

## **Вычислительная технология учета вентиляции при расчете движения газовой смеси в помещении**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Разработаны математическая модель и алгоритм учета естественной и принудительной вентиляции в процессе расчета движения газовой смеси в производственных и бытовых помещениях. Предложенная вычислительная технология основана на постановке дополнительных граничных условий протекания на поверхностях, примыкающих к вентиляционным каналам, и итерационном решении задачи распада разрыва на них для обеспечения заданного расхода отбираемого или подаваемого газа. Получаемые параметры потока используются при интегрировании уравнений движения многокомпонентной газовой смеси методом С.К. Годунова.

**Ключевые слова:** принудительная и естественная вентиляция, газовая динамика, пожарная безопасность, взрыв газовой смеси, распад разрыва.

### **Введение**

Современный уровень технического прогресса предполагает все возрастающее использование в промышленности, транспорте и быту взрывоопасных и токсичных газов [1]. Отказы в работе оборудования приводят к аварийным выбросам газов в атмосферу, формированию взрывоопасных и токсичных облаков, рассеянию их в помещениях, взрывам и пожарам, которые сопровождаются человеческими жертвами и значительным материальным ущербом [2].

Одним из способов повышения уровня пожаровзрывобезопасности производственных и бытовых помещений является их вентиляция (естественная и принудительная) [3]. Для грамотного планирования работы вентиляционных систем в зданиях требуются эффективные математические модели и компьютерные системы, которые позволяют на этапе проектирования выполнить анализ и прогноз движения газовой смеси в зданиях в случае реализации различных аварийных сценариев [4]. Вследствие того, что масштабы и сложность рассматриваемой задачи предполагают огромные затраты ресурсов вычислительной техники, возникает необходимость разного рода упрощений, которые не приведут к снижению точности получаемого решения [5]. Целью данной работы является разработка новой технологии учета вентиляции в процессе расчета нестационарных задач газовой динамики в производственных помещениях.

### **1. Постановка задачи**

Как правило, вентиляционные системы представляют собой сложные инженерные сооружения, газодинамический расчет которых является самостоятельной задачей. В общем случае расчётная область многосвязна и включает в себя набор каналов и устройств вытяжки или напора воздуха.

Так как для получения трехмерной картины движения газовой смеси в самом вентилируемом помещении знание ряда характеристик вентиляционной системы (длина и геометрия каналов, конструкция вентиляторов и др.) не является принципиально важным, то можно не рассматривать детально работу всей вентиляционной системы, а учитывать лишь параметры потока (например, расход газа),

которые она обеспечивает. Абстрагируемся от вентиляционной системы, а для учета влияния ее работы на общую картину течения в помещении будем задавать дополнительные граничные условия на поверхностях основной расчетной области, которые примыкают к вентиляционным проемам.

Рассмотрим движение газовой смеси в помещении, в котором произошел аварийный выброс взрывоопасной примеси (рис.1). Под влиянием работы вытяжного вентилятора вентиляционной системы в выходной проем будет поступать газовая смесь из помещения с суммарным расходом  $G$ . Подача свежего воздуха со скоростью  $C_1$  осуществляется через входной проем помещения.

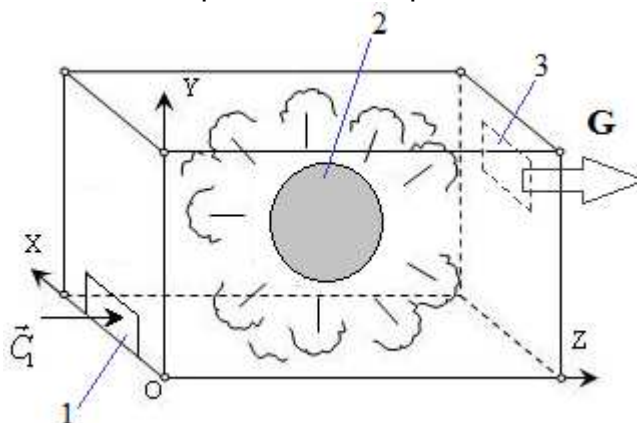


Рис. 1. Расчетная схема вытяжной вентиляции помещения:

- 1 – проем подачи свежего воздуха; 2 – облако взрывоопасной примеси;  
3 – вентиляционный вытяжной проем

Картина течения газовой смеси в помещении будет определяться режимом работы вентилятора, площадью и местом расположения проемов вентиляционной системы. Газовая взрывоопасная примесь, рассеиваясь, вытекает из помещения в выходной проем под влиянием вентиляции. Общая масса примеси в помещении будет, таким образом, уменьшаться, снижая уровень его пожаровзрывоопасности.

## 2. Математическая модель

Для выполнения вычислительного эксперимента, позволяющего оценить работоспособность разработанной технологии учета влияния вентиляции, использовалась математическая модель формирования и рассеяния газозадушной смеси в приземном слое атмосферы [6]. Предполагается, что основным фактором, влияющим на рассматриваемые физические процессы, является конвективный перенос массы, импульса и энергии. Поэтому достаточно использовать упрощенные уравнения Навье–Стокса, которые получены отбрасыванием вязких членов в уравнениях движения газовой смеси (эйлеров подход с источниковыми членами).

Расчетная область представляет собой параллелепипед, который расположен в правой декартовой системе координат (см. рис. 1) и разбит на пространственные ячейки, размеры которых определяются масштабом характерных особенностей области (шероховатостью поверхностей, габаритами объектов).

### 3. Метод расчета

Компьютерное решение системы фундаментальных уравнений газовой динамики для смеси, дополненной законами сохранения массы примесей в интегральной форме, получено явным методом Годунова [7]. Для аппроксимации уравнений Эйлера применяется конечно-разностная схема первого порядка. Центральные разности второго порядка используются для диффузионных источников членов в уравнениях сохранения примесей. Простая интерполяция давления применяется в вертикальном направлении. Метод Годунова характеризуется робастным алгоритмом, устойчивым к большим возмущениям параметров потока (например, давления).

В основе метода расчета лежит идея использования для построения разностной схемы точных решений уравнений с кусочно-постоянными начальными данными. Для гиперболической системы такие решения распадаются на совокупности независимых и сравнительно просто рассчитываемых деталей – «распадов разрывов».

В результате дискретизации расчетной области поверхность вентиляционного проема также разбивается на ряд конечно-разностных ячеек в плоскости XOY (рис. 2). При равномерном разбиении в направлении осей OX и OY площади граней «вентиляционных» ячеек одинаковы. Сделав допущение о равномерности потока в вентиляционном канале, можно определить индивидуальный заданный расход газа для каждой из «вентиляционных» ячеек  $G_i = G_\Sigma / k$ , где  $k$  – количество ячеек, примыкающих к вентиляционному проему.

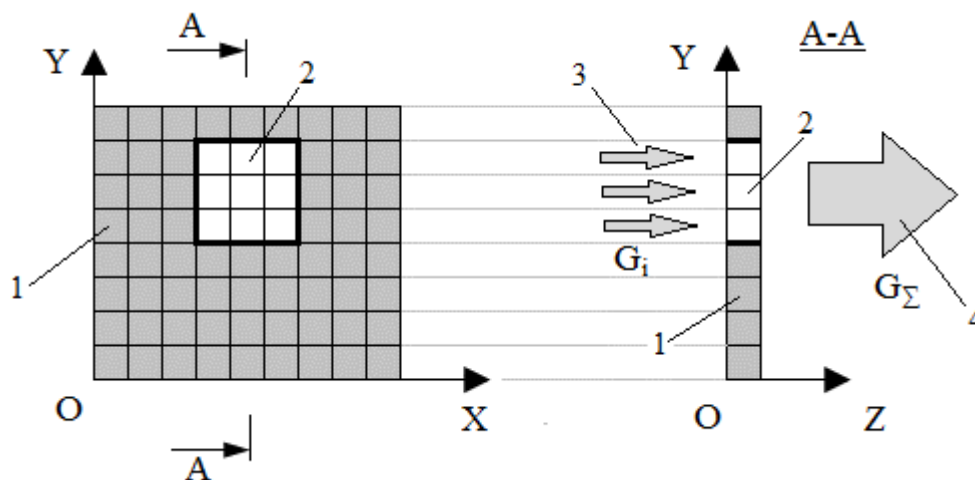


Рис. 2. Дискретизация стены с вентиляционным проемом: 1 – сплошная стена; 2 – вентиляционный проем; 3 – расход газа через одну ячейку вентиляции; 4 – суммарный расход газа через вентиляционный проем

Пусть имеется газовая среда, для которой термодинамические величины – давление  $p$ , плотность  $\rho$ , внутренняя энергия единицы массы  $\varepsilon$  – подчиняются уравнению состояния. Предположим, что в начальный момент времени  $t$  для левого полупространства  $x < 0$  среда характеризуется значениями параметров  $p_1$ ,  $\rho_1$ ,  $u_1$ , а для правого полупространства  $x > 0$  – значениями  $p_2$ ,  $\rho_2$ ,  $u_2$  (здесь  $u$  –

компонента вектора скорости в направлении координаты  $x$ , а другие ее компоненты равны нулю) (рис. 3).

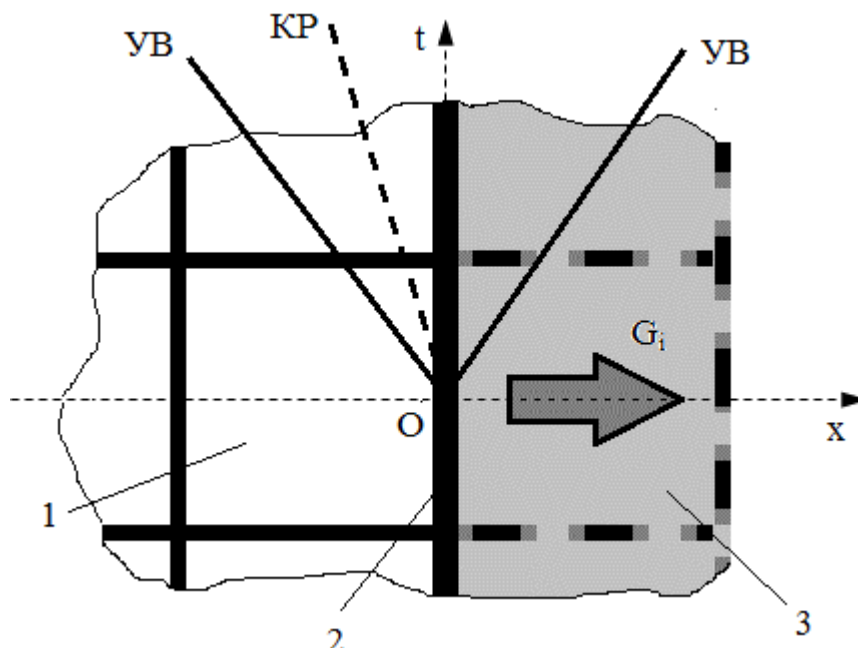


Рис. 3. Расчетная схема для определения расхода газа вентиляции:  
1 – вычислительная ячейка со стороны помещения; 2 – граница «помещение – вентиляционный проем»; 3 – фиктивная расчетная ячейка со стороны вентиляционного канала

Если привести в соприкосновение две массы газа, сжатые до различных давлений ( $p_1$  – давление в помещении,  $p_2$  – давление, генерируемое вентиляционной системой), и убрать перегородку между ними, то поверхность их соприкосновения будет поверхностью разрыва в начальном распределении давления. Начальный разрыв распадается на несколько разрывов, которые с течением времени будут отходить друг от друга. Схематически автомодельная картина возникающего течения на плоскости  $x, t$  соответствует одной из пяти возможных конфигураций, содержащих контактный разрыв КР, ударную волну УВ и волну разрежения ВР. На контактном разрыве испытывает скачок плотность, а значит, и внутренняя энергия ( $R_1, E_1$  – для левой и  $R_2, E_2$  – для правой областей), а давление  $P$  и поперечная компонента скорости  $U$  непрерывны. В свою очередь, эти области отделены от невозмущенных областей с параметрами  $p_1, \rho_1, u_1$  слева и  $p_2, \rho_2, u_2$  справа либо ударной волной УВ или волной разрежения ВР.

Решая задачу распада разрыва на грани конечно-разностной ячейки, примыкающей к вентиляционному проему, можно определить плотность  $R$  и скорость  $U$ , а значит, и индивидуальный расход газа  $G_i$  через рассматриваемую грань. Используя метод итераций, можно подобрать давление  $p_2$  таким образом, чтобы расчетный расход газа  $G_i$  отличался от заданного  $G$  на наперед заданную малую величину  $\varepsilon$  (рис. 4).

Тестирование такого итерационного алгоритма показало быструю сходимость процесса подбора давления вентиляции и незначительное

увеличение общего времени нестационарного расчета движения газовой смеси в вентилируемом помещении.

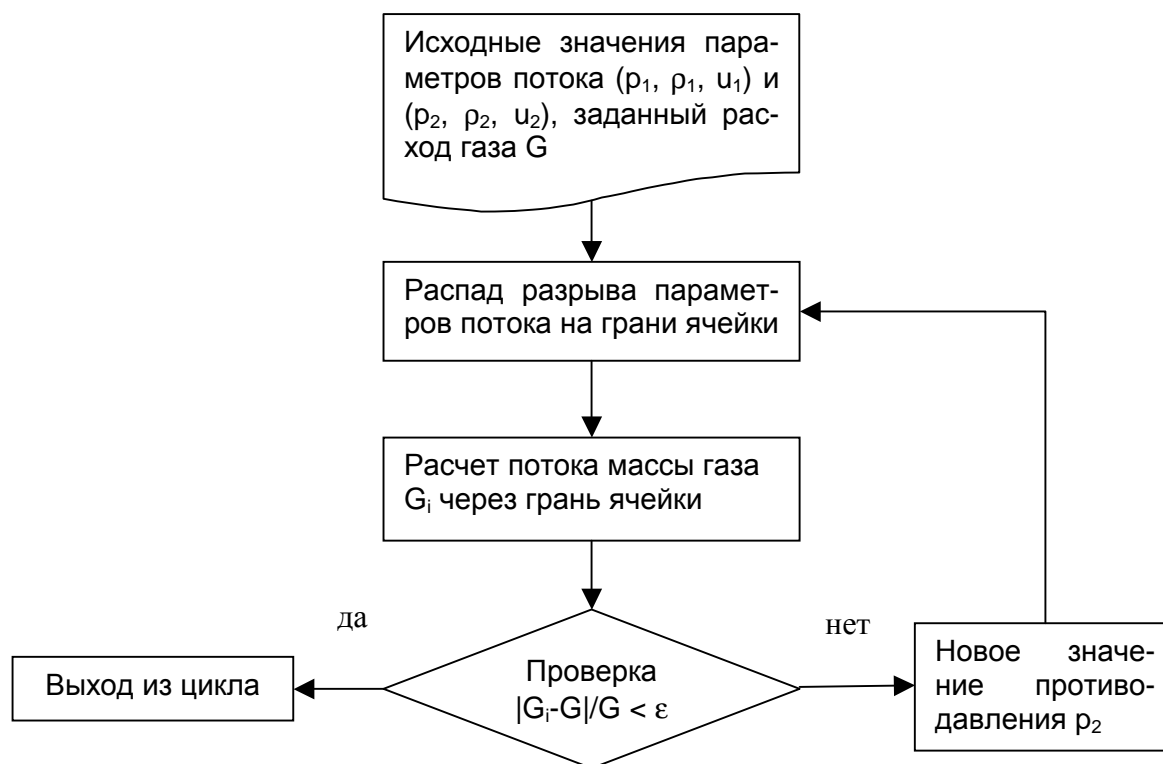


Рис. 4. Итерационный алгоритм подбора противодавления вентиляции

Кроме того, предложенная технология расчета вентиляционного расхода применима к любой из шести поверхностей, ограничивающих помещение (потолок, стены, пол), и позволяет реализовать как вытяжную, так и напорную схему принудительной вентиляции.

#### 4. Апробация разработанной технологии

Предложенный алгоритм и метод учета влияния механической вентиляции на движение газовой смеси в помещении был реализован в виде подсистемы исследовательского программного комплекса «Fire» [8]. Компьютерная система позволяет производить трехмерный анализ рассеяния взрывоопасных и токсичных газообразных примесей во времени и пространстве в практически приемлемое время и делать прогноз рисков взрывов и пожаров, возникающих в результате реализации одного из сценариев техногенной аварии в помещении.

Тестирование разработанной технологии и анализ эффективности алгоритма проводились на примере рассеяния стехиометрического сферического облака водорода радиусом 1 м с координатами центра  $x=1,8$  м,  $y=1,4$  м,  $z=2,2$  м в расчетной области с габаритами  $3,6 \times 2,8 \times 4,5$  м и вариантом по количеству ячеек вдоль координатных осей  $36 \times 28 \times 45$ . Вентиляционный проем для подачи свежего воздуха в помещение естественным способом размещался в центре передней стенки бокса у земли и имел габариты  $0,4 \times 0,4$  м. Вытяжной вентиляционный проем с такими же габаритами находился в центре задней стенки бокса у потолка. Суммарный расход газа  $G_{\Sigma}$ , который обеспечивала вентиляционная система, составлял

0.9369888 кг/с. Расчет производился до полного удаления водорода из помещения за счет вытяжной вентиляции.

Стационарная картина распределения составляющей скорости вдоль оси OZ представлена на рис. 5. Видно, что в проеме естественной вентиляции вырабатывается течение, подобное сгенерированному у проема вытяжки.

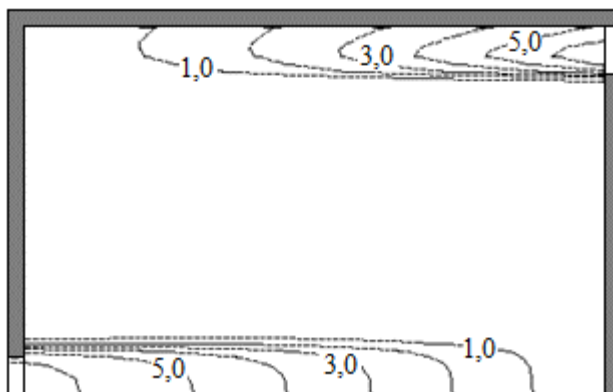


Рис. 5. Распределение осевой скорости в плоскости вентиляции

Анализ изменения массовой концентрации водорода проводился в центральной относительно оси OX плоскости (рис. 6). В процессе рассеяния облако существенно меняет форму и размеры в соответствии с течением газовой смеси, которое вырабатывается исходя из выбранной схемы принудительной вентиляции.

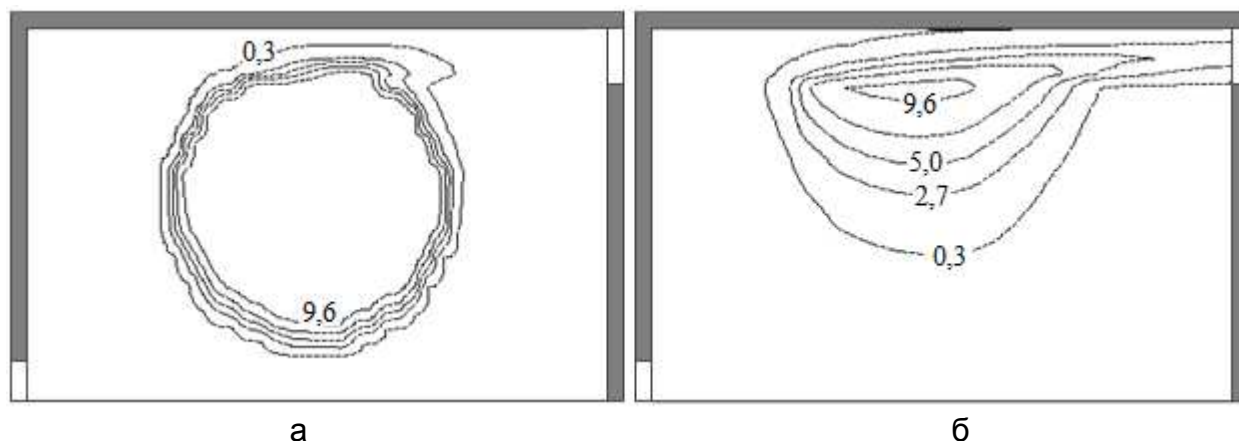


Рис. 6. Поля массовой концентрации водорода в разные моменты времени  $t$  после начала вентиляции: а –  $t=0,2$  с; б –  $t=3,0$  с

Показателем уровня пожаровзрывобезопасности производственного помещения может служить масса взрывоопасной примеси водорода (рис. 7), определенная как сумма масс примеси в тех элементарных расчетных ячейках, массовая концентрация водорода в которых попадала в концентрационный диапазон воспламеняемости ( $0,014 < Q < 0,929$ ) для водорода [9].

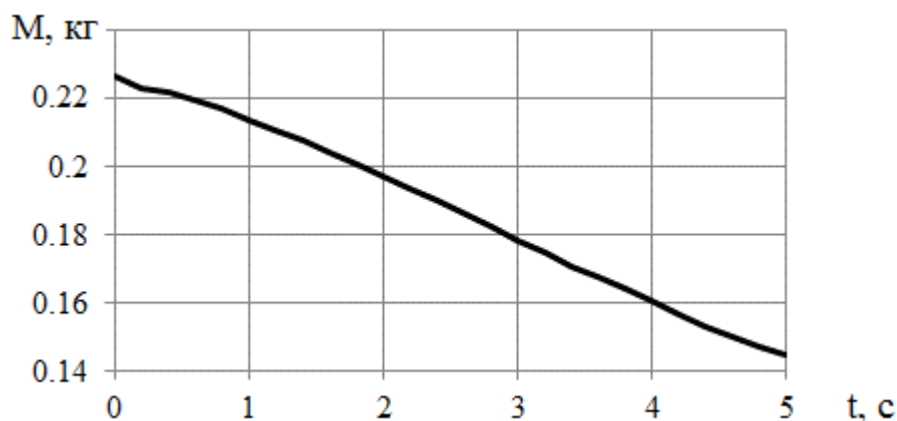


Рис. 7. Изменение во времени суммарной массы водорода в помещении

Анализ суммарной массы водорода, который может воспламениться и привести к взрыву, свидетельствует об уменьшении ее величины в процессе вентиляции и, соответственно, снижении рисков материального ущерба и человеческих жертв, вероятных в случае пожара в данном технологическом боксе.

### Заключение

Разработаны математическая модель и алгоритм расчета, которые позволяют учитывать влияние вентиляции на пространственную картину течения газовой смеси в помещениях промышленного и бытового назначения. В рамках общего подхода предложена вычислительная технология постановки дополнительных граничных условий на поверхностях помещения, примыкающих к вентиляционным проемам, и дальнейшего итерационного решения задачи распада разрыва для обеспечения заданного расхода вентиляции. Предложенный подход протестирован при моделировании течения водородно-воздушной газовой смеси в технологическом боксе, снабженном вытяжной вентиляцией. Для контроля за уровнем пожаровзрывобезопасности помещения введен показатель суммарной массы горючего газа, находящегося в пределах воспламеняемости.

### Список литературы

1. Батулин, В.В. Основы промышленной вентиляции [Текст] / В.В. Батулин – М.: Профиздат, 1990. – 450 с.
2. Макашев, В.А. Опасные ситуации техногенного характера и защита от них [Текст]: учеб. пособие / В.А. Макашев, С.В. Петров. – М.: ЭНАС, 2008. – 191 с.
3. Отопление и вентиляция [Текст]: учебник для вузов: в 2 ч. Вентиляция / под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1976. – Ч. 2. – 439 с.
4. Волков, О.Д. Проектирование вентиляции промышленного здания [Текст]: учеб. пособие / О.Д. Волков. – Х: Вища шк. Изд-во при ХГУ, 1989. – 240 с.
5. Papanikolaou, E.A. CFD modeling for helium releases in a private garage without forced ventilation [Электронный ресурс] / E.A. Papanikolaou, A.G. Venetsanos // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – 10 p. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/320121.pdf>. – 3.02.2013.
6. Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture и Dispersion in Atmosphere [Электронный ресурс] / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // 1-st

International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – 11 p. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/110021.pdf>. – 3.02.2013.

7. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1976. – 400 с.

8. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 30079 (Україна). Комп'ютерна програма «Комп'ютерна інтерактивна система інженерного аналізу та прогнозу руху хімічно реагуючих газоповітряних сумішей в задачах промислової аеродинаміки та екології атмосфери «FIRE»» [Текст] / Ю.А. Скоб, М.Л. Угрюмов, К.П. Коробчинський. – Дата реєстрації 28.08.2009.

9. Баум, Ф.А. Физика взрыва [Текст] / Ф.А. Баум, К.П. Станюкович, Б.И. Шехтер – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. – 801 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., М.Л. Угрюмов, НАКУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 07.02.13

## **Обчислювальна технологія врахування вентиляції під час розрахунку руху газової суміші в приміщенні**

Розроблено математичну модель, яка дозволяє враховувати вплив вентиляції на просторову картину течії газової суміші в приміщеннях промислового та побутового призначення. У рамках загального підходу запропоновано обчислювальну технологію постановки додаткових граничних умов на поверхнях приміщення, що примикають до вентиляційних отворів, і подальшого ітераційного розв'язання задачі розпаду розриву для забезпечення вентиляції. Запропонований підхід протестовано при моделюванні течії воднево-повітряної газової суміші в технологічному боксі, обладнаному витяжною вентиляцією. Для контролю за рівнем пожежовибухобезпеки приміщення введено показник сумарної маси пального газу, що знаходиться в межах займистості.

**Ключові слова:** примусова і природна вентиляція, газова динаміка, пожежна безпека, вибух газової суміші, розпад розриву.

## **A computing technology accounting ventilation effect when calculating of the gas mixture flow in the room**

A mathematical model and algorithm which takes into account the effect of ventilation on the spatial pattern of the gas mixture flow in the premises of industrial and domestic purposes are developed. As part of the overall approach a computational technology is proposed that sets additional boundary conditions on the surfaces of the room, adjacent to the ventilation openings, and further iterative solution of the Riemann problem for a given ventilation flow. The proposed approach is tested during the simulation of flow of hydrogen-air gas mixture in the technology box equipped with a ventilation system. To control the fire safety level of the facilities the total mass of fuel gas in the flammable range is used.

**Keywords:** forced and natural ventilation, gas dynamics, fire safety, gas mixture explosion.