on December 27, 2010) [in Russian].
16. On approval of provision declaring a building as a living room, a living space as space unsuitable for living, an apartment building as an emergency subject requiring demolition or reconstruction, a garden house as a residential house, and a residential house as a garden house. Decree of the Government of the Russian Federation of January 28, 2006, No. 47 (Revised on December 24, 2018) [in Russian].
17. Molhave L., Clausen G., Berglund B. et al. // Indoor Air. 1997. No. 7, P. 225. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1997.00002.x>.
18. Sassi P. // Proceedings of 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant. Cumberland Lodge, Windsor, UK, 7-10 Apr. 2016. P. 782.
19. Chatzidiakou E. Ph.D. Thesis. London: Bartlett Univ. College, 2014.
20. Gubernsky Yu.D., Novikov S.M., Kalinin N.V., Matsyuk A.V. // Sanitariya i gigiena [Sanitation and Hygiene]. 2002. No. 6. P. 27 [in Russian].
21. Hodgson A.T., Wooley J.D., Daisey J.M. // Air Waste. 1993. V. 43. No. 3. P. 316.
22. Weschler C.J. // Atmospheric Environment. 2009. V. 43. P. 156. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.044.

23. Volatile Organic Compounds (VOC) Criteria for New Construction. White Paper Approved by AIHA Board: March 15, 2017. <https://www.aiha.org/government-affairs/PositionStatements/VOC%20White%20Paper.pdf> (accessed 20.04.2019).
24. *Salonen H.* Ph.D. Thesis. Helsinki: Finnish Institute of Occupational Health, 2009.
25. *Oppl R., Neuhaus T.* // Proceedings of Indoor Air 2008, Copenhagen, Denmark. P. 17. https://www.eurofins.com/media/2273/emission_limit_values_in_critical_discussion_953.pdf (accessed 20.04.2019).
26. *Poppendieck D.G., Ng L.C., Schlegel M.P., Persily A.K.* // Proceedings of 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate Conference, Hong Kong, 2014. <https://www.nist.gov/publications/long-term-air-quality-monitoring-net-zero-energy-residential-test-facility-designed> (accessed 20.04.2019).
27. European Commission, Report 19, 1997. http://www.inive.org/medias/ECA/ECA_Report19.pdf (accessed 20.04.2019).
28. *Holøs S.B., Yang A., Lind M. et al.* // International Journal of Ventilation. 2018. DOI: 10.1080/14733315.2018.1435026.
29. German Committee on Indoor Guide Values. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/commissions-working-groups/german-committee-on-indoor-guide-values> (accessed 20.04.2019).
30. *Bar Z., Jia C., Zhu T., Zhang J.* // Proceedings of Indoor Air 2002. <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB7659.pdf> (accessed 20.04.2019).
31. *Abdul-Wahab S.A., Fah En S.C., Elkamel A. et al.* // Atmospheric Pollution Research. 2015. V. 6. No. 5. P. 751. DOI: <https://doi.org/10.5094/APR.2015.084>.
32. *Chen Y.-Y., Sung F.-C., Chen M.-L. et al.* // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2016. No. 13. P. 1200. DOI: 10.3390/ijerph13121200.
33. Committee on Sick House Syndrome: Indoor Air Pollution, Progress Report No. 4. Summary of Discussions from the 8th to 9th Meetings. <http://www.nihs.go.jp/mhlw/chemical/situnai/kentoukai/rep-eng4.pdf> (accessed 20.04.2019).
34. *Mečiarová L., Vilčeková S., Křídlová Burdová E., Kiselák J.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. No. 12. P. 1443. DOI: 10.3390/ijerph14121443.
35. *Mattinen M.-L., Tuominen J., Saarela K.* // Indoor Air. 1995. No. 5. P. 56. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1995.t01-1-00009.x>.
36. GOST [State Standard] R ISO 16000-5-2009. Indoor air. Part 6. Determination of volatile organic compounds in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID [in Russian].
37. *Ayoko G.A., Wang H.* Volatile Organic Compounds in Indoor Air Pollution. Second Edition. Springer-Verlag, 2018.
38. Air Quality Sensors. <https://ams.com/air-quality-sensors> (accessed 20.04.2019).
39. *Rüffer D., Hoehne F., Bühler J.* // Sensors. 2018. V. 18. No. 4. P. 1052. DOI: 10.3390/s18041052.
40. *Mizsei J.* // Proceedings of the 30th anniversary Eurosensors Conference – Eurosensors 2016, Budapest, Hungary. P. 221. <https://www.sciencedirect.com/journal/procedia-engineering/vol/168/suppl/C> (accessed 20.04.2019).
41. *Lin T., Lv X., Hu Z., Xu A., Feng C.* // Sensors. 2019. V. 19. No. 2. P. 233. DOI: 10.3390/s19020233.
42. *Hori H., Ishimatsu S., Fueta Y., Ishidao T.* // Environ. Health Prev. Med. 2013. V. 18. No. 4. P. 285. DOI: 10.1007/s12199-012-0319-1.
43. ZMOD4410 Metal Oxide Gas Sensor for Indoor Air Quality. <https://www.idt.com/document/prb/zmod4410-metal-oxide-gas-sensor-indoor-air-quality-product-brief> (accessed 20.04.2019).
44. MP905 Air-Quality Gas Sensor. <https://www.winsen-sensor.com/sensors/voc-sensor/mp905.html> (accessed 20.04.2019).

45. *Obvintseva L.A.* // Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal (Zhurnal Rossiskogo Khimicheskogo Obshchestva im. D. I. Mendeleeva) [Russian Chemical Journal (Mendeleev Chemistry Journal)]. 2008. V. LII. No. 2. P. 113 [in Russian].
46. *Herberger S., Herold M., Ulmer H.* // Proceedings of 4th Int. Symposium on Building and Ductwork Air Tightness, 30 AIVC Conference Trends in High Performance Building, October, 1-2, 2009 Berlin, Germany.
<https://pdfs.semanticscholar.org/c36d/8a0fd76c1c5c2939d91543d6805a5ba69f7c.pdf> (accessed 20.04.2019).
47. *Budovich V.L., Polotnyuk E.B.* On the relative sensitivity of photoionization gas analyzer.
<https://www.chromdet.ru/ru/librarys/articles-online/ob-otnositelnoj-chuvstvitelnosti-fotoionizatsionnogo-gazoanalizatora> [in Russian] (accessed 20.04.2019).
48. Technical Note 09 Ion Science PID response factor. <https://www.ionscience.com/wp-content/uploads/2017/03/TA-02-Ion-Science-PID-Response-Factors-UK-V1.12.pdf> (accessed 20.04.2019).
49. Technical Note TN-106 RAE Systems Inc.
https://www.raesystems.com/sites/default/files/content/resources/Technical-Note-106_A-Guideline-for-Pid-Instrument-Response.pdf (accessed 20.04.2019).
50. BW Technologies, GasAlertMicro 5 PID, Correction Factors, 3 January 2006.
<https://www.yumpu.com/en/document/read/11799064/micro-5-pid-correction-factors-enviromed-detection-services/3> (accessed 20.04.2019).
51. PID correction factor. <http://www.intlsensor.com/pdf/PIDcorrectionfactors.pdf> (accessed 20.04.2019).
52. Application note TSI-148 (A4). <http://www.tsi.com> (accessed 20.04.2019).
53. *Kim K.H., Lee J.D., Hong Y.J., Choi Y.J.* // Proceedings: Indoor Air 2005. P. 3400.
54. *Noguchi M., Mizukoshi A., Yanagisawa Y., Yamasaki A.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2016. V. 13. No. 5. P. 736. DOI: 10.3390/ijerph13070736.
55. *Oka K., Iizuka A., Inoue Y. et al.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010. V. 7. No. 12. P. 4100. DOI: 10.3390/ijerph7124100.
56. *Bocoș-Bințișan V., Smolenschi A., Rațiu I-A.* // STUDIA UBB CHEMIA. 2016. V. LXI. No. 4. P. 203.
57. *Vilčeková S., Apostoloski I.Z., Mečiarová L. et al.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14. No. 1. P. 37. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph14010037>.
58. *Noguchi M., Mizukoshi A., Yanagisawa Y.* // AIJ Journal of Technology and Design. 2011. V. 17. No. 36. P. 577. DOI: 10.3130/aijt.17.577.
59. *Senitkova I.J.* // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 245. P. 082027. DOI: 10.1088/1757-899X/245/8/082027.
60. *Mizukoshi A., Kumagai K., Yamamoto N. et al.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010. V. 7. No. 12. P. 4127. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph7124127>.
61. *Mizukoshi A., Kumagai K., Yamamoto N. et al.* // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2015. V. 12. No. 10. P. 12446. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph121012446>.
62. *Potievskaya V.I., Popov A.A., Ushakov I.L.* // Nauchnoprakticheskiy meditsinskiy retsenziruemyi zhurnal Doctor.ru. Ginekologiya [Scientific and practical medical peer-reviewed journal Doctor.Ru. Gynecology]. 2015. No. 11 (112). P. 22 [in Russian]
<https://rusmg.ru/images/11-1.pdf> (accessed 20.04.2019).