Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408 Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 06. С. 47–70.

DOI: 10.7463/0616.0842189

Представлена в редакцию: 11.05.2016 Исправлена: 25.05.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 536.24

Численное и экспериментальное исследование структуры течения при турбулентном обтекании одиночной «траншеи»

Афанасьев В. Н.¹, Недайвозов А. В.¹, Семенёв П. А.^{1,*}, Дехай К.¹

<u>semenyov@gmail.com</u>

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлены результаты экспериментального и численного исследования гидродинамики и теплообмена при поперечном безотрывном обтекании двухмерной траншеи, расположенной на плоской пластине, обогреваемой по закону qct = const. Численные исследования выполнены для несжимаемой жидкости с помощью расчетного пакета ANSYS FLUENT в рамках двухмерных уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью моделей турбулентности k-є и двух - параметрической k- ω -модели (MSST). Исследовано влияние формы траншеи на структуру турбулентного пограничного слоя, распределения трения, теплоотдачи и давления вдоль обтекае-мой поверхности.

Ключевые слова: экспериментальное и численное исследование, пограничный слой, турбулентность, интенсификация теплообмена, траншея

Введение

Увеличение мощности, надежности и эффективности разрабатываемых и создаваемых энергетических систем – главнейшая задача современной теплоэнергетики. Одним из наиболее перспективных путей в этом направлении является повышение начальных параметров рабочего тела, в первую очередь температуры - при этом резко возрастает теплонапряженность узлов машин и аппаратов. Существенного улучшения основных характеристик теплообменных устройств, включая массогабаритные параметры, уменьшение металлоёмкости, температуры поверхностей, роста надёжности и ресурса работы, можно достигнуть, используя оптимальные методы интенсификации теплообмена [1...6].

При взаимодействии теплопередающей поверхности с омывающим ее потоком жидкости или газа основное гидродинамическое и термическое сопротивление оказывает пограничный слой, нарастающий на данной поверхности. Обычно для увеличения теплоотдачи используется турбулентный режим течения теплоносителя, поэтому знание гидродинамической структуры турбулентного потока и особенностей теплообмена в нём позволяет установить области и методы воздействия на поток.

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

Главной задачей интенсификации конвективного теплообмена является такое воздействие на пограничный слой, которое сделало бы его более тонким или частично разрушило. Большой практический интерес вызывают работы, в которых предлагаются способы интенсификации теплообмена за счет формирования на исходно гладкой поверхности двумерных углублений-траншей, канавок, шахматно-упорядоченных систем сферических углублений и т.п. [1...7].

Экспериментальные и теоретические исследования структуры течения при обтекании углублений на исходно гладких поверхностях представляют значительный практический интерес, поскольку углубления и полости конструктивного или случайного происхождения встречаются на многих конвективных поверхностях, например, в случаях входящих в атмосферу космических летательных аппаратов, подвергающихся ударам микрометеоритов и аэродинамическому нагреву, каналов в турбинах, поверхностей оперения и т.п. При обтекании углубления отрыв пограничного слоя и его повторное присоединение при-водит к возникновению специфических явлений, оказывающих существенное влияние на сопротивление и теплообмен – это зависит от геометрии углублений, часто от технологии их получения, а в некоторых случаях наблюдается существенная интенсификация тепло-обмена без опережающего роста гидродинамического сопротивления [2...6].

Высокой тепловой эффективностью обладают поверхности типа "диффузорконфузор". Углы расширения диффузоров и конфузоров выбираются из условия получения потока с нестационарными микроотрывными явлениями, которые интенсифицируют теплообмен, но не приводят к появлению сопротивления давления, которое является вредной составляющей с точки зрения процесса интенсификации теплообмена. Наибольшей эффективностью обладают каналы с углами раскрытия диффузоров порядка 10о (рис. 1). Указанные поверхности (каналы, трубы) просты в изготовлении и допускают механизацию и автоматизацию производства. Они изготовляются путем штамповки, литья, накатки специальными роликами и т.п. Кривизна поверхности канала при изготовлении стенки такого профиля оказывается незначительной, т.к. искривление происходит на относительно большой базе, что благоприятно с точки зрения прочности (ребра жесткости). Такие каналы могут ис-пользоваться и в случае загрязненных потоков теплоносителя, поскольку имеют плавные внутренние очертания и не имеют циркуляционных зон. Эти качества совместно с высо-кими теплотехническими показателями обеспечивают таким поверхностям преимущество над поверхностями с дискретными выступами. Диффузорноконфузорное течение имеет место и в случае поперечной цилиндрической траншеи, тем более что технология изготовления цилиндрических траншей (двумерной шероховатости) значительно проще, чем технология изготовления трехмерной шероховатости (сферических лунок). Двумерные цилиндрические углубления-траншеи на стенках каналов можно рассматривать как искусственную типа "диффузор-конфузор" шероховатость.

Предлагаемая физическая модель интенсификации теплообмена под воздействием двухмерной искусственной шероховатости предполагает, что наличие на поверхности нагрева элементов шероховатости обуславливает уменьшение эффективной толщины ламинарного подслоя. С одной стороны, это вызвано разрушением подслоя на элементах шероховатости, а с другой – воздействием на подслой вихрей, образующихся при срыве потока с элементов шероховатости и диффундирующих не только в направлении ядра потока, но и в направлении стенки [4].



Рис. 1. Схема канала типа "диффузор-конфузор"

Совместный анализ трения и теплоотдачи на профилированных «траншеями» поверх-ностях указывает на наличие существенной интенсификации теплоотдачи при неизменности гидродинамического сопротивления по сравнению с гладкой стенкой, причем основной вклад в увеличение теплоотдачи вносит наличие углублений, а не увеличение площади поверхности нагрева [4...7].

Сочетание численных и экспериментальных методов исследования с использованием последних достижений в области диагностики пограничного слоя и компьютеризации является наиболее эффективным направлением в современной теории тепломассообмена. Чтобы понять физическую сущность процессов, происходящих на профилированных цилиндрическими двумерными траншеями – углублениями поверхностях, авторы [4, 8] экспериментально исследовали гидродинамические и тепловые характеристики турбулентного пограничного слоя над одиночной двумерной траншеей. Такие поверхности, представляют значительный практический интерес, поскольку подобные элементы "шероховатости" широко используются для интенсификации теплообмена [1...7]. Повышенный интерес, наблюдаемый в последние годы, к численным методам моделирования течений рассматриваемого класса можно объяснить, как интенсивным развитием компьютерной техники, так и повышением эффективности численных методов решения уравнений Навье-Стокса, хотя проблема численного моделирования турбулентных отрывных течений до сих пор не нашла удовлетворительного решения и вряд ли в ближайшее время она будет разрешена из-за исключительной физической сложности и разнообразия процессов, определяющих осредненные параметры отрывных турбулентных течений.

Существующие и создаваемые полуэмпирические методы расчета пограничного слоя, а также разрабатываемые методы интенсификации теплообмена требуют более глу-

бокого экспериментального изучения структуры пограничного слоя. В данной статье экспериментально и численными методами исследуется структура турбулентного пограничного слоя над одиночными двумерными траншеями различной геометрии. Задачей численного моделирования течений такого типа является оценка возможности применения той или иной модели турбулентности применительно к рассматриваемым течениям на основе сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными и, кроме того, возможности рассчитывать характеристики и свойства потока, представляющие практический интерес в существующих или разрабатываемых конструкциях.

1. Экспериментальное исследование

В статье представлены результаты экспериментального исследования гидродинамических и тепловых характеристик турбулентного пограничного слоя, формирующегося при внешнем обтекании потоком воздуха поверхности плоской пластины с одиночной поперечной цилиндрической траншеей.

Экспериментальная часть выполнялась на дозвуковой низко турбулентной ($\varepsilon = 0,2$ %) аэродинамической трубе открытого типа, работающей по принципу всасывания. Подробное описание экспериментальной установки и методика проведения эксперимента приведены в [4, 10]. Рабочий участок (нижняя стенка), на котором исследовался, возникающий при без градиентном обтекании турбулентный пограничный слой, нагревался по закону qct = const.

Все измерения средних скоростей и температур выполнялись с использованием термоанемометрического комплекта DISA Electronics. Измерения производились однониточными серийными датчиками фирмы DISA типа 55F31 и 55F35 с толщиной вольфрамовой проволоки 2,5 мкм. Кроме того, некоторые экспериментальные исследования повторялись датчиком Пито-Прандтля, специально разработанным для работы в пограничном слое [9].

Экспериментально измерялись значения средних скоростей и температур в различиях точках одиночной поперечной цилиндрической траншеи-углубления размером s = 37,5 мм и глубиной h = 2,5 мм (h/S = 0,067) при скорости внешнего потока 18 м/с. Схема траншеи, точки замеров и их координаты показаны на рис. 2 и в таблице 1.



Рис. 2. Схема траншеи

Коорлинаты точек	Номер точек										
F	1	2	3	4	5	6	7	8			
x_i , $\mathcal{M}\mathcal{M}$	542	550	554	561	570	579	586	590			
h _i , мм	0	0	0.65	1.90	2.50	1.90	0.65	0			

Таблица 1. Координаты исследуемых точек

2. Численные исследования

Точность расчета процессов гидродинамики и теплообмена определяется достоверностью данных о коэффициентах переноса – это особенно важно в связи с интенсивным развитием численных методов решения исходной системы уравнений турбулентного пограничного слоя. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования процессов в турбулентном пограничном слое остаются одним из основных направлений фундаментальных исследований.

Численное исследование включает в себя определение параметров, характеризующих гидродинамику и теплообмен путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса количества движения и теплоты, с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Это позволяет определять профили средних скоростей и температур, интегральные величины: толщины вытеснения, потери импульса и потери энергии, динамическую скорость, местные коэффициенты трения и теплоотдачи, толщины пограничных слоев динамического и теплового, формпараметр и др. Экспериментальные данные (табл. 3, 4), полученные в данном исследовании сравниваются с результатами расчетов, проведенных с помощью двух широко используемых в настоящее время моделей турбулентности: двухпараметрической κ - ω модели Ментера (MSST) и стандартной κ - ε модели.

2.1. Постановка задачи и граничные условия

Рассматривается гидродинамика и теплообмен при двухмерном обтекании турбулентным потоком несжимаемой вязкой жидкости траншеи, расположенной на плоской стенке. Геометрические размеры модели соответствуют размерам экспериментального участка рис. 3. Протяженность расчетной области в горизонтальном и вертикальном направлениях составляет 1300 мм и 500 мм соответственно. Расстояние от входной границы до траншеи – 570 мм. На входе задается полное давление $P_{BX} = 101325$ Па, температура T = 290,6 К и интенсивность турбулентности в невозмущенном потоке – 0,2%. На выходе задается статическое давление $P_{BbIX} = 101131$ Па. Для пластины (рис. 3) задавалось условие прилипания и постоянство теплового потока $q_{cT} = 596,5$ BT/m².



Рис. 3. Геометрия расчетной области

2.2. Сеточная сходимость

Для расчетной области строилась гексагональная сеточная модель (рис. 4), имеющая сгущения в пристеночных областях. На первом этапе расчета проверялась сеточная сходимость решения с использованием κ - ε модели турбулентности с модифицированной пристеночной функцией (Enhanced wall treatment), работающей при y⁺ \leq 1. В таблице 2 приведены характеристики исследуемых вариантов сеточных моделей. Величина универсальной координаты y+ в первом пристенном узле для всех сеточных моделей не превышала 1.



Рис. 4. Фрагмент расчётной структурированной гексагональной сетки в области траншеи

Результаты расчета сравнивались с экспериментально полученными профилями (рис. 5) скорости (а) и температуры (б) в точке 3. По мере уменьшения размеров ячеек наблюдается хорошая сходимость решения. Для дальнейших расчетов был выбран вариант № 2 с размерностью сетки 208×80 (16640 элементов).

Таблица 2. Характеристики сеточных моделей

Параметры №	y 1	N _x	Ny		
Вариант 1	0.04	104	40		
Вариант 2	0.02	208	80		
Вариант 3	0.01	416	160		
Вариант 4	0.005	832	320		

где – Nx, Ny - соответственно количество элементов по длине и высоте плоской пластины; y1 - толщина первой расчетной ячейки



Рис. 5. Безразмерные профили скорости и температуры в точке 3 для разных вариантов сеточной модели

2.3. Влияние модели и степени турбулентности

На рис. 6 приведено сравнение экспериментально полученных безразмерных профилей скорости и температуры в точке 1 с результатами расчетов, выполненных с использованием моделей: двухпараметрической к-ω модели Ментера (MSST) и стандартной к-є модели (Enhanced wall treatment) при степени турбулентности внешнего потока равной 0,2%.



Рис. 6. Распределение скорости и температуры в пограничном слое (точ. 1)

Нетрудно видеть, что результаты расчетов основных динамических и тепловых характеристик (профилей скорости и температуры) выполненных с помощью модели турбулентности к- ε хорошо совпадают с экспериментальными данными. Расчет с использованием модели турбулентности MSST дает существенное отклонение. Однако, учитывая, что в некоторых публикациях [7, 9] говорится о хорошем соответствии результатов расчета такого рода течений с помощью модели MSST, было исследовано влияние степени турбулентности внешнего потока на результаты расчета для модели MSST. Рассмотрено несколько вариантов расчета. На рис. 7 представлены результаты расчета профилей скорости и температуры со степенью интенсивностью турбулентности внешнего потока равной 0,2 и 3,2 %. Видно, что хорошее совпадение с экспериментом дает расчет с помощью модели MSST при $\varepsilon = 3,2$ %. Такая величина степени турбулентности характерна для течений в канале. В данном экспериментальном исследовании рассматривается внешняя задача со степенью турбулентности $\varepsilon = 0,2$ %, поэтому в дальнейшем используется модель к- ε .



Рис. 7. Распределение скорости и температуры в точке 1

По результатам численного и экспериментального исследований можно отметить, что:

- для низко турбулентных и низко рейнольдсовых потоков (показатель степени в степенном представлении профиля скорости между одной шестой и одной седьмой) ε < 1% (внешнее обтекание) следует использовать к-ε модель;
- для высоко турбулентных потоков ε > 2% (внутреннее обтекание каналы) можно использовать к-ε и модель к-ω Ментера (MSST).

3. Сравнение результатов расчета с экспериментом

Совместное измерение распределения скоростей и температур в потоке дает возможность количественно проанализировать и сопоставить теплообмен в различных областях пограничного слоя, включая вязкий подслой при турбулентном течении. Основные результаты исследования приведены в таблицах 3 и 4.

№ Сеч.	$u_{_{\infty ightarrow ighta$	$u_{_{\infty P}},$ м/с	$\mathcal{S}_{ ightarrow},$ мм	$\delta_{_P},$ мм	${\mathcal{\delta}_{\mathfrak{Z}}}^{*},$ мм	${\mathcal{S}_P}^*,$ mm	${\mathcal S}_{\mathfrak Z}^{\;**}$, Mm	${\mathcal{S}_P}^{**}$, мм	Re ₃ **	$\operatorname{Re}_{p}^{**}$	$H_{\mathfrak{Z}}$	$C_{f_{\mathfrak{I}}}$ $\cdot 10^3$	$C_{f_P} \ \cdot 10^3$
1	17.10	17.22	8.37	9.15	1.33	1.27	0.88	0.92	955	1057	1.52	4.48	4.54
2	17.49	17.35	8.18	10.0	1.18	1.19	0.81	0.91	901	1039	1.46	4.78	4.47
3	17.37	17.06	8.36	9.53	1.36	1.24	0.90	1.02	1001	1150	1.51	4.44	4.51
4	16.80	16.67	9.23	9.60	2.01	2.39	1.20	1.46	1285	1622	1.67	3.11	4.49
5	16.92	16.58	10.2	10.3	2.31	2.80	1.40	1.74	1511	1926	1.65	2.53	4.31
6	17.11	16.83	10.6	10.7	2.16	2.51	1.38	1.66	1507	1867	1.56	2.96	4.08
7	17.81	17.35	10.1	11.6	1.47	1.79	1.02	1.33	1159	1538	1.44	3.98	4.25
8	17.99	17.58	7.99	12.0	1.02	1.41	0.75	1.10	863	1287	1.36	5.07	4.35

Таблица 3. Результаты экспериментальных и численных исследований динамического пограничного слоя

Таблица 4. Результаты экспериментальных и численных исследований теплового пограничного слоя

№ Сеч.	<i>Х</i> , мм	<i>h</i> , Мм	Δ <i>Т</i> _{∞Э} °С	$\Delta T_{\infty P}$ °C	$\delta_{T ightarrow},$ MM	$\delta_{_{TP}},$ MM	$\delta_{T \mathfrak{Z}}^{**},$ mm	${{{ {\delta }_{TP}}^{**}}}$ мм	Re _{TЭ} **	Re _{TP} **	<i>q_{CT}</i> , Вт/м ²	$St_{\mathfrak{B}}$ $\cdot 10^3$,	St_P $\cdot 10^3$
1	542	0	11.23	10.63	8.21	9.21	0.82	0.99	890.0	1138	596.5	2.64	2.70
2	550	0	12.43	10.56	9.10	10.2	0.82	1.15	912.3	1308	596.5	2.33	2.70
3	554	0.65	13.93	11.66	9.09	9.51	0.87	1.00	969.1	1126	596.5	2.09	2.49
4	561	1.90	13.84	11.04	7.93	9.45	0.87	1.11	933.1	1234	596.5	2.18	2.69
5	570	2.5	12.40	11.23	7.83	10.0	0.93	1.20	1001	1328	596.5	2.42	2.66
6	579	1.90	10.59	11.01	8.15	9.40	1.10	1.11	1203	1244	596.5	2.80	2.68
7	586	0.65	12.04	10.83	8.50	11.7	0.87	1.37	991.2	1585	596.5	2.37	2.63
8	590	0	13.54	11.10	10.1	12.2	0.91	1.37	1041	1602	596.5	2.08	2.54

Из рассмотрения экспериментально полученных профилей скорости и температуры рис. 7...8 видно, что в сечениях 1, 2 и 8 экспериментально полученные профили скорости и температуры в пограничном слое приближаются к закону одной седьмой, т.е. профили имеют вид характерный для плоской стенки, а исследуемый пограничный слой вполне развитый и турбулентный. На это указывает и величина формпараметра $H = \delta * / \delta * *$, изменяющаяся от 1,52 до 1,36 (табл. 3), что соответствует данным [3, 4, 11]. Наибольшая заполненность расчетного профиля скорости наблюдается перед траншеей в точке 2 (рис. 8а) и за траншеей в точке 8 (рис. 8б), где происходит столкновение потока, двигающегося над траншеей, с потоком, выходящим из траншеи.

Хорошее соответствие расчетных профилей температуры с экспериментально полученными и законом одной седьмой наблюдается в точках 2 и 8 (на входе 2 мм до траншеи и 2 мм после траншеи, рис. 8 а и б), однако расчет дает более заполненные профили скорости в этих точках. Кроме того, следует отметить резкое уменьшение толщины пограничного слоя на выходе из траншеи (в точке 8) расчетная модель к-є на это не указывает.

Наибольшей деформации подвергается пристенная область профилей скорости на входе в траншею. При входе потока в траншею - точки 3, 4, 5 (рис.9) наблюдается типичное диффузорное течение (поток тормозится), при котором профили скорости и температуры деформируют и становятся менее заполненными, особенно профиль скорости, что отражается на увеличении значения формпараметра Н (Таблица 3). Меньшую деформацию профиля температуры на входе в траншею (точки 3, 4 и 5) по сравнению с соответствующими профилями скорости можно объяснить большей консервативностью процессов теплообмена к продольному градиенту давления. Известно [13, 14], что при существенной деформации профиля скорости в условиях положительного продольного градиента давления профиль температуры практически не меняется.



Рис. 8. Распределение скорости и температуры в пограничном слое: а- точка 2, б- точка 8



Рис. 9. Распределение скорости и температуры в пограничном слое: а-точка 3, б-точка 4, в-точка 5

На выходе из траншеи (точки 6 и 7 рис. 10) поток ускоряется, профиль скорости становится более заполненным и, как следствие, уменьшается значение формпараметра Н (Таблица 3).



Рис. 10. Распределение скорости и температуры в пограничном слое: а-точка 6, б-точка 7.

Удовлетворительное совпадение сравниваемых результатов экспериментальных и численных исследований подтверждается и перепадом давлений (рис. 11), который измерялся относительно точки 1.



Рис. 11. Сравнение расчетных и экспериментальных распределений давления.

Это касается как интегральных характеристик гидродинамики и теплообмена (таблицы 3 и 4), так и распределений скорости, температуры, давления, трения и теплоотдачи вдоль омываемой поверхности в окрестности траншеи. Нетрудно заметить, что максимум

в куполообразном распределении давления несколько смещен ближе к задней стенке траншеи, что можно объяснить наложением на диффузорно-конфузорный эффект струйного эффекта (удара потока в заднюю стенку), приводящего к торможению потока и дополнительному повышению давления. Следует отметить, что модель *к-є* качественно правильно описывает характер изменения давления по поверхности траншеи и, как отмечалось в работе [7], аналогичные результаты дают и расчеты с использованием MSST модели.

На рис. 12 и 13 представлено распределение локальных коэффициентов трения и теплоотдачи (чисел Стантона) по сечению цилиндрической траншеи.



Рис. 12. . Трение на поверхности траншеи

Коэффициенты трения определялись по методу Клаузера [3, 4, 10, 11]. В области диффузорного течения наблюдается уменьшение коэффициента трения, а на выходе (в конфузорной части) происходит его монотонное повышение (рис. 12), аналогичный результат отмечался и в работе [7].

Числа Стантона (рис. 13) резко понижаются в начале диффузорной области, а начиная от точки 3, отмечается повышение коэффициента теплоотдачи и в области между точками 6 и 7 достигают максимального значения, существенно превышающее соответствующее значение для плоской стенки, далее число Стантона монотонно уменьшается до уровня точки 8.

Из рассмотрения рис. 12 и 13 видно, что экспериментально полученные коэффициенты трения и теплоотдачи вполне удовлетворительно описываются моделью к-є.



Рис. 13. Теплоотдача на поверхности траншеи

На рис. 14 представлено изменение параметра, характеризующего аналогию Рейнольдса, по которому лучше судить об интенсивности теплоотдачи. Распределение этого параметра свидетельствует о том, что на большей части поверхности траншеи наблюдается нарушение аналогии Рейнольдса в пользу закона теплообмена, т.е. при обтекании безотрывной траншеи уровень теплоотдачи возрастает, приводя к существенной интенсификации теплообмена.



Рис. 14. Аналогия Рейнольдса на поверхности траншеи

Из анализа результатов, полученных численными и экспериментальными исследованиями видно, что в «безотрывных» углублениях области пониженного гидродинамического сопротивления и повышенного коэффициента теплоотдачи занимают большую часть углубления, что, вероятно, и приводит к незначительному изменению гидравлического сопротивления, и существенному увеличению коэффициента теплоотдачи. Интенсификации теплообмена также способствует уменьшение толщины ламинарного подслоя за углублением.

На гидродинамику и теплообмен при обтекании траншеи существенное влияние оказывают форма, размеры и даже технология ее получения. На распределение скорости и температуры в пограничном слое исследовалось влияние радиуса скругления профиля траншеи на входе и выходе из нее. На рис. 15 представлено сравнение результатов численного исследования с экспериментально полученными профилями скорости и температуры в точке 3 (аналогичные результаты получены и для других точек). Расчет выполнялся с использованием κ — ε (I=0.2%) и MSST (I=3.2%) – моделей при различных радиусах скругления r = 0,...0,3. При отсутствии скругления r = 0 на входе в траншею (точка 3) имеет место микроотрыв, на что указывает MSST – модель (рис.15, а и б). Экспериментально установлено, что с увеличением радиуса скругления результаты расчета качественно лучше соответствуют эксперименту, но следует отметить, что влияние этого параметра незначительно.



Рис. 15. Влияние радиуса скругления на распределение скорости и температуры в пограничном слое в точке 3: а- скорость, б- температура

4. Траншейный рельеф

Во второй части работы проведено численное исследование влияния различных форм и геометрии траншейных рельефов на структуру турбулентного пограничного слоя, распределения трения, теплоотдачи и давления вдоль обтекаемой поверхности. На рис. 16 приведены схемы профилей траншей, числено исследованных в работе. Эти траншеи более технологичны и просты по сравнению с обычной цилиндрической траншеей.



Рис. 16. Схемы исследованных профилей траншей

Для всех вариантов траншей выполнялось постоянным отношение глубины траншеи к ее длине h/S = 0,067, изменялись при этом только углы входа в траншею и выхода из нее (углы входа $\alpha = 14^{\circ}$, 8° и 5°). Преимущество таких форм – отсутствие застойных зон, поскольку они имеют плавные внутренние очертания и не имеют циркуляционных зон. Рассчитывались перепады давлений (рис. 17), коэффициенты трения (рис. 18) и теплоотдачи (рис. 19). Сравнение числено полученных результатов, представленных на рис. 17 показало, что более предпочтительным является вариант траншеи *a* с большим углом входа, который обеспечивает меньшие потери давления и меньший коэффициент трения (рис. 18), чем на гладкой пластине и мало уступает безотрывной цилиндрической траншее, рассмотренной выше и тем более лучше третьего варианта *b*. С точки зрения теплоотдачи (рис.19) он существенно превосходит оба варианта *б* и *b*. В случае варианта *a* реализуется описанный выше случай – на входе имеет место микроотрыв пограничного слоя (точнее разрушение ламинарного подслоя) и далее дополнительная турбулизация пристенной области. Этот вариант обеспечивает существенную интенсификацию теплоотдачи на боль-

шей части траншеи, что хорошо видно из рис. 20, характеризующего аналогию Рейнольдса.



Рис. 17. Распределение давления на поверхностях траншей различной формы $\Delta P = P_i - P_1$



Рис. 18. Распределение коэффициента трения на поверхностях траншей различной формы



Рис. 19. Распределение коэффициента теплоотдачи на поверхностях траншей различной формы



Рис. 20. Аналогия Рейнольдса на поверхности траншей

Заключение

Экспериментальное и численное исследование гидродинамики и теплообмена при без градиентном, турбулентном обтекании различных видов углублений-траншей, нанесенных на плоскую поверхность теплообмена, нагреваемую по закону q_{ct} = const показало, что результаты расчета в ANSYS FLUENT с использованием *к-є* модели турбулентности дают хорошее совпадение с экспериментом - при этом:

- для низко турбулентных ε < 1% и низко рейнольдсовых потоков (внешнее обтекание) следует использовать *κ*-ε модель;
- для высоко турбулентных потоков ε > 2% (внутреннее обтекание каналы) можно использовать модель *к*-ε и *к*-ω модель Ментера (MSST);;
- влияние радиуса скругления кромок сказывается незначительно на результатах расчета с использованием обоих моделей, но MSST модель турбулентности указывает на наличие микроотрыва (при α = 14⁰), экспериментально наблюдаемого на входе в траншею;
- профилирование поверхности теплообмена системой поперечных траншей не приводит к увеличению поверхностного трения, а в ряде случаев снижает его, т.е. возможно профилирование поверхности теплоотдачи таким двумерным рельефом для умеренной интенсификации теплообмена при определенных h/S.

Список литературы

- 1. Берглс А. Интенсификация теплообмена // Теплообмен. Достижения. Проблемы. Перспективы. М.: Мир, 1981. С. 145...192.
- 2. Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Леонтьев А.И. и др. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах. М.: ФГТУ «ЦНИИАТОМИН-ФОРМ», 2008. 532 с.
- 3. Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. М.: МГТУ, 1990. 118 с.
- 4. Афанасьев В.Н., Леонтьев А.И., Чудновский Я.П. и др. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности. М.: МГТУ, 1991.140 с.
- 5. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 206 с.
- 6. Мигай В.К. Повышение эффективности теплообменников. Л.: Энергия. Ленинградское отд-е, 1980. 144 с.
- Исаев С.А., Леонтьев А.И., Кудрявцев Н.А. Численное моделирование гидродинамики и теплообмена при турбулентном поперечном обтекании «траншеи» на плоской поверхности. // ТВТ, 2005, том 43, выпуск 1. С. 86...99.

- 8. Терехов В.И. Отрывные течения. Механизмы формирования и возможности управления процессами теплопереноса // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: XIII Школы-семинара молодых учен. и специал. под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева: труды. Т. 1. М.: МЭИ, 2001. С. 15.
- Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Proc. Int. Conf. Turbulence: Heat and Mass Transfer 4. N.Y.: Begell House Inc., 2003. P. 8.
- 10. Афанасьев В.Н., Трифонов В. Л. Интенсификация теплоотдачи при вынужденной конвекции. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 68 с.
- 11. Шишов Е.В., Югов В.П., Афанасьев В.Н. и др.Экспериментальное исследование турбулентного пограничного слоя на плоской пластине с нулевым градиентом давления и постоянным тепловым потоком // Труды МВТУ. 1976. №222. С. 121–129.
- 12. Кон Дехай. Численное и экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена при без градиентном обтекании пластины // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. №7. 10 с.
- 13. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоиздат, 1985. 320 с.
- 14. Афанасьев В.Н. Исследование процессов теплообмена в заторможенном равновесном турбулентном пограничном слое в начальном участке тепловой завесы: автореф. дис. канд. техн. наук. М., 1976. 16 с.

Science & Education of the Bauman MSTU

Electronic journal ISSN 1994-0408 Science and Education of the Bauman MSTU, 2016, no. 06, pp. 47–70.

DOI: 10.7463/0616.0842189

Received:	11.05.2016
Revised:	25.05.2016

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Numerically and Experimentally Investigated Turbulent Flow Structure Past a Single "Trench"

V.N. Afanas'ev¹, A.V. Nedaivozov¹, P.A. Semenev^{1,*}, K. Dehai¹

*<u>semenyov@gmail.com</u>

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: experimental and numerical investigation, boundary layer, turbulence, intensification of heat ex-change, trench

The paper presents results of experimental and numerical investigation of hydrodynamics and heat exchange with transversal flow past a two-dimensional trench without separation. The trench is placed on the flat plate and heated according to the law of q_w =const. For experimentation a subsonic low-turbulent open-type aerodynamic tunnel was used. Mean velocity and temperature profiles have been obtained experimentally in different sections of tunnel above the single transversal cylindrical trench (stream-wise size s=37.5 mm, depth h=2.5 mm, h/s=0.067) with an external flow velocity of 18 m/s. Incompressible two-dimensional RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) approach with two-parametrical k- ε and k- ω (MSST) turbulence models has been used in ANSYS FIUENT computational research.

The paper explores an impact of trench shape and geometry on the structure, turbulent boundary layer, drag friction, heat exchange and pressure on a streamlined surface.

It has been shown that calculations with k- ε turbulence model constitute a match with experimental data. Thus, k- ε turbulence model should be used for the low turbulent ($\varepsilon < 1\%$) and low-Reynolds flow calculation and both k- ε and k- ω (MSST) turbulence models could be used for the high-turbulent ($\varepsilon > 2\%$) flow calculations. Surface profiling with a system of transversal trenches leads to increasing heat-transfer coefficient without raising surface drag friction.

The influence of different geometries of trench shapes on the heat transfer intensity has been numerically simulated. It has been revealed that in comparison with flat plate trenches with greater inlet angle have lower pressure losses and drag coefficient and substantially higher heattransfer coefficient.

References

 Bergls A. Intensifikatsia teploobmena [Heat exchange intensification]. Teploobmen. Dostigenia. Problemy. Perspektivy. [Heat exchange. Achievements. Problems. Perspectives] -Moscow, Mir Publ., 1981. pp. 145-192. (in Russian).

- Dzubenko B.V., Kuzma-Kichta Yu.A., Leontiev A.I. et al. *Intensifikatsia teplo- I massoobmena* na makro-, mikro I nanomashtabah [Heat and mass exchange intensification on macro, micro and nanoscales] Moscow, FGTU «TsNIIATOMINFORM», 2008. 532 p. (in Russian).
- 3. Afansiev V.N., Leontiev A.I., Chudnovskiy Ya.P. *Teploobmen I trenie na poverhnostyah, profilirovannyh sfericheskimi uglubleniyami* [Heat exchange and drag on spherical-cavities profiled surfaces] Moscow, Bauman MSTU Publ., 1990. 118 p. (in Russian).
- 4. Afanasiev V.N., Leontiev A.I., Chudnovskiy Ya.P. et al. *Gidrodinamika i teploobmen pri obtekanii odinochnyh uglubleniy na ishodno gladkoi poverhnosti* [Hydrodynamics and heat exchange of the flow past initially smooth surface with a single cavities]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1991. 140 p. (in Russian).
- 5. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarho S.A. *Intensifikatsia teploobmena v kanalah* [Intensification of the heat exchange in ducts] Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 206 p. (in Russian).
- 6. Migai V.K. *Povyshenie effectivnosti teploobmennikov* [Increasing of the heat exchanger efficiency] Leningrad, Energiya Publ. (Leningrad department), 1980. 144 p. (in Russian).
- 7. Isaev S.A. Leontiev A.I., Kudryavtsev N.A. *Chislennoe modelirovaniye gidrodinamiki i teploobmena pri turbulentnom poperechnom obtekanii transhei na ploskoi poverhnosti* [Numerical simulation of hydrodynamics and heat exchange of the turbulent flow past a single trench on the flat plate] *TVT*, 2005, vol 43, issue 1. p. 86-99. (in Russian).
- 8. Terekhov V.I. Otryvnye techeniya. Mehanizmy formirovaniya I vozmognosti upravleniya protsessami teploperenosa [Tear flow. Formation mechanisms and control processes of heat transfer] Fizicheskie osnovy eksperimentalnogo I matematicheskogo modelirovaniya protsessov gazodinamiki I teplomassoobmena v energeticheskih ustanovkah. XIII Shcoly-seminara molodyh uchen. I spetsial. pod ruk. akad. RAN A.I. Leontieva. Trudy. [Physical foundations of experimental and mathematical simulation of processes of gasdynamics and heat exchange in power plants: XIII School-seminar of young scientists and specialists. Proc.]. Vol. 1. Moscow, MEI, 2001. p. 15. (in Russian).
- 9. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. *Proc. Int. Conf. Turbulence: Heat and Mass Transfer 4*. N.Y., Begell House Inc., 2003. P. 8.
- Afanasiev V.N. Trifonov V.L. Intensifikatsia teplootdachi pri vynugdennoi konvektsii. Metodicheskie ukazania [Heat transfer intensification in case of forced convection. Workbook]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2007, 68 p. (in Russian).
- Shisov E.V., Yugov V.P., Afanasiev V.N. et al. Eksperimentalnoe issledovanie turbulentnogo pogranichnogo sloya na ploskoi plastine s nulevym gradientom davleniya I postoyannym teplovym potokom [Experimental investigation of flat plate boundary layer with zero pressure gradient and constant heat flow]. *Trudy MVTU* [Transactions of the MHTS]. 1976. No. 222. p. 121–129. (in Russian).

- 12. Kong Dehai Numerical and experimental study of hydrodynamics and heat transfer in gradient flow with no plate. *Molodezhnyi nauchno-tekhnicheskii vestnik MGTU im. N.E. Baumana* = *Youth Science and Technology Herald of the Bauman MSTU*, 2015, no.7. 10 p. (in Russian).
- 13. Kutateladze S.S., Leontiev A.I. *Teploobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe* [Heat exchange and drag in turbulent boundary layer] Moscow, Energoizdat Publ., 1985. 320 p. (in Russian).
- Afanasiev V.N. Issledovanie protsessov teploobmena v zatormogennom ravnovesnom turbulentnom pogranichnom sloe v nachalnom uchastke teplovoi zavesy: autoref. dis. kand. tehn. nauk. [Investigation of heat exchange prosesses in equilibrium stagnated turbulent boundary layer at initial part of the thermal screen: author's abstract of cand.diss]. Moscow, 1976. 16 p. (in Russian).