



Summary:

К вопросу о нормировании воздухообмена по содержанию CO₂ в наружном и внутреннем воздухе

Описание:

Еще несколько лет назад в отечественных нормативных документах при проектировании вентиляции в помещениях с пребыванием людей CO₂ учитывался только косвенно в удельных нормах воздухообмена. В зарубежных стандартах его концентрация в воздухе помещений служит индикатором содержания других более вредных загрязняющих веществ и соответствующей интенсивности вентиляции.

Ключевые слова: [качество воздуха](#), [CO₂](#), [Углекислый газ](#), [IDA](#), [концентрация CO₂](#), [уровень CO₂](#)

К вопросу о нормировании воздухообмена по содержанию CO₂ в наружном и внутреннем воздухе

И. М. Квашнин, канд. тех. наук, ведущий специалист НПП «Энергомеханика»
И. И. Гурин, директор компании Alfaintek Oy

В журнале «АВОК», № 4, 2008, была опубликована статья Ю. Д. Губернского и Е. О. Шилькрота «[Сколько воздуха нужно человеку для комфорта?](#)», которая вызвала большой интерес у специалистов. Представленный в статье материал показывает, что хотя проблеме нормирования воздухообмена по CO₂ уделяется много внимания, материала для решения этого вопроса пока не достаточно. Данная статья предлагает продолжить обсуждение этой проблемы.

Еще несколько лет назад в отечественных нормативных документах при проектировании вентиляции в помещениях с пребыванием людей CO₂ учитывался только косвенно в удельных нормах воздухообмена. В зарубежных стандартах его концентрация в воздухе помещений служит индикатором содержания других более вредных загрязняющих веществ и соответствующей интенсивности вентиляции. Высокие концентрации углекислого и других газов в наружном воздухе больших городов приводят к необходимости выбора: либо интенсифицировать воздухообмен, вызывая цепную реакцию увеличения потребления энергоресурсов путем сжигания органического топлива с дополнительным загрязнением атмосферы (в том числе CO₂), либо производить очистку приточного воздуха от газов. Это соответствует последним исследованиям ученых о вреде двуокиси углерода для здоровья людей при повышении концентрации в два-три раза по сравнению с чистым атмосферным воздухом.

По данным современной медицины, в составе метаболических (жизнедеятельностных) выделений организма человека выявлено несколько сотен химических соединений, из которых более двухсот веществ – с поверхности кожи и свыше ста – с выдыхаемым воздухом. Одним из наиболее интересных веществ является углекислый газ. Это относительно безвредный газ по ГОСТ 12.1.007-76 относится к 4 классу опасности, он содержится в небольших количествах в составе чистого атмосферного воздуха. По данным большинства источников, его концентрация составляет примерно 0,03 % от объема (об.), то есть в 1

м³ содержится 0,3 л, или $0,3/22,4 = 0,01339$ моль (по данным БСЭ – 0,0314 % об.). Зная молекулярную массу диоксида азота 44 г/моль, легко определить его массу в 1 м³, а именно: $44 \times 0,01339 = 0,589$ г. Концентрация, соответственно, равна 589 мг/м³. В таких количествах углекислый газ необходим для жизнедеятельности человека. По ГОСТ 8050-85 «Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия» [1] плотность газообразной двуокиси углерода составляет 1,839 кг/м³, то есть примерно в 1,5 раза больше воздуха. В таблице 1 приведены формулы перевода величин из одних единиц в другие. Как в отечественных нормативных документах, так и в зарубежных отсутствует норматив предельно допустимой концентрации углекислого газа в атмосферном воздухе. Очевидно, что содержание в воздухе СО₂ будет различным в сельской местности, небольших и крупных городах. Фоновые концентрации определяются выбросами автотранспорта, сжиганием топлива на предприятиях теплоэнергетики и работой промышленных предприятий. Затруднение заключается в том, что мониторинг за уровнем СО₂ службами Центра по гидрометеорологии не ведется. За рубежом углекислый газ, наряду с окислами азота, оксидом углерода, диоксидом серы и летучими органическими соединениями, является типичным загрязняющим веществом, которое подлежит учету при оценке наружного воздуха для проектирования систем вентиляции и кондиционирования. Европейский стандарт EN 13779 «Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems» [2] в качестве общего базового руководства предлагает принимать концентрацию углекислого газа в сельской местности 350 ppm, в небольших городах 400 ppm, в центрах городов 450 ppm. На самом деле она может быть существенно выше. Например, измерения в центре Москвы в безветренную погоду в конце лета в районе Садового кольца показали, что при достаточно интенсивном движении транспорта уровень СО₂ поднимался до 900 ppm (0,09 % об.). Погуляв несколько часов эту концентрацию и без приборов ощутит на себе каждый в виде головной боли.

Таблица 1

Единицы измерения концентраций газов и их взаимный пересчет

C _x	мг/м ³	% (об.)	ppm, см ³ /м ³ (частей на миллион)
C _a			
мг/м ³	1	8312,6•10 ⁻⁴ C _a T / М Р	8312,6 C _a T / М Р
% (об.)	0,12•10 ¹ C _a М Р/ Т	1	10 ⁴ C _a
ppm, см ³ /м ³ (частей на миллион)	0,12•10 ⁻³ C _a М Р / Т	10 ⁻⁴ C _a	1

Примечание:

C_a – числовое значение концентрации в заданных единицах;

C_x – числовое значение концентрации в искомых единицах;

M – молекулярная масса газа;

P – общее давление газовой смеси, Па;

T – температура, °K.

Одним из способов, широко применяемых на Западе, для определения требуемой интенсивности воздухообмена в общественных зданиях, является использование углекислого газа в качестве индикатора качества воздуха. По его концентрации судят о содержании других веществ, выделяемых человеком, которых в относительных концентрациях (отношение фактической концентрации к ПДК) образуется меньше. При снижении уровня СО₂ разбавлением приточным воздухом одновременно снижается уровень концентрации других веществ. Углекислый газ выбран из-за того, что его концентрацию

легко измерить с достаточно высокой точностью и его массовое выделение значительно больше других вредных веществ.

Общеизвестно, что один человек в спокойном состоянии, например работник офиса, за один час потребляет 20–30 л кислорода с выделением 18–25 л углекислого газа, а при занятиях в фитнес- и тренажерных залах – до 36 л и более. Если во вдыхаемом воздухе содержится 0,03 % (об.) CO₂, то в выдыхаемом – 3,6 % (об.), то есть возрастает более чем в 100 раз.

Интенсивно выделяется углекислый газ от газовой плиты при приготовлении пищи. При возрастании содержания в воздухе значения CO₂ выше определенной величины человек начинает чувствовать себя дискомфортно, может впадать в дремотное состояние, возникают головные боли, тошнота, чувство удушья. Его влияние настолько постепенное и слабое, что его трудно сразу обнаружить. Этот предел индивидуален для различных людей – мужчин и женщин, детей. Однако до недавнего времени в отечественных документах отсутствовал норматив качества воздуха помещений для углекислого газа. Лишь гигиеническими нормативами [3] в 2006 году введена максимально разовая ПДК равная 13 790 ppm (27 000 мг/м³) и среднесменная 4 597 ppm (9 000 мг/м³) для воздуха рабочей зоны производственных помещений. Для сравнения: в США эти цифры составляют 30 000 ppm (58 740 мг/м³) и 5 000 ppm (9 790 мг/м³), соответственно. В шахтах [4, 5] на рабочих местах допускается концентрация 0,5 % (об.) или 5 000 ppm. В соответствии с ГОСТ 8050-85 [1] «При концентрациях более 5 % двуокись углерода оказывает вредное влияние на здоровье человека... При этом снижается объемная доля кислорода в воздухе, что может вызвать явление кислородной недостаточности и удушья». Напомним, что максимально разовая и среднесменная концентрация ПДК воздуха рабочей зоны определяются ГОСТ 12.1.005-88 и гигиеническими нормативами ГН 2.2.5.1313-03, ГН 2.2.5.1314-03.

Для помещений жилых и общественных зданий этот норматив по-прежнему отсутствует. Коллизия возникает в связи с тем, что в соответствии со СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» [6], СанПиН 2.1.2.1002-00 «Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям» [7] и др. для этих помещений норматив качества принимается равным для воздуха населенных мест (ГН 2.1.6.1338-03; ГН 2.1.6.1339-03), который, как отмечалось выше, отсутствует. Однако, в отличие от многих других загрязняющих веществ, практически не выделяющихся в помещениях, содержание двуокиси углерода интенсивно увеличивается. Интересно, что еще в справочнике Р. В. Щекина 1976 года [8, с. 37] приводится расчет требуемого воздухообмена на разбавление CO₂ одним человеком.

Европейский стандарт 2004 года [2] предлагает разделять воздух в помещениях с пребыванием людей на категории качества от IDA 4 – низкое, IDA 2 и 3 – среднее, до IDA 1 – высокое. Предполагается несколько способов определения категории качества. Один из них оценивает превышение уровня CO₂, как индикатора, в воздухе помещений над наружным воздухом (табл. 2).

Таблица 2

**Превышение уровня CO₂ в
помещении над его
содержанием в наружном воздухе,
ppm**

Категория помещения	Типичный диапазон	Задаваемое значение
IDA 1	<400	350
IDA 2	400–600	500
IDA 3	600–1 000	800
IDA 4	≥1000	1 200

Зная местонахождение здания (сельская местность, город) и уровень концентрации CO_2 в наружном воздухе легко определить его расчетное содержание в воздухе помещения. Далее приводятся рекомендации по установке определенных классов фильтров, как правило, не менее двух ступеней, для достижения необходимой чистоты воздуха в соответствии с требуемой категорией качества IDA. Это касается не только твердых пылевых частиц, но и основных газов: NO_x , SO_2 , полициклических ароматических углеводородов и летучих органических соединений. Стандарт гласит: «В городской среде рекомендуется использование молекулярных (газовых) фильтров». **Отметим, что по представлению ассоциации АСИНКОМ европейский стандарт [2] принят без изменений как отечественный ГОСТ Р ЕН 13779-2007 «Вентиляция в нежилых зданиях. Технические требования к вентиляции и кондиционированию». ФГУП СТАНДАРТИНФОРМ объявило о том, что он вводится в действие с 1 октября 2008 года.**

Допустимое приемлемое значение содержания углекислого газа в помещениях с пребыванием людей было установлено гигиенистами и принято, например, стандартом ASHRAE 62-1989 на уровне 1 000 ppm (1 958 мг/м³) или 0,1 % (об.). На эту величину опираются многие авторы при расчетах воздухообмена. Это значение фигурирует в СП 2.5.1198-03 «Санитарные правила по организации пассажирских перевозок» [9] для железнодорожных вокзалов и СанПиН 2.5.1.051-96 «Условия труда и отдыха для летного состава гражданской авиации» [10] для кабин воздушных судов. Зная выделение CO_2 одним человеком в офисе – 18 л/ч (0,005 л/с) или 35 200 мг/ч по формуле (Л.2) СНиП 41-01-2003 [6] требуемый расход приточного воздуха для одного человека равен

$$L = 35\,200 / (1\,958 - 589) = 25,7 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$\text{В единицах л/с и ppm } L = [0,005 / (1000 - 300)] \times 106 = 7,14 \text{ л/с}.$$

Первым отечественным документом, в котором предпринята попытка регламентировать содержание CO_2 в наружном и внутреннем воздухе, является стандарт АВОК «Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена» [11]. В качестве рекомендуемой справочной предлагается предельно допустимая концентрация в наружном воздухе: сельская местность – 332 ppm (650 мг/м³), малые города – 409 ppm (800 мг/м³), большие города – 511 ppm (1 000 мг/м³). Верхний допустимый предел концентрации CO_2 в помещениях жилых и общественных зданий не должен превышать концентрацию в наружном воздухе на 638 ppm (1 250 мг/м³). В этом случае требуемый воздухообмен на 1 человека составит 28 м³/ч.

В результате последних исследований, проведенных индийскими учеными в городе Калькутта [12], было выяснено, что так же, как NO_2 , CO_2 является потенциально токсичным для человека даже в низких концентрациях, принимая во внимание его воздействие на клеточную мембрану и биохимические изменения, такие, как увеличение напряжения CO_2 в крови, увеличение концентрации ионов бикарбоната в крови и моче, ацидоз и т. д. Для выявления того, как влияет уровень CO_2 в воздухе на процессы в организме человека, были проведены замеры уровня бикарбоната в крови и в моче человека. Всего было исследовано 593 человек из жилого, коммерческого и промышленного районов города и контрольной зоны, находящейся в экологически чистой сельской местности. Уровень бикарбоната в сыворотке крови – биологический показатель влияния CO_2 – оказался в среднем на 60 % выше у жителей Калькутты, чем у жителей сельских районов, причем самым высоким он был у жителей промышленной зоны. В городе Калькутта CO_2 присутствовал в воздухе в концентрациях от 0,03 до 0,06 %. Уровень вентиляции в помещениях был адекватным почти в 75 % жилых и рабочих помещений. Принимая во внимание то, что увеличение уровня CO_2 в

атмосфере ведет к увеличению его концентрации в воздухе помещения, можно сказать, что он может явиться причиной увеличения уровня бикарбоната в крови.

В своих работах [13, 14], английский ученый D. S. Robertson пишет, что уровень углекислого газа в атмосфере, при котором человечество может выжить, значительно ниже, чем предполагалось, поэтому безопасный для человека уровень углекислого газа требует пересмотра. Он рассчитал максимальный безопасный для человека уровень углекислого газа в атмосфере, составляющий 426 ppm. Ученый также считает, что под влиянием углекислого газа, уровень которого выше указанной цифры, происходит снижение величины pH в сыворотке крови, что ведет к ацидозу. Симптомы начальной степени ацидоза следующие: состояние перевозбуждения и умеренная гипертензия. Далее к ним добавляются сонливость и состояние беспокойства и как следствие уменьшение желания проявлять физическую активность. Существует вероятность того, что когда концентрация углекислого газа в атмосфере достигнет 426 ppm, а это может случиться раньше, чем через два поколения, здоровье, по крайней мере, некоторой части населения Земли, ухудшится.

Финские ученые под руководством Olli Seppanen [15] провели 21 эксперимент на основе более 30 000 испытуемых по исследованию влияния концентрации углекислого газа. Если уровень углекислого газа в офисном помещении был ниже 800 ppm (0,08 % об.), такие симптомы, как воспаление глаз, заложенность носа, воспаление носоглотки, проблемы, связанные с дыхательной системой, головная боль, усталость и сложность с концентрацией внимания, которые возникали у сотрудников при более высокой концентрации CO₂, значительно снижались.

В пресс-релизе ежегодной конференции Европейского респираторного общества в 2006 году были опубликованы результаты исследований, проведенных в пяти странах ЕЭС группой итальянских ученых. Исследования показали, что 68 % детей испытывают на себе негативное влияние CO₂ выше уровня 1 000 ppm. У них наблюдалось тяжелое дыхание, одышка, сухой кашель и ринит чаще, чем у других детей. Были сделаны следующие выводы: у детей, находящихся в помещении с высоким уровнем CO₂, в 3,5 раза выше риск возникновения сухого кашля и в 2 раза – развитие ринита. Они имеют более уязвимую носоглотку, чем их ровесники.

В исследовании корейских ученых о влиянии концентрации CO₂ в помещении на приступы астмы у детей, в домах и квартирах, где живут дети больные астмой, измерялся уровень содержания веществ, которые считаются основными загрязнителями воздуха в помещении, таких как CO, NO₂, аллергены и CO₂. В результате данных исследований были сделаны выводы о том, что самым важным фактором, влияющим на возникновение приступов астмы у детей, является только уровень концентрации CO₂.

Принимая допустимую концентрацию CO₂ в наружном воздухе мегаполиса 450 ppm, а оптимальную во внутреннем воздухе 800 ppm требуемый воздухообмен на 1 человека составит

$$L = [0,005 / (800 - 450)] \cdot 106 = 14,29 \text{ л/с} = 51,4 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Реально концентрация в наружном воздухе может быть еще выше, а внутри помещения могут быть другие источники выделения CO₂, например при приготовлении пищи. При разности содержания CO₂ в наружном и внутреннем воздухе 100 ppm требуемый воздухообмен составит 180 м³/чел., что превышает разумные пределы.

В качестве одной из мер новый американский стандарт ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004 предусматривает динамическое изменение режимов работы вентиляции жилых и общественных зданий. Это реализуется средствами DCV (Demand-Controlled

Ventilation, DCV), путем регулирования количества подаваемого свежего воздуха сверх минимально необходимого по мере изменения реально складывающейся обстановки, определяемой количеством людей, присутствующих внутри вентилируемого объема. Объективной предпосылкой к использованию в отечественной практике является значительное удешевление за последние годы инверторных схем управления скоростью вентилятора путем использования все более доступных частотно-регулируемых приводов. Технология DCV доступно рассмотрена в статье [16]. Однако такой мерой не всегда можно добиться эффективного результата.

О другой мере по снижению содержания вредных газов в воздухе помещений П. Оле Фангер писал в своей статье [17]: «Очистка внутреннего воздуха от газообразных загрязняющих веществ представляет собой многообещающий метод повышения качества воздуха и частичного замещения вентиляции. Разрабатываются различные методы очистки воздуха, включая сорбцию и фотокатализ. Было показано, что последний метод обладает значительной эффективностью фильтрации, которая была зафиксирована при фильтрации отдельных химических веществ, присутствующих в воздухе. Для типичной смеси из сотен химических веществ, присутствующих внутри здания в очень малых концентрациях, при использовании указанных двух методов может быть реально достижимой эффективность очистки более 80 %, то есть очистка может снизить концентрацию загрязняющих веществ и повысить качество внутреннего воздуха в пять раз. При этом очевидно, что для повышения эффективности очистки для типичных источников загрязнения внутреннего воздуха необходимы дополнительные разработки технологии очистки и проведение дальнейших исследований».

Фотокаталитическое окисление (ФКО) является очень многообещающей технологией для уменьшения летучих органических соединений (ЛОС) в воздухе помещения. Однако исследования, проведенные Национальной лабораторией Л. Беркли в 2005 и 2007 годах, показали, что метод фотокаталитического окисления уменьшает количество ЛОС в воздухе помещения, но производит формальдегид как побочный продукт. Ученые считают, что для применения данного метода необходимо провести дальнейшее изучение, с тем чтобы либо уменьшить количество формальдегидов и ацетальдегидов, получаемых в результате реакции, либо соединить эту технологию с применением газоочистителей, для того чтобы улавливать токсичные побочные продукты до того, как они попадут в помещение. К этому необходимо добавить, что ФКО не удаляет углекислый газ, а наоборот – добавляет его в помещение, так как конечными продуктами реакции должны быть CO_2 и вода.

В настоящее время наиболее безопасными для очистки воздуха от газов в помещениях, где находятся люди, можно считать фильтры, основанные на методе адсорбции загрязняющих веществ в составе приточных вентиляционных установок. В качестве фильтрующего элемента используют активированный уголь и высокоэффективные материалы. Такие фильтры уже предлагаются на климатическом рынке.

Если возможность поддержания качества воздуха на высоком уровне при помощи вентиляционных систем не представляется возможным, можно удалять его избыток бытовыми адсорберами углекислого газа.

Выводы

1. Углекислый газ является токсичным для человека даже в относительно низких концентрациях. Его нельзя рассматривать только как индикатор эффективности вентиляции. Наилучшим для человека в помещении является уровень углекислого газа, максимально приближенный к атмосферному.
2. Концентрация CO_2 требует постоянного контроля в помещениях с пребыванием людей в промышленных городах и крупных мегаполисах, где промышленность и транспорт постоянно

загрязняют атмосферный воздух углекислым и другими газами. Особенно это касается детских учреждений и других общественных зданий.

3. Рост углекислого газа в атмосфере, особенно в крупных городах из-за выбросов автотранспорта, предприятий энергетики и промышленности, вызывает необходимость в увеличении воздухообмена в помещениях с пребыванием людей. Это приводит к повышенным затратам энергии и увеличению выбросов CO₂ при ее выработке. Выход из ситуации заключается в достижении разумного оптимума между количеством приточного наружного воздуха и требуемой очисткой от углекислого и других газов.

Литература

1. ГОСТ 8050-85. Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия.
2. Стандарт EN 13779:2004. Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems.
3. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.2100-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (дополнение N 2 к ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны).
4. РД-06-28-93. Правила безопасности при строительстве (реконструкции) и горнотехнической эксплуатации размещаемых в недрах объектов, не связанных с добычей полезных ископаемых.
5. СанПиН 2.2.3.570-96. Гигиенические требования к предприятиям угольной промышленности и организации работ.
6. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование.
7. СанПиН 2.1.2.1002-00. Санитарно-эпидемиологические требования к жилым зданиям и помещениям.
8. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга вторая. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Р. В. Щекин и др. – Киев : Будівельник, 1976.
9. СП 2.5.1198-03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок.
10. СанПиН 2.5.1.051-96. Условия труда и отдыха для летного состава гражданской авиации.
11. АВОК СТАНДАРТ – 1 2002. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. – М. : АВОК-ПРЕСС, 2002.
12. Dr. R. N. Chaudhuri, Dr. D. Sengupta. Report of the research project on evaluation of environmental NO₂, CO₂, benzene and lead exposures of Kolkata population by biological monitoring techniques.
13. D. S. Robertson. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Current science, vol. 90, no. 12, 25 June 2006.
14. D. S. Robertson. The rise in the atmospheric concentration of carbondioxide and the effects on human health. Med. Hypotheses, 2001, 56.
15. Olli Seppanen. [Энергоэффективные системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата помещений](#) // АВОК. – 2000. – № 5.
16. Stanke. В библиотеку проектировщика. Технологии DCV в системах вентиляции // Мир климата. – № 43.
17. П. Оле Фангер. [Качество внутреннего воздуха в зданиях, построенных в холодном климате, и его влияние на здоровье, обучение и производительность труда людей](#) // АВОК. – 2006. – № 2.

18. C. D. Keeling, T. P. Whorf. Atmospheric carbon dioxide record from Mauna Loa. Period of record 1958–2003. Carbon Dioxide Research Group, Scripps Institution of Oceanography, University of California, Internet source.

Книги автора:

- [Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация](#)
- [Предельно допустимые выбросы предприятия в атмосферу. Рассеивание и установление нормативов](#)