

В. В. БЕЛЯЕВА, Д. Ю. СМАЛИЙ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООВОГО И ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПРИ АВАРИЯХ

АННОТАЦИЯ Предложены методы расчета вентиляции помещений в случае аварийного выброса химических загрязнений, а также после горения огненного шара. Методы основаны на численном интегрировании трехмерного уравнения энергии и двухмерного уравнения переноса примеси в воздушной среде. Поле скорости воздушного потока рассчитывается путем численного интегрирования трехмерного уравнения потенциального течения и двухмерной модели отрывных течений невязкой жидкости. Приводятся результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: аварийная ситуация, производственное помещение, токсичное вещество, огненный шар, уравнение переноса примеси.

V. V. BILIAIEVA, D. YU. SMALII

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE PROCESSES OF THERMAL AND CHEMICAL POLLUTION INSIDE INDUSTRIAL PREMISES IN CASE OF EMERGENCY SITUATION

ABSTRACT The purpose of this scientific paper was to create numerical models and develop the methods on their basis for computation of the chemical and thermal pollution of air inside industrial premises when the failure occurs; these also allow us to analyze the chemical and thermal pollution taking into account those weighty factors that affect this process. To simulate thermal pollution of air inside the premises we use the energy equation. To describe the chemical pollution of air we use 2D model that enables the computation of the migration of pollution agent inside the premises. To solve this problem we use the space width-averaged equation of a gradient type. The air flow rate field inside the premises induced by the working ventilation is calculated on assumption that the migration of air inside the premises is potential. The numerical integration of the equation for the velocity potential and Poisson equation is conducted using A.V. Samarskii alternatively triangle method. For numerical integration of the impurity transfer equation, the energy equation and the turbulence transfer equation alternatively-triangle implicit difference diagrams are used. Each difference equation corresponds to the record of balance ratio for the reference volume (the difference cell). The unknown value is calculated at each step using the explicit formula of point-to-point computation. This scientific paper gives constructed computer models and the efficient methods developed on their basis that are used for computation of the thermal and chemical pollution inside industrial premises in case of anthropogenic accidents. Developed computation methods allow the numerical model to take into account any arrangement and any shape of the process equipment and the position of air inlets and outlets.

Key words: emergency situation, industrial premises, toxic substance, and the impurity transfer equation.

Введение

Задачи, связанные с аварийными ситуациями внутри производственных помещений привлекают к себе повышенное внимание, поскольку при таких авариях весьма высока вероятность поражения рабочего персонала как в помещении, где произошла авария, так и в соседних помещениях или на промплощадках. Среди задач данного класса можно выделить задачи, относящиеся к загрязнению воздушной среды в помещениях при аварийных выбросах химических веществ, нередко токсичных. Ко второму классу задач можно отнести задачи, связанные с выбросом или разливом ряда химических веществ (например, углеводородов), при котором образуется облако газа паровоздушной смеси (ГПВС). Если это облако переобогащено топливом, то происходит горение его с образованием огненного шара [1]. В этом случае будет происходить термическое воздействие на обслуживающий персонал, оборудование, элементы конструкции цеха и т.п. Таким образом, второй класс задач можно назвать задачами теплового загрязнения воздушной среды внутри производ-

ственных помещений, вызванного аварийными ситуациями. Анализ литературных источников показал, что выбор параметров вентиляции при аварийном выбросе химических веществ в воздушную среду помещения осуществляется по рекомендациям СНИПа, в основу которых положено, как правило, результаты расчетов на базе одномерных моделей переноса загрязняющих веществ [2]. Изменение теплового состояния воздушной среды в случае вентиляции производственных помещений после горения углеводородов с образованием огненного шара или без него в литературе практически не рассматривалась. Рассматривались лишь вопросы расчета нагрузок в помещении в случае аварийных ситуаций, связанных с горением и образованием ударной волны или термического поражения при излучении [1]. Важным вопросом является исследование влияния воздухообмена на снижение химического и теплового загрязнения в производственном помещении в случае аварийных ситуаций. Это приобретает в настоящее время особую актуальность в связи со значительным износом технологического оборудования на многих производствах.

© В. В. Беляева, Д. Ю. Смалий, 2017

Цель работы

Необходимо отметить, что на производстве для снижения концентрации химических веществ в воздухе применяются сорбенты. Однако, представляет практический интерес изучение эффективности использования сорбирующих материалов в случае аварийных ситуаций. **Целью** настоящей работы является создание численных моделей и разработка на их основе методов расчета химического и теплового загрязнения воздушной среды в производственных помещениях при аварийных ситуациях и позволяющих провести исследование химического и теплового загрязнения с учетом следующих особенностей:

- влияния технологического оборудования, расположенного в помещении на процесс загрязнения;
- влияния интенсивности воздухообмена, положения приточно-вытяжных отверстий на динамику снижения уровня загрязнения в помещении;
- влияние сорбирующих материалов на снижение загазованности помещения при аварийных ситуациях.

Изложение основного материала

Рассмотрим помещение, имеющее размеры R_x, R_y, R_z . На стенах помещения или на полу (потолке) имеются отверстия приточно-вытяжной вентиляции (рис. 1). В помещении может располагаться технологическое оборудование, оказывающее влияние на деформацию поля скорости воздушного потока при работе вентиляции (рис. 1). При исследовании теплового загрязнения воздушной среды в помещении будем считать, что на месте аварии произошло быстрое горение углеводородов (или других веществ), в результате которого в помещении образовалась подзона с высокой температурой T_a – огненный шар. В данной работе принимается, что шар имеет характерный диаметр D в момент времени $t = 0$. Далее рассматривается миграция этой подзоны в помещении при воздействии воздушного потока, индуцированного работой вентиляции.

Для моделирования теплового загрязнения воздушной среды внутри помещения будем использовать уравнение энергии

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где T – температура; a – коэффициент теплопроводности; u, v, w – компоненты скорости воздушной среды в помещении.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [3].

Для расчета поля скорости воздушного потока в помещении, индуцированного работой вентиляции делается допущение, что движение воздушной среды в помещении – потенциальное, тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z},$$

где P – потенциал.

Уравнение для определения потенциала имеет вид

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

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работе [3]. Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия:

- на твердых стенках $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$,

где n – единичный вектор внешней нормали;

- на входной границе (границы втекания воздушного потока в помещение) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$,

где V_n – известное значение скорости;

- на выходной границе $P = P(x = const, y) + const$ (условия Дирихле).

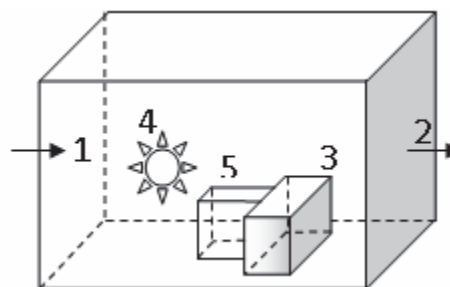


Рис. 1 – Схема расчетной области: 1 – приточное отверстие вентиляции; 2 – вытяжное отверстие вентиляции; 3 – технологическое оборудование; 4 – тепловой шар; 5 – положение рецептора (панель управления на технологическом оборудовании)

Кроме моделирования теплового загрязнения воздушной среды в производственном помещении будем рассматривать химическое загрязнение воздушной среды, вызванное аварийным выбросом на производстве. Для описания химического загрязнения воздушной среды будем использовать двухмерную модель для расчета миграции загрязняющего вещества в производственном помещении. Для решения этой задачи используется уравнение градиентного типа, усредненное по ширине помещения [4].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (3)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества в помещении; μ_x, μ_y – коэффициенты турбулентной диффузии; Q – интенсивность выброса токсичного вещества в помещении при аварии; $\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i = (x_i, y_i)$ – координаты источника выброса.

Для расчета поля скорости воздушного потока в помещении будем использовать модель отрывных течений невязкой несжимаемой жидкости [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= -\omega \\ u &= \frac{\partial \psi}{\partial y}; v = \frac{\partial \psi}{\partial x}; \omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где ω – завихренность; ψ – функция тока.

При применении данной модели делается допущение, что отрыв потока происходит в угловых точках. Интенсивность вихря в угловой точке рассчитывается по методики, рассмотренной в работе [5].

Постановка краевых условий для уравнений (4) рассматривается в работе [5].

Для численного интегрирования уравнений (1), (3) и уравнения переноса завихренности используются попеременно-треугольные неявные разностные схемы [5]. Каждое разностное уравнение представляет собой запись балансового соотношения для контрольного объема (разностной ячейки). Расчет неизвестного значения определяется на каждом шаге расщепления по явной формуле бегущего счета.

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости и уравнения Пуассона для функций тока используется идея «установления решения по времени». Так уравнение потенциала приобретает вид

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2},$$

где η – фиктивное время.

Численное интегрирование данного уравнения и уравнения Пуассона проводится с использованием попеременно-треугольного метода А. А. Самарского [6].

Обсуждение результатов

На базе разработанной численной модели создан пакет прикладных программ «ROOM-INVIS-2D» (расчет переноса примеси на базе двухмерной модели отрывных течений невязкой жидкости) и пакет прикладных программ «HEAT-

3D» (расчет теплового загрязнения помещения на базе трехмерной модели (1), (2)). Все пакеты программ реализованы на алгоритмическом языке FORTRAN-IV. Рассмотрим практическое использование каждого пакета на примере решения двух прикладных задач.

Задача 1. В производственном помещении, имеющем размеры 12 м×12 м×6 м, установлено технологическое оборудование (рис. 1). В результате аварии произошел разлив и горение пропана. На месте аварии образовался огненный шар, имеющий размер в диаметре 3 м и температуру 1000 °С. Температура воздуха в помещении до аварии составляло 20 °С. В помещение поступает воздух (расход 2 м³/с) с температурой 10 °С. Ставится задача исследования температурного загрязнения воздушной среды в помещении после аварии.

Результаты решения задачи представлены на рис. 2–4, где показаны изотермы для различных моментов времени и позволяющие выявить динамику процесса миграции огненного шара в помещении после аварии. Хорошо видно как происходит деформация формирующейся зоны теплового загрязнения возле технологического оборудования.

В табл. 1 представлены значения температуры возле панели управления оборудованием (позиция 5 на рис. 1). Видно, что происходит достаточно быстрое нагревание воздуха в этом месте после аварии. Если считать, что болевой порог для человека при термическом воздействии начинается примерно с 40 °С, то очевидно, что рабочий персонал, находящийся в этом месте достаточно быстро получит серьезные ожоги. Безусловно, такое высокое значение температуры может привести к выходу из строя технологического оборудования, на которое происходит «натекание» нагретого воздуха.

Таблица 1 – Расчетные значения температуры воздуха на месте расположения персонала возле оборудования

Время после аварии, сек	Температура, °С
5	283
7	371
9	453
11	520
13	569

Задача 2. Рассматривается помещение, имеющее размеры: длина – 15 м, высота – 15 м, ширина – 10 м. В помещении располагается технологическое оборудование, вызывающего деформации поля скорости воздушного потока при вентиляции помещения (рис. 5).

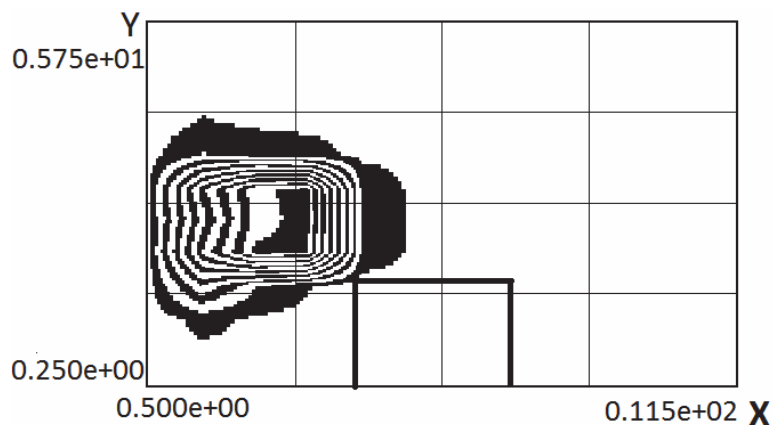


Рис. 2 – Распределение изотерм в помещении через $t = 1$ сек после аварии

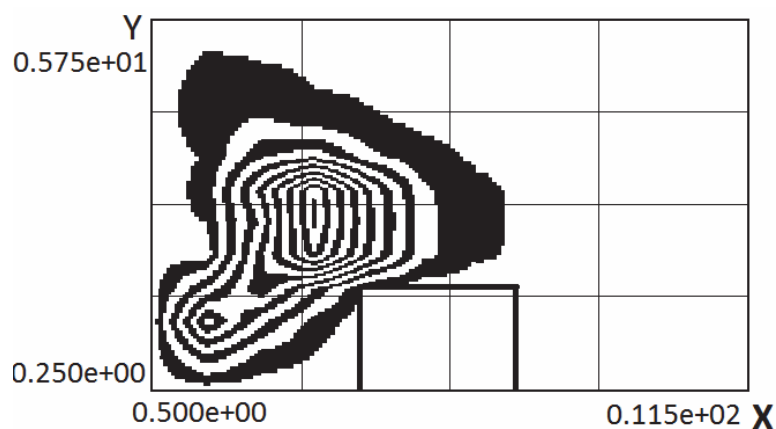


Рис. 3 – Распределение изотерм в помещении через $t = 7$ сек после аварии

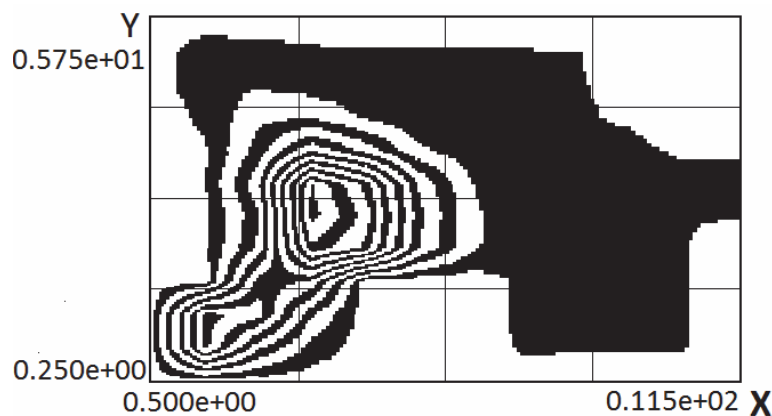


Рис. 4 – Распределение изотерм в помещении через $t = 13$ сек после аварии

Исследуется процесс загрязнения помещения при аварийном выбросе аммиака в двух местах, показанных на рис. 5. Исходные параметры выбраны следующим образом: выброс осуществляется в течение 10 сек, интенсивность выброса каждого источника – 10 г/с, коэффициент диффузии равен $0,7 \text{ м}^2/\text{с}$, подача воздуха в помещение осуществляется через два отверстия (одно в верхней части помещения, а другое – в нижней, расход

через отверстие составляет $40 \text{ м}^3/\text{с}$). На потолке помещения располагается материал, сорбирующий токсичное вещество, длина этого участка составляет 11 м, на поверхности оборудования также расположена сорбирующая поверхность длиной 2,5 м (рис. 5).

Требуется оценить эффективность сорбции токсичного вещества. Расчет выполняется с помо-

щю разработанной выше двухмерной модели и пакета программ «ROOM-INVIS-2D».

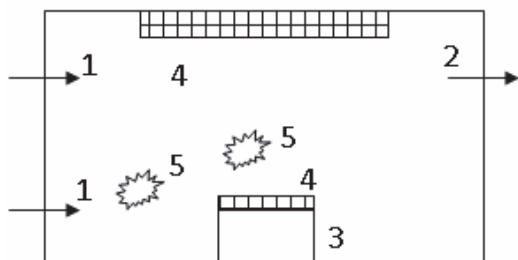


Рис. 5 – Схема расчетной области в задаче о сорбции загрязнителя в помещении:

1 – приточное отверстие вентиляции; 2 – вытяжное отверстие вентиляции; 3 – технологическое оборудование; 4 – сорбирующая поверхность; 5 – источник выброса загрязнителя

На рис. 6, 7 показаны изолинии концентрации аммиака в помещении после аварии для двух моментов времени. Хорошо видны два «ядра» повышенной концентрации аммиака, образовавшиеся на месте аварийного выброса, заметно вытягивание зоны загрязнения в направлении вытяжного отверстия.

Однако, хорошо видно из рис. 7, что возле оборудования и стен помещения образуются плохо проветриваемые застойные зоны.

В табл. 2 представлены расчетные значения массы аммиака, которая адсорбировалась на месте расположения сорбирующей поверхности (рис. 5). Отметим, что на данной поверхности ставилось граничное условие $C = 0$, т.е. в модели реализовывалось физическое условие полного поглощения. Это значит, что представленные результаты показывают «по максимуму» возможности сорбента.

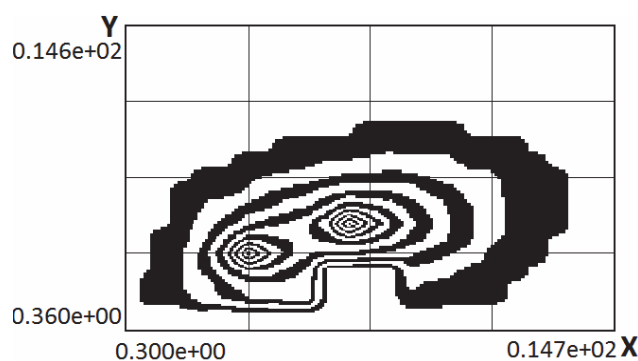


Рис. 6 – Распределение концентрации загрязнителя в помещении для момента времени $t = 3$ сек

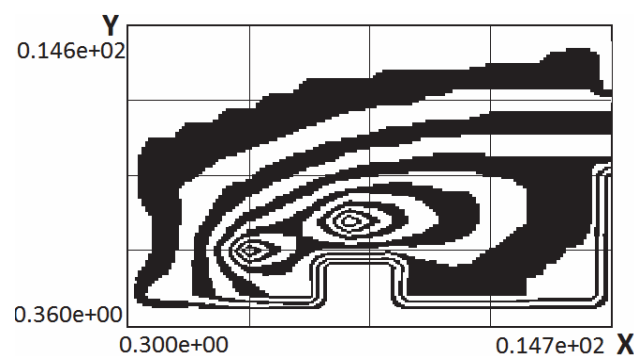


Рис. 7 – Распределение концентрации загрязнителя в помещении для момента времени $t = 10$ сек

Таблица 2 – Зависимость массы адсорбированного загрязнителя от времени

t , сек	Масса адсорбированного загрязнителя
8	22 г
16	57 г
24	72 г
48	81 г
55	82,4 г
71	82,83 г
79	82,89 г

Выводы

В работе построены компьютерные модели и на их основе разработаны эффективные методы расчета теплового и химического загрязнения производственных помещений при техногенных авариях. Модели и методы расчета основаны на неявном разностном алгоритме решения трехмерных уравнений потенциального течения и энергии, а также на численном решении двухмерных уравнений миграции примеси в воздушной среде и отрывных течений невязкой жидкости. Разработанные методы расчета позволяют учитывать в численной модели любое расположение и форму тех-

нологического оборудования, положения приточно-вытяжных отверстий.

Дальнейшее совершенствование моделей следует проводить в направлении их развития для моделирования горения и переноса пыли в производственных помещениях.

Список литературы

- 1 Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учебн. пособие в 5-ти книгах / Под редак. В. А. Котляревского и А. В. Забегаева. – Москва : Из-во АСВ, 2001. – 200 с.
- 2 **Эльтерман, В. М.** Вентиляция химических производств / В. М. Эльтерман. – Москва : Химия, 1980. – 3-е изд., перераб. – 288 с.
- 3 **Крейт, Ф.** Основы теплопередачи / **Ф. Крейт, У. Блэк.** – Москва : Мир, 1983. – 512 с.
- 4 **Марчук, Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука. – 1982. – 320 с.
- 5 **Згуровский, М. З.** Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / **М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев.** – Киев: Наукова думка, 1997. – 368 с.
- 6 **Самарский, А. А.** Теория разностных схем /

А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 2-е изд., испр. – 616 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Kotlyarevskiy, V. A. and Zabegaev A. V.** (2001), *Avarii i katastrofyi. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy. [Accidents and disasters. Prevention and elimination of consequences]*, Publishing House ASV, Moscow, Russian.
- 2 **Elterman, V. M.** (1980) *Ventilyatsiya himicheskikh proizvodstv [Chemical plants ventilation]*, Himiya, Moscow, Russian.
- 3 **Kreyt, F. and Blek, U.** (1983) *Osnovy teploperedachi [Fundamentals of heat transfer]*, Mir, Moscow, Russian.
- 4 **Marchuk, G. I.** (1982) *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushey sredy [Mathematical modeling in environmental problem]*, Nauka, Moscow, Russian.
- 5 **Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Hrusch, V. K. and Belyaev, N. N.** (1997) *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede [Numerical modeling of pollution in the environment]*, Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.
- 6 **Samarskiy, A. A.** (1983) *Teoriya raznostnykh shem [The theory of difference schemes]*, Nauka, Moscow, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

Беляева Виктория Витальевна – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, доцент кафедры аэрогидромеханики и энергомассопереноса; г. Днепропетровск, Украина; e-mail: vika_lulu@mail.ru.

Belyaeva Victoria – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of energy and mass transfer and aerohy-dromechanics, Dnepropetrovsk national university O. Gonchar, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Смалий Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры аэрогидромеханики и энергомассопереноса, Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, г. Днепропетровск; e-mail: dp141291sdj@gmail.com.

Smalii Dmitrii – Post Graduate Student, Department of energy and mass transfer and aerohy-dromechanics, Dnepropetrovsk national university O. Gonchar, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Беляева, В. В. Математическое моделирование процессов теплового и химического загрязнения производственных помещений при авариях / **В. В. Беляева, Д. Ю. Смалий** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 73–78. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.12.

Please cite this article as:

Belyaeva, V. and Smalii, D. (2017), "Mathematical Simulation of the Processes of Thermal and Chemical Pollution inside Industrial Premises in Case of Emergency Situation", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1233), pp. 73–78, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.12.

Будь ласка посилаетесь на цю статтю наступним чином:

Біляєва, В. В. Математичне моделювання процесів теплового та хімічного забруднення виробничих приміщень при аваріях / **В. В. Біляєва, Д. Ю. Смалий** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 73–78. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.12.

АНОТАЦІЯ Запропоновано методи розрахунку вентиляції приміщень у випадку аварійного викиду хімічних забруднювачів, а також після горіння вогняної кулі. Методи базуються на чисельному інтегруванні тривимірного рівняння енергії та двовимірного рівняння міграції домішки у повітрі. Поле швидкості повітря розраховується на базі чисельного інтегрування тривимірного рівняння потенційного руху та двовимірної моделі відірваних течій. Наводяться результати чисельного експерименту.

Ключові слова: аварійна ситуація, виробниче приміщення, токсична речовина, вогняна куля, рівняння переносу домішки.

Поступила (received) 20.02.2017