

**РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ В ХРАНИЛИЩЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА**

*Н. Н. Беляев, \* д. т. н., проф., В. В. Беляева, \*\* к. т. н., А. В. Берлов, \*\* инж.*

*\* Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта  
имени академика В. Лазаряна*

*\*\* Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара*

**Ключевые слова:** *загрязнение атмосферы, численное моделирование, чрезвычайные ситуации*

**Постановка проблемы.** Одним из потенциальных источников химического загрязнения атмосферы является Павлоградский химический завод, где хранится твердое ракетное топливо ракетной системы РС-22 (рис. 1). Твердое топливо находится внутри специально оборудованных хранилищ, возле которых располагается защитный вал (рис. 2). Одной из важных задач в области экологической безопасности является прогноз уровня загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в данном хранилище, приводящей к возгоранию ракетного топлива. В этом случае произойдет интенсивная эмиссия химически опасных веществ в атмосферу. Поэтому актуальной задачей является оценка уровня загрязнения атмосферы при такой чрезвычайной ситуации.

**Анализ публикаций.** Основным методом прогноза уровня загрязнения атмосферы при чрезвычайных ситуациях, связанных с эмиссией химически опасных веществ, является метод математического моделирования. В настоящее время используется несколько классов математических моделей для решения задачи прогноза загрязнения атмосферы при чрезвычайных ситуациях на химических опасных объектах. В Украине – это эмпирические модели [9] или аналитические модели [7].



*Рис. 1. Вид ракетного двигателя первой ступени РС-22*

Как правило, аналитические модели – это расчетные зависимости, основанные на точном решении уравнения переноса примеси в атмосфере для точечного, постоянно действующего источника выброса или для модельной ситуации – «мгновенный выброс». Реже применяется аналитическое решение – расчетная зависимость для модельной ситуации «полунепрерывный выброс». Другой вид аналитических моделей – это различные модификации модели Гаусса, также разработанные для точечного, постоянно действующего источника или для модельной ситуации – «мгновенный выброс» [7]. Аналитические модели дают возможность быстро рассчитать зону загрязнения. Большим недостатком этих моделей является то, что они не учитывают влияние зданий и рельефа на процесс формирования зоны загрязнения. Для получения адекватных прогнозных данных необходимо применение численных моделей, учитывающих существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере и формирование зоны загрязнения [4; 6]. Однако для практики необходимо создание численных моделей, позволяющих максимально учитывать специфические особенности конкретных задач.

**Цель статьи.** Целью данной работы является разработка CWE (Computational Wind Engineering) модели для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива в хранилище, не требующей больших затрат компьютерного времени и применения мощных ПК при проведении прогнозных расчетов. Прогноз загрязнения на базе разработанной модели осуществляется в масштабе «microscale».

**Математическая модель.** При расчете процесса загрязнения атмосферы в случае аварийной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива (рис. 2) решение задачи разбивается на два шага. На первом шаге решается задача по определению поля скорости воздушного потока с учетом взаимодействия выходящего из хранилища газового потока с ветровым потоком. Для решения этой задачи применяются уравнения Навье – Стокса, записанные в переменных Гельмгольца [8]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = \nu \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

где  $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  – завихренность;  $\psi$  – функция тока;  $\nu$  – коэффициент турбулентной вязкости. Ось  $Y$  направлена вертикально вверх.



Рис. 2. Общий вид зоны размещения хранилища твердого ракетного топлива:  
1 – хранилище твердого ракетного топлива; 2 – защитный вал

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются по зависимостям

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Постановка краевых условий для данной системы уравнений приведена в [8].

После определения поля скорости воздушного потока решается задача о переносе загрязняющих веществ (продуктов горения твердого ракетного топлива) в атмосфере. Для моделирования этого процесса используется уравнение переноса примеси в атмосфере [2; 8; 10]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества;  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;

$x_i, y_i$  – координаты источника выброса;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя;  $t$  – время.

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

Численное интегрирование уравнений модели выполняется на прямоугольной разностной сетке. При формировании расчетной области используется метод маркирования [6; 8]. С помощью маркеров задается положение здания – хранилища твердого ракетного топлива, форма и местоположение защитного вала возле хранилища.

**Метод решения.** Для численного интегрирования уравнений Навье – Стокса используются неявные разностные схемы [8]. Для численного интегрирования уравнения переноса примеси используется попеременно-треугольная неявная разностная схема расщепления [6; 8].

**Практическая реализация.** На базе рассмотренной CWE модели был создан пакет прикладных программ WALL-2. Для программирования использовался FORTRAN. Разработанная модель была использована для решения следующей задачи. Рассматривается здание – хранилище твердого ракетного топлива РС-22. Возле здания размещается защитный вал (рис. 3). Ставится задача оценки уровня загрязнения приземного слоя атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище, когда произойдет возгорание топлива внутри хранилища и струя газа – продуктов горения будет выходить из хранилища наружу, приводя к загрязнению воздушной среды.



Рис. 3. Схема расчетной области: 1 – хранилище твердого ракетного топлива; 2 – защитный вал; 3 – направление ветра

Размеры расчетной области  $41,6\text{ м} \times 42\text{ м}$  (масштаб «microscale»). Скорость ветра на входе в расчетную область рассчитывалась по зависимости [7]:

$$u = u_1 (Y/Y_1)^n,$$

где  $u_1$  – значение скорости ветра на фиксированной высоте  $Y_1$  ( в расчетах принимается, что это высота 10 м, скорость ветра на этой высоте – 3 м/с);  $n = 0,15$  – параметр [7].

Вертикальный коэффициент турбулентной диффузии в приземном слое атмосферы рассчитывался по зависимости [7]:

$$\mu_y = k_1 \left( \frac{y}{y_1} \right)^m,$$

где  $k_1 = 0,2$ ;  $m \approx 1$ ,  $y_1$  – высота, где задана скорость ветра  $u_1$ . Коэффициент  $\mu_x$  рассчитан по зависимости  $\mu_x \approx k \cdot u$ , где  $k \approx 0,5$  [7].

Внутри хранилища располагается горящий корпус ракетного двигателя РС-22 из которого выходит струя газа, содержащая продукты горения. Для моделирования этого процесса используется следующий подход. Внутри здания задается разностная ячейка, из которой выходит поток со скоростью  $V_{gas}$ , содержащий загрязнитель (хлористый водород) с концентрацией 100 ед. ( в безразмерном виде). Скорость струи выходящего из хранилища газового потока – продуктов сгорания принята равной  $V_{gas} = 20$  м/с. Расчет переноса загрязнителя осуществляется как внутри здания, так и снаружи. Скорость переноса загрязнителя внутри здания определяется скоростью газового потока  $V_{gas}$  и диффузией, а снаружи здания – скоростью переноса, которая формируется в процессе взаимодействия выходящего из здания газового потока и ветрового потока + атмосферная диффузия.

Коэффициенты диффузии по обоим направлениям внутри здания рассчитываются по зависимости  $\mu \approx k \cdot u$ , где  $u = V_{gas}$  – скорость газового потока,  $k = 0,1$ . Вычислительный эксперимент на базе разработанной модели проведен для следующих сценариев:

1. Выброс продуктов сгорания осуществляется перед валом.
2. Выброс продуктов сгорания происходит перед валом, на наветренной стороне которого размещена вертикальная перегородка (высота 16 м).
3. Выброс продуктов сгорания происходит перед валом, на вершине которого размещена вертикальная перегородка.

На приведенных ниже рисунках показаны результаты расчета зоны загрязнения атмосферы вблизи хранилища для данных сценариев. Эти данные позволяют определить форму зоны загрязнения, ее размеры и интенсивность.

Видно, что при отсутствии перегородки концентрация загрязнителя за валом на уровне органов дыхания человека составляет примерно 72 % от концентрации загрязнителя возле источника эмиссии (рис. 4). Наиболее интенсивное загрязнение воздушной среды наблюдается внутри хранилища и на расстоянии порядка 15 м, т. е. возле вала.

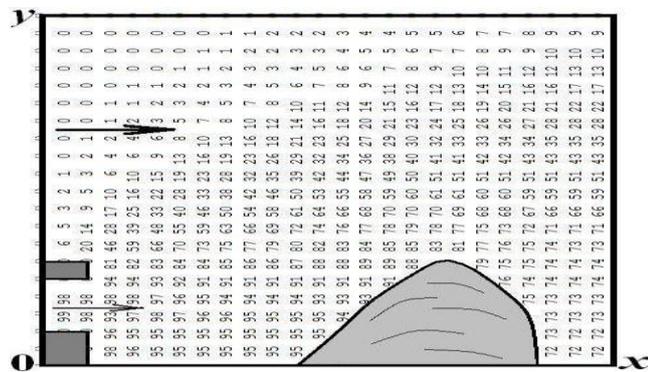


Рис. 4. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени  $t = 47с$  (первый сценарий)

Для второго сценария (рис. 5, б), за защитным валом концентрация загрязнителя составляет величину порядка 50 %, т. е. – интенсивность загрязнения уменьшилась примерно вдвое по сравнению с концентрацией внутри хранилища (рис. б).

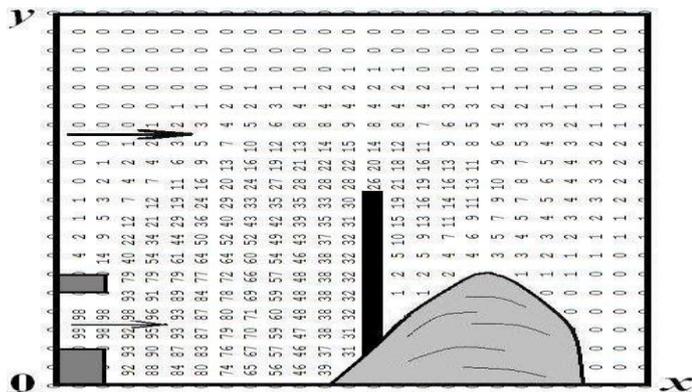


Рис.5. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени  $t = 8 с$  (второй сценарий)

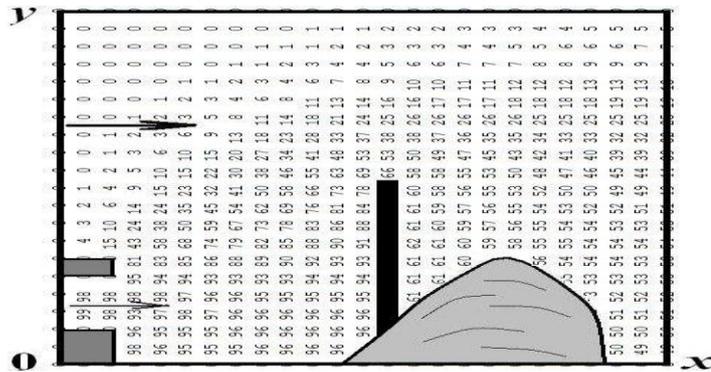


Рис. 6. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени  $t = 45\text{с}$  (второй сценарий)

Непосредственно перед перегородкой концентрация загрязнителя составляет величину порядка 96 %, а за перегородкой – 61 % от концентрации вблизи источника эмиссии. То есть применение перегородки привело к локальному снижению концентрации примерно на 30 %. На рисунке 5 хорошо видно, как за перегородкой формируется зона с пониженной концентрацией – эта зона более «разрежена визуально» и концентрация загрязнителя там, для выбранного момента времени, составляет 1 – 5 %.

Для третьего сценария (рис. 7, 8), за защитным валом концентрация загрязнителя составляет величину порядка 30 %, т. е. – интенсивность загрязнения за валом уменьшилась примерно втрое по сравнению с концентрацией внутри хранилища (рис. 8).

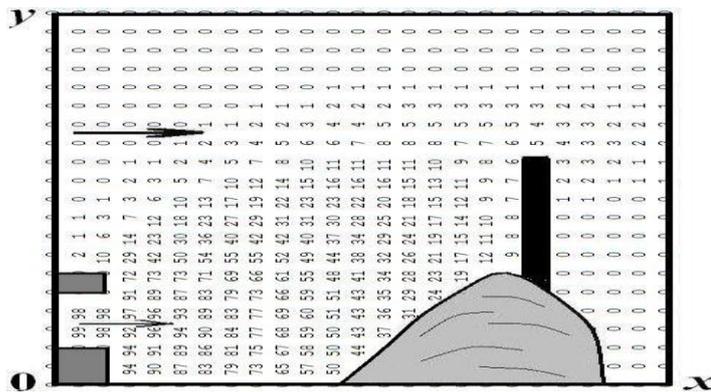


Рис. 7. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени  $t = 8\text{с}$  (третий сценарий)

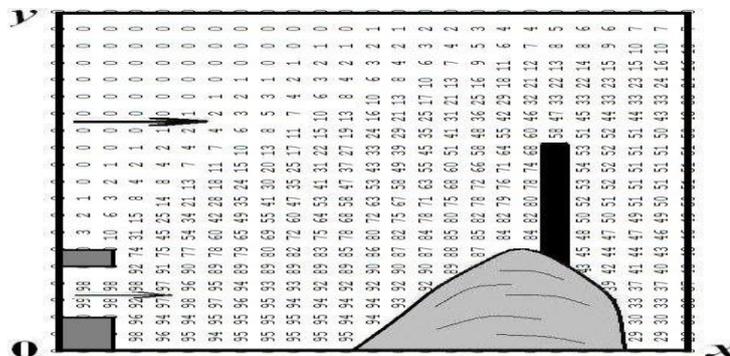


Рис. 8. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени  $t = 45\text{с}$  (третий сценарий)

Применение перегородки в данном случае привело к локальному снижению концентрации примерно на 50 % (от уровня 84 % до уровня 45 %). Таким образом, применение перегородки

на валу позволяет достаточно существенно снизить локальное загрязнение атмосферы на месте размещения хранилища.

В заключение отметим, что на расчет задачи потребовалось 5 мин компьютерного времени.

**Выводы.** Предложенная модель позволяет рассчитать гидродинамику ветрового потока с учетом его взаимодействия с газовым потоком – продуктом горения ракетного топлива. Разработанная модель была использована для оценки эффективности перегородки, размещенной на валу для локальной защиты атмосферы от загрязнения при чрезвычайной ситуации в хранилище. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для расчета 3-D переноса примеси в атмосфере.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий : учеб. пособие : в 6 кн. / Под ред. В. А. Котляревского, А. В. Забегаева. – М. : Изд-во АСВ, 2001 – 2005.
2. Антошкина Л. И. Моделирование аварийных ситуаций на промышленных объектах и безопасность жизнедеятельности / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Л. Ф. Долина, Е. Д. Коренюк. – Д. : Нова ідеологія, 2011. – 123 с.
3. Беляев Н. Н. Моделирование процесса загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Д., 2013. – Вып. 17. – Т. 1. – С. 179 – 184.
4. Беляев Н. Н. Математическое моделирование прогрева корпуса первой ступени ракеты РС-22 при инициированном воздействии / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. И. Губин // Зб. наук. пр. НГУ. – Д. : Нац. гірнич. ун-т, 2012. – № 38. – С. 192 – 201.
5. Беляев Н. Н. Численное моделирование загрязнения воздушной среды на промплощадках / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина, // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вып. 16. – Д., 2007. – С. 18 – 20.
6. Беляев Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций : монография. / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Д. : Акцент ПП, 2013. – 159 с.
7. Бруяцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруяцкий. – К. : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
8. Згуровский М. З. 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.
9. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К., 2001. – 33 с.
10. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
11. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
12. Belyaev M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances / M. Belyaev // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Series. – С. : Environmental Security, Springer, 2007. – P. 327 – 336.
13. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

## SUMMARY

**Purpose.** Development of CWE (Computational Wind Engineering) of model for the forecast of pollution of the atmosphere when burning solid rocket fuel in the storage, not demanding big expenses of computer time and use of powerful personal computers when carrying out expected calculations. The pollution forecast on the basis of the developed model is carried out on the scale of «microscale».

**Methodology.** For numerical integration of the equations of Navier – Stokes implicit differential schemes are used. For numerical integration of the equation of transfer of impurity is used alternately

– the triangular implicit differential scheme of splitting.

**Findings.** The offered model allows to calculate hydrodynamics of a wind stream taking into account its interaction with a gas stream – a product of burning of rocket fuel. The developed model was used for an assessment of efficiency of use of the partition placed on a shaft for local protection of the atmosphere from pollution at an emergency situation in storage.

**Originality.** The numerical model, allowing to consider essential factors, such as influence of buildings, a relief and the meteoconditions, influencing process of dispersion of polluting substances in the atmosphere, and formation of a zone of pollution at emergency situations of chemically dangerous substances connected with issue is created.

**Practical value.** The developed numerical model can be used in practice for expected calculations of possible zones of pollution at emergency situations on chemically dangerous objects, and also when developing PEA (the plan of elimination of an accident).

## REFERENCES

1. Avarii i katastrofyi. Preduprezhdenie i likvidatsiya posledstviy : ucheb. Posobie : v 6 kn. / Pod red. V. A. Kotlyarevskogo, A. V. Zabegaeva. – M. : Izd-vo ASV, 2001 – 2005.
2. Antoshkina L. I. Modelirovanie avariyniyh situatsiy na promyshlennyih ob'ektah i bezopasnost zhiznedeyatel'nosti / L. I. Antoshkina, N. N. Belyaev, L. F. Dolina, E. D. Korenyuk. – D. : Nova Ideologiya, 2011. – 123 s.
3. Belyaev N. N. Modelirovanie protsessa zagryazneniya atmosferyi pri gorenii tverdogo raketnogo topliva / N. N. Belyaev, A. V. Berlov // Visnik Dnipropetr. un-tu. SerIya «Mehanika». – D., 2013. – Vyip. 17
4. Belyaev N. N. Matematicheskoe modelirovanie progreva korpusa pervoy stupeni raketyi RS-22 pri initsirovannom vozdeystvii / N. N. Belyaev, A. V. Berlov, A. I. Gubin // Zb. nauk. pr. NGU. – D. : Nats. Gİrnich. un-t, 2012. – № 38. – S. 192 – 201.
5. Belyaev N. N. Chislennoe modelirovaniya zagryazneniya vozdushnoy sredy na promploschadkah / N. N. Belyaev, E. Yu. Gunko, P. B. Mashihina, // Visnik Dnipropetr. nats. un-tu zal'znich. transp. Im. akad. V. Lazaryana. – Vyip. 16. – D., 2007. – S. 18 – 20.
6. Belyaev N. N. Matematicheskoe modelirovanie v zadachah ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvyichaynyih situatsiy : monografiya. / N. N. Belyaev, E. Yu. Gunko, P. B. Mashihina. – D. : Aktsent PP, 2013. – 159 s.
7. Bruyatskiy E. V. Teoriya atmosferyi diffuzii radioaktivnyih vyibrosov / E. V. Bruyatskiy. – K. : In-t gidromehaniki NAN Ukrainyi, 2000. – 443 s.
8. Zgurovskiy M. Z. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushey srede / M. Z. Zgurovskiy, V. V. Skopetskiy, V. K. Hrusch, N. N. Belyaev. – K. : Nauk. dumka, 1997. – 368 s.
9. Metodika prognozuvannya naslidkiv vilivu (vikidu) nebezpechnih hlmlchnih rechovin pri avariayah na promisl'ovih ob'ektah i transporti. – K., 2001. – 33 s.
10. Marchuk G. I. Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushey sredy / G. I. Marchuk. – M. : Nauka, 1982. – 320 c.
11. Samarskiy A. A. Teoriya raznostnyih shem / A. A. Samarskiy. – M. : Nauka, 1983. – 616 s.
12. Belyaev M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances. Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Series / Environmental Security, Springer, C., 2007. – pp. 327 – 336.
13. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography. Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, Torino, Italy, 2010. № P1.7.

УДК 519.6:504.3.054

**Расчет локального загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, В. В. Беляева, А. В. Берлов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2014. – № 1. – С. 13 – 20. – рис. 8. – Библиогр.: (13 назв.).**

Разработана численная модель для прогноза загрязнения атмосферы при горении твердого ракетного топлива. Модель основана на применении уравнений Навье – Стокса и уравнений переноса примеси в атмосфере. Для численного интегрирования используются неявные разностные схемы. Представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов.

*Ключевые слова:* загрязнение атмосферы, численное моделирование, чрезвычайные ситуации.

**Розрахунок локального забруднення атмосфери у разі надзвичайної ситуації в сховищі твердого ракетного палива / М. М. Беляєв, В. В. Беляєва, О. В. Берлов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2014. – № 1. – С. 13 – 20. – рис. 8. – Бібліогр.: (13 назв).**

Розроблено числову модель для прогнозу забруднення атмосфери під час горіння твердого ракетного палива. Модель ґрунтується на застосуванні рівнянь Нав'є – Стокса і рівняннз перенесення домішки в атмосфері. Для числового інтегрування використовуються неявні різницьові схеми. Неведено результати проведених обчислювальних експериментів.

*Ключові слова* забруднення атмосфери, числове моделювання, надзвичайні ситуації.

**Calculation of local contamination of atmosphere at an emergency in the depository of hard rocket fuel / M. Beliaiev, V. Beliaieva, A. Berlov // Visnyk of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2014. – № 1. – P. 13 – 20. – pic. 8. – Bibliogr.: (13 names).**

A numeral model is worked out for the prognosis of contamination of atmosphere at burning of hard rocket fuel. A model is based on application of equalizations of Navier-Stokes and equalization of transfer of admixture in an atmosphere. For numeral integration non-obvious differences charts are used. The results of the conducted calculable experiments are presented.

*Key words:* contamination of atmosphere, numeral modeling, emergencies.