УДК 622.457:519.6

Т. И. Русакова*, Н. Н. Беляев**
*Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара
**Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Создана численная модель для исследования проветривания горной выработки, которая учитывает наиболее важные факторы при проведении вычислительных расчетов, а именно форму выработки, наличие породы, режим вентилирования, процесс гравитационного оседания примеси. Численная модель базируется на решении многомерных уравнений аэродинамики и уравнения конвективно-диффузионного переноса загрязнителя. Для численного интегрирования моделирующих уравнений использован метод Либмана и неявная разностная схема. Численное моделирование осуществлено на прямоугольной разностной сетке с использованием метода маркирования исследуемой расчетной области. Представлены результаты практического применения рассматриваемой численной модели, позволяющие оценить эффективность проветривания горной выработки при заданных параметрах вентиляции. На основе построенной численной модели разработан пакет программ, использование которого дает возможность получать прогнозные данные по распределению концентрации примеси в течение нескольких секунд. Рассчитаны значения концентрации метана в исследуемой области выработки. Проведены сравнительный анализ изменения концентрации по этому загрязнителю с течением времени, расчеты по разработанной численной моделе, которые могут служить практическим инструментом при серии инженерных исследований для оценки и поддерживания установленных правилами безопасности параметров рудничной атмосферы.

Ключевые слова: горная выработка, численная модель, перенос примеси, разностная схема.

Створено числову модель для дослідження провітрювання гірничої виробки, яка враховує найважливіші фактори під час проведення обчислювальних розрахунків, а саме форму виробки, наявність породи, режим вентилювання, процес гравітаційного осідання домішки. Числова модель грунтується на розв'язку багатовимірних рівнянь аеродинаміки і рівняння конвективно-дифузійного перенесення забруднювача. Для числового інтегрування моделюючих рівнянь застосовано метод Лібмана і неявну різницеву схему. Числове моделювання здійснено на прямокутній різницевій сітці методом маркування досліджуваної розрахункової області. Подано результати практичного застосування розробленої числової моделі, що дозволяють оцінити ефективність провітрювання гірничої виробки за заданих параметрів вентиляції. На основі побудованої числової моделі розроблено пакет програм, використання якого створює можливість отримувати прогнозні дані щодо розподілу концентрації домішки протягом декількох секунд. Розраховано значення концентрації метану в досліджуваній області виробки. Проведено порівняльний аналіз зміни концентрації за цим забруднювачем із часом, розрахунки за розробленою числовою моделлю, які можуть бути практичним інструментом у серії інженерних досліджень для оцінки та підтримування встановлених правилами безпеки параметрів рудникової атмосфери.

Ключові слова: гірнича виробка, числова модель, перенесення домішки, різницева схема.

A numerical model was made for research ventilation underground workings. This model takes into account the most important factors when computing calculations, form underground workings, a rock formation, regime of ventilation, the process of gravitational subsidence pollution. The numerical model is based on solving the multi-dimensional equations of aerodynamics and the equation of convection-diffusion transport of pollutants. Numerical integration of modeling equations is performed using the method of Libman and implicit difference schemes. Realization of difference methods is carried out on an explicit scheme. Numerical modeling is performed on a rectangular grid using the method of marking the computational domain. Program package developed on the basis the numerical model. This allows projections data on distribution of impurity concentration for several seconds. The results of the practical application of the developed numerical model to assess the effectiveness of

© Т. И. Русакова, Н. Н. Беляев, 2015

ventilation excavation for the given parameters of ventilation. The values of the methane concentration is calculated on study area. A comparative analysis of changes in the concentration of this pollutant over time was conducted. Calculations made using the developed numerical model can serve as a practical tool for conducting a series of engineering research to evaluate and maintain the established safety practices parameters of mine atmosphere.

Key words: underground workings, numerical modeling, transfer of pollutant, difference scheme.

Постановка проблемы и анализ публикаций. Основной задачей проветривания тупиковых выработок является поддерживание установленных правилами безопасности параметров рудничной атмосферы. В выработках, в которых находятся или могут находиться люди, воздух должен содержать не менее 20 % кислорода (по объему). Содержание углекислого газа в рудничном воздухе на местах работ не должно превышать 0,5 %, в выработках с общей исходящей струей – 0,75 %. Воздух в действующих подземных выработках не должен содержать ядовитых и вредных веществ больше предельно допустимой концентрации.

Добыча полезных ископаемых подземным способом, особенно при разработке угольных месторождений, связана с выделением в горные выработки ядовитых и взрывчатых газов, угольной и породной пыли, тепла и влаги. Обеспечить безопасные и комфортные условия труда в шахтах становится все труднее. Это связано с углублением горных работ и интенсификацией добычи угля, что приводит к увеличению газовыделения, пылеобразования и температуры рудничного воздуха.

Роль рудничной аэрологии в обеспечении безопасных и комфортных условий труда значительна. Большой вклад в развитие рудничной аэрологии в России и Украине внесли А.С.Попов, М.М. Протодьяконов, В.Б. Комаров, Д.Ф. Борисов, А.И. Ксенофонтова, В.Н. Воронин, Ф.А. Абрамов, В.А. Бойко, Л.Н. Быков, И.М. Печук, П.И. Мустель, А.М. Карпов, А.Н. Щербань, Г.Д. Лидин, А.Ф. Воропаев. Аэродинамические расчеты на основе математического моделирования и численные расчеты по проветриванию тупиковых выработок приведены в работах [2; 4].

В сравнении с достаточно обширной разработкой CFD моделирования процесса вентилирования подземных выработок за рубежом [8–10], существующие в настоящее время в Украине подходы по расчету параметров проветривания выработок основываются на теоретических положениях [1; 3], которые требуют проведения экспериментов для определения эмпирических параметров. Такие подходы не позволяют определить поля концентрации загрязнителей в любое заданное время, а следовательно, и контролировать процесс проветривания.

Целью работы является разработка CFD модели для расчета вентиляции тупиковых выработок, создание эффективного вычислительного инструмента для ежедневного использования в инженерной практике. Этот инструмент, с одной стороны, должен учитывать наиболее существенные факторы при проведении расчетов (форму выработки, наличие породы в выемке, режим вентилирования, процесс гравитационного оседания пыли и т.д.), а с другой стороны, позволял бы получить прогнозируемые данные в течение нескольких секунд.

Математическая модель. При экспресс-расчете поля скорости в подземной выработке применяют модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид [5]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \qquad (1)$$

где P – потенциал скорости. При использовании данного уравнения предполагается, что ось Y направлена вертикально вверх. Для решения уравнения (1) ставятся граничные условия [5]:

- на стенках выработки, а также на других твердых поверхностях, расположенных внутри нее, ставится граничное условие вида $\frac{\partial P}{\partial n}=0$, где n – единичный вектор внешней нормали к твердой стенке;

- на границе выхода воздушного потока из воздуховода $\frac{\partial P}{\partial n}=V_n$, где V_n – известное значение скорости воздушного потока;

- на границе выхода воздушного потока из выемки (рис.1) $P=P_0+const$, где P_0 – некоторое число (условие Дирихле).

Для моделирования рассеивания примеси в подземной выработке используется уравнение массопереноса [7]

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial (v-w_s)C}{\partial y}=$$

$$=\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y})+\sum Q_i\delta(x-x_i)(y-y_i), \qquad (2)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества в выемке; u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока в выемке; w_s – скорость гравитационного оседания загрязняющего вещества, $\mu=(\mu_x,\mu_y)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; (x_i,y_i) – координаты источника выброса загрязняющего вещества; Q_i – интенсивность эмиссии загрязнителя в точке (x_i,y_i); $\delta(x-x_i)$, $\delta(y-y_i)$ – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируется поступление загрязнителя в выработку.

Численное интегрирование моделирующих уравнений проводится с использованием прямоугольной разностной сетки. Для численного интегрирования уравнения Лапласа (1) применяется метод Либмана [6]. В этом случае аппроксимирующее уравнение имеет вид

$$\frac{P_{i+1,j}-2P_{i,j}+P_{i-1,j}}{\Delta x^2}+\frac{P_{i,j+1}-2P_{i,j}+P_{i,j-1}}{\Delta y^2}=0. \qquad (3)$$

Неизвестное значение потенциала определяется по следующей зависимости:

$$P_{i,j}=\frac{\frac{P_{i+1,j}-P_{i-1,j}}{\Delta x^2}+\frac{P_{i,j+1}-P_{i,j-1}}{\Delta y^2}}{\frac{2}{\Delta x^2}+\frac{2}{\Delta y^2}}. \qquad (4)$$

Для начала расчета по методу Либмана необходимо задать начальное значение потенциала скорости в расчетной области, например $P_{i,j}=0$. При проведении серийных расчетов поле потенциала скорости, определенное численным путем для одной задачи, может использоваться как начальное значение при расчете последующей задачи с целью минимизации компьютерного времени. Расчет

прекращается при выполнении условия $\left|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n}\right| \le \varepsilon$, где ε – малое число (например, ε=0.001); *n* – номер итерации.

После расчета поля потенциала скорости выполняется расчет компонент вектора скорости на гранях разностных ячеек по зависимостям:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \; v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \qquad (5)$$

Численное интегрирование уравнения массопереноса проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления, основные этапы построения которой изложены в [7]. В данных разностных уравнениях используется значение $\bar{q}_l = \frac{Q_l}{\Delta x \Delta y}$.

Значение функции δ_l тождественно равно нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса. Поскольку на каждом шаге расщепления шаблон разностных уравнений имеет треугольную форму, то на верхнем временном слое неизвестное значение функции *C* находится по методу «бегущего счета».

На основе построенной численной модели разработан пакет программ «Выработка 3» на языке FORTRAN.

Практическая реализация модели. Вычислительный эксперимент с помощью разработанной численной модели выполнен при следующих исходных данных: скорость подачи воздуха – 0,5 м/с; диаметр трубопровода – 0,4 м. Размеры расчетной области: ширина 6 м, высота 4 м. В начальный момент времени во всей выработке задается равномерная концентрация примеси C_0=100 %. Подача воздуха для вентилирования осуществляется через воздуховод (рис.1). Волнистой линией показан выход воздушного потока из выработки.

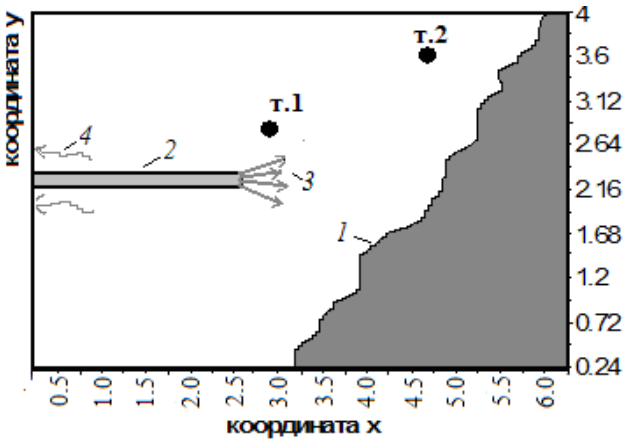

Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – порода; *2* – воздуховод; *3* – подача воздуха;
4 – выход воздушного потока

На последующих рисунках (рис. 2 – 6) представлено изменение концентрационного поля примеси (метана) в выработке для различных моментов времени.

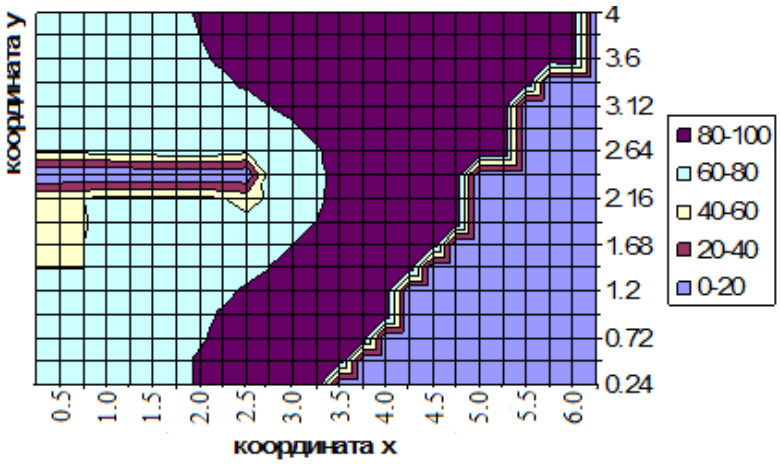

Рис. 2. Поле концентрации метана:
t=0.5 с, C_{max}=0.9898

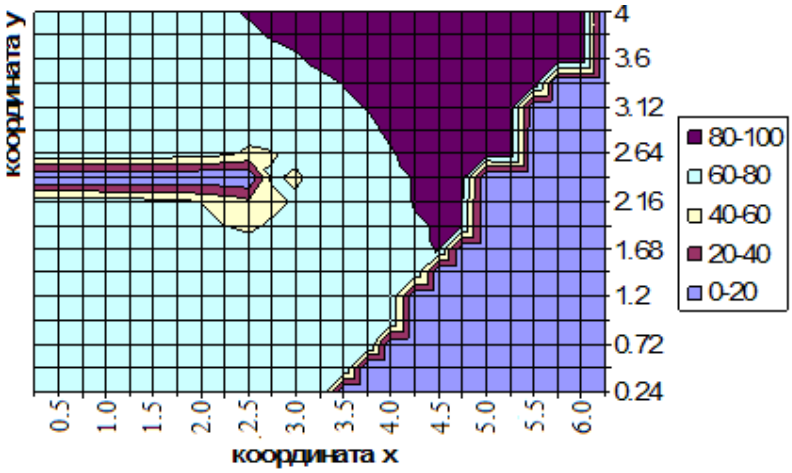

Рис. 3. Поле концентрации метана:
t=2 с, C_{max}=0.9079

На этих рисунках значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», то есть дробная часть числа не выдается на печать. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет «17,8 %» от максимальной концентрации, то на печать будет выведено число «17». Этот вывод результатов эффективен при проведении большого количества расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов с целью выбора наиболее оптимального для конкретной ситуации. Указанное представление результатов расчета в виде «целых» чисел позволяет оперативно анализировать информацию относительно величины концентрации в любой части расчетной области. Отметим, что по требованию пользователя разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату «действительное число», то есть с сохранением дробной части числа.

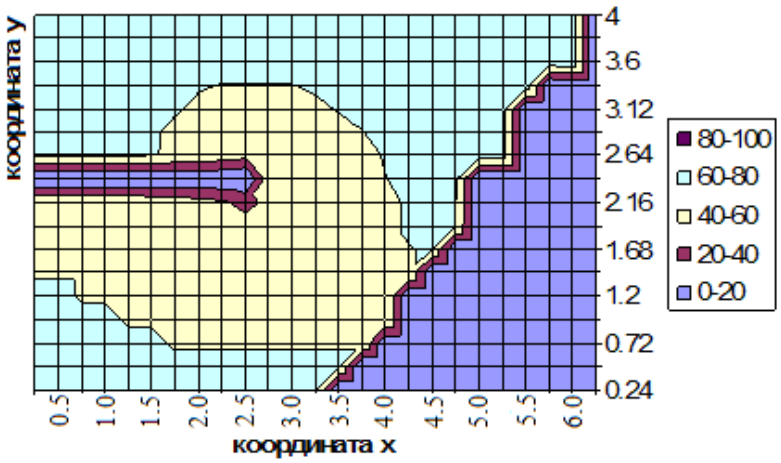

Рис. 4. Поле концентрации метана:
t=4 с, C_{max}=0.7565

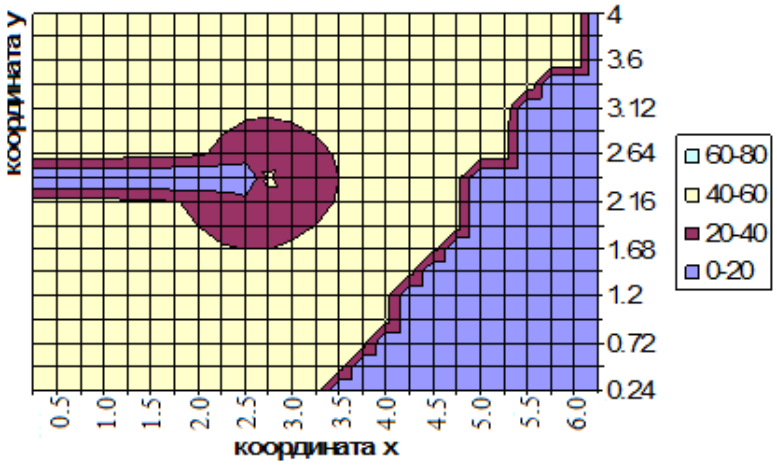

Рис. 5. Поле концентрации метана:
t=7 с, C_{max}=0.5709

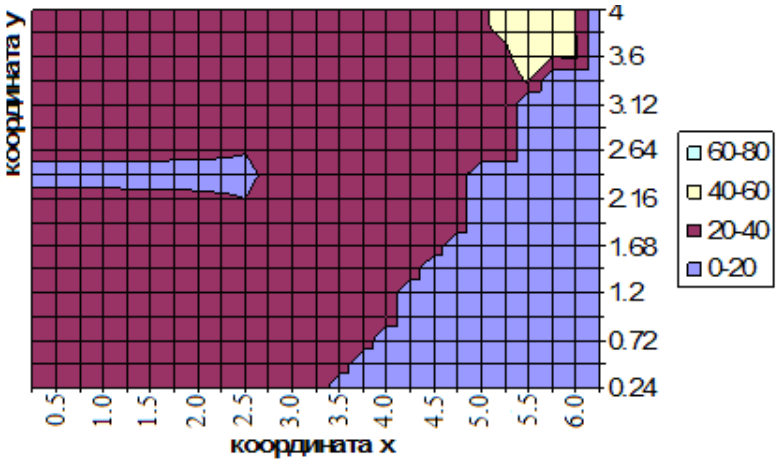

Рис. 6. Поле концентрации метана:
t=10 с, C_{max}=0.4228

Хорошо видно, что с течением времени происходит эффективное очищение воздушной среды горной выработки. Концентрация загрязнения уменьшается как по длине, так и по высоте выработки. На момент времени t=0.5 с в выработке преобладает зона с повышенной концентрацией примеси 80–100 % (рис. 2). Однако при t=2 с такая зона сохраняется только в верхней части тупиковой выработки, так как там возникают застойные зоны (рис. 3). Далее, с течением времени (рис. 4–5), концентрация примеси уменьшается и для моментов времени t=10 с ее значение составляет порядка 20 % (рис. 6). На рис. 7 показана динамика изменения концентрации метана в точках 1 и 2 (рис.1) выработки с течением времени.

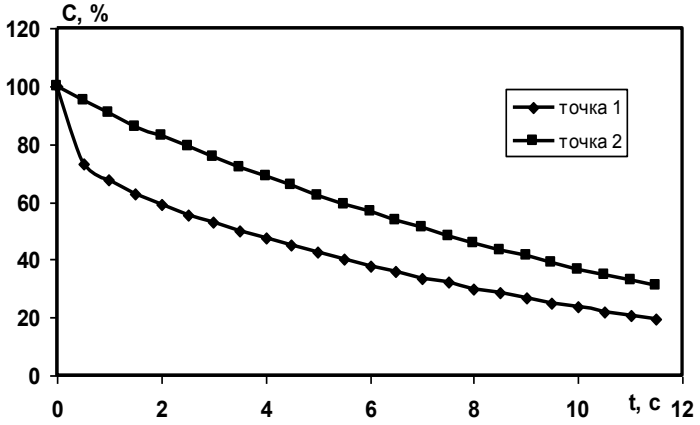

Рис. 7. Изменение концентрации метана с течением времени

Выводы. В работе представлена численная модель для исследования проветривания горной выработки. Практическая реализация модели требует небольших затрат компьютерного времени, порядка 10–12 с. Модель позволяет улучшить качество и оперативность инженерных расчетов с целью поддерживания установленных правилами безопасности параметров рудничной атмосферы.

Библиографические ссылки

1. **Голинько, В.И.** Вентиляция шахт и рудников [Текст] / В.И. Голинько, Я.Я. Лебедев, О.А. Муха. – Д.: НГУ, 2012. – 266 с.

2. **Калабин, Г.В.** Метод расчета аэродинамики камерообразных выработок на основе математического моделирования [Текст] / Г.В. Калабин, А.А. Бакланов, П.В. Амосов // Физико-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. – 1990. – №1. – С.74 –88.

3. **Колесник, В.Е.** Моделирование процесса распространения пыли по длине горной выработки при постоянно действующем источнике [Текст] / В.Е. Колесник // Наук. вісн. НГА України. – 2001. – №2. – С.49–52.

4. **Кременчуцкий, Н.Ф.** Расчет проветривания тупиковых выработок с использованием дифференциальных уравнений [Текст] / Н.Ф. Кременчуцкий, О.А. Муха, Е.В. Столбченко // Наук. вісн. НГУ. – 2011. – №2. – С.136–139.

5. **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

6. **Роуч, П.** Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

7. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.

8. **Aminossadati, S. M.** Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings [Text] /S. M. Aminossadati, K. Hooman // In 12th US/North American Mine Ventilation Symposium, 2008. – P. 253-259.

9. Multiscale modeling of transient flows from fire and ventilation in long tunnels [Text] / F. Colella, G. Rein, V. Verda, R. Borchiellini // Computers Fluids, 2011. – № 51(1). – P. 16-29.

10.A practical use of CFD for ventilation of underground works [Text] / I. Diego et al // Tunneling and Underground Space Technology, 2011. – № 26(1). – P. 189-200.

Надійшла до редколегії 10.06.2015

УДК 539.3

Ю.А. Черняков, А. Є. Шевельова

Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара

СМУГА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ З ЧАСТКОВИМ РОЗРИВОМ НА ІНТЕРФЕЙСІ МІЖ ДВОМА МАТЕРІАЛАМИ

Досліджено смугу локалізації пластичної деформації в області поділу двох матеріалів за умови, що діаграма деформування міжматеріального прошарку має пік-«зуб», а також ділянку зміцнення. Зроблено припущення про наявність розриву в центральній частині смуги локалізації пластичної деформації. Сформульовано крайову задачу Діріхле для кусково-аналітичної функції, виписано її точний аналітичний розв'язок. Знайдено довжини смуг локалізації пластичної деформації, графічно проілюстровано стрибки переміщень у смугах локалізації та дотичного напруження на її продовженні для різних зовнішніх навантажень і різних механічних властивостей матеріалів.

Ключові слова: полоса локалізації пластичної деформації, кусково-аналітична функція,стрибки переміщень.

Исследована полоса локализации пластической деформации в области раздела двух материалов при условии, что диаграмма деформирования межматериальной прослойки имеет пик-«зуб», а также участок упрочнения. Предполагалось наличие трещины в центральной части полосы локализации пластической деформации. Сформулирована краевая задача Дирихле для кусочно-аналитической функции и записано ее точное аналитическое решение. Найдены длины полос локализации пластической деформации, приведена графическая иллюстрация скачка перемещений в полосе локализации и касательного напряжения на ее продолжении для различных внешних нагрузок и различных механических свойств материалов.

Ключевые слова: полоса локализации пластической деформации, кусочно-аналитическая функция, скачки перемещений.

A localization strip of plastic deformation between two materials assuming that the graph of intermaterial deformation has a peak-«tooth» and hardening part is investigated. A crack in the central part of the strip of plastic strain localization is assumed. Dirichlet problem for a piecewise-analytic function is formulated and solved exactly. The numerical results of the length of localization strip of plastic deformation, shear displacement jumps and shear stress for various external loads and mechanical properties of materials are presented.

Keywords: localization strip of plastic deformation, piecewise-analytic function, shear displacement jumps.

Вступ. Зазвичай пластична деформація тіл супроводжується розвитком ліній ковзання. За умови незначної зміни величини напружень в однорідному тілі лінії ковзання рівномірно розподіляються за його об'ємом. У разі ж неоднорідного поля

© Ю. А. Черняков, А. Є. Шевельова, 2015