

ЗАЩИТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗДАНИЙ ОТ БИОЛОГИЧЕСКОГО ОРУЖИЯ

Лестер Л. Юань

Методы для моделирования загрязнения воздуха в помещении используются, чтобы определить степень защиты, обеспечиваемой зданиями против воздушно-капельных биологических средств. Рассматриваются факторы, которые определяют эффективность защиты здания, в частности, скорости воздухообмена, скорости осаждения частицы, распад биологических средств в окружающей среде, и эффективность фильтров. Из доступной информации определены представительные значения для каждого из этих параметров. Вычислена защита, обеспечиваемая средним американским домом, и количественно определены результаты разумных мер гражданской обороны.

Лестер Юань в настоящее время является членом американского агентства по охране окружающей среды (АООС) от американской ассоциации содействия развитию науки.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы атаки террористов стали более смелыми и привели к большему числу жертв, чем когда-либо прежде¹. Многие связывают эти изменения с появлением нового вида террориста, такого, кто свято верит в экстремальное насилие, и кто подвержен совсем другим рациональным ограничениям, чем политические террористы прошлого. Взрыв 1989 года в Центре международной торговли в Нью-Йорке и зариновая атака в Токио в 1995 году часто упоминаются как примеры этого нового рода терроризма². В этих атаках главной целью являлось просто вызвать так много жертв среди гражданских лиц, насколько это было возможно. К счастью, атаки не нанесли такого обширного ущерба, как это планировалось их организаторами. Однако, был установлен прецедент для чрезвычайно разрушительных террористических актов, и угроза террористического использования оружия массового поражения теперь стала больше, чем когда-либо.

В частности, биологическое оружие (БО), было выделено как оружие, которое могло бы быть чрезвычайно разрушительно, и которое могло бы в принципе быть получено террористом. Управление технических оценок сообщает, что, при известных условиях, биологическое оружие имеет разрушительную мощь, конкурируя только с ядерным оружием. Тем не менее, в отличие от ядерного оружия, к технологиям, используемым при создании биологического оружия, не так уж трудно получить доступ.

Несколько недавних событий, возможно, еще более разрушили некоторые из ограничений, которые существовали ранее для доступа к БО. Во-первых, конец холодной войны ослабил средства контроля за организациями по разработке биологического оружия, и за их персоналом в бывшем Советском Союзе, обеспечивая источник технологии БО, которая может быть относительно доступна. Во вторых, быстрый рост биотехнической промышленности во всем мире ускорил диффузию технологий, которые могут быть адаптированы к разработке и производству БО. Недавние результаты в Ираке высветили легкость, с которой государства могут приобретать и разрабатывать биологические средства. Поскольку биологическое оружие настолько разрушительно, и потому что ограничения к распространению ослабевают, имеется возрастающее беспокойство, что они будут использоваться против целей внутри Америки.

В этой статье основное внимание уделено вопросу о том, насколько жилые здания могут обеспечить жителей защитой от атак с использованием БО. Причина для рассмотрения этой проблемы проста: большинство людей проводит большую часть их повседневной жизни внутри зданий. Фактически, АООС США оценило, что в среднем американцы проводят приблизительно 87 % времени в закрытом помещении⁵. Однако, в большинстве предыдущих технических оценок инцидентов с БО игнорируется влияние зданий, и расчетные значения потерь основаны только на интегрированной наружной поверхностной дозе. Защитные эф-

фекты зданий рассматривались для других токсичных выбросов. Карлссон, например, рассматривал влияние внутреннего осаждения из облаков отравляющего газа⁶, а Энгельманн⁷, и другие, исследовали эффективность защиты зданий против выбросов вдыхаемого плутония. В этой работе мы стараемся расширить эти основные идеи на биологические средства и исследовать аспекты проблемы, которые являются уникальными для биологического оружия.

Остальная часть этой работы построена следующим образом. Сначала представлено краткое обсуждение общих аспектов биологического оружия. После этого мы представим метод, обычно применяемый для моделирования проникновения биологических средств в здания, и обсудим факторы, которые определяют эффективность защиты конкретного строения. Статья заканчивается обсуждением простых мер, которые могут быть использованы отдельными лицами для увеличения эффективности защиты конкретного здания.

Природа биологического оружия

Биологические средства определяются, как живые организмы, или токсины, которые получены от живых организмов, которые распространяются с намерением заражения болезнями поражаемого населения. Для использования в биологическом оружии рассматривался ряд микроорганизмов и токсинов, но в интересах краткости в этой статье будут рассмотрены только два довольно типичных примера. Первый пример, сибирская язва, использовался в многих анализах БО и часто описывается как идеальный бактериологический возбудитель болезни. Он формирует устойчивые споры, которые могут оставаться в живых в ряде сред, и когда вдыхают инфекционную дозу от 8,000 до 100,000 спор⁸, может развиваться инфекционное заболевание, которое является смертельным в 90 % случаев, если не будет применено лечение⁹. Для того, чтобы дать некоторое представление о диапазоне результатов, который обусловлен применением различных средств, мы также рассмотрим вирус венесуэльского конского энцефаломиелита (вирус ВКЭ). Вирус ВКЭ значительно более чувствителен к среде, чем споры сибирской язвы, но инфекционная доза, по оценкам, может достигать 10-100 вирусов¹⁰. Также, в отличие от сибирской язвы, естественно приобретенный вирус ВКЭ редко является смертельным, так что это средство может рассматриваться только как средство вывода из строя.

Для обеспечения эффективности, бактериологический возбудитель болезни должен так или иначе быть распространен среди поражаемого населения. В этом документе, мы обратим особое внимание на воздушно-капельное рассеивание, которое часто рассматривается как метод распространения с самым большим потенциалом для огромного количества потерь. Чтобы рассеивать БО через воздух, нужно сначала образовать облако очень мелких частиц, которое затем разнесется ветром и будет вдыхаться поражаемым населением. Однако, технические аспекты образования такого облака не тривиальны. Сначала, образующиеся частицы должны быть сформированы в строго определенном интервале размеров для вдыхания и осаждения в человеческих легких. Частицы, которые являются большими, чем 5 мкм, имеют тенденцию оседать в верхних путях системы органов дыхания, где они имеют пониженную вероятность порождения инфекции. Частицы меньшие, чем 1 мкм, в значительной степени будут выдыхаться, скорее чем сохраняться в легких¹¹ (1 мкм равен 10⁻⁶ метров.) Таким образом, оптимальный размер для частиц, как полагают, составляет 1 - 5 мкм, хотя этот диапазон может зависеть от определенного организма. Во вторых, потому что биологические средства являются живыми организмами, они должны быть рассредоточены достаточно мягко, чтобы сохранить свою жизнеспособность. В этом отношении, споры сибирской язвы особенно привлекательны, поскольку они высоко устойчивы к механическим воздействиям и к изменениям температуры и влажности¹². Другие средства более чувствительны, и при их рассредоточении должна соблюдаться намного большая осторожность. Комбинация из этих двух факторов предоставляет существенную техническую проблему для любого проектировщика биологического оружия.

После того, как частицы окажутся в воздухе, их поведение будет сильно зависеть от их плотности и размера. Споры сибирской язвы имеют плотность, приблизительно равную половине плотности воды, а плотности других бактериальных и вирусных средств имеют тот же самый порядок величины. При этой плотности, частицы размером 1 - 5 мкм легко переносятся потоками атмосферного воздуха и следуют за всеми, кроме самых мелкомасштаб-

ных, движений жидкости. Силы тяжести будут действовать, чтобы осадить их из воздуха, но этот процесс происходит весьма медленно. (Частица размером 1 мкм оседает на 500 м приблизительно за пять месяцев.)¹³ Другие природные процессы удаляют частицы из воздуха намного более эффективно. Капли дождя, например, собирают частицы, поскольку они падают к земле, и весьма эффективно очищают воздух. В отсутствие осаждения, главный естественный механизм, которым эти частицы удаляются из воздуха, происходит из-за того, что воздушные течения обеспечивают контакт частиц с поверхностью твердого тела. Когда это происходит, частицы имеют тенденцию твердо удерживаться на поверхности¹⁴.

Модель качества воздуха внутри помещений

Чтобы облегчить понимание того, как меняется внутренняя концентрация частиц в зависимости от действия наружных источников, мы рассмотрим простую модель потока воздуха в здание и из него. Модели этого типа использовались много лет, чтобы исследовать проблемы загрязнения воздуха в помещении, и их эффективность была хорошо подтверждена. Конкретный вариант, который мы используем, в основном построен на работе, представленной Щером и Хейтнером¹⁵. Мы начнем здесь с представления краткого обзора модели и обсуждения соответствующего управляющего уравнения. В последующих разделах мы более подробно обсудим отдельные компоненты модели.

Как показано на рисунке 1, в модель включены несколько путей потока воздуха. Обобщенная система отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (ОВКВ) обеспечивает рециркуляцию воздуха внутри и всасывание воздуха снаружи, представлены также приток в здание (инфильтрация) и утечка из здания (эксфильтрация). Мы обсудим подробнее различные пути поступления и выхода воздуха в следующем разделе, но пока, основываясь на этой модели, мы можем записать выражение для концентрации частиц внутри здания следующим образом:

$$V \frac{dc_i}{dt} = q_0 c_0 + q_3 c_0 (1 - F) + q_2 c_i (1 - F) - q_2 c_i - m c_i \quad (1)$$

Здесь V представляет полный объем здания. Переменные c_0 и c_i соответственно представляют концентрации снаружи и изнутри, t представляет время, F обозначает эффективность фильтров, в то время как объемные скорости потока по различным путям обозначаются через q_j ($j = 0, 1, 2, 3$). Процессы внутренних потерь характеризуются членом $m c_i$.

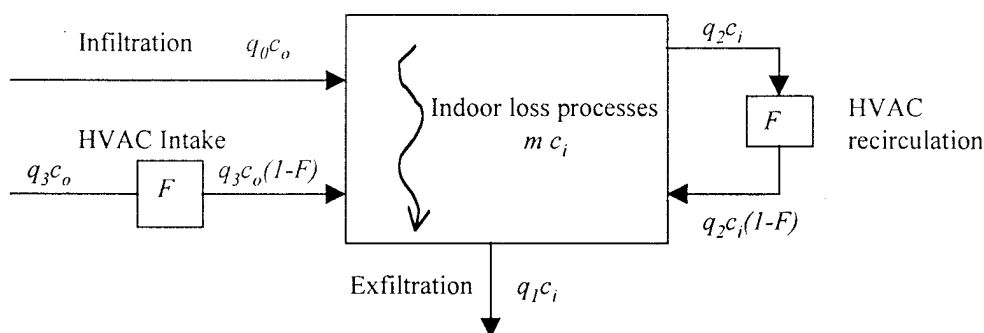


Рис.1. Схема модели. Слева показаны пути ввода (инфильтрация и приток системы ОВКВ), в блоке здания показаны потери внутри помещения, снизу показан путь выхода (эксфильтрация), справа показана рециркуляция.

Модель идеализирует воздушную среду в помещении в нескольких различных отношениях. Во-первых, она представляет полный объем здания как одиночное помещение. Это упрощение применимо прежде всего для многоквартирных отдельных зданий, где число внутренних помещений относительно невелико. Большие, многоэтажные служебные и жилые дома лучше представляются моделями с многими отделениями, поскольку потоки воздуха могут существенно изменяться на отдельных этажах и в различных помещениях на одном и том же этаже¹⁶.

Пространственное распределение частиц в пределах здания также идеализировано, поскольку мы следовали предыдущим работам и предполагали, что концентрации частицы в

пределах здания соответствуют хорошему перемешиванию. Пространственное распределение частиц внутри здания поэтому считалось всегда однородным. Конечно, это предположение только аппроксимирует фактическое распределение частиц, но вносимые ошибки не слишком велики по сравнению с другими неопределенностями модели¹⁷.

Третье упрощение, присущее определению модели, это предположение о постоянстве потоков воздуха. В действительности, инфильтрационные потоки изменяются с метеорологическими условиями вне здания, и система ОВКВ предназначена только для периодической работы. Таким образом, все потоки воздуха изменяются со временем. Это упрощение и другие предположения, перечисленные выше, могут влиять на точность результатов, но для характера анализа, выполненного в этой работе, и качества доступных данных, простая модель наиболее пригодна.

При формулировке модели мы также предположили, что при вводе воздуха в здание через инфильтрационный путь никакие частицы не теряются. Некоторые исследователи выдвинули гипотезу, что часть частиц, несомых инфильтрующимся воздухом, теряется при проходе через трещины в стенах. Однако, недавние измерения Тэтчера и Лейтона¹⁸ показали, что существенных потерь частиц в интересующем нас диапазоне 1 - 5 мкм не наблюдается.

Уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dc_i}{dt} &= (\alpha c_o - \beta c_i) \\ \alpha &= k_o + k_3(1 - F) \\ \beta &= k_2 F + k_1 + m/V \end{aligned} \quad (2)$$

В этой форме вместо объемных расходов q_j мы ввели потоки воздухообмена, которые определены как $k_j = q_j/V$. Каждый поток воздухообмена поэтому представляет процент от общего объема внутреннего воздуха, который перемещается по каждому специфическому пути. Перестраивая таким образом, мы привели управляющее уравнение к довольно простой форме, с двумя параметрами, α и β , которые зависят от комбинаций потоков воздухообмена, эффективности фильтра, и скорости осаждения.

Общее решение уравнения (2) можно записать следующим образом:

$$c_i(t) = \alpha e^{-\beta t} \int_0^t e^{\beta \tau} c_o(\tau) d\tau \quad (3)$$

Для целей оценки результатов атаки биологическим оружием основным параметром, представляющим интерес, является общая интегрированная экспозиция. Это количество соответствует экспозиции средством, полученным человеком, остающимся в здании в течение атаки и относительно длительного периода времени после нее. Мы можем вычислять суммарную экспозицию, интегрируя внутреннюю концентрацию в течение всего времени, следующим образом:

$$E_i = \int_0^{\infty} c_i(t) dt \quad (4)$$

Затем, комбинируя уравнения (3) и (4), мы можем определить выражение для полной экспозиции внутри здания в зависимости от внешней концентрации:

$$E_i = \int_0^{\infty} \alpha e^{-\beta t} \int_0^t e^{\beta \tau} c_o(\tau) d\tau dt \quad (5)$$

Уравнение (5) можно проинтегрировать по частям, получив следующий результат:

$$E_i = \frac{\alpha}{\beta} \int_0^{\infty} c_o(t) dt \quad (6)$$

Таким образом, интегрированная экспозиция, испытываемая жителями здания, равна интегрированной экспозиции за его пределами, умноженной на коэффициент α/β . Мы следуем за прецедентом и обозначаем α/β как кратность уменьшения дозы, R , хотя технически, это представляет только уменьшение экспозиции к средству, скорее чем уменьшение фактической дозы, получаемой жителями. Чтобы преобразовать значения экспозиции в дозы, надо учитывать и другие факторы, такие, как скорость вентиляции легких и частоту дыхания.

Мы можем записать коэффициент уменьшения дозы в следующем виде:

$$R = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{k_0 + k_3(1-F)}{k_2F + k_1 + m/V} \quad (7)$$

Значение коэффициента уменьшения дозы зависит от различных элементов, которые были включены в модель. Мы рассмотрим каждый из этих элементов, скорости воздухообмена, внутренние процессы удаления, и эффективность фильтрации, в следующих разделах.

Скорость воздухообмена

Суммарная скорость воздухообмена - это просто скорость, с которой воздух внутри здания заменяется внешним воздухом. Внешний воздух проходит в здание многими путями, которые могут быть сгруппированы в три общие категории¹⁹. Первая категория, естественная инфильтрация, происходит, поскольку воздух просачивается сквозь трещины в стенах, под дверями, и через плохо загерметизированные отверстия. Скорость, с которой происходит эта утечка, сильно зависит от внешних параметров окружающей среды. Например, более высокие скорости ветра приводят к большим инфильтрационным потокам в здание. Точно так же большой перепад температур между зданием и внешней средой может увеличивать инфильтрационные потоки. То есть, когда воздух в помещении более горяч, чем наружный воздух, он поднимается и выходит через верхнюю часть здания, в то время как холодный воздух засасывается в нижней части здания. Второй источник внешнего воздуха, искусственная вентиляция, является фактором прежде всего в сильно герметизированных коммерческих зданиях, где вентиляционные сети активно смешивают внешний воздух с возвратным потоком, чтобы улучшить качество воздуха. Скорости, с которыми это перемешивание происходит, обычно определяются автоматически предварительно запрограммированной вентиляционной сетью. Последний путь, которым внешний воздух попадает в здание, связан с деятельностью людей, проживающих в здании, и открывающих и закрывающих окна и двери. Из-за этих многих факторов, вариабельность общих потоков воздухообмена между различными зданиями огромна.

Экспериментальные измерения суммарных скоростей воздухообмена подтверждают, что существуют большие различия между индивидуальными зданиями. Вообще говоря, большинство измерений потоков воздухообмена проведено на многоквартирных изолированных зданиях, чем на больших административных зданиях. Следовательно, статистические исследования для меньших зданий намного больше доступны. Несколько групп исследовали доступные данные для многоквартирных изолированных зданий и попытались разработать аппроксимации для предсказания скоростей воздухообмена для типичных американских домов. Например, исследователи в АООС США подогнали пригодные экспериментальные измерения к эмпирической зависимости, по которой суммарная скорость воздухообмена зависит от скорости ветра и перепада температур²⁰. Энгельманн²¹ провел обширный обзор предыдущих измерений воздухообмена и также разработал эмпирические отношения между скоростью ветра, перепадом температур и скоростей воздухообмена. В других компиляциях данных старались получить только точные статистические выражения для скорости воздухообмена в американских домах. Шерман и Дикерхоф²² компилируют обширное количество данных утечки воздуха, собранных методами продувки дверей. Поскольку этот метод измерений утечки требует повышения давления в доме по отношению к нормальному уровню, преобразование этих данных к естественным скоростям воздухообмена не является прямым. В другом исследовании, Меррей и Бермастер²³ компилируют сводные данные по скорости воздухообмена по более, чем 2800 домашних хозяйств в Соединенных Штатах. Скорости воздухообмена, которые они используют, были непосредственно измерены слежени-

ем за временной эволюцией концентрации инертных газов-маркеров, которые были введены в каждый дом. Они находят, что средняя для всех американских домов и усредненная по всем сезонам скорость воздухообмена равна 0,76 час. То есть, в типичном домашнем помещении 76 % воздуха внутреннего воздуха будет заменено на наружный в течение одного часа. Скорости воздухообмена, полученные в этом исследовании, изменяются в зависимости от региона США, и от сезона, так что вариабильность полного набора данных весьма высока.

Скорости воздухообмена для больших зданий могут меняться даже больше, чем для изолированных многоквартирных зданий, из-за широкого разнообразия систем ОВКВ, которые используются в этих зданиях. Также, насколько известно автору, не имеется никаких статистических вычислений для потоков воздухообмена в этих зданиях.

В нашей модели мы сложили вместе человеческие действия с естественной инфильтрацией как поток единого ввода (k_0), и сохранили второй путь поступления через систему ОВКВ (k_3). Это различие предоставляет простой способ для исследования различий между маленькими жилыми и большими коммерческими зданиями. Единственным путем выхода остается эксфильтрация.

Чтобы изолировать влияние скорости воздухообмена на внутреннюю концентрацию, мы упрощаем модель до наиболее основной формы, пренебрегая внутренними процессами потерь (установка $m = 0$) и полагая, что искусственную вентиляцию отсутствует (установка $k_2 = k_3 = 0$). Из условия сохранения массы, две оставшиеся скорости воздухообмена (k_0 и k_1) должны быть равны, и коэффициенты в уравнении (2) могут быть записаны как $\alpha = \beta = k$. Мы далее идеализируем ситуацию, принимая, что наружная концентрация является постоянной для конечного промежутка времени, после чего она мгновенно изменяется до нуля. Эта простая модель моделирует прохождение одиночного облака токсинов или биологических средств, но игнорирует флуктуации концентрации непосредственно внутри облака. Уравнение (2) может быть решено весьма легко для эволюции наружной концентрации такого вида. На рисунке 2 показаны результаты для двух примерных значений потоков воздухообмена.

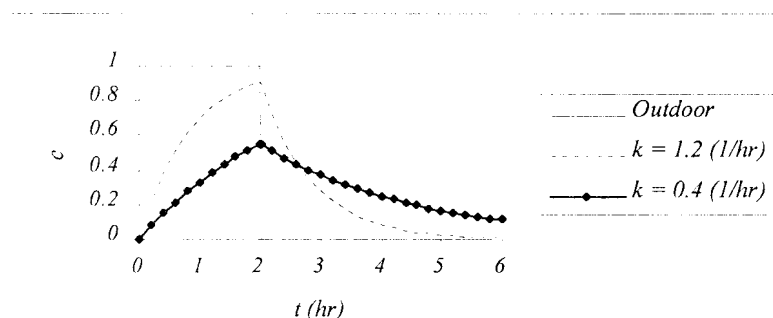


Рис. 2. Временная эволюция уровней внутренней концентрации.

Эволюция внутренних уровней концентрации следует относительно простому закону. В то время, когда присутствует облако, концентрация внутренней установки повышается и асимптотически приближается к наружному значению. Как только облако проходит, внутренняя концентрация начинает экспоненциально уменьшаться, стремясь к нулю. Постоянная времени для обоих из этих процессов - это скорость воздухообмена k . Из графика очевидно, что максимальная концентрация, достигнутая внутри, зависит от величины скорости воздухообмена по отношению к протяженности токсичного облака. Для случаев, в которых облако является маленьким и скорость воздухообмена мала, концентрация внутри здания не будет иметь достаточного времени, чтобы увеличиться к максимальной величине, сопоставимой с наружными уровнями. Однако, если мы рассматриваем общее количество интегрированной дозы (уравнение 6), мы видим, что доза, получаемая внутри здания идентична той, которая получается снаружи ($\alpha = \beta$ и $R = 1$). Интуитивно, этот результат кажется разумным. Медленная скорость воздухообмена сохраняет максимальные концентрации внутри здания низкими, но после того, как снаружи облако проходит, медленный воздухообмен препятствует замене загрязненного воздуха внутри здания на чистый наружный воздух.

Теперь, полезность датчика для биологических средств становится очевидной. Если жители здания знают точно, когда облако прошло, они могут провентилировать здание в соответствующий момент и значительно уменьшить свою полную дозу. В таких случаях, полная доза сильно зависела бы от скорости воздухообмена, поскольку низкая скорость воздухообмена могла бы сильно понизить максимальные концентрации, наблюдаемые внутри здания. Много вычислений для эффективности защиты зданий против ядерных аварий основаны на этой предпосылке, поскольку планировщики предполагают, что они будут знать расположение радиоактивного облака²⁴. В случае биологического оружия, жители здания, вообще говоря, не будут знать расположения облака. Фактически, в многих сценариях, атака БО происходит без уведомления, и идентификация атаки происходит позже, когда люди начинают заболеть. Поэтому, в этой работе мы предполагаем, что жители здания остаются в закрытом помещении во время атаки и в течение длительного времени впоследствии, и будем использовать уравнение (6) для вычисления полной дозы.

Процессы внутреннего удаления

Мы теперь рассмотрим влияние процессов внутри здания, которые приводят к уменьшению концентрации частиц. К этому исследованию имеют отношение два процесса: осаждение и распад. Каждый из них дает вклад в член m в уравнении (1), и в последующем разделе мы обсудим соответствующие значения для коэффициента m .

Осаждение происходит, когда частицы, которые несет локальное поле, сталкиваются с поверхностью твердого тела. Как только они входят в контакт с поверхностью, частицы имеют тенденцию оседать довольно прочно. Физические процессы, благодаря которым это сцепление происходит, до конца не поняты, но вообще думается, что комбинация сил Ван дер Ваальса, электростатических сил, и сил поверхностного натяжения ответственна за прилипание частиц, оседающих на поверхность²⁵, потому что частицы твердо прилипают к практически любой поверхности; в большинстве случаев ограничивающим фактором в процессе осаждения является скорость, с которой частицы переносятся из воздуха на поверхность твердого тела.

Транспортный процесс довольно сложен и зависит от размера частиц и характера локального поля потока. Для вывода выражения, которое может использоваться в практических приложениях, большинство исследователей, предполагает, что скорость осаждения пропорциональна локальной концентрации частиц и полной доступной площади поверхности. Константа пропорциональности в этом выражении является тогда скоростью осаждения v_d , так что мы можем описать осаждение следующим образом:

$$m = v_d A \quad (8)$$

В этом выражении A представляет полную площадь поверхности в пределах здания. Конечно, v_d зависит также от ориентации рассматриваемой поверхности. Например, для поверхностей, ориентированных вверх, v_d должна включить влияние осаждения частиц силой тяжести в дополнение к осаждению полем потока. Чтобы упростить представление, большинство моделей рассматривает среднюю скорость осаждения для всех поверхностей, но определяет различные значения для различных диапазонов размера частиц.

Показано, что скорость осаждения частиц чрезвычайно трудно определить как теоретически так и экспериментально. Самый современный теоретический подход полагается на несколько упрощающих предположений и вычисляет скорость осаждения для трех различных идеальных случаев воздушного потока в камере: однородно турбулентное течение, вынужденное ламинарное течение, и поток, управляемый плавучестью³⁶. Эти теоретические объяснения обеспечивают основание для предсказания качественных тенденций для скоростей осаждения частиц различных размеров и в различных условиях потока. При сравнении с экспериментальными измерениями достигнуто разумное соглашение, но это соглашение зависит от подгонки числовых параметров, которые характеризуют поток воздуха в камере. Точное определение этих параметров априорно трудно, и это ограничивает применимость теории.

Непосредственное измерение скорости осаждения также трудно. Результаты нескольких недавних исследований приведены в Таблице 1 для частиц с размером 1 мкм. Как

можно наблюдать из перечисленных данных, значения измеренной скорости осаждения удивительно сопоставимы между различными экспериментами. Отклонения, которые существуют, могут быть приписаны различиям в экспериментальных конфигурациях. Скорости осаждения от Ксю и других, например, являются существенно более низкими, чем другие эксперименты. Это различие можно, вероятно, объяснить двумя факторами. Во-первых, Ксю и другие использовали в качестве своего источника частиц табачный дым из окружающей среды, и большая часть этих частиц имела диаметр меньше 1 мкм. Данные, перечисленные выше, представляют только самые большие частицы в указанных исследованиях. Во-вторых, что, вероятно, более важно, изучение Ксю было выполнено в модельной камере, изготовленной из фанеры и оставленной необработанной. Таким образом, поверхности в их камере были менее грубы чем те, можно было бы ожидать в обычной комнате с мебелью.

Табл. 1. Экспериментальные скорости осаждения частиц.

Ссылка	Расположение	V_d (см/сек)
27	Комната с мебелью	0.011
28	Комната с мебелью	0.017
29	Модель комнаты	0.001-0.004
30	Комната с мебелью	0.01
31	Лабораторная емкость	0.05

Те же самые проблемы, появляющиеся в интерпретации результатов Ксю и других, возникают и при оценке надежности других исследований. Типы частиц, используемых в разных исследованиях, весьма отличны друг от друга. Офферман исследовал табачный дым из окружающей среды, Тэтчер и Лейтон использовали окружающую пыль, а Фох и другие, и Окуяма и другие применяли частицы из кварца и полистирола. Существуют также различия в конфигурациях экспериментальных отсеков. Исследование Окуямы и других было выполнено в маленькой, гладкой лабораторной камере, воздух в которой перемешивался вентилятором, в то время как другие исследования проводились в мебелированных комнатах, в которых движение воздуха обеспечивалось только жителями и существующей системой ОВКВ. Из-за многих различий между экспериментами, нельзя придавать чрезмерное значение кажущемуся согласию в скоростях осаждения, и следует понимать, что этим значениям присуща значительная неопределенность. Тем не менее, на основании этого обзора данных по скоростям осаждения, мы будем использовать скорость осаждения в 0.01 см/сек для частиц в 1 мкм. Это значение также сопоставимо с используемым Уэшлером и Шилдсом³² в их модели.

Все значения, представленные в Таблице 1, соответствуют частицам с диаметром 1 мкм. К сожалению, данные скорости осаждения для частиц большего размера скудны. Назаров и Касс³³ представили законченный анализ механизмов осаждения частиц, и вообще говоря, обнаружили, что скорости осаждения увеличиваются для частиц, больших, чем 1 мкм, поскольку при увеличении размеров частиц возрастает роль осаждения частиц силой тяжести. Измерения Фоха и других, а также Тэтчера и Лейтона поддерживают эту гипотезу. На основании этих теорий и ограниченных экспериментальных данных, мы используем значение 0.05 см/сек для частицы в 5 мкм.

Чтобы исследовать влияние скорости осаждения, мы возвращаемся снова к модельному уравнению (2). Мы продолжаем пренебрегать влиянием системы ОВКВ, но теперь можем включать эффекты внутренних процессов удалением следующим образом:

$$\beta = k_1 = m/V \quad (9)$$

Теперь фактор уменьшения дозы становится меньше единицы:

$$R = \frac{k_0}{k_1 + v_d A/V} \quad (10)$$

Теперь возможно исследовать эффекты защиты здания, принимая во внимание осаждение агентов на внутренних поверхностях. На рисунке 3 показана кратность уменьшения дозы, R , как функция скорости воздухообмена для частиц в 1 мкм и 5 мкм, с использованием скоростей осаждения, указанных выше. Для отношения площади поверхности к объему используется типичное значение 2.0 1/м^{34} .

Прежде, когда осаждением пренебрегалось, кратность уменьшения дозы была зафиксирована как единица, независимо от выбора скорости воздухообмена. Теперь, с учетом осаждения, мы находим, что кратность уменьшения дозы уменьшается с понижением скорости воздухообмена. Эта тенденция обладает физическим смыслом: так как скорость осаждения не изменяется, более медленные скорости воздухообмена обеспечивают дополнительное время для процессов осаждения, чтобы удалить частицы из воздуха. Как отмечено ранее, средняя по всем американским домам скорость воздухообмена равна 0.76 1/час , и, таким образом, с принятой скоростью осаждения эти дома обеспечивают фактор защиты примерно в 0.51 для частиц в 1 мкм . Это означает, что люди, остающиеся в закрытом помещении во время атаки, получают только 51% от дозы тех, кто остается на открытом воздухе. Скорость воздухообмена в более сильно герметизированном доме с низким энергопотреблением, вероятно, ближе к 0.2 , что понижает кратность уменьшения дозы до приблизительно 0.19 . Поскольку частицы в 5 мкм осаждаются более быстро, чем частицы в 1 мкм , эффекты защиты здания(строительства) проявляются сильнее. При скорости воздухообмена 0.76 1/час , внутренняя доза для частиц в 5 мкм составит только 17% от наблюдаемой снаружи. Очевидно, что когда учитывается влияние осаждения, уменьшение скорости воздухообмена обладает позитивным воздействием на свойства защиты зданий.

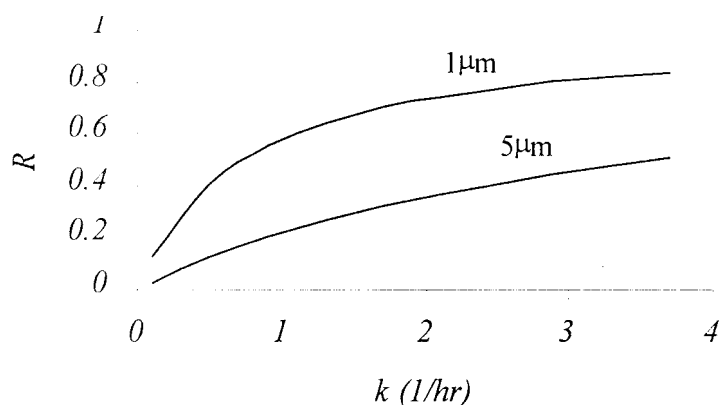


Рисунок 3. Фактор уменьшения дозы в зависимости от скорости воздухообмена.

Второй внутренний процесс удаления, который мы рассматриваем - это биологический распад. Живые организмы имеют конечную продолжительность жизни, когда они сосредоточены, как аэрозоль в среде. Ультрафиолетовое излучение, избыточная влажность, и экстремальные температуры, действуют совместно, чтобы уничтожить биологические средства прежде, чем их будут вдыхать. В то время как споры сибирской язвы более устойчивы, чем незащищенные бактерии или вирусы, они, тем не менее, могут распадаться со скоростью 2% в минуту под влиянием яркого солнечного света³⁵. Следовательно, большинство моделей дисперсии биологического средства включает член экспоненциального распада, чтобы представить потерю жизнеспособных организмов из-за параметров окружающей среды. В случае биологических средств, которые проникли во внутреннюю среду, существенные уровни ультрафиолетового излучения отсутствуют, и распад спор сибирской язвы незначителен. Другие средства все еще распалаются: вирус ВКЭ, например, распадается в закрытом помещении со скоростью 2% в минуту, когда влажность высока, и со скоростью 0.5% в минуту при более низкой влажности³⁶. Чтобы моделировать влияние биологического распада во внутренней среде, мы прибавляем другой член к нашему выражению для коэффициента m , используя параметр k_e , чтобы представить скорость биологического распада:

$$M = v_d A + k_e V \quad (11)$$

Коэффициент уменьшения дозы можно рассчитать, как и раньше, но с учетом как осаждения, так и биологического распада:

$$R = \frac{k_0}{k_1 + v_d A/V + k_e} \quad (12)$$

На рисунке 4 мы сравниваем предсказанные кратности уменьшения дозы для сибирской язвы и для вируса ВКЭ, для частиц в 1 мкм. Константа распада, используемая для вируса ВКЭ равна 2 % в минуту; однако, этот относительно медленный распад в окружающей среде производит, тем не менее, существенное сокращение внутренней экспозиции при его учете в проблеме воздухообмена. Вспомним, однако, что инфекционная доза вируса ВКЭ приблизительно на два порядка величины меньше, чем у сибирской язвы. Так, низкие экспозиции могут все еще приводить к существенной заболеваемости.

Фильтрация

В большинстве американских зданий используется некоторая форма системы принудительной вентиляции, которая обеспечивает рециркуляцию воздуха внутренней части после его нагревания или охлаждения. В более сложных системах ОВКВ, применяемых в больших зданиях, в обратный поток примешивается также некоторая часть наружного воздуха. Во всех этих системах воздух перед возвращением во внутреннюю часть здания пропускается через фильтры, и этот процесс может приводить у уменьшению внутренней концентрации частиц.

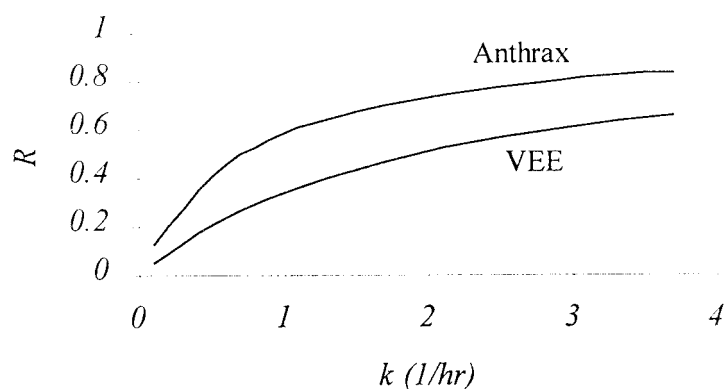


Рисунок 4. Влияние распада в окружающей среде.

Фильтры ОВКВ, используемые в США, должны иметь эффективность, которая определяется Американским обществом инженеров отопления, охлаждения, и кондиционирования воздуха (АОИООКВ). Одна система оценки фильтров, используемая в настоящее время, основана на измерении отношения непрозрачности пылевого пятна, образующегося в воздушном потоке на входе конкретного фильтра, к непрозрачности такого же пятна на его выходе, обеспечивая меру "эффективности пылевого пятна"³⁷. К сожалению, эффективность пылевого пятна, и другие стандарты фильтров АОИООКВ только обеспечивает информацию для полной массы аэрозольных частиц, собранных фильтром, и не предоставляют никакой информации для эффективности фильтра для различных размеров частиц. В настоящее время предпринимаются усилия для изменения системы оценки и для представления информации об эффективности, зависящей от размеров частиц, и мы использовали некоторые из этих предварительных исследований, чтобы обеспечить некоторые данные для оценки эффективности фильтра для размеров частиц, представляющих интерес для БО³⁸.

Тип фильтров, обычно используемых в системах ОВКВ для жилых зданий, характеризуется низкой эффективностью, и для них норма "эффективности пылевого пятна" установлена в 25 %. Эти фильтры предназначены для того, чтобы удалять очень большие частицы с диаметрами больше, чем 50 мкм, так что частицы с размером в 1 - 5 мкм, характерным для

БО, проходят через них беспрепятственно. Из-за того, что коммерческие здания более сильно герметизированы, чем жилые дома, они, вообще говоря, нуждаются в более эффективной защите от частиц в своих системах ОВКВ, чтобы поддерживать приемлемое качество воздуха в помещении. В типичном современном административном здании весь рециркулируемый и внешний воздух пропускается через набор фильтров со средней эффективностью (60 % - 65% по критерию пылевого пятна). Эти фильтры удаляют приблизительно 55 % частиц с размером в 1 мкм, приблизительно 88 % частиц с размером 2 мкм, и их эффективность для еще больших частиц продолжает увеличиваться³⁹

Специальные фильтры ВЭПВ (высоко эффективные пылевые воздушные), которые специально (в особенности), которые специально разработаны для удаления мелких частиц, являются доступными для использования в больницах и переносных воздушных фильтрах, и они могут удалять почти 100 % частицы с размерами 1 - 5 мкм. Однако, эти высокоэффективные фильтры также оказывают большое сопротивление потоку воздуха, так что они требуют использования вентиляционных сетей, специально разработанных для преодоления этого сопротивления.

Недавно стал коммерчески доступен новый тип фильтра, известный как электростатический фильтр, в котором волоконные пряди изготовлены из электрически непроводящего материала, позволяющего фильтру удерживать заряд статического электричества. Этот электростатический заряд обеспечивает дополнительное притяжение мелких частиц, так что электростатический фильтр удаляет заметную часть мелких частиц при использовании довольно большого зазора между волокнами, который поддерживает высокие скорости воздухообмена. Исследовательские версии этого фильтра удаляли целых 95 % частиц в 1 мкм⁴⁰, в то время как коммерческие фильтры, которые являются в настоящее время доступными, удаляют, согласно заявлениям, приблизительно 60 % частиц в 1 мкм. Эффективность этого коммерческого фильтра улучшается для больших размеров частиц, достигая 92 % для частиц в 3 мкм, и 97 % для частиц в 5 мкм⁴¹.

Чтобы изучить влияние фильтрации на защитные свойства зданий, мы сначала предполагаем, что система ОВКВ только рециркулирует воздух внутренней части, и что внешний воздух поступает только за счет инфильтрации. То есть, в вентиляционную сеть принудительно не поступает никакой дополнительный воздух ($k_3 = 0$), как это и имеет место для большинства многоквартирных жилых домов.

Если принять во внимание рециркуляцию через фильтр, то кратность уменьшения дозы, R , становится равной:

$$R = \frac{k_0}{k_2 F + k_1 + v_d A / V} \quad (13)$$

Пока мы пренебрегаем распадом в окружающей среде. Как показано на рисунке 1, скорость воздухообмена, k_2 , представляет собой скорость, в которой воздух внутренней части рециркулирует через фильтры. Эффективность фильтра обозначена через F , так, чтобы совершенно эффективный фильтр, который удаляет все загрязняющие примеси в воздухе, имел бы $F = 1.0$. Дополнительный фактор, который теперь появился в знаменателе, $k_2 F$, отражает результаты фильтрации. Высокие значения F имели бы очевидное влияние на общее значение вдыхаемой дозы, поскольку более эффективные фильтры удалят большее количество загрязняющих примесей из воздуха. Присутствие коэффициента k_2 демонстрирует важность рециркуляции. То есть, чем быстрее воздух в здании рециркулирует через фильтры, тем сильнее фильтры влияют на конечную интегрированную дозу.

Как обсуждалось прежде, большинство существующих фильтров в системах ОВКВ для жилых домов не удаляют мелкие частицы, которые как раз и наблюдается в биологическом оружии. Следовательно, $F = 0$, и фильтрация не имеет никакого влияния. Однако, если заменить стандартные воздушные фильтры электростатическими фильтрами, то система ОВКВ становится эффективным средством удаления частиц из воздуха. На рисунке 5 приведены кривые уменьшения дозы для частиц в 1 мкм для случая без фильтрации и случая с фильтрацией. Для этих вычислений мы предположили, что эффективность фильтра равна 60 %, и что скорость рециркуляции, равна 1.5 1/час. Скорости осаждения те же самые, которые ис-

пользованы в предыдущих примерах. При средней скорости воздухообмена 0.76 1/час, доза для людей, защищенных внутри, теперь равна только 34 % дозы, получаемой снаружи.

На рисунке 6 показано влияние электретоного воздушного фильтра для частиц в 5 мкм. Уменьшение фактора понижения дозы, наблюдаемой с добавлением фильтра, несколько меньше, чем наблюдаемое для меньших частиц, несмотря на увеличение эффективности фильтра. Для этих больших частиц, осаждение является таким эффективным средства понижения концентрации, на которые дополнительная фильтрация не может сильно повлиять. Типичное административное здание более сильно загерметизировано, чем жилые дома, так что главным источником наружного воздуха является система ОКВК. Как отмечалось раньше, модель одного отделения, которую мы используем, не отражает сложности потока воздуха в многоэтажном служебном здании. Кроме того, средние данные по скорости воздухообмена для таких зданий не очень доступны. Мы можем поэтому только представить примеры значений, которые можно было получить, представляя набор примерных расчетов, в которых используются скорости воздухообмена для одного конкретного здания, для которого проводились обширные измерения⁴². Как это типично для новых административных зданий, инфильтрация в них мала и не принималась в расчет, а рециркуляция является основным источником воздухообмена. Исходя из предоставленных данных о вентиляции мы вычислили скорость рециркуляции, равный $k_2 = 5$ 1/час, и скорость, с которой закачивается наружный воздух, $k_3 = 0.5$ 1/час. Мы также пренебрегали инфильтрацией (установка $k_0 = 0$), и предполагали, что поток впуска системы ОКВК равен потоку эксфильтрации ($k_3 = k_1$). Кратность уменьшения дозы может тогда быть записана как:

$$R = \frac{k_3(1-F)}{k_2F + k_1 + v_d A/V} \quad (14)$$

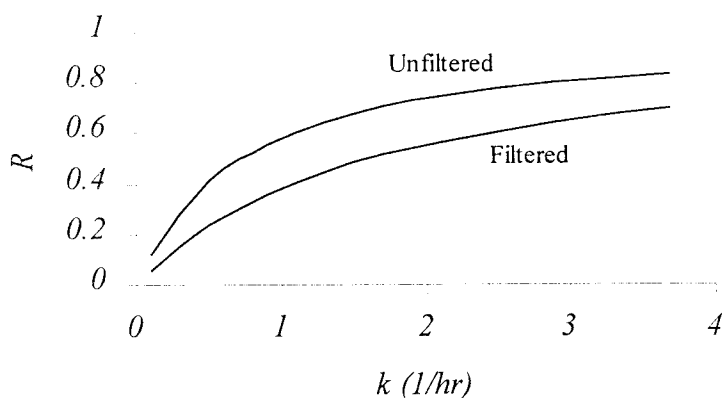


Рисунок 5. Влияние электретоного воздушного фильтра (частицы в 1 мкм).

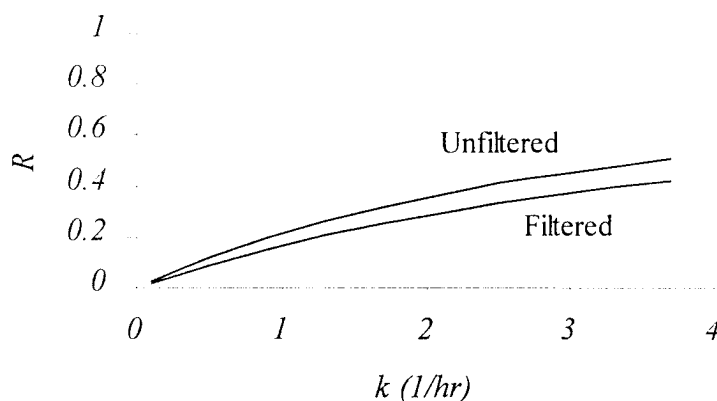


Рисунок 6. Влияние электретоного воздушного фильтра (частицы в 5 мкм).

При использовании тех же самых скоростей осаждения, что и прежде, мы можем вычислять кривые уменьшения дозы для двух различных размеров частиц (рисунок 7). Поскольку весь внешний воздух должен сначала пройти через фильтр, мы наблюдаем большее понижение дозы в диапазоне скоростей воздухообмена. При скорости наружного воздухообмена в 0.5 1/час, фактор уменьшения дозы лежит в диапазоне от 0.02 для частицы в 1 мкм до 0.07 для частицы в 1 мкм. Конечно, представленные здесь значения применимы только к конкретному выбранному нами зданию, и расширение до более общих заявлений на все административные здания потребует намного более полных данных.

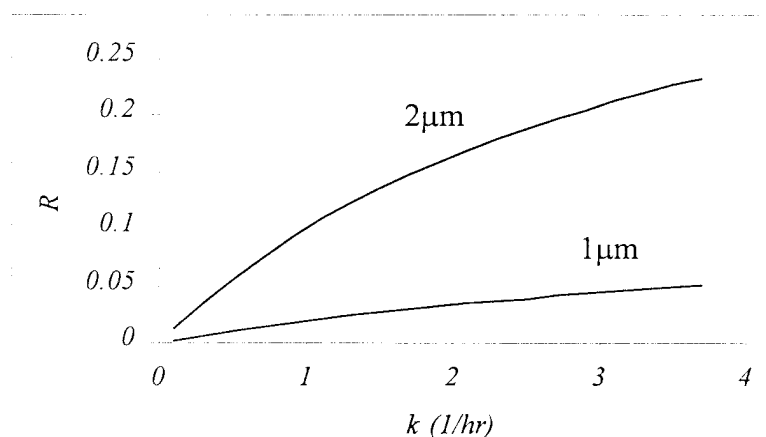


Рисунок 7. Факторы уменьшения дозы для административных зданий.

Мероприятия гражданской обороны

На основании предыдущих обсуждений, очевидно, что очень простые меры могут существенно улучшить эффективность защиты зданий. Чтобы исследовать влияние таких мер, мы вычислим кратности уменьшения дозы для ряда случаев, в которых здание постепенно изменяется, чтобы оптимизировать защитную способность против БО. Здесь, мы обратим особое внимание на многоквартирные жилые дома, в которых установлены только рециркулирующие системы ОВКВ. Чтобы установить базу для сравнения, мы вычислим кратность уменьшения дозы для немодифицированного дома. Как прежде, мы используем среднюю скорость воздухообмена 0.76 1/час и среднюю скорость осаждения 0.01 см/сек. Эти значения приводят к кратности уменьшения дозы в 0.5 для немодифицированного дома.

Самая простая защита, которую может осуществить индивидуальный домовладелец, это замена воздушного фильтра в вентиляционной сети. Переход на электростатический воздушный фильтр можно выполнить с минимальными финансовыми издержками⁴³, и это может существенно повысить защитную способность здания, обеспечивая другой механизм для удаления частиц из воздуха. С целью иллюстрации, мы предположим, что установленный фильтр имеет эффективность 0.6 для частиц в 1 мкм, и скорость вентиляции 1.5 1/час, что даст новую кратность уменьшения дозы в 0.30. Таким образом, замена воздушного фильтра понижает кратность уменьшения дозы на 36 %.

Другой метод повышения эффективности защиты здания состоит в том, чтобы уменьшить скорость воздухообмена. Как отмечено ранее, при уменьшении скорости воздухообмена относительно скорости механизмов удаления частицы приводит к улучшению фактора уменьшения дозы. Поскольку скорость воздухообмена зависит от целого ряда факторов, трудно предсказать эффективность различных мер в различных зданиях. Однако, проводились многочисленные исследования влияния переоборудования существующих зданий. Например, Нагда и др.⁴⁴ находят, что скромные усилия типа дополнительного законопачивания и проклейки лентой, приводят к уменьшению скорости воздухообмена до 25 %, в то время как Гольдсмит⁴⁵, делая обзор ряда экспериментов по уплотнению жилых домов, также находит, что небольшие усилия понижают скорости воздухообмена примерно на 25 %. Более серьезные усилия могут еще больше уменьшать скорости воздухообмена даже больше. Например, установка полупроницаемой перегородки под обшивкой дома может уменьшать скорости воздухообмена до 60 %⁴⁶. Если здание было разработано с целью ми-

нимизации утечки, скорости воздухообмена будут еще ниже. (Средние скорости воздухообмена для скандинавских зданий приблизительно равны 0.15 1/час.) Чтобы иллюстрировать влияние дополнительного уплотнения, мы вычисляем кратность уменьшения дозы для двух случаев: $k = 0.54$ 1/час, который представляет уменьшение в 25 %, что можно было ожидать от скромной модификации, и $k = 0.15$ 1/час, который представляет более обширные усилия по уплотнению. Результаты для этих случаев подведены в Таблице 2, наряду со случаями отсутствия изменений и замены фильтров.

Таблица 2. Влияние мероприятий по гражданской обороне.

	R
Без изменений	0.51
Замена фильтра на электретеный	0.32
Умеренное уплотнение	0.43
Плотная конструкция	0.17
Кумулятивный (все меры обороны)	0.08

Случай скромных усилий, который заключается в заклеивании лентой и в уплотнении соединений, очевидных раковин и трещин, понижает кратность уменьшения дозы на 19 %, в то время как понижение скорости воздухообмена в доме плотной конструкции приводит к понижению кратности уменьшения дозы на 67 %. Здания со скоростями воздухообмена, сравнимыми со значениями, используемым в этом последнем случае, становятся все более и более обычными по причинам экономии энергии, так как достаточно герметичные дома требуют меньшего количества энергии для отопления или охлаждения. Таким образом, совокупный фактор уменьшения дозы в 8 %, который включает установку нового воздушного фильтра, не маловероятен.

Эти числа представлены только, чтобы продемонстрировать типы результатов, которые можно было наблюдать в попытке улучшить эффективность защиты здания. Конечно, все параметры могут по значению весьма существенно измениться. В одном изучении модернизации, исследователи замечают, что изменения в скорости воздухообмена между летом и осенью были вдвое больше величины любых изменений, вызванных модернизацией. Действительно, среднеквадратичные отклонения скорости воздухообмена и скоростей осаждения приблизительно совпадают с теми же самыми средними величинами. Несмотря на эту вариабильность, качественные результаты остаются неизменными. То есть, устанавливая электретеные фильтры и уменьшая утечки воздуха в здании, вы улучшите кратность уменьшения дозы. Кроме того, кажется разумным вывести, что здания с более высокими скоростями воздухообмена извлекут большую выгоду от применения скромных мер защиты. Такие здания должны иметь источники утечки, которые могут быть существенно сокращены простым законопачиванием и оклейкой лентой, в то время как здания, которые уже имеют низкие скорости воздухообмена, вероятно, улучшить намного более трудно.

Так как биологическое оружие обычно имеет форму облака частиц, распределенных в интервале размеров, мы также должны рассмотреть влияние этих мер защиты для различных размеров частиц. Вообще говоря, можно было бы ожидать, что эффективность этих мер увеличится для больших частиц, прежде всего, потому что полезное действие фильтра улучшается. Вместо эффективности в 60 %, наблюдаемой для частиц в 1 мкм, можно ожидать эффективность 97 % для частиц в 5 мкм. Однако, защита, предлагаемая немодифицированным домом против частицы в 5 мкм уже весьма хороша. При использовании скорости осаждения 0.05 см/сек для частицы в 5 мкм коэффициент защиты для немодифицированного дома равен 0.17. Домовладельцы, устанавливающие электретеные воздушные фильтры, изменили бы коэффициент защиты для частиц в 5 мкм примерно на 24% до 0.13. Дальнейшие усилия, чтобы по уменьшению скоростей) воздухообмена привели бы к уменьшению, подобному тому, которое наблюдается для меньших частиц. В любом случае, коэффициенты защиты, представленные для частицы в 1 мкм, могут рассматриваться как нижняя граница для защиты, предлагаемой против типичных размеров частиц БО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы продемонстрировали, что малые здания предлагают жителям скромную степень защиты от атак БО, даже в тех случаях, когда жители здания не знают положения облака биологических средств. Эта защита возникает, потому что процесс ввода биологических средств в здание происходит с конечной скоростью и обеспечивает возможность действия механизмов удаления внутри здания, чтобы уменьшились полные концентрации. Мы вычислили, что средняя кратность уменьшения дозы для американского многоквартирного дома приблизительно равна 0.5, и может уменьшиться до 0.2 для больших частиц. В то время как этот коэффициент может сильно изменяться в зависимости от конфигурации каждого здания, и в зависимости от текущих метеорологических условий, это представительное значение, и оно могло бы использоваться, чтобы улучшить исследования побочных эффектов БО.

В этом исследовании мы также кратко рассмотрели защиту, предлагаемую большими коммерческими зданиями. Поскольку такие здания имеют тенденцию быть более герметичными, и потому что они имеют более сложные системы ОВКВ, большие здания могут предлагать существенно лучшую защиту от атак БО.

Результатом этого исследования явились два предложения по увеличению эффективности защиты жилых домов: установка электретенных воздушных фильтров и сокращение скорости воздухообмена. Обе из этих мер имеют многочисленные выгоды вне приложений гражданской обороны. Изготовители электретенных фильтров рекламируют как первичные выгоды сокращение обслуживания систем ОВКВ и помощь страдающим от аллергии, в то время как сокращение скорости воздухообмена имеет дополнительную выгоду экономии энергии. Эти меры довольно недороги и просто осуществимы, и могут существенно увеличить эффективность защиты небольших зданий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование для этой работы было выполнено в то время, как автор был научным ассистентом в Центре международной безопасности и контроля над вооружениями в Стэнфордском университете. Финансирование этой работы обеспечивалось корпорацией Карнеги. Автор с удовольствием благодарит Дина Вилкенинга за многие полезные обсуждения и комментарии. Автор также хотел бы выразить признательность за вклад членов группы исследований биологического оружия в лаборатории Лоуренса в Беркли. Представления, выраженные здесь, принадлежат исключительно автору и не отражают таковых у корпорации Карнеги или любого из других спонсоров Центра.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. R. Medd & F. Goldstein, "International terrorism on the eve of a new millennium," *Studies in Conflict & Terrorism* 20, (1997): 281-316.
2. Там же.
3. Office of Technology Assessment, *Proliferation of Weapons of Mass Destruction, Assessing the Risks*, 1993.
4. B. Roberts, "New challenges and new policy priorities for the 1990s," in *Biological Weapons: Weapons of the Future?* (Washington, DC: Center for Strategic and International Studies, 1993), 68-101.
5. J. Robinson & W.C. Nelson, *National Human Activity Pattern Survey Database* (Research Triangle Park, NC: USEPA, 1995).
6. E. Karisson, "Indoor deposition reducing the effect of toxic gas clouds in ordinary buildings," *J of Hazardous Materials* 38, (1994): 313-327.
7. R.J. Engelmann, "Sheltering effectiveness against plutonium provided by buildings," *Atmospheric Environment* 26A(11), (1992): 2037-2044.
8. Для оценки инфекционных доз смотри M. Meselson et al., "The Sverdlovsk anthrax outbreak of 1979," *Science* 200, (1994): 1202; and *Health Aspects of Chemical and Biological Weapons* (Geneva: World Health Organization, 1970).

9. Более подробное обсуждение биологических средств приведено в SIPRI, "The Problem of Chemical and Biological Warfare," *Volume II, CB Weapons Today*. (Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1973).
10. D. R. Franz et al, "Clinical recognition and management of patients exposed to biological warfare agents," *JAMA* 278, (1997): 399-411.
11. J. H. Seinfeld, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution* (New York, NY: John Wiley & Sons, 1986).
12. SIPRI, "The Problem of Chemical and Biological Warfare," *Volume II, CB Weapons Today*. (Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1973).
13. Конечная скорость частиц может быть оценена довольно точно при помощи закона Стокса для вычисления силы лобового сопротивления частицы. Для мелких частиц (< 1мкм) требуется коррекция для учета нарушения непрерывности. Смотри J. H. Seinfeld, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution* (New York, NY: John Wiley & Sons, 1986).
14. Для более подробного обсуждения механизмов внешнего осаждения смотри J. H. Seinfeld, *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution* (New York, NY: John Wiley & Sons, 1986).
15. F.H. Shair & K. L. Heitner, "Theoretical model for relation indoor pollutant concentration to those outside," *Environmental Science and Technology* 8(5), (1974):305-308.
16. R.C. Diamond, H.E. Feustel & D. J. Dickerhoff, *Ventilation and Infiltration in High-Rise Apartment Buildings* (Lawrence Berkeley Labs, Energy and Environment Division, LBL-38103,1996).
17. Подробное обсуждение механизма «хорошего перемешивания» можно найти в R.A. Wadden & P.A. Scheff, *Indoor Air Pollution: Characterization, Prediction, and Control* (New York, NY: John Wiley & Sons, 1983).
18. T.L. Thatcher & D.W. Layton, "Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence," *Atmospheric Environment* 29(13), (1995):1487-1497.
19. Обсуждение каналов воздухообмена можно найти в различных учебниках по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха, например, в G.E. Clifford, *Heating, Ventilating, and Air Conditioning* (Reston, VA: Reston Publishing Company, Inc., 1984).
20. G.H. Anno & M.A. Dore, *Protective Action Evaluation Part I: The Effectiveness of Sheltering as a Protective Action Against Nuclear Accidents Involving Gaseous Releases*. (U.S. Environmental Protection Agency, 1978).
21. R.J. Engelmann, "Sheltering effectiveness against plutonium provided by buildings," *Atmospheric Environment* 26A(11), (1992): 2037-2044.
22. M. Sherman & D. Dickerhoff, "Air leakage in U.S. Homes," Lawrence Berkeley Labs, Energy and Environment Division, *Indoor Environment Program 1994 Annual Report*, LBL-36551,1994.
23. D.M. Murray & D.E. Burmaster, "Residential air exchange rates in the United States: Empirical and estimated parametric distributions by season and climatic region," *Risk Analysis* 15(4), (1995): 459-465.
24. R.J. Engelmann, "Sheltering effectiveness against plutonium provided by buildings," *Atmospheric Environment* 26A(11), (1992): 2037-2044.
25. W.C. Hinds, *Aerosol Technology* (New York, NY: John Wiley and Sons, 1982).
26. W.W. Nazaroff & G.R. Cass, "Mathematical modeling of indoor aerosol dynamics," *Environmental Science and Technology* 23(2), (1989): 157-165.
27. C.L. Fogh, M.A. Byrne, J. Rood, and A.J.H. Goddard, "Size specific indoor aerosol deposition measurements and derived I/O concentration ratios," *Atmospheric Environment* 31(15), (1997): 2193-2203.
28. T.L. Thatcher and D.W. Layton, "Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence," *Atmospheric Environment* 29(13), (1995): 1487-1497.
29. M. Xu, M. Nematollahi, R.G. Sextro, A.J. Gadgil and W.W. Nazaroff, "Deposition of tobacco smoke particles in a low ventilation room," *Aerosol Science and Technology* 20, (1994): 194-206.
30. E.J. Offermann, R.G. Sextro, W.J. Fisk, D.T. Grimsrud, W.W. Nazaroff, A.V. Nero, K.L. Revzan, and J. Yater, "Control of respirable particles in indoor air with portable air cleaners," *Atmospheric Environment* 19, (1985):1761-1771.
31. K. Okuyama, Y. Kousaka, S. Yamamoto, and T. Hosokawa, "Particle loss of aerosols with particle diameters between 6 and 2000 nm in stirred tanks," *J. of Colloid and Interface Science* 110(1), (1986): 214-223.

32. C.J. Weschler & H.C. Shields, "The effects of ventilation, filtration, and outdoor air on the composition of indoor air at a telephone building," *Environment International* 15, (1989): 593-604.
33. W.W. Nazaroff & G.R. Cass, "Mass transport aspects of pollutant removal at indoor surfaces," *Environment International* 15, (1989): 567-584.
34. E. Karlsson, "Indoor deposition reducing the effect of toxic gas clouds in ordinary buildings," *J. of Hazardous Materials* 38, (1994): 313-327.
35. SIPRI, "The Problem of Chemical and Biological Warfare," *Volume II, CB Weapons Today*. (Stockholm: Almqvist & Wiksell, 1973), 128.
36. Там же.
37. ASHRAE Standard 52.1-1992.
38. J.T. Hanley, D.S. Ensor, D.W. VanOsdell, D.S. Smith & L.E. Sparks, "Fractional aerosol filtration efficiency test method for ventilation air cleaners," ed. by E.L. Besch (*IAQ 94 Engineering Indoor Environments, ASHRAE, 1994*), 205-214.
39. Там же.
40. H.-P. Baumgartner & F. Löffler, "The collection performance of electret filters in the particle size range 10nm - 10µm," *J. Aerosol Science* 17(3), (1986): 438-445.
41. Смотри, например, данные, представленные по адресу <http://www.lifetimefilter.com>.
42. W.S. Dols, A.K. Persily & S.J. Nabinger, "Development and application of an indoor air quality commissioning program in a new office building," ed. E.L. Besch (*IAQ 94 Engineering Indoor Environments, ASHRAE, 1994*), 33-43.
43. Электретные фильтры можно приобрести даже за 10 долларов.
44. N.L. Nagda, D.T. Harrje, M.D. Koontz & G.G. Purcell, "A detailed investigation of the air infiltration characteristics of two houses," ed. H. R. Treschel & P. L. Lagus (*Measured Air Leakage of Buildings, ASTM Technical Publication 904, 1986*), 33-45.
45. V.W. Goldschmidt, "Average infiltration rates in residences: Comparison of electric and combustion heating systems," ed. H.R. Treschel & P.L. Lagus (*Measured Air Leakage of Buildings, ASTM Technical Publication 904, 1986*), 70-98.
46. R.D. Weimar & D.F. Luebs, "Field performance of an air infiltration barrier," ed. H. R. Treschel & P.L. Lagus (*Measured Air Leakage of Buildings, ASTM Technical Publication 904, 1986*), 304-311.