

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК [502.3:504.5]:614.8

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, Н. В. РОСТОЧИЛО², Ф. В. НЕДОПЁКИН³

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-9811-867X

³Каф. «Физика неравновесных процессов, метрологии и экологии», Донецкий национальный университет, ул. Университетская, 24, Донецк, Украина, 83000, эл. почта f.nedopekin@donnu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0717-3994

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ (SHELTER IN-PLACE) С УЧЕТОМ СОРБЦИИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА НА ПОВЕРХНОСТЯХ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Цель. Химически опасные объекты, где используются, производятся, хранятся токсичные вещества, а также магистрали, по которым осуществляется транспортировка опасных грузов, представляют собой потенциальные источники аварийного загрязнения атмосферы. В исследовании необходимо осуществить разработку прикладной численной модели для расчета эффективности локальной защиты здания от попадания в него опасных веществ путем применения воздушной завесы и сорбции/десорбции опасного вещества на поверхностях внутри здания. **Методика.** Для решения гидродинамической задачи взаимодействия воздушной завесы с ветровым потоком и с учетом влияния здания на этот процесс используется модель идеальной жидкости. Для расчета процесса переноса опасного вещества в атмосфере применяется уравнение конвективно-диффузионного переноса примеси. Для расчета процесса загрязнения воздушной среды внутри помещений при затекании в них загрязненного атмосферного воздуха используется модель Karisson & Huber. Данная модель учитывает сорбцию опасного вещества на различных поверхностях внутри помещения. Для численного интегрирования уравнений модели используются разностные методы. **Результаты.** В работе построена эффективная численная модель оценки эффективности защиты зданий от попадания в них опасных веществ путем применения воздушной завесы. На основе построенной модели проведен вычислительный эксперимент по оценке эффективности данного метода защиты при варьировании места расположения воздушной завесы относительно здания. **Научная новизна.** Создана численная модель, позволяющая оперативно рассчитать эффективность применения воздушной завесы для снижения инфильтрации загрязненного наружного воздуха в помещение. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована для проектирования локальной защиты зданий от попадания в них опасных веществ.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; локальная защита зданий; воздушная завеса; инфильтрация опасных веществ в помещении

Введение

Химически опасные объекты, где используются, производятся, хранятся токсичные вещества, а также магистрали, по которым осуществ-

ляется транспортировка опасных грузов, представляют собой потенциальные источники аварийного загрязнения атмосферы. В случае чрезвычайной ситуации на таких объектах возможно быстрое поступление опасных веществ в ат-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

мосферу и дальнейший их перенос под действием ветра и атмосферной диффузии. Кроме этого опасное загрязнение атмосферного воздуха может произойти при терактах и при применении химического оружия (Сирия, август 2013г.). Все это создает угрозу токсичного поражения людей, попавших в зону влияния источника эмиссии. Поэтому, одной из проблем в области экологической и промышленной безопасности является решение двух важных задач при таких ситуациях: прогноз уровня загрязнения атмосферы с целью определения зон поражения [1, 2, 4, 8, 10–13, 17] и разработка мер по защите людей от токсического поражения. В Украине, как правило, основными методами для защиты населения являются эвакуация, применение специальных укрытий и индивидуальных средств защиты. Этот комплекс мер имеет свои особенности. Индивидуальные средства защиты не всегда могут быть «под рукой», а специальные укрытия могут располагаться на расстоянии от сосредоточенного нахождения людей. При передвижении людей к укрытиям возникает, своего рода, местная эвакуация и маршрут эвакуации может попасть в зону загрязнения.

Эвакуация людей по заранее разработанным планам основывается на предварительном расчете возможных зон загрязнения и после получения такой прогнозной информации – определение безопасных маршрутов эвакуации и средств эвакуации. Здесь следует подчеркнуть, что эвакуация людей имеет следующие особенности:

1) маршруты эвакуации, которые определены на основе предварительного расчета зон загрязнения, могут быть не столь безопасны, как предполагается, поскольку зонирование местности выполняется с учетом некоторых «типичных» атмосферных условий для региона, а при реальной чрезвычайной ситуации метеосостояние могут оказаться совершенно другими;

2) даже если заранее определенный маршрут эвакуации является безопасным, то при изменении метеосостояния (направления ветра), этот маршрут может быть опасен;

3) кроме этого при эвакуации возможно возникновение «пробок», заторов на маршрутах передвижения и «неадекватное» поведение людей, попавших в сложную ситуацию без соответствующей психологической подготовки;

4) реализация эффективной, «согласованной» эвакуации требует проведения предварительной, большой работы и постоянной корректировки планов.

Перечисленные выше методы защиты не всегда могут быть эффективны. Это, в частности связано с тем, что в городах, как правило, люди находятся внутри зданий (жилых, административных, универмагах и т.п.) и поэтому организация быстрой эвакуации крайне затруднено. Как показывает зарубежный опыт [14–16, 18, 19], основанный не только на анализе чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах, но и терактах, в ряде случаев будет более эффективно обеспечить защиту людей от токсического поражения непосредственно в этих зданиях. Поэтому, в США, Евросоюзе активно стало разрабатываться научное направление, называемое «*shelter-in-place*». Это комплекс мер по защите людей от токсического поражения в зданиях (защита, рекомендуемая для применения в жилых зонах – «*residential districts*»). Суть такой защиты состоит в том, чтобы уменьшить инфильтрацию атмосферного воздуха, содержащего опасное вещество, внутрь зданий, помещений. Следует отметить, что анализ литературных источников не позволил, к сожалению, выявить в Украине научные публикации в рамках данного направления.

За рубежом направление «*shelter-in-place*» разрабатывается в нескольких аспектах, например: применение специальных фильтров в системах вентиляции и кондиционирования воздуха зданий, применение сорбционных материалов внутри помещений, создание в помещениях избыточного давления, чтобы минимизировать инфильтрацию наружного воздуха и т.д. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки, но задача каждого метода – минимизировать концентрацию опасного вещества внутри помещения [16, 18, 19]. Следует подчеркнуть, что для эффективной защиты необходимо использовать комплекс методов. Например, можно соединить мероприятия, проводимые внутри зданий с мероприятиями, организуемыми снаружи, цель которых – минимизировать величину поражающего фактора – концентрации там, где имеет место воздухозабор системы вентиляции здания. В этом случае внутрь здания, в помещения будет поступать воздух, содержащий меньшее количество ток-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

сичного вещества. Это направление можно назвать «наружной» локальной защитой зданий. Для организации такой защиты можно использовать создание воздушной завесы возле зданий путем использования воздуходувок и т.п. Струя воздуха создает гидродинамический барьер на пути мигрирующей в атмосфере зоны загрязнения и тем самым препятствует прохождению загрязнения на отдельном участке, где имеет место влияние воздушной струи. Для применения данного метода защиты необходимо предварительно выполнить определенные расчеты, с помощью которых выяснить зону влияния воздушной струи при конкретных метеоусловиях, размерах здания и т.д. Для решения такой многофакторной задачи необходимо применение специализированных математических моделей, поскольку применение метода физического моделирования требует существенных временных и материальных затрат. Кроме того, в ряде случаев, постановка физического эксперимента может быть просто невозможна.

Цель

Целью данной работы является разработка прикладной CFD модели расчета эффективности применения воздушной завесы для наружной локальной защиты зданий от проникновения в них опасных веществ.

Анализ публикаций. Анализ литературных источников показывает, что существует ограниченное количество работ, посвященных математическому решению проблемы локального снижения концентрации опасного вещества в атмосферном воздухе путем применения специальных средств. Так в работе [1] рассмотрено построение математической модели и ее применение для оценки эффективности использования воздушной завесы при миграции в атмосфере шлейфа или облака токсичного газа. Но построенная модель не может быть применена для оценки эффективности воздушной завесы в рамках рассматриваемого класса задач, т.к. не учитывает влияния зданий на процесс рассеивания опасного вещества в условиях применения такой защиты.

Постановка задачи. Рассматриваются миграции в атмосфере токсичного вещества, попавшего в нее при чрезвычайной ситуации. Будем считать, что произошел быстрый выброс в атмосферу CL_2 и в результате этого в атмо-

сфере движется облако данного вещества. Ставится задача – локально снизить концентрацию этого вещества возле наветренной стороны здания (рис. 1), чтобы уменьшить инфильтрацию загрязненного наружного воздуха внутрь помещений.

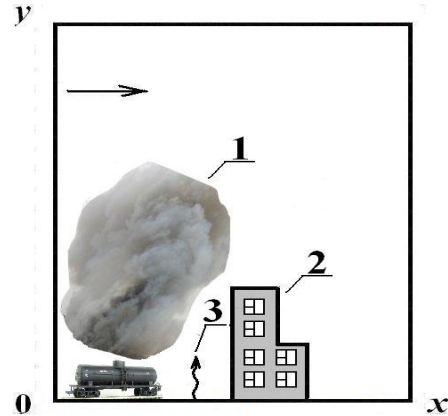


Рис. 1. Наружная локальная защита здания от загрязнения:

1 – облако токсичного вещества; 2 – здание;
3 – положение воздушной завесы (вдуваемой струи)

Fig. 1. External local contamination prevention:
1 – cloud of toxic agent; 2 – building; 3 – position of air screen (blown in air blast)

Методика

Для расчета концентрации опасного вещества в атмосфере используется осредненное по ширине переноса (профильная задача) уравнение транспорта загрязнителя [2, 3, 7, 11]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где C – концентрация примеси (опасное вещество); u , v – компоненты вектора скорости движения ветрового потока; w – скорость гравитационного оседания примеси; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты атмосферной диффузии; t – время.

Ось Y направлена вертикально вверх.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [2, 7, 11].

Для расчета коэффициентов атмосферной диффузии используются такие зависимости [3]

$$\mu_y = 0,11 y;$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\mu_x = 0,2 u;$$

где u – скорость ветра, y – текущее значение высоты [3]. Профиль скорости ветра на входе в расчетную область рассчитывается по зависимости

$$u = u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^n,$$

где u_1 – значение скорости ветра на некоторой фиксированной высоте y_1 , $n = 0,15$ – параметр [3].

Решение уравнения (1) можно получить, если известно поле скорости ветрового потока, которое формируется под влиянием застройки. Для расчета поля скорости ветрового потока используется модель потенциального течения [2]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где P – потенциал скорости. Граничные условия для данного уравнения рассмотрены в работе [2].

После расчета поля потенциала скорости компоненты вектора скорости потока определяются на основании соотношений

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Полученное значение компонент вектора скорости потока используется для решения задачи рассеивания в атмосферном воздухе опасного вещества, с учетом влияния на этот процесс воздушной завесы.

Модель загрязнения воздушной среды внутри помещения. Атмосферный воздух, содержащий опасное вещество, попадает внутрь помещений в силу естественной инфильтрации, а также за счет работы системы вентиляции. Это приводит к загрязнению воздушной среды внутри помещений, что создает риск токсичного поражения людей, находящихся внутри них. Следует подчеркнуть, что в настоящее время тщательно изучается влияние процесса сорбции опасных веществ внутри помещений на поверхностях стен, мебели и т.п. Как известно, процесс сорбции способствует снижению концентрации опасного вещества в помещении. Поэтому при разработке моделей для оценки риска поражения людей внутри помещений

следует учитывать этот фактор. В данной работе процесс загрязнения воздушной среды в помещении, с учетом сорбции/десорбции опасного вещества на различных поверхностях в помещении, описывается моделью Karisson & Huber [18]

$$\frac{d(CV)}{dt} = Q_f C_{out} - Q_f C - \sum_i^N A_i \frac{dm_i}{dt}, \quad (3)$$

где C – концентрация опасного вещества в выходящем из помещения воздухе; V – объем комнаты; Q_f – интенсивность воздухообмена; N – количество сорбирующих материалов внутри помещения; C_{out} – концентрация токсичного вещества в приточном воздухе; A_i – площадь поверхности сорбирующих материалов; m_i – масса отсорбированного вещества.

Как известно, при применении модели (3) полагается, что концентрация загрязнителя в помещении равна C .

Для моделирования процесса сорбции опасного вещества на поверхности материала используется следующее уравнение [18]

$$\frac{dm_i}{dt} = a_i (C - C_i^*),$$

где C_i^* – концентрация опасного вещества на поверхности материала, отвечающая пределу насыщения; a_i – эмпирический коэффициент.

Для расчета величины C_i^* используется модель [18]

$$C_i^* = b_i m_i,$$

где b_i – эмпирический коэффициент.

Применение модели (3) дает возможность рассчитать динамику изменения концентрации опасного вещества внутри помещения с течением времени.

Численное интегрирование моделирующих уравнений. Численное интегрирование моделирующих уравнений осуществляется на прямоугольной разностной сетке. Формирование вида расчетной области (место расположения зданий) осуществляется с помощью технологии «rogosity technique» [1, 2, 11]. Кроме этого, данная технология используется для задания места положения воздушной завесы.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод Либмана.

Для численного интегрирования уравнения (1) используется четырехшаговая попеременно-треугольная разностная схема расщепления [1, 11]. Для численного интегрирования уравнения (3) используется метод Эйлера.

Программная реализация модели (код InFLOW-2D). На основе построенной численной модели создан код, реализованный на алгоритмическом языке *FORTRAN*. В состав кода входят следующие подпрограммы:

- *RUF1* – расчет процесса переноса опасного вещества на первом и четвертом шаге расщепления попеременно – треугольной схемы;
- *RUF2* – расчет процесса переноса опасного вещества на втором и третьем шаге расщепления попеременно-треугольной схемы;
- *RFB* – реализация граничных условий для уравнения транспорта опасного вещества в атмосфере;
- *RFF* – решение уравнения для потенциала скорости;
- *RWFF* – реализация граничных условий уравнения для потенциала скорости;
- *RFP* – расчет поля скорости воздушного потока в расчетной области;
- *ROOM* – численное решение уравнения (3);
- *RPE* – печать результатов расчета;
- *RFW.dat* – файл исходных данных.

Алгоритм расчета. Основные этапы расчета на базе построенной CFD модели состоят в следующем:

1. Вводится исходная информация, определяющая физическую постановку моделируемого процесса (скорость ветра, положение здания, его размеры, положение воздушной завесы и т.п.).
2. Осуществляется решение уравнения для потенциала скорости и рассчитывается поле скорости воздушного потока.
3. Осуществляется решение уравнения транспорта токсичного вещества в атмосфере и определяется его концентрация в расчетной области в различные моменты времени.
4. Осуществляется решение уравнения (3) и определяется концентрация токсичного вещества в помещении в различные моменты времени и масса вещества, отсорбированного на поверхностях.
5. Осуществляется печать поля концентрации токсичного вещества в расчетной области,

на месте расположения рецептора и внутри помещения для данного момента времени.

Исходные данные для модели. Для моделирования рассматриваемого процесса необходимо задать следующую входную информацию:

- 1) параметры метеоситуации;
- 2) положение зданий и их форму;
- 3) положение места размещения воздушной завесы, создающей воздушную завесу; скорость вдува и ширина участка вдува;
- 4) координаты рецептора;
- 5) концентрацию токсичного вещества в облаке;
- 6) объем помещения, площадь сорбирующих поверхностей, расход воздуха Q , подаваемый для вентиляции помещения, параметры сорбции a_i , b_i .

Очень важно отметить, что концентрация C_{out} в воздухе, поступающем внутрь помещения (см. уравнение 3) – не задается, а определяется в процессе расчета. Для этого, при проведении вычислительного эксперимента, задаются координаты точки расположения воздухозаборника системы вентиляции или положение окна, через которое происходит инфильтрация загрязненного атмосферного воздуха. Далее осуществляется расчет значения концентрации опасного вещества в данной точке для каждого момента времени и тем самым определяется концентрация вещества в поступающем в помещение воздухе. Таким образом, например в отличие от работы [15], здесь рассматривается решение сопряженной задачи «загрязнение атмосферы + загрязнение воздуха в помещении с учетом процессов сорбции опасного вещества на поверхностях внутри помещения».

Практическая реализация CFD модели. Разработанная модель была использована для решения следующей задачи. Рассматривается миграция в атмосферном воздухе облака опасного вещества (Cl_2), поступившего в атмосферу вследствие чрезвычайной ситуации. При миграции опасного вещества происходит инфильтрация его внутрь помещений здания, расположенного на пути следования облака (рис. 1). Для локальной защиты здания применяется воздушная завеса. Необходимо исследовать эффективность применения воздушной завесы для конкретных условий задачи.

Расчет выполнен при следующих исходных данных. Высота здания – 15 м, высота при-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

стройки на подветренной стороне здания – 7,5 м, ширина здания 18 м. Скорость невозмущенного ветрового потока – 3 м/с (скорость потока на высоте u_1); концентрация токсичного вещества в облаке в начальный момент времени равна 1 г/м³. Размеры расчетной области 100 м×42 м; объем помещения $V = 65\text{ м}^3$; площадь сорбирующих поверхностей внутри помещения $A = 110\text{ м}^2$; расход воздуха, подаваемый для вентиляции помещения $Q_f = 0,072\text{ м}^3/\text{с}$; $a = 1,4 \cdot 10^{-4}\text{ м/с}$; $b = 0,033\text{ м}^{-1}$ [18]. Вертикальная воздушная струя выходит из воздуходувки со скоростью 10 м/с и располагается на расстоянии 4,5 м от наветренной стороны здания.

Требуется определить, какой будет концентрация опасного вещества в помещениях здания при отсутствии воздушной завесы и при ее работе. Рассматриваются два помещения – одно располагается на первом этаже. Координаты воздухозаборника для этого помещения равны $x = 34,5\text{ м}$, $y = 3,75\text{ м}$. Второе помещение находится на четвертом этаже. Координаты воздухозаборника для этого помещения равны $x = 34,5\text{ м}$; $y = 11,25\text{ м}$. На приведенных ниже рисунках положение воздухозаборников условно показаны «кружком» (рис. 3).

Результаты

Рассмотрим результаты моделирования, полученные на базе разработанной CFD модели. На приведенных ниже рисунках представлено распределение концентрации опасного вещества в расчетной области для случая, когда отсутствует воздушная завеса и при ее работе.

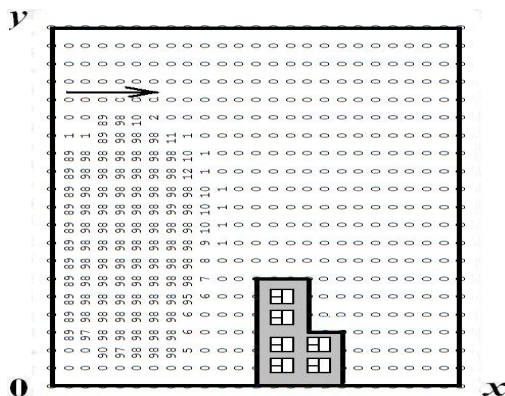


Рис. 2. Распределение концентрации опасного вещества при отсутствии воздушной завесы, $t = 0,1\text{ с}$

Fig. 2. Concentration distribution of the dangerous material without air screen, $t = 0.1\text{ sec}$

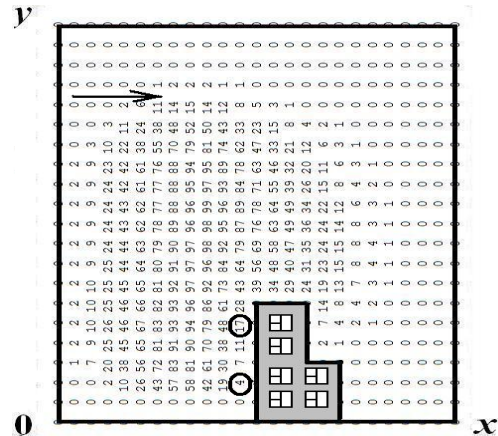


Рис. 3. Распределение концентрации опасного вещества при отсутствии воздушной завесы, $t = 4,09\text{ с}$ (O – точка расположения рецептора)

Fig. 3. Concentration distribution of the dangerous material without air screen, $t = 4.09\text{ sec}$ (O – is the receptor point)

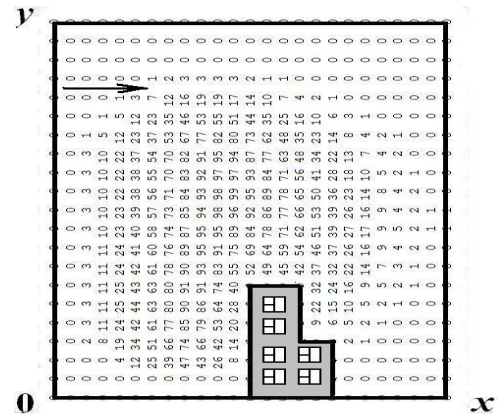


Рис. 4. Распределение концентрации опасного вещества при отсутствии воздушной завесы, $t = 5,49\text{ с}$

Fig. 4. Concentration distribution of the dangerous material without air screen, $t = 5.49\text{ sec}$

На данных рисунках поле концентрации представлено в виде матрицы, что позволяет быстро определять наиболее загрязненные подзоны и, что особенно важно – в области расположения рецептора. Каждое число на этих рисунках – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Печать осуществляется по формату «целое число», например, если значение концентрации составляет 1,56 %, то на печать выдается «1».

Из представленных рисунков видно, что с течением времени происходит натекание облака опасного вещества на здание и формиру-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ється зона загрози навколо всього збудованого. Это значит, что через окна, отверстия вентиляции опасное вещество с атмосферным воздухом попадет внутрь здания и создаст угрозу токсичного поражения людей в помещениях.

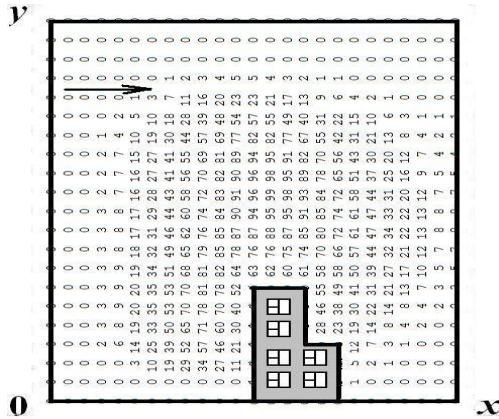


Рис. 5. Распределение концентрации опасного вещества при отсутствии воздушной завесы, $t = 7,39$ с

Fig. 5. Concentration distribution of the dangerous material without air screen, $t = 7.39$ sec

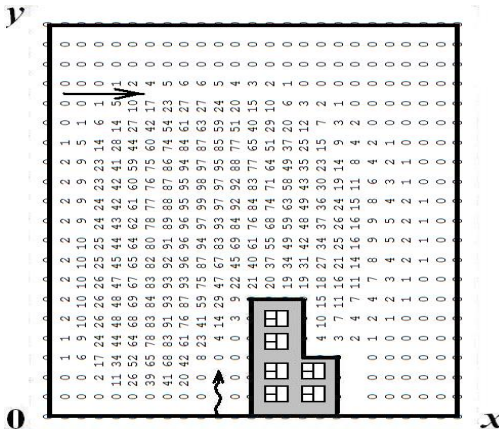


Рис. 6. Зона загрязнения для момента времени $t = 4,09$ с (воздушная завеса на расстоянии 4,5 м от здания, скорость воздушной струи 10 м/с)

Fig. 6. Pollution area for the time point $t = 4.09$ sec (air screen on the distance 4.5 m. from the building, speed of the air blast 10 m/sec)

На последующих рисунках представлена зона загрязнения для ситуации, когда создана воздушная завеса возле наветренной стороны здания.

Из представленных рисунков видно, что наличие воздушной завесы изменяет распределение концентрации токсичного вещества возле наветренной стороны здания, т.е. локально,

и приводит к ее понижению (например, сравним рис. 8 и 5).

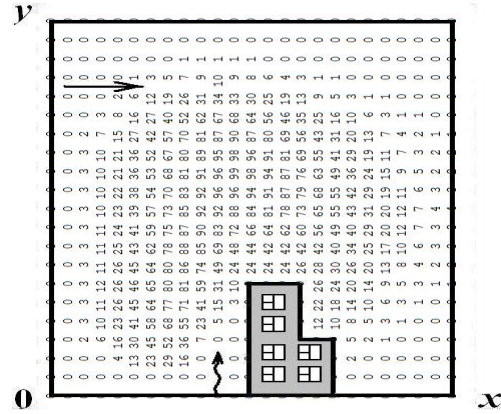


Рис. 7. Зона загрязнения для момента времени $t = 5,49$ с (воздушная завеса на расстоянии 4,5 м от здания, скорость воздушной струи 10 м/с)

Fig. 7. Pollution area for the time point $t = 5.49$ sec (air screen on the distance 4.5 m. from the building, speed of the air blast 10 m/sec)

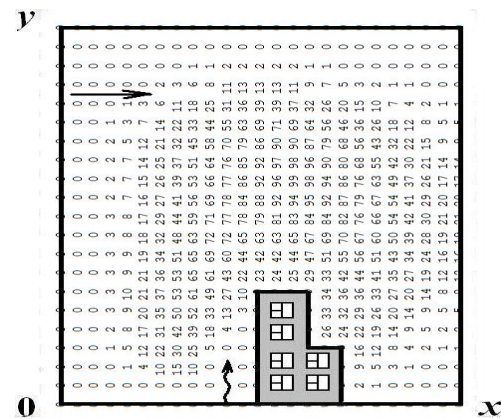


Рис. 8. Зона загрязнения для момента времени $t = 7,39$ с (воздушная завеса на расстоянии 4,5 м от здания, скорость воздушной струи 10 м/с)

Fig. 8. Pollution area for the time point $t = 7.39$ sec (air screen on the distance 4.5 m. from the building, speed of the air blast 10 m/sec)

Для оценки эффективности применения воздушной завесы для защиты людей, находящихся внутри помещений, выполнен расчет концентрации опасного вещества в обоих помещениях для случая, когда отсутствует воздушная завеса и при ее работе. Расчет выполнен на основе модели (3). Данные расчета представлены в табл. 1–4. Здесь также представлены данные относительно количества опасного вещества, отсорбированного внутри помещений.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Таблица 1

Значение концентрации опасного вещества внутри помещения и масса вещества, отсорбированного на поверхностях (помещение на верхнем этаже, нет воздушной завесы)

Table 1

Concentration value of the dangerous material inside the building and the mass of the material, occluded on the surfaces (room on the upper floor, without air screen)

Время, с	Концентрация в помещении, г/м ³	Масса вещества, отсорбированного на поверхностях внутри помещения, г
1,9	0,0010	0
9,7	0,064	0,3·10 ⁻⁴
10,4	0,071	0,4·10 ⁻⁴
10,9	0,075	0,4·10 ⁻⁴
11,4	0,080	0,5·10 ⁻⁴
12,4	0,086	0,6·10 ⁻⁴

Таблица 2

Значение концентрации опасного вещества внутри помещения и масса вещества, отсорбированного на поверхностях (помещение на нижнем этаже, нет воздушной завесы)

Table 2

Concentration value of the dangerous material inside the building and the mass of the material, occluded on the surfaces (room on the ground floor, without air screen)

Время, с	Концентрация в помещении, г/м ³	Масса вещества, отсорбированного на поверхностях внутри помещения, г
1,9	0,0001	0
9,7	0,0177	0,1·10 ⁻⁴
10,4	0,0197	0,1·10 ⁻⁴
10,9	0,0210	0,1·10 ⁻⁴
11,4	0,0222	0,1·10 ⁻⁴
12,4	0,0243	0,2·10 ⁻⁴

Как видно из данных таблиц, применение воздушной завесы позволяет существенно снизить концентрацию опасного вещества в помещениях. Так в помещении, расположенном на

верхнем этаже при применении воздушной завесы (момент времени 12,4 с), концентрация опасного вещества в помещении снизилась почти в 12 раз по сравнению с вариантом, когда нет воздушной завесы. Для помещения, расположенного на первом этаже, применение воздушной завесы позволило полностью приостановить поступление опасного вещества в помещение.

Таблица 3

Значение концентрации опасного вещества внутри помещения и масса вещества, отсорбированного на поверхностях (помещение на верхнем этаже, создана воздушная завеса, скорость воздушной струи 10 м/с, завеса на расстоянии 4,5 м от здания)

Table 3

Concentration value of the dangerous material inside the building and the mass of the material, occluded on the surfaces (room on the upper floor, with air screen 10 m/sec, air screen on the 4.5 m distance from the building)

Время, с	Концентрация в помещении, г/м ³	Масса вещества, отсорбированного на поверхностях внутри помещения, г
1,9	0,0003	0
9,7	0,0064	0
10,4	0,0071	0
10,9	0,0072	0,1·10 ⁻⁴
11,4	0,0073	0,1·10 ⁻⁴
12,4	0,0074	0,1·10 ⁻⁴

Но для оценки риска токсичного поражения людей в помещениях проведем сравнение величины концентрации в помещении с ПДК. Для сравнения выберем ПДК для хлора 1 мг/м³ – для рабочей зоны. Это связано с тем, что данная ПДК максимальная по величине по сравнению с другими ПДК. Как видно из табл. 3, концентрация хлора в помещении на верхнем этаже превышает эту ПДК при создании воздушной завесы. Чтобы снизить концентрацию опасного вещества в помещении на верхнем этаже, разместим воздушную завесу ближе к зданию. На рис. 9 и 10 показана зона загрязнения для этого варианта задачи – воздушная струя создается на расстоянии 1,5 м от навет-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ренной стороны здания, т.е. ближе к зданию по сравнению с предыдущим вариантом.

Таблица 4

Значение концентрации опасного вещества внутри помещения и масса вещества, отсорбированного на поверхностях (помещение на нижнем этаже, создана воздушная завеса, скорость воздушной струи 10 м/с, завеса на расстоянии 4,5 м от здания)

Table 4

Concentration value of the dangerous material inside the building and the mass of the material, occluded on the surfaces (room on the ground floor, with air screen 10 m/sec, air screen on the 4.5 m distance from the building)

Промежуток времени, с	Концентрация в помещении, г/м ³	Масса вещества, отсорбированного на поверхностях внутри помещения, г
1,9 – 12,5	0	0

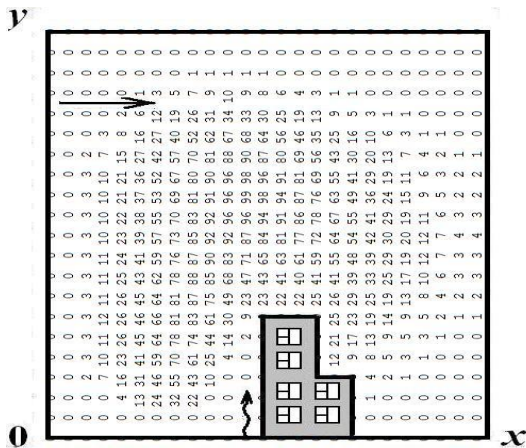


Рис. 9. Зона загрязнения для момента времени $t = 5,49$ с (воздушная завеса на расстоянии 1,5 м от здания, скорость воздушной струи 10 м/с)

Fig. 9. Pollution area for the time point $t = 5.49$ sec (air screen on the distance 1.5 m. from the building, speed of the air blast 10 m/sec)

Расположение воздушной завесы ближе к зданию позволяет больше снизить концентрацию в воздухе, поступающем в помещение на четвертом этаже. Это хорошо видно из табл. 5. Так для момента времени 12,4 с концентрация снизилась примерно на 27 %, но все таки она больше ПДК.

Теперь увеличим скорость воздушной среды до 15 м/с. Из рис. 11 видно, что увеличение

этого параметра еще больше приводит к снижению концентрации опасного вещества возле наветренной стороны здания.

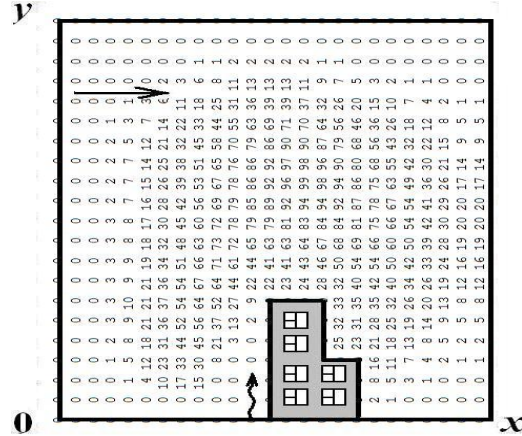


Рис. 10. Зона загрязнения для момента времени $t = 7,39$ с (воздушная завеса на расстоянии 1,5 м от здания, скорость воздушной струи 10 м/с)

Fig. 9. Pollution area for the time point $t = 7.39$ sec (air screen on the distance 1.5 m from the building, speed of the air blast 10 m/sec)

Таблица 5

Значение концентрации опасного вещества внутри помещения и масса вещества, отсорбированного на поверхностях (помещение на верхнем этаже, создана воздушная завеса на расстоянии 1,5 м от здания, скорость струи 10 м/с)

Table 5

Concentration value of the dangerous material inside the building and the mass of the material, occluded on the surfaces (room on the upper floor, with the air screen on the 1.5 m distance from the building, speed of the air blast 10 m/sec)

Время, с	Концентрация в помещении, г/м ³	Масса вещества, отсорбированного на поверхностях внутри помещения, г
1,9	0,0002	0
9,7	0,0049	0
10,4	0,0051	0
10,9	0,0052	0
11,4	0,0053	0
12,4	0,0054	0

В табл. 6 представлены данные, позволяющие оценить уровень снижения концентрации

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

опасного вещества внутри помещения на верхнем этаже для рассматриваемого сценария.

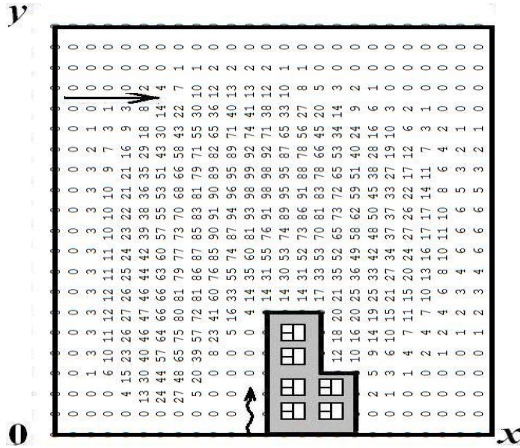


Рис. 11. Зона загрязнения для момента времени $t = 5,49$ с (воздушная завеса на расстоянии 1,5 м от здания, скорость воздушной струи 15 м/с)

Fig. 11. Pollution area for the time point $t = 7.39$ sec (air screen on the distance 1.5 m. from the building, speed of the air blast 15 m/sec)

Таблица 6

Значение концентрации опасного вещества внутри помещения и масса вещества, отсорбированного на поверхностях (помещение на верхнем этаже, создана воздушная завеса на расстоянии 1,5 м от здания, скорость струи 15 м/с)

Table 6

Concentration value of the dangerous material inside the building and the mass of the material, occluded on the surfaces (room on the upper floor, with the air screen on the 1.5 m distance from the building, speed of the air blast 15 m/sec)

Время, с	Концентрация в помещении, г/м ³	Масса вещества, отсорбированного на поверхностях внутри помещения, г
1,9	0,00014	0
9,7	0,00136	0
10,4	0,00139	0
10,9	0,00140	0
11,4	0,00141	0
12,4	0,00141	0

Из табл. 6 видно, что увеличение скорости воздушной струи привело к еще большему снижению уровня загрязнения воздушной сре-

ды в помещении на верхнем этаже – практически до безопасного уровня.

Данные вычислительного эксперимента также показывают, что интенсивность сорбции опасного вещества на поверхностях недостаточно высока при рассмотренных параметрах сорбции.

В заключение отметим, что расчет задачи на базе разработанной модели составляет порядка 10 с компьютерного времени.

Научная новизна и практическая значимость

Создана численная модель, позволяющая учесть влияние воздушной завесы на рассеивание загрязняющих веществ и, в тоже время, требующая небольших затрат компьютерного времени при практической реализации. Разработанная модель может быть использована при проектировании систем локальной защиты зданий от попадания в них опасных веществ. Особенностью построенной модели является использование стандартной исходной информации и быстрота в получении расчетных данных, что важно при проведении серийных расчетов.

Выводы

В работе представлена новая CFD модель для расчета эффективности применения воздушной завесы с целью наружной локальной защиты здания от попадания внутрь его загрязнения. Для решения гидродинамической задачи используется модель идеальной жидкости. Для расчета переноса опасного вещества в атмосфере используется модель Марчука Г. И. При практической реализации на ПК разработанной CFD модели требуются небольшие затраты компьютерного времени. Дальнейшее развитие данной тематики следует вести в направлении построения 3-D модели.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ / Н. Н. Беляев, В. М. Лисняк. – Д. : ООО «Инновация», 2006. – 150 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Д. : «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
3. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
 4. Гунько, Е. Ю. Оценка риска токсичного поражения людей при аварийном выбросе химически опасного вещества / Е. Ю. Гунько // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2008. – Вип. 20. – С. 87–90.
 5. Купаев, В. И. Методы локализации очага аварии и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта / В. И. Купаев, С. В. Рассказов // Трансп. : наука, техника, управление. – 2003. – № 4. – С. 28–34.
 6. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1978. – 735 с.
 7. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
 8. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
 9. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
 10. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
 11. Belayev, N. N. An engineering approach to simulate the 3-d wind flows over buildings / N. N. Belayev, V. K. Khrutch // Bluff Body Aerodynamics & Applications. Volume of Abstracts (11.09-14.09. 2000) : Proc. of the 4th Intern. Colloquium. – Bochum, Ruhr-Universitat, 2000. – P. 471–475.
 12. Belayev, N. N. Computer simulation of the pollutant dispersion among buildings / N. N. Belayev, M. I. Kazakevitch, V. K. Khrutch // Wind Engineering into 21st Century : Proc. of the 10th Intern. Conf. on Wind Engineering. – Copenhagen, 1999. – P. 1217–1220.
 13. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // SPS Intern. Tech. Meeting Air Pollution Modeling and its Application XXI (27.09-01.10.201) : Proc. of the 31st NATO. – Italy, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.
 14. Chester, C. V. Technical options for protecting civilians from toxic vapors and gases / C. V. Chester. – Washington : U.S. Department of Energy ORNL/TM-0423, 1988. – 50 p.
 15. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residential Districts [Электронный ресурс] / W. R. Chan, W. W. Nazaroff, P. N. Price, A. J. Gadgil. – 2008. – 31 p. – Режим доступа: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232>. – Загл. с экрана. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
 16. Modeling shelter-in-place including sorption on indoor surfaces : 84th American Meteorological Society Annual Meeting. Vol. PNFUZ Session 6.5 / Wanyu R. Chan, Philli N. Price, Ashok. J. Gadgil et al. – WA : American Meteorological Society, Boston, MA, 2004. – 9 p.
 17. Protecting buildings and their occupants from airborne hazards. U.S. / Army Corps of Engineers. Engineering and Construction Division. Directorate of Military Programs. – Washington : The Corps, 2001. – 25 p.
 18. Protecting buildings from a biological or chemical attack: actions to take before or during a release / Phillip N. Price, Michael D. Sohn, Ashok J. Gadgil et al. – Honolulu : University Press of the Pacific, 2004. – 52 p. doi: 10.2172/810539.
 19. Validation of numerical simulation system for gas diffusion in urban area [Электронный ресурс] / Ryohji Ohba, Akinori Kouchi, Tomohiro Hara et al. – 2009. – 8 p. – Режим доступа: http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/safety/pdflist/pdf/МНІ_09_2.pdf. – Загл. с экрана.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, Н. В. РОСТОЧИЛО², Ф. В. НЕДОПЬОКІН³

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. + 38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна. тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-9811-867X

³Каф. «Фізика нерівноважних процесів, метрології та екології», Донецький національний університет, вул. Університетська, 24, Донецьк, Україна, 83000, ел. пошта f.nedopekin@donnu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0717-3994

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНОГО ЗАХИСТУ БУДІВЕЛЬ (SHELTER-IN-PLACE) ІЗ УРАХУВАННЯМ СОРБЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНОЇ РЕЧОВИНИ НА ПОВЕРХНЯХ УСЕРЕДИНІ ПРИМІЩЕНЬ

Мета. Хімічно небезпечні об'єкти, в яких використовуються, виробляються, зберігаються токсичні речовини, а також магістралі, якими здійснюється транспортування небезпечних вантажів, являють собою потенційні джерела аварійного забруднення атмосфери. У дослідженні необхідно здійснити розробку прикладної чисельної моделі для розрахунку ефективності локального захисту будівлі від потрапляння в неї небезпечних речовин шляхом застосування повітряної завіси. **Методика.** Для вирішення гідродинамічної задачі взаємодії повітряної завіси з вітровим потоком та з урахуванням впливу будівель на цей процес використовується модель ідеальної рідини. Для розрахунку процесу переносу небезпечної речовини в атмосфері використовується рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Для розрахунку процесу забруднення повітряного середовища всередині приміщень при втіканні в них забрудненого атмосферного повітря використовується модель Karisson & Huber. Дана модель враховує сорбцію небезпечної речовини на різних поверхнях всередині приміщень. Для чисельного інтегрування рівняння моделі використовуються різницеві схеми. **Результати.** У роботі побудовано ефективну чисельну модель оцінки ефективності захисту будівель від потрапляння в них небезпечних речовин шляхом використання повітряної завіси. На основі побудованої моделі проведено розрахунковий експеримент з оцінки ефективності даного методу захисту при варіюванні місця розташування повітряної завіси відносно будівлі. **Наукова новизна.** Побудовано чисельну модель, яка дозволяє оперативно розрахувати ефективність використання повітряної завіси для зниження інфільтрації забрудненого зовнішнього повітря в приміщення. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана для проектування локального захисту будівель від потрапляння в них небезпечних речовин.

Ключові слова: забруднення атмосфери; локальний захист будівель; повітряна завіса; інфільтрація небезпечних речовин у приміщення

N. N. BELYAYEV^{1*}, N. V. ROSTOCHILO², F. V. NEDOPEKIN³

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

²Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St. 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0001-9811-867X

³Dep. «Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology», Donetsk National University, Universitetskaya St., 24, Donetsk, Ukraine, 83000, e-mail f.nedopekin@donnu.edu.ua, ORCID 0000-0003-0717-3994

MODELING OF THE BUILDING LOCAL PROTECTION (SHELTER – IN PLACE) INCLUDING SORPTION OF THE HAZARDOUS CONTAMINANT ON INDOOR SURFACES

Purpose. Chemically hazardous objects, where toxic substances are used, manufactured and stored, and also main lines, on which the hazardous materials transportation is conducted, pose potential sources of atmosphere accidental pollution. Development of the CFD model for evaluating the efficiency of the building local protection from

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

hazardous substances ingress by using air curtain and sorption/desorption of hazardous substance on indoor surfaces. **Methodology.** To solve the problem of hydrodynamic interaction of the air curtain with wind flow and considering the building influence on this process the model of ideal fluid is used. In order to calculate the transfer process of the hazardous substance in the atmosphere an equation of convection-diffusion transport of impurities is applied. To calculate the process of indoors air pollution under leaking of foul air Karisson & Huber model is used. This model takes into account the sorption of the hazardous substance at various indoors surfaces. For the numerical integration of the model equations differential methods are used. **Findings.** In this paper we construct an efficient CFD model of evaluating the effectiveness of the buildings protection against ingress of hazardous substances through the use of an air curtain. On the basis of the built model a computational experiment to assess the effectiveness of this protection method under varying the location of the air curtain relative to the building was carried out. **Originality.** A new model was developed to compute the effectiveness of the air curtain supply to reduce the toxic chemical concentration inside the building. **Practical value.** The developed model can be used for design of the building local protection against ingress of hazardous substances.

Keyword: air pollution; local protection of buildings; air curtain; infiltration of hazardous substances in the rooms

REFERENCES

1. Belyayev N.N., Lisnyak V.M. *Zashchita atmosfery ot zagryazneniya pri migratsii toksichnykh veshchestv* [Protection of the atmosphere from contamination migration of toxic substances]. Dnipropetrovsk, OOO «Innovatsiya» Publ., 2006. 150 p.
2. Belyayev N.N., Gunko E.Yu. Mashykhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy* [Mathematical modeling in problems of environmental safety and emergency monitoring]. Dnipropetrovsk, «Aktsept PP» Publ., 2013. 159 p.
3. Berlyand M. Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and control of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
4. Gunko Ye.Yu. Otsenka riska toksichnogo porazheniya lyudey pri avariynom vybrose khimicheskii opasnogo veshchestva [Risk assessment of toxic shock to persons under the accidental release of the chemically dangerous substances]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 20, pp. 87-90.
5. Kupayev V.I., Rasskazov S.V. Metody lokalizatsii ochaga avarii i likvidatsii yeye posledstviy na khimicheskii opasnykh ob'ektakh zheleznodorozhnogo transporta [Methods for localization of the accident and elimination of its consequences on the chemically hazardous facilities of railway transport]. *Transport: nauka, tekhnika, upravleniye – Transport: Science, Techniques, Management*, 2003, no. 4, pp. 28-34.
6. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 735 p.
7. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
8. Mashykhina P.B. Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relefa mestnosti [Simulation of the distribution impurity in the atmosphere in view of the terrain]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universitetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
9. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [Theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
10. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical simulation of the spread of contamination in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
11. Belayev N.N., Khrutch V.K. An engineering approach to simulate the 3-d wind flows over buildings. Proc. of the Fourth Intern. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics&Applications, Ruhr-Universitat. Volume of Abstracts. Bochum, 2000, pp. 471-475.
12. Belayev N.N., Kazakevitch M.I., Khrutch V.K. Computer simulation of the pollutant dispersion among buildings. Proc. of the Tenth Intern. Conf. on Wind Engineering «Wind Engineering into 21st Century». Copenhagen, 1999, pp. 1217-1220.
13. Biliaiev M. M., Kharytonov M.M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography. SPS Intern. Tech. Meeting Air Pollution Modeling and its Application XXI. Italy, 2012, pp. 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15.
14. Chester C.V. Technical options for protecting civilians from toxic vapors and gases. Washington, Department of Energy ORNL/TM-0423 Publ., 1988. 50 p.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

15. Chan W.R., Nazaroff W.W., Price P.N., Gadgil A.J. Effectiveness of Urban Shelter-in-Place. II: Residential Districts, 2008. 31 p. Available at: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/928232> (Accessed 29 March 2014). doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.04.059.
16. Chan R. Wanyu, Price N. Philli, Gadgil. J. Ashok. 84th American Meteorological Society Annual Meeting «Modeling shelter-in-place including sorption on indoor surfaces». Boston, vol. PNFUZ Session 6.5, 2004, pp. 9.
17. Protecting buildings and their occupants from airborne hazards. Washington, The Corps Publ., 2001. 25 p.
18. Price N. Phillip, Sohn D. Michael, Gadgil J. Ashok. Protecting buildings from a biological or chemical attack: actions to take before or during a release. Honolulu, University Press of the Pacific Publ., 2004. 52 p. doi: 10.2172/810539.
19. Ohba Ryohji, Kouchi Akinori, Hara Tomohiro, Yoneda Jiro, Kato Shinsuke. Validation of numerical simulation system for gas diffusion in urban area, 2009. 8 p. Available at: http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/safety/pdflist/pdf/MHI_09_2.pdf (Accessed 29 March 2014).

Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. С. А. Пичуговым (Украина); д.физ.-мат.н., проф. О. Г. Гоманом (Украина)

Поступила в редколлегию: 03.04.2014

Принята к печати: 23.05.2014