

УДК 697.31

**В. Н. ПОДКОПАЙ**, аспірантка НТУ «ХПІ»;

**А. Н. ГАНЖА**, д-р техн. наук, проф.; проф. НТУ «ХПІ»;

**Н. А. МАРЧЕНКО**, канд. техн. наук., доц.; доц. НТУ «ХПІ»

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФАКТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ ПОВРЕЖДЕННУЮ ИЗОЛЯЦИЮ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОТРАСС**

В статье рассматриваются проблемы качественного теплоснабжения жилых массивов от централизованных источников энергии. Для обеспечения необходимым количеством тепловой энергии потребителей, нужно компенсировать потери тепла, которые возникают при передаче. Разработаны математические модели и методика определения фактических потерь тепловой энергии через поверхность изоляционного материала трубопроводов с учетом его повреждения в процессе эксплуатации и режимов работы тепловой сети. Адекватность модели подтверждается аналитически. С помощью данной методики можно оценивать и прогнозировать тепловые потери в теплосети, а также эффективность теплоснабжения и потенциал энергосбережения.

**Ключевые слова:** математическая модель, тепловая сеть, тепловые потери, коэффициент теплопроводности, температурное поле.

### **Введение**

В настоящее время теплоснабжение жилых массивов многих городов Украины является централизованным и осуществляется от источников тепловой энергии, оборудованных водогрейными и паровыми котлами. Зачастую котельные расположены на значительном расстоянии от массивов и потребителей, а тепловые сети от них имеют значительный износ. Несмотря на то, что в последнее время принимаются меры по замене трубопроводов или их изоляции, современное состояние многих трубопроводов, как правило, неудовлетворительное, что обуславливает значительные потери теплоты в окружающую среду при передаче её к конечным потребителям. Вследствие этого многие потребители недополучают тепловую энергию и в итоге – некоторые из них отказываются от централизованного теплоснабжения, что уменьшает потребность в поставке тепловой энергии и увеличивает долю её потерь.

Для того чтобы компенсировать потери теплоты дополнительной её выработкой на источниках (в целях обеспечения необходимым количеством теплоты потребителей) нужно знать долю тепловых потерь в теплотрассах с учетом текущих параметров окружающей среды и фактического состояния трубопроводов.

### **Анализ основных достижений и литературы**

На практике определение, как нормируемых, так и фактических потерь теплоты через изоляцию трубопроводов теплотрасс представляет собой большую проблему, как для эксплуатирующих организаций, так и для энергоаудиторов. Легко решается эта проблема, если установлены приборы учета тепловой энергии – отпуска на источнике и у всех потребителей. Разница между этими показаниями и покажет величину фактических тепловых потерь.

Однако приборы учета отпуска тепловой энергии на котельных есть не везде и не все потребители охвачены приборами учета. Потребление тепловой энергии в этом случае рассчитывается по проектным тепловым нагрузкам зданий. Потери тепловой энергии рассчитываются с помощью методики [1], где учитываются коэффициенты к нормативным потерям в результате проведенных испытаний. Испытания проводятся на

© В.Н. Подкопай, А.Н. Ганжа, Н.А. Марченко, 2014

определенном участке тепловой сети, выведенном из работы, и распространяются на всю сеть. В итоге полученные данные не показывают реальной картины тепловых потерь. Для подземных участков теплотрасс часто используется метод определения потерь путем измерения температуры поверхности неизолированных трубопроводов в тепловых камерах (колодцах). Однако, падение температуры соизмеримо с погрешностью приборов и, зачастую, бывает практически невозможно точно установить расход теплоносителя на участке.

В последнее время появились работы, где используется математическое моделирование тепловых потерь трубопроводами с учетом фактического состояния изоляции [2 и др.]. Однако они, как правило, охватывают частные случаи повреждения в поперечном разрезе и не рассматривают распределение разных видов повреждений по длине трубопровода. Все эти факторы приводят к неадекватному определению потерь в тепловых сетях.

#### **Цель исследования, постановка задачи**

Разработка методов и средств оценки фактических потерь тепловой энергии через изоляцию трубопроводов теплотрасс с учетом её состояния, что есть актуальной задачей в энергосбережении.

#### **Материалы исследования**

Для решения поставленной задачи разработана математическая модель определения поправок или коэффициентов увеличения нормативного теплового потока с 1 м длины трубы, а также – эквивалентных коэффициентов увеличения теплопроводности изоляции с учетом её фактического состояния. Фактическое состояние тепловой изоляции может быть определено по результатам энергетического аудита с помощью термографической съемки по температурному полю поверхности изоляции (см. пример на рис. 1а).

В модели используются фактические параметры окружающего воздуха (температура, скорость ветра). При подземной прокладке трубопроводов производится расчет температуры окружающего воздуха в канале с учетом характеристик канала и температуры грунта.

Теплотрасса обычно состоит из множества характерных участков. Падение температуры теплоносителя на участке трубопровода будет определяться так

$$t_{Ti} = t_{Oi} + (t_{Ti-1} - t_{Oi}) e^{-\frac{K_i l_i}{G_i c_i}}, \quad (1)$$

где  $t_{Ti}$  и  $t_{Ti-1}$  – температуры теплоносителя на выходе из текущего участка и на выходе из предыдущего участка;  $t_{Oi}$  – температура окружающего воздуха на текущем участке;  $G_i$  и  $c_i$  – расход и теплоемкость теплоносителя на участке;  $l_i$  – длина участка;  $K_i$  – линейный коэффициент теплопередачи на участке с учетом фактического состояния изоляции (коэффициента к исходной теплопроводности изоляции  $K_\lambda$ ).

Наибольшую трудность представляет определение коэффициента  $K_\lambda$ . Для его определения, кроме дорогостоящих испытаний выведенных из работы теплотрасс по методике из [1], можно воспользоваться еще двумя расчетно-экспериментальными способами:

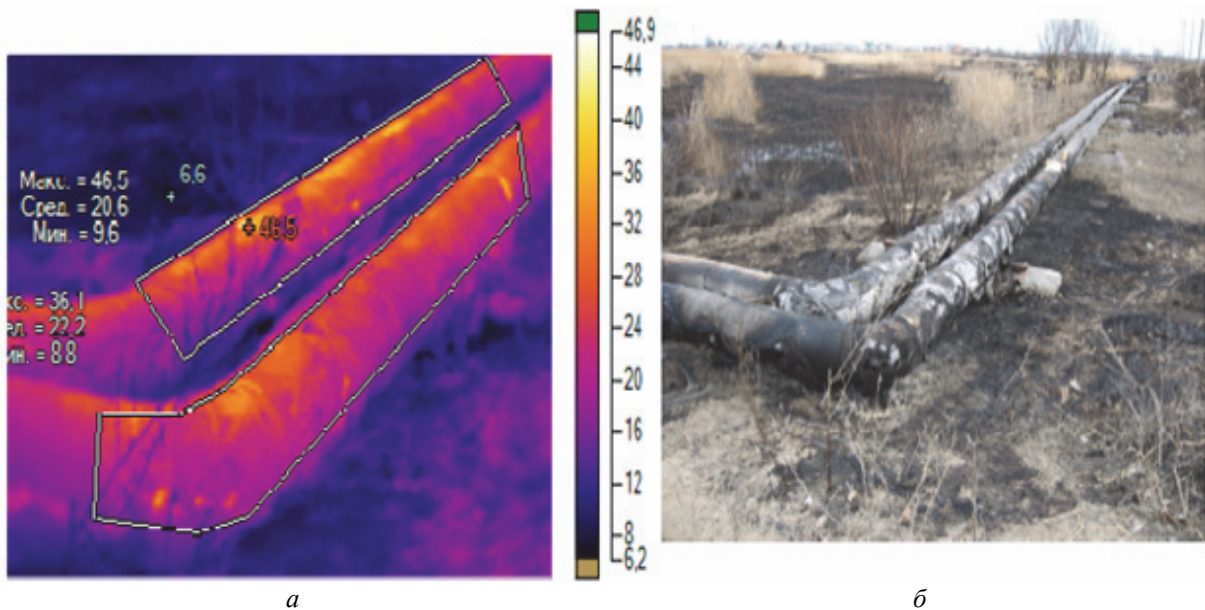


Рис. 1 – Термограма участка трубопроводов теплотрассы *а* и фактическое состояние изоляции *б*

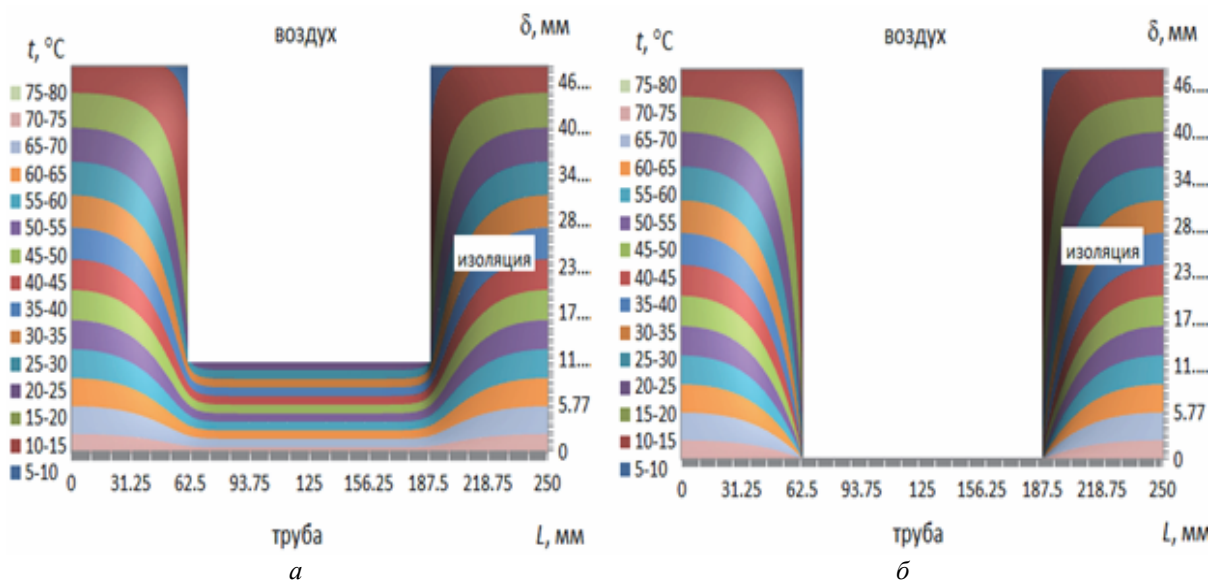


Рис. 2 – Пример поля температур слоя изоляции в разрезе поврежденного участка:  
*а* – относительная глубина повреждения  $\beta = 0,75$ ; *б* – поврежден весь слой изоляции ( $\beta = 1$ )

1) Обследование (энергетический аудит) трубопроводов во время их работы с проведением измерений и тепловизионной съемки (см. пример на рис. 1*а*). В этом случае кроме коэффициентов теплоотдачи необходима среднеинтегральная температура поверхности изоляции  $t_{\text{пов}}^{\text{ср}}$  трубопровода и интегральная величина самой поверхности трубопровода  $F_{\text{пов}}$ . Тогда средний коэффициент теплопередачи на участке будет

$$K_l = \frac{\alpha_n F_{\text{пов}} (t_{\text{пов}}^{\text{ср}} - t_o)}{l(t_T - t_o)}, \quad (2)$$

где  $t_T$  и  $t_o$  – средние температуры теплоносителя (воды) внутри трубы и окружающей среды (воздуха) снаружи (для подземной канальной прокладки – температура воздуха в

канале);  $\alpha_H$  – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции;  $l$  – длина участка.

Искомый коэффициент  $K_\lambda$  выражается из формулы для  $K_l$ .

2) Расчеты температурного состояния слоя изоляции. В этом случае решается задача нахождения поля температур в слое и на поверхности участка трубы с поврежденной изоляцией решением дифференциального уравнения теплопроводности [3]: двумерного

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

или трехмерного

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия для этих уравнений (после введения замены  $\vartheta = t - t_0$ ): 3 рода внутри трубы и на поверхности изоляции, а также – 2 рода на границе участка. Из них только граничное условие теплообмена внутри трубы является неоднородным, а все остальные – однородными. Для двумерного случая (3) граничные условия будут:

а) снаружи трубы на слое изоляции ( $r = r_2$ )

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \alpha_H \vartheta = 0; \quad (5)$$

б) снаружи трубы на углублении слоя поврежденной изоляции или оголенной трубе ( $r = r_c$ )

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} - \alpha_c \vartheta = 0; \quad (6)$$

в) снаружи трубы на боковом срезе поврежденной изоляции ( $x = 0$ )

$$\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} - \alpha_6 \vartheta = 0; \quad (7)$$

г) внутри трубы с учетом термического сопротивления стенки трубы ( $r = r_1$ )

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} + \alpha_B \vartheta = \alpha_B (t_T - t_0); \quad (8)$$

д) внутри слоя изоляции на границе участка ( $x = L_T$ )

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

где  $\alpha_{\delta}$ ,  $\alpha_c$  и  $\alpha_B$  – коэффициенты теплоотдачи к воздуху на боковом срезе, на углублении слоя поврежденной изоляции и от воды внутри трубы.

Примеры двумерного поля температур (уравнение (3)) слоя изоляции трубы  $\varnothing 630$  мм в продольном разрезе поврежденного участка при относительной глубине повреждения  $\beta = 0,75$  и  $\beta = 1,0$  от толщины слоя  $\delta$  приведен на рис. 2. Длина повреждения составляет половину длины участка. Для решения этой задачи нами был использован итерационный конечно-разностный метод переменных направлений в комбинации с методом простой неявной прогонки из [3].

Аналогичное решение для двумерного случая с повреждением всей толщины слоя изоляции (см. рис. 2б) при граничных условиях, см. формулы (5)–(8), мы получили аналитическим методом решения дифференциального уравнения (3). Общее решение является суммой частных решений [4] уравнения (3) с весовыми коэффициентами

$$v = \sum_{k=1}^n a_k \cdot v_k; \quad v_k = \left( c_k I_0 \left( \frac{k\pi}{l} r \right) + K_0 \left( \frac{k\pi}{l} r \right) \right) \left( \sin \left( \frac{k\pi}{l} x \right) + b_k \cos \left( \frac{k\pi}{l} x \right) \right), \quad (10)$$

где  $k$  – текущий индекс (целое положительное число);  $n$  – количество частных решений (т.е. членов бесконечного ряда, что определяется сходимостью);  $a_k$  – весовой коэффициент решения;  $b_k$  и  $c_k$  – коэффициенты, которые получаются из граничных условий теплообмена снаружи трубы;  $I_0$  и  $K_0$  – модифицированные функции Бесселя и Ганкеля первого рода (т.е. от мнимого аргумента) нулевого порядка;  $l$  – длина участка разложения решения.

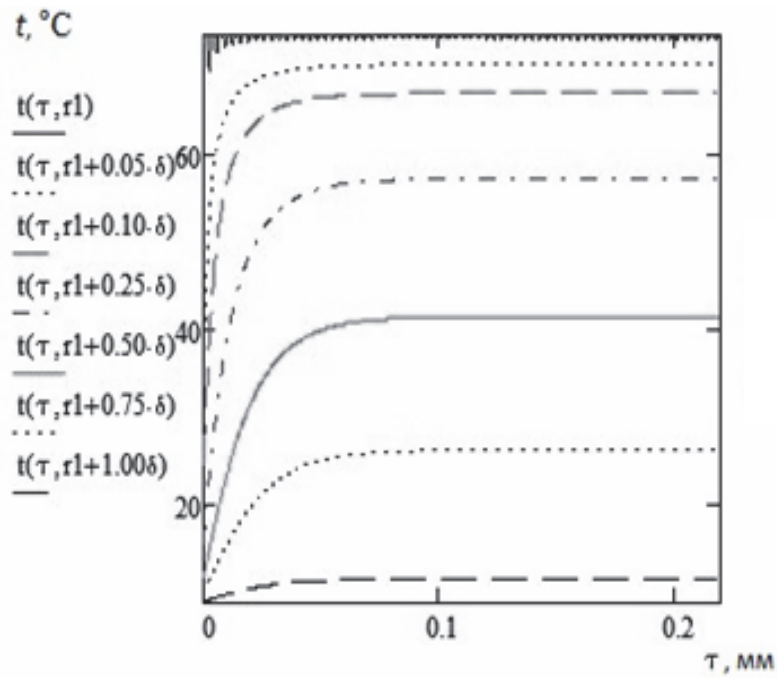
Нами установлено, что решение (10) будет ортогональным относительно неоднородного граничного условия внутри трубы (8), если его правая часть  $\alpha_B(t_T - t_0)$  представляет собой константу или экспоненциальную зависимость от координаты  $x$ , что будет соответствовать физике и условиям процесса. Таким образом, предложено, что весовые коэффициенты  $a_k$  будут находиться из граничного условия (8), при представлении его правой части в виде

$$\alpha_B(t_T - t_0) = \psi(x) + \frac{k\pi}{l} \frac{\lambda}{\alpha_H} \frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (11)$$

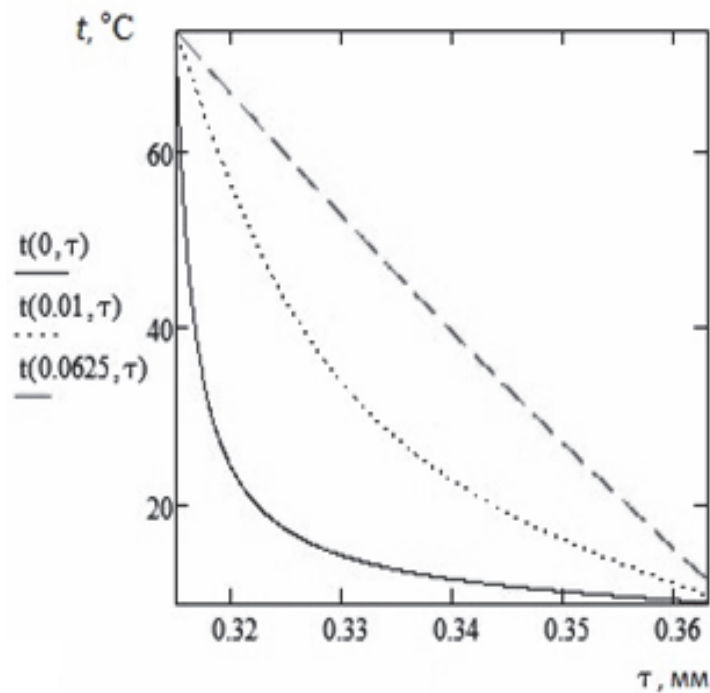
Далее вспомогательная функция  $\psi(x)$ , которая является решением уравнения (11), раскладывается в ряд Фурье по синусам на длине  $l$ . В итоге с учетом (11) коэффициенты  $b_k$  будут удовлетворять условиям (7) и (8). Ввод параметра длины разложения  $l$  позволяет уйти от граничных условий (9) и определить зону влияния повреждения на длине участка трубы  $L_T$ . Параметр  $l$  в этом случае находится из условия сопряжения граничных условий (6)–(8) в точке соединения боковой поверхности повреждения и оголенного участка трубы.

#### **Результаты исследования**

Проведенные расчетные исследования с помощью системы *MathCAD* показали, что ряд (10) сходится к общему решению. Пример распределения температуры внутри слоя изоляции для случая из рис. 2б и аналитического решения (10) при числе членов ряда  $n = 270$  представлен на рис. 3.



*a*



*б*

Рис. 3 – Пример поля температур слоя изоляции в разрезе поврежденного участка  
*a* – по длине трубы на различных радиусах; *б* – по радиусу на различной длине

Сделано сравнение результатов аналитического решения по уравнению (10) (рис. 3) и дискретного решения (рис. 2б). Поле температур практически совпадает, линейная плотность теплового потока составила 334,370 и 334,194 Вт/(м·°С) соответственно. Расхождение составило всего 0,05 %, что говорит о практическом совпадении результатов и их адекватности. Линейная плотность теплового потока оказалась выше нормативной в 2,255 раза. Коэффициент увеличения теплопроводности

ізоляції  $K_\lambda$  склав 2,391; для оголеного участка – 20,123; загальний для пошкодження на рис. 2б – 11,257.

Дослідження були проведені для інших типорозмірів труб, інших параметрів в граничних умовах (внутрішніх і зовнішніх), іншого характеру пошкодження ізоляції.

Встановлено, що для найбільш характерного випадку (т.е. повного пошкодження товщини шару ізоляції, см. рис. 2б) при стандартних товщинах ізоляції з мінеральної вати зона впливу пошкодження на довжину участка труби  $L_T$  склала 0,2 м в дві сторони від бокових поверхностей пошкодження при товщині ізоляції 40 мм і 0,32 м при товщині ізоляції 60 мм, незалежно від діаметра труби. Цей факт дозволяє визначити межі пошкодженого участка на трубі і його впливу.

### **Висновки**

1) В результаті для кожного діаметра труб нами створено список (база даних) характерних пошкоджень і їх характеристик (т.е. коефіцієнтів  $K_\lambda$ ). При проведенні обстеження теплотраси енергоаудитори, виявляють характер пошкодження ізоляції на кожному участку. Далі, використовуючи коефіцієнти  $K_\lambda$ , розраховується падіння температури теплоносія на кожному участку і на теплотрасі в цілому за рівнянням (1). Потім визначається загальний тепловий потік, переданий в оточуюче середовище при транспортуванні теплоносія по теплотрасі (т.е. фактичні теплові втрати і їх частка).

2) Розроблені методи і засоби, що дозволяють визначати фактичні теплові втрати через ізоляцію трубопроводів при передачі теплоносія по теплотрасі від джерела генерації теплової енергії до споживача. Математичні моделі і методики враховують фактичний стан ізоляції в час експлуатації трубопроводів. З їх допомогою можна оцінювати теплові втрати, а також прогнозувати їх, оцінювати ефективність систем теплоснабження і потенціал енергозбереження.

**Список літератури:** 1. Методичні вказівки по визначенню теплових втрат в водяних і парових теплових мережах: РД 34.09.255 (МУ 34-70-080-84). – М.: Союзтехенерго, 1985. – 72 с. 2. Половников, В. Ю. Чисельний аналіз теплових втрат теплопроводів в умовах деформації і порушення цілостності шару теплової ізоляції [Текст] / В. Ю. Половников, Ю. Н. Рахімова // Теплофізичні основи енергетических технологій: сб. науч. тр. II Всеросійська науч.-практ. конф. з міжнародним участком, Томск, 06 – 08 жовтня 2011 г. – Томск: Національний дослідницький Томський політехнічний університет, 2011. – С. 296–300. 3. Самарський, А. А. Теорія різностійких схем [Текст] / А. А. Самарський. – М.: Наука, 1989. – 616 с. 4. Корн, Г. Справочник по математиці [Текст] / Г. Корн, Т. Корн; під заг. ред. І. Г. Арамановича. – М.: Наука, 1978. – 832 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. RD 34.09.255 (MU 34-70-080-84) Metodicheskie ukazaniya po opredeleniju teplovyh poter' v vodjanyh i parovyh teplovyh setjah. Moscow: Sojzutehenergo, 1985. Print. 2. Polovnikov, V. Ju., and Ju. N. Rahimova. "Chislennyj analiz teplovyh poter' teploprovodov v uslovijah deformacii i narushenija celostnosti sloja teplovoj izoljacii." *Teplofizicheskie osnovy jenergeticheskikh tehnologij: sb. nauch. tr. II Vserossijskaja nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem, Tomsk, 06 – 08 oktjabrja 2011 g.* Tomsk: Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehnicheskij universitet, 2011. 296–300. Print. 3. Samarskij, A. A. *Teorija raznostnyh shem.* Moscow: Nauka, 1989. Print. 4. Korn, G., and T. Korn. *Spravochnik po matematike.* Ed. I. G. Aramanovicha. Moscow: Nauka, 1978. Print.

*Поступила (received) 12.02.2014*