

А. А. Андрижиевский, д-р техн. наук, профессор;  
 А. Г. Трифонов, д-р техн. наук, профессор; А. Г. Лукашевич, канд. техн. наук  
 (Объединенный институт энергетических и ядерных исследований «Сосны» НАН Беларуси)

### АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ С ТУРБУЛИЗАЦИЕЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Results of application of k-ε-turbulence model for description of spatial fluid flow in the complex shape channels are presented. The research of a configuration of considered flows in technological equipment elements with internal ruffle forming of heat exchange surfaces was executed. The zones of increased vortex formation are revealed, power characteristics of turbulence depending on the thermodynamic characteristics of flows and parameters of ruffle forming of channels are investigated.

В данной работе рассмотрены методы повышения технологической (и соответственно экономической) эффективности теплообменных устройств (включая химические реакторы) посредством различных способов внутренней турбулизации рабочей среды.

В качестве модельных элементов тестирования методов математического представления теплообменных устройств с турбулизацией рабочей среды выбраны:

- модульный трубчатый элемент поверхности теплообмена с внутренним оребрением;
- модульный трубчатый элемент поверхности теплообмена с динамическими турбулизаторами.

**Способ интенсификации процессов переноса на основе механических турбулизаторов.** На рис. 1. представлен рассматриваемый модельный аналог трубчатой поверхности теплообмена с внутренним оребрением, построенный на основе формализованного аналога системы Femlab.

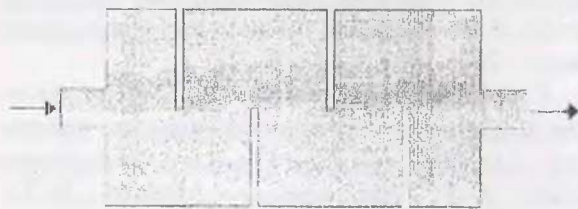


Рис. 1. Модельный аналог трубчатой поверхности теплообмена с внутренним оребрением

Для описания процессов переноса в данном модельном эксперименте используется k-ε-модель движения рабочей среды и метод конечных элементов в интерпретации системы Femlab:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T) \right] + \rho U \cdot \nabla U + \nabla P = 0$$

$$\nabla \cdot U = 0$$

где  $\rho$  – плотность рабочей среды;  $U$  – скорость потока;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости;  $P$  – гидростатическое давление;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – диссипация турбулентной энергии;  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  – модельные константы.

Турбулентная энергия определяется из решения следующей системы уравнений:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \varepsilon,$$

а диссипация турбулентной энергии:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \rho U \cdot \nabla \varepsilon = \rho C_{\varepsilon 1} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – модельные константы.

Значения модельных констант в приведенных выше уравнениях определены на основании экспериментальных данных (таблица).

Таблица  
 Значения модельных констант

Константа	Значение
$C_\mu$	0,09
$C_{\varepsilon 1}$	0,1256
$C_{\varepsilon 2}$	1,92
$\sigma_k$	1,0
$\sigma_\varepsilon$	1,6

Результаты вычислительных экспериментов по изучению эффективности турбулизации потока рабочей среды (и соответственно интенсификации процессов переноса) в модульном

элементе трубчатой поверхности охлаждения с внутренним оребрением иллюстрируются рис. 2–4.

На рис. 2 представлено поле скоростей (линии тока) рабочей среды в режиме установившегося движения.

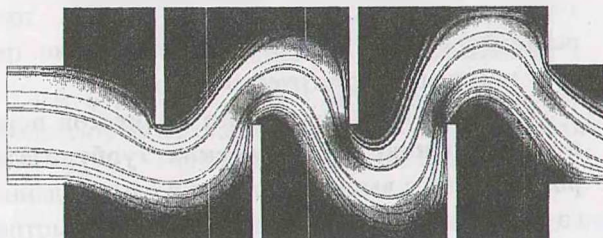


Рис. 2. Поле скоростей и линии тока в модульном элементе поверхности охлаждения с внутренним оребрением

Как следует из анализа структуры поля скоростей, в подобных конструкциях, области смешения потока увеличиваются по мере прохождения механических турбулизаторов и соответственно возрастает интенсивность процессов переноса от ядра потока к поверхности охлаждения.

При этом необходимо все же иметь в виду, что степень интенсификации потока связана с ростом осредненных скоростей и соответственно затрат энергии на «прокачку» рабочей среды.

Вместе с тем на рис. 2 видны достаточно обширные застойные зоны вблизи оребренной поверхности охлаждения, особенно на ее начальных (вблизи входа) участках. Наличие и размеры подобных зон рециркуляции заметным образом влияют на интенсивность рассматриваемых процессов переноса.

На рис. 3 представлен профиль турбулизации потока по мере его продвижения через рассматриваемый модульный элемент. Данный профиль связывается с соответствующим изменением «турбулентной вязкости».

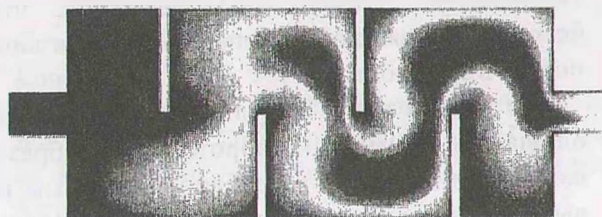


Рис. 3. Профиль турбулентной вязкости

На рис. 4 представлена динамика турбулизации потока рабочей среды в рассматриваемом модульном элементе на примере интенсификации процесса смешения аэрозольных частиц заданной начальной концентрации (численная реализация метода «подкрашивания» турбулентного потока).

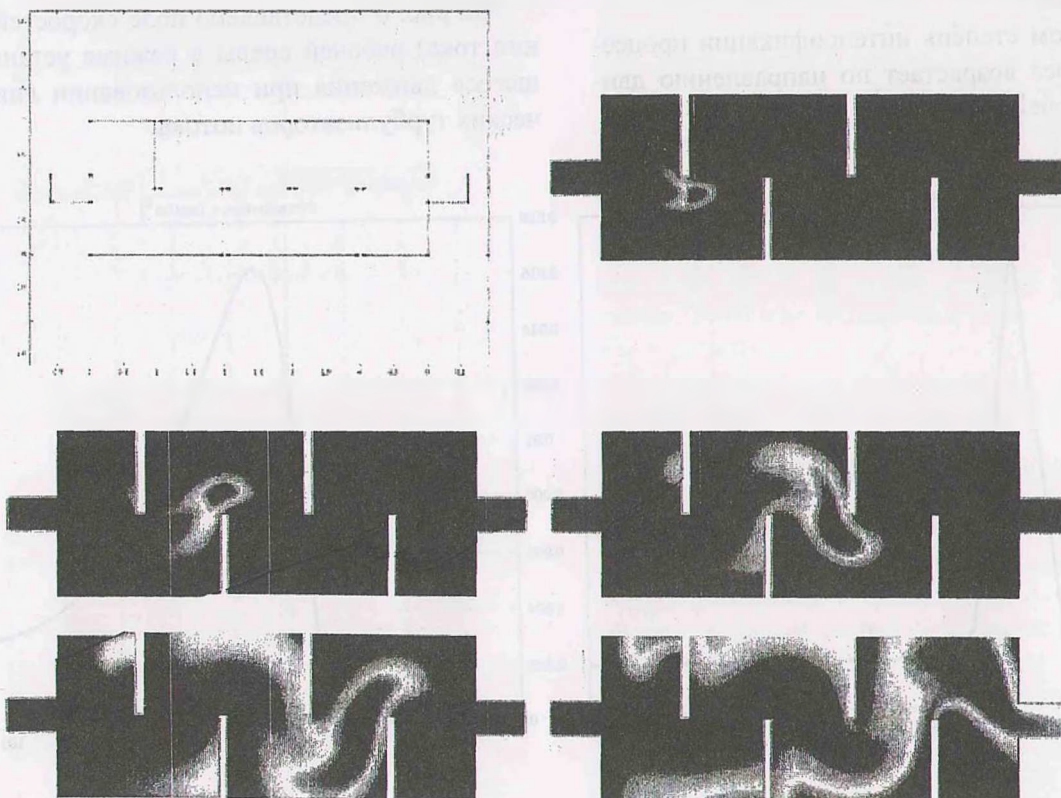


Рис. 4. Профили концентраций аэрозольных частиц для моментов времени  $t = 10, 20, 30, 45, 65$  и  $90$  с (время пребывания  $100$  с)

Данный прием «проявления» турбулентной вязкости используется нами для большей иллюстративности исследуемых закономерностей.

Представленные на рис. 4 результаты получены на основе приведенной выше математической модели, дополненной уравнением сохранения массы аэрозольных частиц.

Из рис. 4 ясно видно, что в первой трети модуля аэрозольное образование сохраняет свою форму. Это свидетельствует о низкой интенсивности процесса перемешивания, что, безусловно, связано со степенью турбулизации потока в этой области.

Во второй трети модульного элемента наблюдается размывание аэрозольного образования, что становится особенно заметным на выходе из модуля. Данный процесс полностью соотносится с представленным на рис. 3 профилем турбулентной вязкости, а также профилями концентраций аэрозольных частиц на входе и выходе модульного элемента (рис. 5).

По результатам данного численного исследования можно сделать вывод, что механические турбулизаторы потока рабочей среды достаточно эффективно интенсифицируют процессы переноса.

При этом степень интенсификации процессов переноса возрастает по направлению движения рабочей среды.

В то же время при данном способе интенсификации вблизи поверхности теплообмена образуются зоны рециркуляции, особенно заметные на начальных участках теплообменных поверхностей. Это, безусловно, снижает эффективность процессов переноса в подобных конструкциях теплообменных аппаратов. Кроме того, реализация этого способа интенсификации требует заметных энергетических затрат.

**Способ интенсификации процессов переноса на основе механических турбулизаторов.** В связи с вышесказанным в рамках данного вычислительного эксперимента рассмотрен способ повышения энергонапряженности поверхности теплообмена посредством динамических турбулизаторов потока.

В данном способе интенсификации процессов переноса механические турбулизаторы заменяются форсунками для впрыска в охлаждающую среду, как части основного потока, так и части охлаждаемой среды.

В последнем случае для описания характеристик транспортного потока к приведенной выше системе уравнений сохранения добавляются уравнение сохранения капельной влаги и граничные условия на межфазной границе.

На рис. 6 представлено поле скоростей (линии тока) рабочей среды в режиме установившегося движения при использовании динамических турбулизаторов потока.

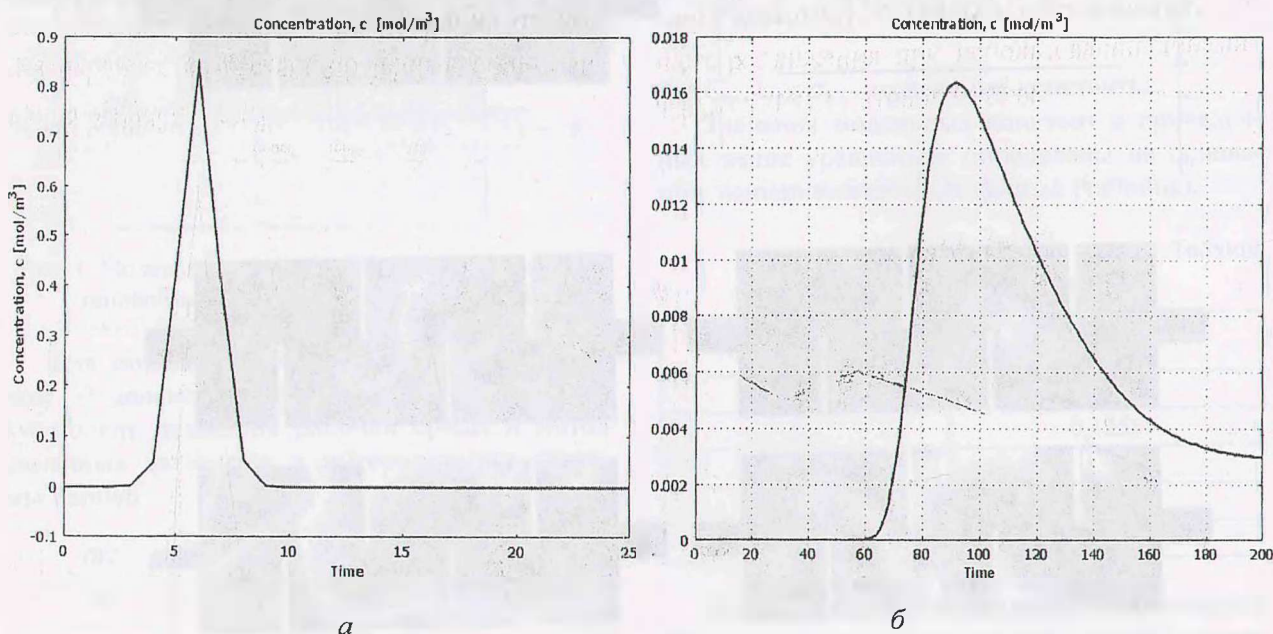


Рис. 5. Профили концентраций аэрозольных частиц на входе (а) и выходе (б) модульного элемента

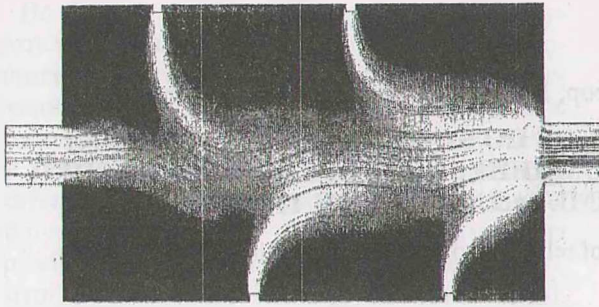


Рис. 6. Поле скоростей и линии тока в модульном элементе поверхности охлаждения с динамическими турбулизаторами потока

Как следует из данного вычислительного эксперимента, способ турбулизации рабочей среды посредством динамических турбулизаторов и соответственно интенсификация процессов переноса представляется более эффективным и требующим меньших энергетических затрат, чем способ турбулизации посредством механических турбулизаторов.

По результатам использования  $k-\epsilon$ -модели турбулентности для описания пространствен-

ного потока жидкости в каналах сложной формы была получена функция отклика, учитывающая влияние оребрения и динамических турбулизаторов на эффективность процессов перемешивания.

Кроме того, исследованы условия формирования вихревых и застойных зон в элементах технологического оборудования.

#### Литература

1. FEMLAB User's Guide, Version 3.1. COMSOL, 2004. – P. 474–490.
2. Morton, K. W. Numerical Solution of Convection-Diffusion problems / K. W. Morton. – London, 1996. – P. 9–13.
3. Nassehi, V. Finite Element Methods for the Convection Diffusion Equation, IRI Journal of Engineering / V. Nassehi, S. King. – 1991. Vol. 4. – P. 93–99.
4. Nassehi V. Practical Aspects of Finite Element Modeling of Polymer Processing / V. Nassehi. – Chichester, 2002. – P. 131–139.