

8. **Hau E.** Wind turbines / E. Hau // Fundamentals, Technologies, Application, Economics. 2nd edition Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, 2006.
9. **Tong W.** Wind power generation and Wind Turbine design / W. Tong.– Boston: WIT press, 2010.
10. **Sanderson R.J.** Optimum propeller Wind turbines / R.J. Sanderson R.J., R.D Archer // J. Energy. – 1983, Vol.7, №6. – P. 695 – 701.
11. **Stewart H.J.** Dual optimum aerodynamic design for a conventional windmill / H.J. Stewart// AIAA J. – 1976, 14. – P. 1524 – 1527.
12. **Vermeer Ir.M.P.** Some Aspects of Optimising the Integration of Wind Farms into the Electricity Grid/ Ir.M.P Vermeer// Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1988. – 27. – P. 247 – 261.
13. **Westberg S.** A strategy for optimization of wind energy systems/ S. Westberg // Wind Eng. – 1983, Vol. 7, №7. – P. 104 – 114.
14. **Wilson R.E.** Performance-optimized Horizontal Axis Wind Turbines/ R.E.Wilson, S.N.Walker // Proc. Int. Symp. on Wind Energy Syst., Cambridge, 7 – 9 sept. – 1976.– P. B1 – B29.
15. **Wijnen M.** Multi-point optimization of wind turbine blades using helicoidal vortex model / M. Wijnen, J. Chattot// Springer-Verlag, Proceedings Sixth International Conference on Computational Fluid Dynamics, July 12-16, 2010, St. Petersburg, Russia.
16. **Paraschivoiu Ion.** Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept / Ion Paraschivoiu //Polytechnic International Press, Canada, 2002. – 442pp.
17. **Spera D.A.** Wind Turbine Technology / D.A. Spera// ASME Press, New York, 1994.
18. Справочник по климату СССР. Выпуск 10. Украинская ССР. Часть 3. Ветер Ленинград: Гидрометеиздат, 1967.– 695с.
19. **Поморцев М.С.** О законе распределения скорости ветра / М.С. Поморцев // Записки по гидрографии.– С-П, 1894.– Т. 15.

Надійшла до редколегії 16.05.2014

УДК 614.84

В.В. Беляева

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОНАГРЕВАНИЯ НАСЫПИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Представлена численная модель для моделирования процесса самонагревания насыпи растительного сырья. Модель основана на использовании уравнения теплопроводности. Для численного интегрирования используется неявная разностная схема. Представлены результаты вычислительного эксперимента, проведенного на базе разработанной модели.

Ключевые слова: математическое моделирование, самовозгорание зерна, тепловой процесс.

Наведено числову модель для моделювання процесу самонагрівання насипу рослинної сировини. Модель заснована на використанні рівняння теплопровідності. Для чисельного інтегрування використовується неявна різницева схема. Представлені результати обчислювального експерименту, проведеного на базі розробленої моделі.

Ключові слова: математичне моделювання, самозаймання зерна, тепловий процес.

A numerical model to simulate the heat transfer in the grain heap heating was developed. This model is based on the 2-D equation of the heat transfer. The implicit scheme is used for the numerical simulation. The results of the numerical experiment are presented.

Key words: mathematical simulations, grain self-firing, heat transfer process.

© Беляева В.В., 2014

Постановка проблеми и анализ публикаций. В настоящее время Украина занимает шестое место в мире по экспорту зерновых культур. Производство зерна требует решение вопроса обеспечения надежного хранения урожая. Хранение, как зерновых культур, так и другого растительного сырья имеет ряд особенностей [1; 2; 5; 6]. Так, одной из важных проблем при хранении растительного сырья является прогноз возможного его самонагревания и возгорания. Как известно, самонагревание растительного сырья связано с жизнедеятельностью микроорганизмов, которые находятся в нем. При выделении тепла в определенной зоне зерновой массы может возникнуть очаг самонагревания и с течением времени он может превратиться в очаг пожара. Поэтому крайне важно прогнозировать процессы самонагревания в растительной массе в целях предупреждения ее возгорания. Прогнозом необходимо установить время, когда температура внутри насыпи достигнет критического уровня, например значения порядка 120°C , что создаст потенциальную опасность возникновения пожара.

Необходимо отметить, что теоретическое решение такой задачи является достаточно сложным, поскольку на процесс самонагревания влияют микробиологические процессы, воздушный и тепловой режимы в хранилище, влагосодержание в растительном сырье и т.д. Как правило, для решения данной прогнозной задачи широко прибегают к аналитическим методам расчета [4], которые позволяют с достаточной для практики точностью получить решение поставленной задачи с учетом определенных допущений. Однако аналитические методы базируются на решении одномерного уравнения теплопроводности, что не позволяет, например, учитывать при прогнозе геометрическую форму насыпи растительного сырья. Поэтому целью наших исследований является разработка численной модели процесса самонагревания насыпи растительного сырья, позволяющей учесть геометрическую форму насыпи и наличие очага нагревания в любом месте этой насыпи.

Математическая модель. Для нахождения температурного поля внутри насыпи растительного сырья при наличии очага нагревания (возникшего в результате действия микроорганизмов) используем уравнение теплопроводности [4;5]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N \frac{q_i(t)}{\rho c} \delta(r-r_i),$$

где T – температура; t – время; μ_x, μ_y – коэффициенты температуропроводности; ρ – плотность; c – коэффициент теплоемкости; q – интенсивность выделения тепла в результате действия микроорганизмов в точке с координатами $r_i=(x_i, y_i)$.

Формирование вида расчетной области и краевые условия. Как правило, насыпь растительного сырья имеет сложную геометрическую форму. Для математического моделирования процесса нагревания насыпи растительного сырья используем метод маркирования. Это значит, что в расчетной области, которая имеет форму прямоугольника, с помощью маркеров выделяем ту область, которая соответствует месту расположения сырья. Поэтому граничные условия ставим там, где маркеры определяют нахождение границы насыпи сырья. Так, на границе «насыпь – окружающий воздух» ставим граничное условие 1-го рода, т.е. задаем температуру T_0 , которая поддерживается в хранилище. На нижней границе – пол хранилища – ставим условие теплоизоляции. В качестве начального условия принимаем, что сырье в насыпи, для момента времени $t = 0$, имеет начальную температуру $T=T_0$.

Метод решения. Рассмотрим разностную схему для численного интегрирования моделирующего уравнения. Для численного интегрирования будем использовать равномерную прямоугольную сетку. Производную по времени аппроксимируем так:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Вторые производные представим следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial T}{\partial x}) \approx \mu_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial T}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1}.$$

Здесь $M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$ – обозначения разностных операторов. С учетом этих обозначений разностный аналог моделирующего уравнения примет вид

$$\frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} = (M_{xx}^+ T^{n+1} + M_{xx}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1} + M_{yy}^- T^{n+1}) + \bar{q}_l \delta_{ij},$$

где $\bar{q}_l = \frac{q_l}{\rho \cdot c}$. Символ δ_{ij} означает число "1" или "0", в зависимости от того, находится или нет в разностной ячейке источник нагревания.

Данное разностное уравнение расщепляется на четыре шага. Разностные уравнения на каждом шаге расщепления записываем так [3]:

на первом шаге $k = n + \frac{1}{2}$:

$$\frac{T_{ij}^k - T_{ij}^n}{\Delta t} = (M_{xx}^+ T^k + M_{yy}^+ T^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{2} \delta_l;$$

на втором шаге расщепления $k = n + 1; c = n + \frac{1}{2}$:

$$\frac{T_{ij}^k - T_{ij}^c}{\Delta t} = (M_{xx}^- T^k + M_{yy}^- T^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{2} \delta_l.$$

Неизвестное значение температуры на каждом шаге расщепления находим по явной формуле бегущего счета. Это позволяет построить эффективный алгоритм расчета поля температуры в области, имеющей сложную геометрическую форму.

Практическая реализация модели. Разработанная численная модель была использована для расчета поля температуры внутри насыпи растительного сырья (рис.1) при следующих исходных данных: длина насыпи 24м, максимальная высота – 6.4м; $\mu_x = \mu_y = 0.12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $\rho \cdot c = 8 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3/\text{К}$; $q = 280 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^3$; $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

На рис.1 – 3 показано поле температуры внутри насыпи растительного сырья для различных моментов времени при наличии одного очага самовозгорания, а на рис.4 – для двух очагов возгорания внутри насыпи.

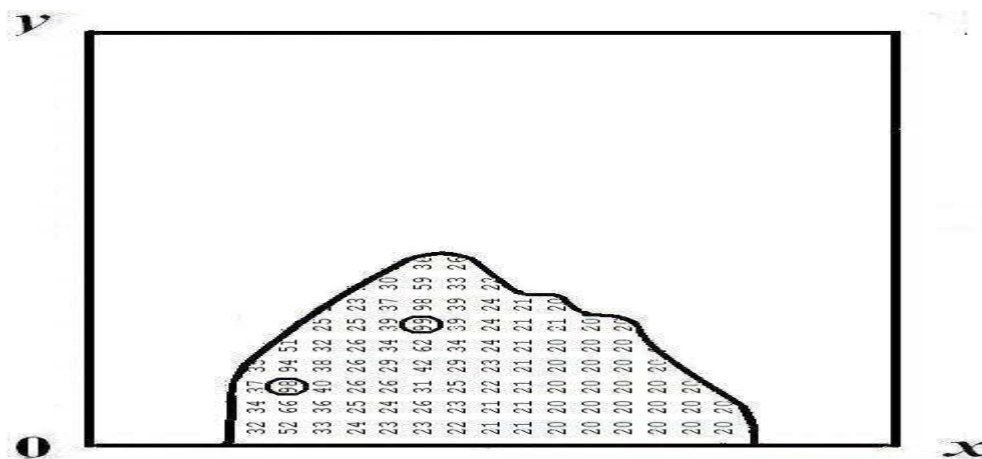


Рис.4. Поле температуры внутри насыпи растительного сырья, $t=1.04$ сут
($T_{\max}=940^{\circ}\text{C}$, два очага возгорания)

Как видим, формирование области нагревания внутри насыпи происходит в виде «гнездового очага», т.е. интенсивное повышение температуры происходит локально – в зоне радиусом приблизительно 1м, прилегающей к колонии микроорганизмов. Повышение температуры до критической величины 120°C происходит к моменту времени приблизительно 6 -7сут. Таким образом, этот момент времени определяет возможное начало пожара в хранилище.

Выводы. В работе построена эффективная численная модель процесса самонагрева растительного сырья, складированного в виде насыпи. Для математического моделирования распределения температуры внутри насыпи при наличии очага нагревания следует использовать двухмерное уравнение теплопроводности. Использование разработанной модели позволяет определить динамику формирования поля температуры внутри насыпи растительного сырья и прогнозировать время возникновения пожара в хранилище. Дальнейшую разработку этой тематики необходимо проводить в направлении создания трехмерной модели процесса самонагрева растительного сырья.

Библиографические ссылки

1. **Брушлинский Н. Н.** Моделирование пожаров и взрывов / Н. Н. Брушлинский, А. Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2000. – 482 с.
2. **Вогман Л. П.** Пожарная безопасность элеваторов / Л. П. Вогман, В. И. Горшков, А. Г. Дегтярев. – М.: Стройиздат, 1993. – 298 с.
3. **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.
4. **Лыков А. В.** Теория сушки / А. В. Лыков – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
5. **Семенов Л. И.** Взрывобезопасность элеваторов, мукомольных и комбикормовых заводов / Л.И. Семенов, Л.А. Теслер. – М. ВО «Агропромиздат», 1991. – 367 с.
6. **Трисвяцкий В. С.** Хранение зерна / В. С. Трисвяцкий. – М.: Агропромиздат, 1986. – 351 с.

Надійшла до редколегії 20.04.2014