

ТЕПЛОТЕХНІКА ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 536.24

Капустин Е.А.¹, Берестовой И.О.²

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЗАТРАТ РАЗОГРЕВА – ОХЛАЖДЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА

В статье предложен аналитический метод оценки затрат энергии и времени на нагрев твердого тела на основе замены нестационарного процесса разогрева – охлаждения стационарным.

Ключевые слова: энергозатраты, стационарный процесс, тепловой поток, теплообмен, нагрев.

Капустин Е.О., Берестовой И.О. Метод оцінки енерговитрат розігріву - охолодження твердого тіла. У статті запропонований аналітичний метод оцінки витрат енергії й часу на нагрів твердого тіла на основі заміни нестационарного процесу розігріву - охолодження стаціонарним.

Ключові слова: енерговитрати, стаціонарний процес, тепловий потік, теплообмін, нагрів.

E.A. Kapustin, I.O. Berestovoi. Method of the estimation expenses to energy on the heating - cooling the solid subject. In the article is offered an analytical method of energy and time expenses for the solid body heating estimation based on the heating-cooling process from not-stationary to stationary changing.

Keywords: energy expenses, stationary process, heat flux, heat transfer, heating.

Постановка проблемы. В современных условиях оценки технологий изготовления конкурентоспособной продукции являются не только востребованность продукта на рынке; надежность оборудования и экологичность производства, но и реализация энерго-ресурсосбережения. При этом учитывается использование конструктивных и технологических особенностей аппаратов, обеспечивающих оптимальные условия протекания производственных процессов.

Анализ последних исследований и публикаций. В отечественной практике на стадии проектирования оборудования, а также в процессе его эксплуатации применяют оценочные расчетные методики, обеспечивающие адекватность к моделируемым процессам. Эти методы используются и при решении задач оптимизации конструктивных и технологических параметров.

При этом принципиальную важность приобретает не только качество, надежность и достоверность в реализации полученных результатов используемых методов, но также затраты времени и ресурсов на их реализацию. Это вызвано тем, что при оценке нестационарных процессов разогрева – охлаждения используются дополнительные подручные средства, например: таблицы, номограммы, персональные вычислительные электронные машины (ПВЭМ) и т.п.

В самом общем случае пространственное нестационарное температурное поле может быть описано дифференциальным уравнением Фурье – Кирхгофа [1].

Без учета переноса тепла диффузионной теплопроводностью, которым обычно пренебрегают вследствие его малости по сравнению с другими составляющими, уравнение имеет вид:

$$C_p \rho \frac{dt}{d\tau} = \text{div}(\lambda \nabla t) + Q_v + \frac{dp}{d\tau} + S_v, \quad (1)$$

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

где C_p - удельная теплоемкость, Дж/(кг К);
 ρ - плотность кг/м³;
 t - определяемая температура, как функция пространственных координат и времени τ , °С;
 $\frac{dt}{d\tau}$ - полная производная температуры, в декартовой системе координат:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial t}{\partial x} + v_y \frac{\partial t}{\partial y} + v_z \frac{\partial t}{\partial z}, \text{ } ^\circ\text{C/сек}; \quad (2)$$

λ - коэффициент теплопроводности Вт/(м К);
 $div(\lambda \nabla t)$ - перенос тепла теплопроводностью, в декартовых координатах:

$$div(\lambda \nabla t) = \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \frac{\partial t}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \text{ Вт/м}^3; \quad (3)$$

Q_V - суммарная удельная мощность объемных источников тепла, Вт/м³;

$\frac{dP}{d\tau}$ - удельная работа сил давления, Вт/м³;

S_V - суммарная удельная работа внешних сил в процессе диффузионного переноса Вт/м³.

Это уравнение описывает температурное поле на основе фундаментальных законов переноса тепла в пространстве с учетом всех тепловых эффектов, которые встречаются при эксплуатации промышленного производственного оборудования.

Очевидно, что решение уравнения (1) для любого процесса сопряжено с рядом трудностей как в выборе условий однозначности, так и выборе метода решения.

Существующие методы решения одномерных уравнений теплопроводности условно можно разделить на две группы: аналитические и численные.

Аналитические – методы, которые дают решение в виде уравнений, что позволяет выявить влияние отдельных факторов на развитие процесса. Но они могут быть реализованы лишь для тел простой геометрической формы (пластина, шар, цилиндр и т.п.) и для линейных уравнений, т.е. таких, в которых определяемые функции и их производные содержатся только в первой степени. При этом многие нелинейные задачи могут быть сведены к линейным и тогда к ним можно применять методы решения линейных уравнений. В настоящее время разработаны следующие аналитические методы решения уравнения теплопроводности: метод разделенных переменных (метод Фурье) [2], метод интегральных преобразований в бесконечных пределах [3], метод замены «массивного» тела «тонким» и т.д.

Численные – методы, в которых, в отличие от аналитических, модель сплошной среды заменяют дискретной. При использовании дискретных моделей среды и процесса решение получают в дискретном виде, т.е. в виде таблицы значений параметров в узловых точках и т.п. При численных методах недостаточно выявляется влияние отдельных параметров на результат. Численные методы в большинстве случаев позволяют получить решение сложных задач. К данным методам относятся: метод сеток [4] (конечных разностей), метод элементарных балансов и т.п.

Цель статьи – сокращение количества расчетов и используемых в методе подручных средств для решения задачи оценки энергозатрат разогрева – охлаждения твердого тела, на основе аналитического метода замены нестационарного процесса разогрева – охлаждения стационарным, и последующим совместным решением трех уравнений для внешнего, внутреннего и аккумулируемого потоков тепла

Изложение основного материала. Для расчета нестационарной задачи теплопроводности заменим нестационарный процесса разогрева – охлаждения стационарным, и в последующем совместным решением трех уравнений для внешнего, внутреннего и аккумулируемого потоков тепла

Из равенства внешнего и внутреннего потоков, задаваясь одной из температур (условие нагрева), определяем вторую температуру:

$$\frac{\alpha_{\Sigma}}{m} (T_{\bar{n}} - T_2) = \frac{\lambda}{R} (T_2 - T_1), \quad (4)$$

- для сферы

$$T_{cp} = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{k(k + 0,5)}{k^2 + k + 1} \quad (13)$$

На рисунке представлено распределение температуры по толщине. В пластине линейное распределение – линия 1. При установившемся режиме аккумулируется пластиной половина тепла, необходимого для полного перевода ее в состояние T_2 . При установившемся состоянии в цилиндрическом слое распределение температуры соответствует кривой 2. В этом слое при стационарном режиме накапливается больше половины тепла. В сферическом слое аккумулируется еще больше - кривая 3.

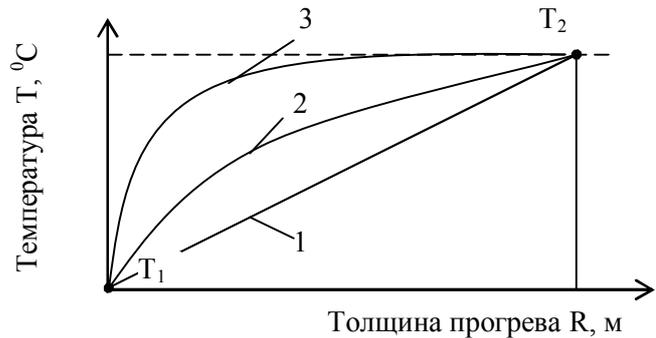


Рисунок – Кривые распределения температуры: 1 – в пластине; 2 – цилиндре; 3 – сфере.

В таблице приведены результаты расчета при граничных условиях третьего рода различными методами для пластины при $\lambda=40$ Вт/(м·К), $a=6 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\alpha=200$ Вт/(м²·К), $T_H=0$ °С, $\delta=0,1$ м, $T_{печи}=1300$ °С.

Таблица

Результаты расчета при граничных условиях третьего рода различными методами

Метод	Фурье*	Метод сеток**	Предлагаемый
T пов., °С	1200	1200	1200
T цен., °С	1174	1177	1158
Время нагрева, ч	2,6	2,35	2,38

* При количестве членов ряда $n=7$.

** При разбиении по толщине на $dx=20$ частей, с шагом во времени $dt=1$ сек.

Из приведенных выше расчетов видно, что результаты, полученные предлагаемым методом, находятся между методом Фурье и методом сеток, отклонения температур незначительны.

В результате сравнения можно утверждать, что предлагаемый метод с достаточной степенью точности пригоден для расчета задач теплопроводности. Отклонение температур, рассчитанных предлагаемым методом, от метода Фурье и метода сеток - незначительно.

Помимо этого, в отличие от метода Фурье и метода сеток, для реализации которых необходимы таблицы корней характеристического уравнения $ctg\mu_m = \frac{\mu_m}{Bi}$ и использование

ПВЭМ, реализация нового метода упрощает расчет времени нагрева – охлаждения твердого тела, что приводит к ускорению реализации энерго- и ресурсосберегающих мероприятий, а также к возможности использования конструктивных особенностей аппаратов, обеспечивающих оптимальные условия протекания технологических процессов.

Выводы

1. Предложенный метод, заключающийся в замене расчета нестационарного процесса разогрева – охлаждения стационарным, позволяет с достаточной степенью точности определить затраты энергии и времени на нагрев твердого тела
2. Реализация нового метода упрощает расчет времени нагрева – охлаждения твердого тела, что приводит к ускорению реализации энерго- и ресурсосберегающих мероприятий, а также к обеспечению оптимальных условий протекания технологических процессов с учетом использования конструктивных особенностей технологических устройств нагрева - охлаждения.

Список использованных источников:

1. Теплообмен: Справочник. / А.В. Лыков: – М.: Энергия. – 1978. – 480 с.
2. Свинолов Н.П. Решение общих задач симметричного и несимметричного нагрева пластины методом разделения переменных Фурье / Н.П. Свинолов. – Днепропетровск: ГМетАУ. – 1997. – 154 с.
3. Карташов Э.М. Метод интегральных преобразований в аналитической теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов // Известия РАН. Энергетика. – 1993. – № 2. – С. 99–127.
4. Дульнев Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов. – М.: высшая шк. – 1990.– 207 с.
5. Капустин Е.А. Среднеинтегральная температура цилиндрических и сферических оболочек при стационарной теплопроводности / Е.А.Капустин, А.Г.Ярмицкий // Вестник ПГТУ. – Вип. 14. – 2004. – С. 29-34.

Рецензент: В. А. Маслов
д-р тех. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 25.03.2011