

---

3. Интеграция расчетно-информационных комплексов на основе современных компьютерных технологий в процессе обучения бакалавров / Р.Х. Акчурин и др. [Электронный ресурс]. URL: <http://ito.bitpro.ru/1999/11/4/495.html> (дата обращения 21.12. 2017).

© А.А. Мосейчук, А.А. Беляева, 2018

УДК 621.1.016

**Н.П. Петрова**

магистрант 2 курса ФИСПОС

**Научный руководитель**

**А.А. Цынаева**

к.т.н., доцент, доцент кафедры ТГВ

Самарский государственный технический университет

г. Самара, Россия

## **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОБМЕНА В ПОТОКАХ С ВОЗДЕЙСТВИЯМИ**

### **Введение**

Продольный градиент давления оказывает значительное влияние на пограничный слой вблизи стенки теплообменной поверхности. Следовательно, от величины и знака градиента давления (градиент может быть положительным и отрицательным) значительно изменяются локальные значения коэффициентов теплоотдачи и диффузии. Таким образом, градиент давления может быть использован для управления интенсивностью теплообмена в каналах теплообменных аппаратов [1,2], а также для разделения потока рабочего тела по плотности компонентов. На этом основании разрабатываются теплообменные аппараты [3], системы охлаждения и термостабилизации [4-6].

Выполнение численного эксперимента по определению влияния условий моделирования на качество получаемого решения для задач теплообмена в пограничном слое с градиентом давления базировалось на основании RANS подхода [7] с привлечением  $k-\omega$  SST и  $k-\epsilon$  Linear Production моделей турбулентности [8,9]. В качестве инструмента исследования использовался программный код Code\_Saturne [10], распространяемый на основе свободной лицензии, имеющий открытый программный код.

Валидация численного эксперимента осуществлялась при сравнении результатов расчета с экспериментальными данными Эпик Э.Я. по исследованию влияния продольного положительного градиента давления и повышенной турбулентности на теплообмен в турбулентном пограничном слое [11]. Эти эксперименты были выбраны из-за высокого качества и отсутствия вдува или отсоса пограничного слоя с пластины.

В работе [12] проводилось численное исследование влияние градиента давления и локализованного вдува на теплообмен на пластине. Эта работа [12] может использоваться для валидации численных экспериментов по пленочному охлаждению высокотемпературных поверхностей.

## Выбор условий моделирования

Геометрия расчетной области подробно описана в работе [13] и согласуется с параметрами аэродинамической трубы из работы Эпик Э.Я. [11]. Конструкции группы аэродинамических труб представлены в работе [1].

Физические условия моделирования:  $P=101325$  Па;  $\rho = \rho_0(273.15/(273.15+t))$ ,  $\rho_0$  - плотность воздуха при нормальных условиях;  $\mu = \mu_{ref}((T_0+CST)/((t+273.15)+CST))((t+273.15)/T_0)^{3/2}$ ,  $T_0=291.15$ ,  $CST=120$ ,  $\mu_{ref}=0.000018277$  Па·с,  $c_p=1005$  Дж/(кг·К),  $\lambda=0.026$  Вт/(м·К),  $g=9.81$  м/с<sup>2</sup>.

Граничные условия: на входе -  $u_0=10$  м/с,  $t=20$  °С, поток направлен по нормали к входу,  $Tu = \sqrt{u_e'^2/u_0^2} = \sqrt{\frac{1}{A+(x+x')^m}}$ ,  $A=240$ ,  $x' = 0.4$ ,  $m = 1.4$  [13], на выходе - условие свободного истечения в атмосферу  $p_{изб}=0$ ; на стенках аэродинамической трубы  $q=0$  Вт/м<sup>2</sup>, пластина обогревается по условию  $q=200$  Вт/м<sup>2</sup>.

Расчет проводился в стационарной постановке, метод расчета - итерационный. Алгоритм расчета поля скоростей и давления - SIMPLEC. Заданная точность решателя принята  $(1 \cdot 10^{-6})$ . Для расчета переменных выбраны рекомендованные Code\_Saturne схемы решения, заданные в автоматическом режиме. На диапазон изменения температуры потока наложено ограничение  $-273^{\circ}\text{C} \leq t \leq 500^{\circ}\text{C}$ . Максимальное число Куранта задано не более 1, максимальное значение числа Фурье не должно превышать 10, продолжительность численного эксперимента определялась временем трехкратного прохождения потока по длине расчетной области  $\tau=3 \cdot (\Sigma L_i/u)$ , шаг по времени определялся  $\Delta\tau=(\Delta l/Cr)/u$ , где  $\Delta l$  - размер ячейки,  $Cr$  - максимальное значение числа Куранта,  $u$  - скорость потока.

На рисунке 1 представлены результаты валидации численного решения путем сравнения с экспериментальными данными Эпик Э.Я. [11]. Обработка результатов численного исследования производилась выборкой данных в окрестностях контрольных точек на пластине.

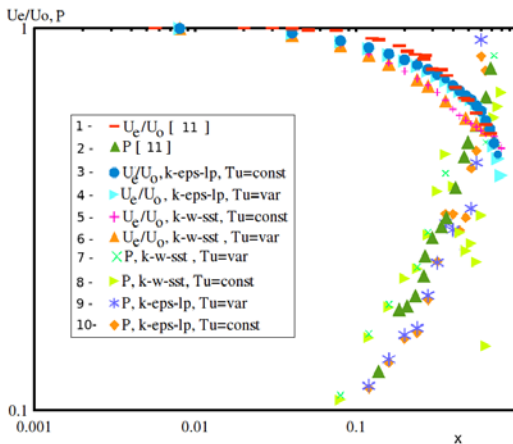


Рис. 1. Распределение скорости и параметра давления во внешнем потоке:  
 1,2 - результаты экспериментальных исследований Эпик Э.Я. [11];  
 3-10 - результаты численного эксперимента

Анализируя результаты, представленные на рис. 1, можно отметить, что используемые модели и методы исследования показывают достаточно близкие результаты (минимальное отклонение результатов расчета составило 0.1%, максимальное отклонение 19.1% для значений скорости).

На рис 2. представлено сравнение результатов расчета локальных значений коэффициента теплоотдачи от критерия  $Re_x$ .

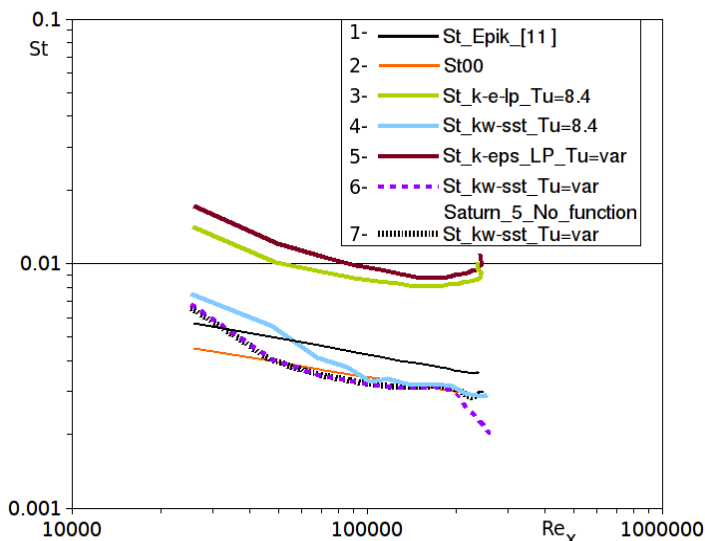


Рис. 2. Изменение локальных коэффициентов теплоотдачи по длине пластины:

- 1 - расчет по уравнению подобия [11] для потока с продольным градиентом давления и повышенной турбулентностью; 2 - расчет по уравнению подобия для безградиентного потока [1];
- 3,5 - результаты численного эксперимента при  $Tu > 0$  и  $dP/dx > 0$  с привлечением k-ε Linear Production модели турбулентности; 4,6,7 - тоже, но с k-ω SST моделью турбулентности

При сравнении рассмотренных моделей турбулентности k-ω SST дает более приближенные значения к эмпирическим данным, обобщенным в виде критериального уравнения для потока с продольным градиентом давления. Следует отметить, что результаты расчета в версии Code\_Saturne 4.0 несколько отличается от результатов расчета в версии Code\_Saturne 5.0 для идентичных начальных и граничных условий. Кроме того, результаты расчета с моделью турбулентности k-ε Linear Production дают существенно завышенные значения коэффициентов теплоотдачи в условиях градиента давления и повышенной турбулентности. Использование k-ω SST модели турбулентности показывает более корректные результаты по сравнению с k-ε Linear Production моделью турбулентности. Но при  $Re_x > 40000$  результат численного решения практически не показывает влияния градиента давления на теплообмен, что несколько отличается от эмпирических данных, обобщенных уравнением подобия [11].

## Сравнение теплообмена в турбулентном пограничном слое с положительным и отрицательным градиентом давления

Наличие градиента давления существенно сказывается на обменных процессах [1,14]. Кроме того, следует отметить влияние физических свойств рабочего тела на интенсивность теплообмена в потоке с градиентом давления.

На рис. 3 представлены результаты численного исследования влияния градиента давления и свойств рабочего тела на интенсивность теплоотдачи.

Геометрия расчетной области та же, что в работе [13], но для изменения знака градиента давления, вход и выход были заменены между собой.

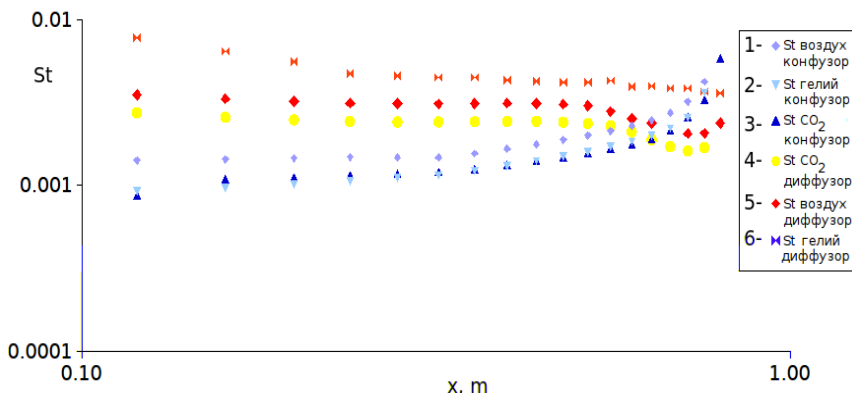


Рис. 3. Влияние градиента давления и свойств рабочего тела на локальные характеристики теплообмена: 1, 5 - при  $T_i = \text{var}$ , воздух; 2, 6 -  $T_i = \text{var}$ , гелий; 3, 4 -  $T_i = \text{var}$ , углекислый газ

Согласно результатам, представленным на рис. 3 интенсивность теплообмена в пограничном слое на пластине будет выше для каналов-диффузоров по сравнению с конфузорами. При этом для каналов-диффузоров влияние свойств рабочего тела на обменные процессы на пластине выражено сильнее, чем для конфузоров.

**Выводы:** Для получения корректных результатов численного исследования обменных процессов в потоках с градиентом давления необходимо уделять существенное внимание параметрам моделей турбулентности, производя предварительный анализ их применимости. Погрешность расчета может значительно возрастать при использовании моделей турбулентности, разработанных для эталонных условий. На основе результатов численных экспериментов по исследованию теплообмена в пограничном слое с градиентом давления возможно выявить условия повышения эффективности теплообменных аппаратов и систем термостабилизации.

### Список литературы

1. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков / Е.П. Дыбан, Э.Я. Эпик. Киев: Наук. думка, 1985. - 296 с.
2. А.с. 285938 СССР. Способ интенсификации конвективного теплообмена /Кирликов В.А., Гутарев В.В., Лейфман И.И.: заявитель и патентообладатель Московский институт химического машиностроения - 1280302/24-6, заявл: 04.10.1968, опубл. 10.11.1970 Бюл. №34.

---

3. Пат. 2047081 Российская Федерация, МПК F28F 13/12 (1995.01), F28D 7/16 (1995.01), F28F 1/40 (1995.01) Теплообменный аппарат / Барон В. Г., Барон А.В.; заявитель и патентообладатель Барон В. Г., Барон А.В. - 93042496/06, заявл: 24.08.1993, опубл. 27.10.1995.

4. Пат. 2319842 Российская Федерация, МПК F01D 5/18 Система охлаждения лопатки газовой турбины/ Рыкачев Ю.Ф.; заявитель и патентообладатель ФГУП ЦИАМ им. П.И. Баранова - 2006110841/06, заявл: 05.04.2006, опубл. 20.03.2008 Бюл. №8.

5. Пат. 2374141 Российская Федерация, МПК B64D 13/08 Устройство для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (варианты) / Киселев В.М., Майоров А.В., Наумов Г. А., Никитин В. И., Пушилилин В. Е., Сапронов А. С., Тарасов В. В.; заявитель и патентообладатель Курское открытое акционерное общество прибор - 2008118028/11, заявл: 05.05.2008, опубл. 27.11.2009 Бюл. № 33.

6. Пат. 2557073 Российская Федерация, МПК H02K 9/20 Система охлаждения электрической машины [Текст] / Цынаева А. А., Цынаева Е. А., Никитин М.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Самарский государственный архитектурно-строительный университет". - 2013148162/07; заявл. 29.10.2013, опубл. 20.07.2015; Бюл. № 20.

7. Елисов Н. А., Ишков С. А, Шахов В. Г. Влияние моделей турбулентности на расчетные значения несущих свойств летательного аппарата // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. № 3 (16). С. 39-46.

8. [https://www.cfd-online.com/Wiki/SST\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model).

9. [https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon\\_models](https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models).

10. <https://www.code-saturne.org/cms/>.

11. Элик Э.Я. Теплообмен в турбулентном пограничном слое при наличии положительного градиента давления // Proc. VI Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. Минск, 2008

12. Volkov K.N. The effect of pressure gradient and localized injection on turbulent heat transfer on a flat plate/ K.N. Volkov // High Temperature. 2006. Т. 44. № 3. С. 414-421.

13. Петрова Н.П. Численное исследование теплообмена в турбулентном пограничном слое с воздействиями/ Н.П. Петрова // Сб. материалов международной конференции: Наука в современном обществе. 29 июля, 2017. С. 56-62.

14. Волчков Э.П., Макаров М.С., Сахнов А.Ю. Пограничный слой с асимптотическим отрицательным градиентом давления/ Э.П. Волчков , М.С. Макаров , А.Ю. Сахнов // Проблемы и достижения прикладной математики и механики: к 70-летию академика В.М. Фомина: сб. науч. тр. Новосибирск: 2010. с. 25-34.

© Н.П. Петрова, 2018