

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА В ХРАНИЛИЩЕ

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

Розроблена чисельна модель для прогнозу забруднення атмосфери при горінні твердого ракетного палива. Модель ґрунтується на застосуванні рівнянь Нав'є-Стокса і рівнянні перенесення домішки в атмосфері. Для чисельної інтеграції використовуються неявні різницьові схеми. Представлені результати проведених обчислювальних експериментів.

A numerical model was developed to predict the atmosphere pollution in the case of the solid rocket fuel firing. The model is based on Navier-Stokes equations and K-gradient model. The implicit difference schemes are used for the numerical integration. The results of the computational experiments are presented.

Вступление. 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 [1,3,4]. В этом случае произойдет интенсивная эмиссия химически опасных веществ в атмосферу. Поэтому актуальной задачей является оценка уровня загрязнения атмосферы при такой чрезвычайной ситуации.

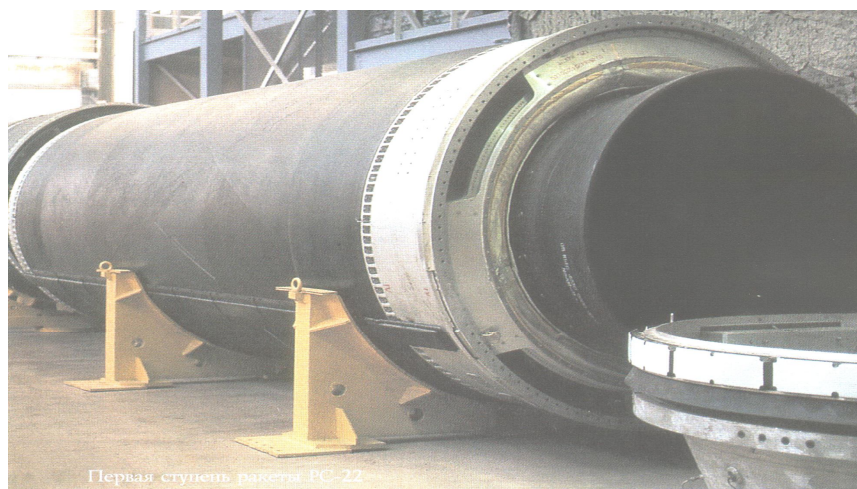


Рис.1. Вид ракетного двигателя первой ступени РС-22



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

Анализ существующих решений. Основным методом прогноза уровня загрязнения атмосферы при чрезвычайных ситуациях связанных с эмиссией химически опасных веществ является метод математического моделирования [2,5,7,6,14,15]. 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].

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» [7,12,13]. 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.

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 Гельмгольда [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; ψ – функция тока; ν – коэффициент турбулентной вязкости. Ось Y направлена вертикально вверх.

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]

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

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; σ – 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 модели. На базе рассмотренной CWE модели был создан пакет прикладных программ WALL-2. Для программирования ис-

пользовался 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 по оценке 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 41.6м*42м (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 10м, скорость ветра на этой высоте 5м/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 μ_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. Этот процесс моделируется следующим образом. 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 $u=V_{\text{gas}}$ – скорость газового потока, $k=0.1$.

Результаты параметрических исследований. Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. На приведенных ниже рисунках показана динамика загрязнения приземного слоя атмосферы вблизи хранилища для различных моментов времени. Эти данные позволяют определить форму зоны загрязнения, ее размеры и интенсивность.

Видно, что с течением времени формируется сложная зона загрязнения, вызванная влиянием защитного вала на процесс распространения загрязнителя. Высота зоны загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени 5с после начала аварийного выброса составит порядка 22м, а для момента времени 50с – более 40м, т.е. происходит ее стремительный рост. Наиболее интенсивное загрязнение воздушной среды наблюдается внутри хранилища и на расстоянии порядка 15м от него, т.е. возле вала. На этом расстоянии концентрация снижается только до величины порядка 94% от максимальной концентрации внутри хранилища. За защитным валом концентрация загрязнителя составляет величину порядка 66%, т.е. – интенсивность загрязнения уменьшилась примерно на 34% по сравнению с концентрацией внутри хранилища.

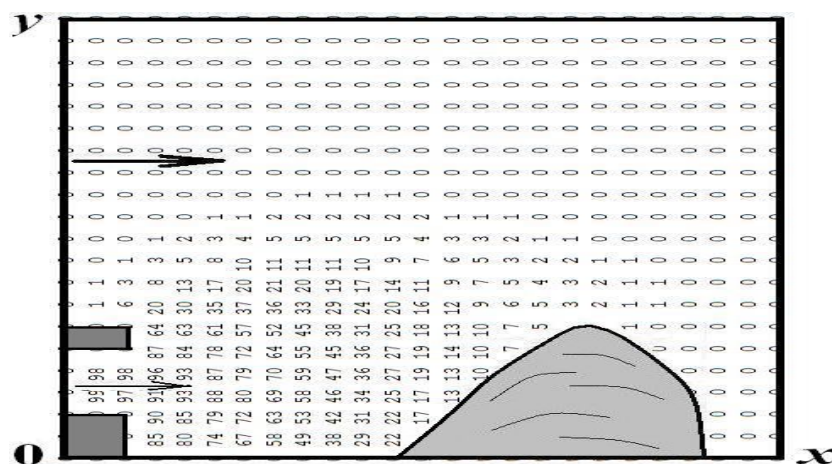


Рис. 4. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=5\text{с}$ (скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

На рис.7 показана зона загрязнения атмосферы при меньшей скорости ветра – 3м/с. Если сравнить данный рисунок с предыдущим, то видно, что уменьшение скорости ветра привело к возрастанию концентрации загрязнителя в атмосфере (для данного случая за валом концентрация загрязнителя составляет величину порядка 72 %–73 %).

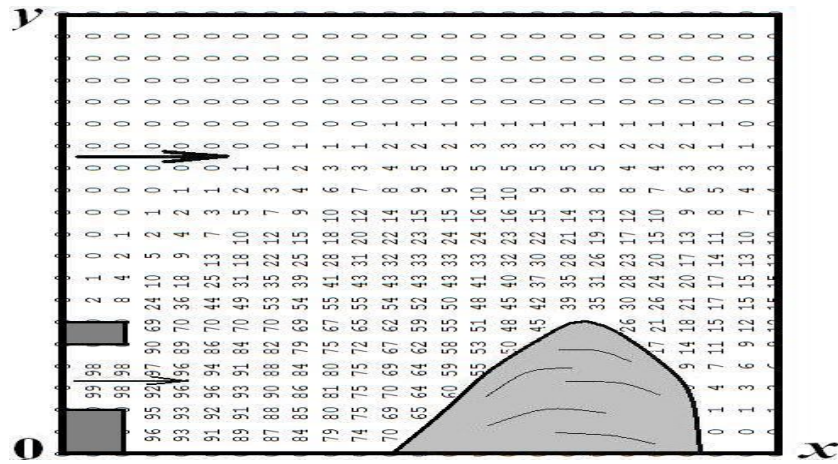


Рис. 5. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=10\text{с}$ (скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

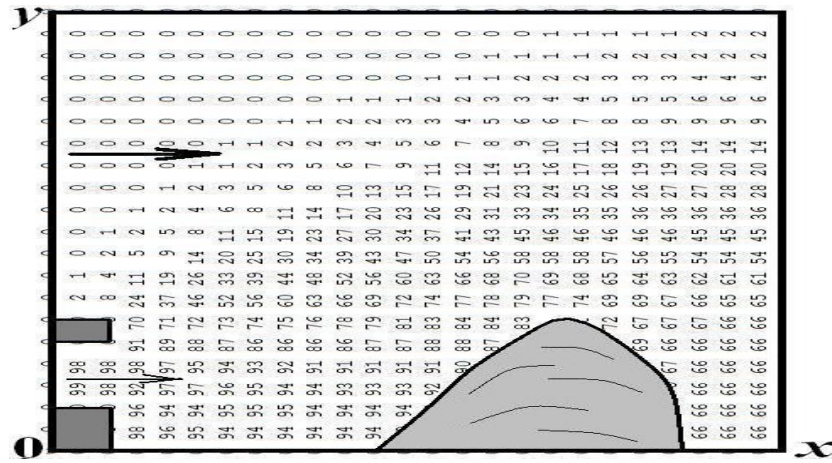


Рис. 6. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=50\text{с}$ (скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

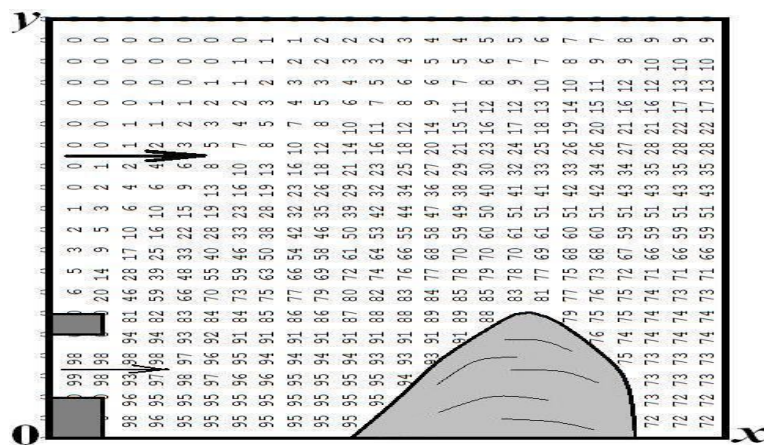


Рис. 7. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=50\text{с}$ (скорость ветра на высоте Y_1 равна 3м/с)

Ниже представлены результаты вычислительного эксперимента для иного сценария аварийной ситуации – когда имеет место частичное разрушение защитного вала (рис.8) или практически его полное разрушение (рис.9).

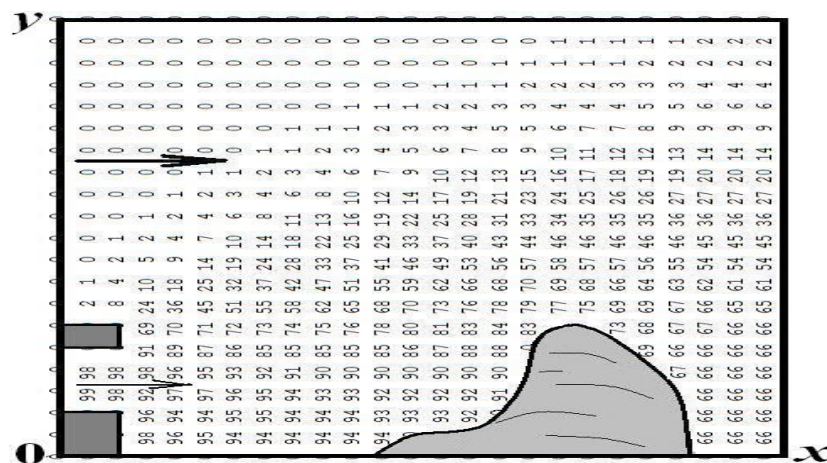


Рис. 8. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=50c$ (частично разрушенный защитный вал, скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

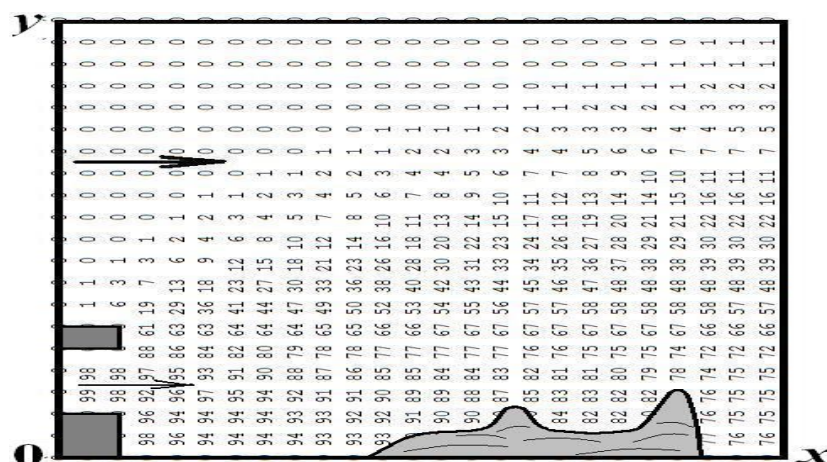


Рис.9. Зона загрязнения приземного слоя атмосферы для момента времени $t=50c$ (разрушенный защитный вал, скорость ветра на высоте Y_1 равна 5м/с)

Видно, что при частичном разрушении вала, его защитная функция – сохраняется, т.к. не уменьшилась высота вала. В этом случае концентрация загрязнителя за ним также составляет величину порядка 66% от концентрации внутри хранилища. Но при полном разрушении вала, т.е. при существенном уменьшении его высоты – концентрация загрязнителя за остатками вала уже составляет примерно 76 %, т.е. – очевидно выше.

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

Выводы. Разработана методика расчета прогрева корпуса I ступени ракеты РС-22 при инициированном тепловом воздействии. Методика расчета основывается на аналитическом решении задачи теплопроводности для многослойного тела.

На основе разработанной модели проведен ряд вычислительных экспериментов. Дальнейшую разработку модели следует проводить в направлении учета в ней условий неидеального теплового контакта на стыках слоев конструкций.

Список литературы

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учеб. пособие: В 6 кн. / Под ред. В. А. Котляревского и 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». –2013. Вип. 17, т.1. С.179 – 184.
4. Беляев Н.Н. Математическое моделирование прогрева корпуса первой ступени ракеты РС-22 при иницированном воздействии / Н.Н. Беляев, А.В. Берлов, А.И. Губин // Збірник наукових праць НГУ. Д.: Національний гірничий університет, 2012. – № 38. – С.192 – 201.
5. Беляев Н.Н. Численное моделирования загрязнения воздушной среды на промплощадках / Н.Н. Беляев, П.Б. Машихина, Е.Ю. Гунько. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Випуск 16. Дніпропетровськ, 2007. – С 18 – 20.
6. Беляев Н.Н., Гунько Е.Ю., Машихина П.Б. 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. Бруцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев: Институт 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.: Наукова 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. – М.: Наука, 1982. – 316 с.
11. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
12. Шаталов А.А., Лисанов М.В. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46 – 52с.
13. Hanna S. Air Quality Modeling Over Short Distances.// College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling: 16 May-3 June 1994. №SMR/760-2 – P. 712 – 743.
14. 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. – С.: Environmental Security, Springer, 2007. P.327 – 336.
15. Biliaiev M.M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography /Biliaiev M.M., Kharytonov M.M. / Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September – 01 October, Torino, Italy, 2010. № P1.7.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Е.
Надійшла до редакції 11.11.13*