

турбулизаторов и режимов течения, приведённом в экспериментальном материале [2, 6], показывает, что средняя погрешность расчёта по точными решениям, приведён-

ным в рамках данного исследования, по отношению к эксперименту составляет порядка 5%, в то время как формулы Мигая дают погрешность в среднем более 10%.

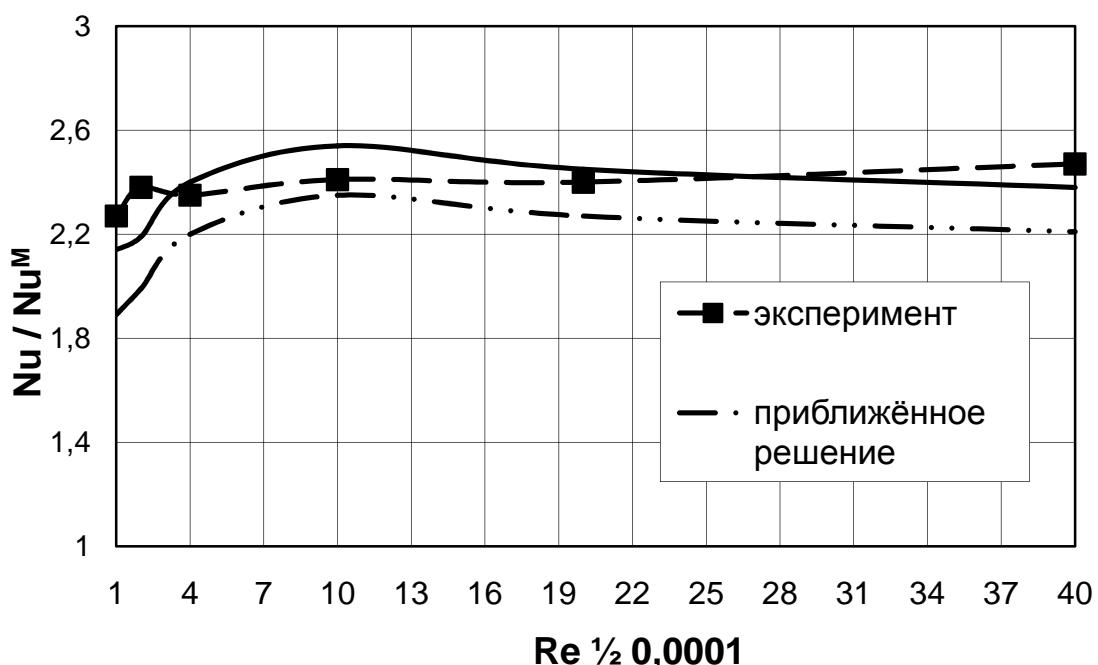


Рис. 2. Сравнение точного и приближённого решений для интенсифицированного теплообмена с экспериментальными данными [2, 6] для труб с турбулизаторами при  $t/D=1$ ,  $d/D=1$ ,  $Pr=0,72$  и в зависимости от числа Рейнольдса

Следовательно, точные решения, полученные в данной работе, гораздо качественнее описывают имеющийся экспериментальный материал, что существующие решения. Применение точных решений можно считать оправданным, несмотря на их относительную сложность.

#### 4. Основные выводы

Резюмируя полученные данные, можно сказать, что в рамках данного исследования были получены точные решения задачи об интенсифицированном теплообмене для четырёхслойной схемы турбулентного пограничного слоя. Существующие реше-

ния могут быть охарактеризованы как частный случай этих точных решений; точные решения являются более сложными по отношению к существующим решениям. Расчётные данные по теплообмену, полученные с применением точных решений, хорошо соответствуют экспериментальным данным и имеют гораздо меньшую погрешность по отношению к последним, чем существующие решения.

#### Список литературы

1. Дрейцер Г.А., Лобанов И.Е. Моделирование изотермического теплообмена при турбулентном течении в каналах в условиях ин-

- тенсификации теплообмена // Теплоэнергетика. 2003. № 1. С. 54—60.
2. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
4. Лобанов И.Е. Математическое моделирование интенсифицированного теплообмена при турбулентном течении в каналах: дисс. ... д.т.н. М.: МАИ, 2005. 632 с.
5. Лобанов И.Е. Моделирование теплообмена и сопротивления при турбулентном течении в каналах теплоносителей в условиях интенсификации теплообмена // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т. 6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М., 2002. С. 140—143.
6. Мигай В.К. Интенсификация конвективного теплообмена в трубах и каналах теплообменного оборудования: дисс. ... д.т.н. Л.: ЦКТИ, 1973. 412 с.
7. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. — Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1987. 263 с.
8. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1980. 144 с.
9. Эффективные поверхности теплообмена / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, И.З. Копп и др. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В КАМЕРАХ ТУННЕЛЬНОГО ТИПА

Мялицин А.В.

*Уральский государственный лесотехнический университет,*

*Екатеринбург, Россия*

*[alex21m@rambler.ru](mailto:alex21m@rambler.ru)*

**На основании закона сохранения массы вещества, экспериментальных исследований и принятых допущений составлено математическое описание процесса сушки древесины в камерах непрерывного действия туннельного типа. Приведены решения полученных уравнений и соответствующие выводы.**

**Ключевые слова:** сушка древесины, камеры непрерывного действия, теплообмен, массообмен

## MATHEMATICAL FORMULATION OF DRYING PROCESS OF SAWN TIMBER IN PROGRESSIVE KILNS

Mialitsin A.V.

*Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia*

**On the basis of mass conservation law, experimental research and hypothetical assumptions, there has been made a mathematical formulation of drying process of sawn timber in progressive kilns. The solutions of received equations and corresponding conclusions are given.**

**Keywords:** drying wood, progressive kilns, heat transfer, mass transfer.

Ранее уже предпринимались попытки анализа процессов тепло- и массообмена для камер непрерывного действия [1, 2].

Была получена следующая система уравнений, описывающих процесс тепло- и массообмена в туннельной сушилке:

$$\begin{aligned}
 \gamma_B \left( -g_x \frac{\partial D}{\partial x} + g_y \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial D}{\partial \tau} \right) &= \gamma_M \left( v \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial \tau} \right), \\
 -c_B \left( -g_x \frac{\partial t_B}{\partial x} + g_y \frac{\partial t_B}{\partial y} + \frac{\partial t_B}{\partial \tau} \right) &= \alpha F(t_B - t_M); \\
 r' \gamma_M \left( v \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial \tau} \right) &= -\alpha F(t_B - t_m); \\
 t_m &= f(t_B, D)
 \end{aligned} \tag{1}$$

с начальными и граничными условиями:

$$W(0, x, y) = W^0(x, y); t_B(0, x, y) = t_{B0}(x, y);$$

$$D(0, x, y) = D^0(x, y); W(\tau, 0, y) = W^0(\tau, y);$$

$$t_B(\tau, x, 0) = t_{B0}(\tau, x); D(\tau, 1, 0) = D_1(\tau);$$

где  $0 \leq x \leq 1; 0 \leq y \leq 1$

Решение системы (1) в операторном виде выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} W(p, x) &= W_0(p) \exp\left(-\frac{px}{v}\right) \eta_1(x) + \\ &+ \exp\left(-\frac{px}{v}\right) \eta_1(x) \int_0^x \exp\left(-\frac{p\xi}{v}\right) \eta_2(\xi) t(p, \xi) d\xi, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } \eta_1 = \exp\left(\frac{1}{v} \int_0^x \varphi_2(\xi) d\xi\right); \eta_2 = \frac{1}{v} \varphi_1 \exp\left(\frac{1}{v} \int_0^x \varphi_2(\xi) d\xi\right)$$

Первое слагаемое в (2) показывает влияние возмущения по начальной влажности материала на влажность материала в любом сечении по длине сушилки, а второе слагаемое учитывает влияние распределенного по длине возмущения параметров сушильного агента на влажность материала в сушилке.

В (1) – (2) приняты следующие обозначения:

$x, y, z$  – координаты соответственно по длине, высоте и ширине сушильной камеры, м;

$g(x), g(y)$  – расход воздуха, соответственно, по осям  $x$  и  $y$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$F$  – площадь поверхности высушиваемого материала, приходящаяся на единицу объема сушильного пространства,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;

$v$  – скорость перемещения материала по оси  $x$ ,  $\text{м}/\text{ч}$ ;

$\gamma_v, \gamma_m$  – плотность, соответственно, воздуха и материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$t_b, t_m, t_m$  – температура воздуха, поверхности материала и мокрого термометра,  $^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2\text{°C}$ ;

$W$  – влажность материала,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;

$c_v, c_m$  – теплоемкость воздуха и материала,  $\text{Дж}/\text{кг}^\circ\text{C}$ ;

$D$  – влагосодержание воздуха,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

Таким образом, полученное решение (2) описывает искомые распределения по длине камеры, однако, его практическое применение представляется весьма затруднительным по следующим причинам:

1. Выражение (2) для практического применения необходимо привести из операторной формы в нормальную, а для этого надо знать параметры  $\eta_1, \eta_2, \varphi_1, \varphi_2$ .

2. Определение указанных параметров эмпирическим путем также не представля-