

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ТРАКТАХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРИ НАНЕСЕНИИ НА СТЕНКИ ОДНОГО ПРОДОЛЬНОГО РЯДА СФЕРИЧЕСКИХ И ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК

АННОТАЦИЯ

Моделирование вихревой интенсификации теплообмена в узких трактах двигательных установок с помощью одного продольного ряда лунок проведено в рамках многоблочных вычислительных технологий (МВТ), реализованных в специализированном пакете VP2/3. Рассмотрены каналы с пятнадцатью лунками на стенке и содержащий две лунки периодический каналный модуль, соответствующий предельно большому (неограниченному) числу лунок. Сопоставлены сферические и траншейные лунки, причем показано, что последние по теплоотдаче и теплогидравлической эффективности существенно превосходят первые.

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ материалов по вихревой интенсификации теплообмена при обтекании луночных рельефов, представленных в ряде монографий последних лет [1-3], позволяет судить о луночных технологиях как эффективном инструменте повышения теплоотдачи при весьма незначительном превышении гидравлических потерь. Однако при этом предполагается, что лунок должно быть много и они должны упорядоченным образом достаточно плотно покрывать омываемую стенку. В многообразных, практических приложениях встречаются ситуации, когда проводящие теплоноситель каналы довольно узки (по ширине) и на их поверхности нельзя нанести большое число лунок. Более того, в двигательной проблематике есть компактные каналы, между боковыми стенками которых помещается лишь одна лунка. Следует отметить, что проблема интенсификации теплообмена в таких трактах двигательных установок стоит очень остро.

Один из фундаментальных, нерешенных до сих пор вопросов луночных технологий касается количества лунок в рельефе, необходимого для максимального эффекта. Как правило, в экспериментах рассматриваются образцы с ограниченным числом лунок и их интегральные характеристики по теплоотводу и гидравлическим потерям нельзя считать предельными. Таким образом, актуальным представляется вопрос об асимптотических характеристиках луночных рельефов при неограниченном числе лунок в ансамбле.

В данной работе рассматривается конвективный теплообмен в узком канале с одним продольным рядом лунок в двух постановках: канал с пятнадцатью лунками на стенке и периодический ка-

нальный модуль, содержащий две лунки различной конфигурации.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛИ

Вихревой теплообмен при турбулентном движении вязкой несжимаемой жидкости в узком канале с нанесенными лунками описывается системой уравнений Рейнольдса, замыкаемых с помощью уравнений модели переноса сдвиговых напряжений (MSST) Ментера [4], и уравнением энергии. Исходная система уравнений решается с помощью МВТ, реализованной в пакете VP2/3 [5].

Рассматриваются две задачи. В первой из них число лунок фиксируется и равняется пятнадцати. Диаметр сферической лунки, максимальная скорость потока и температура ($T=293K$) во входном сечении принимаются в качестве характерных параметров. Геометрические размеры плоскопараллельного канала: 33.4, 0.8, 2.8 (по координатам x, y, z).

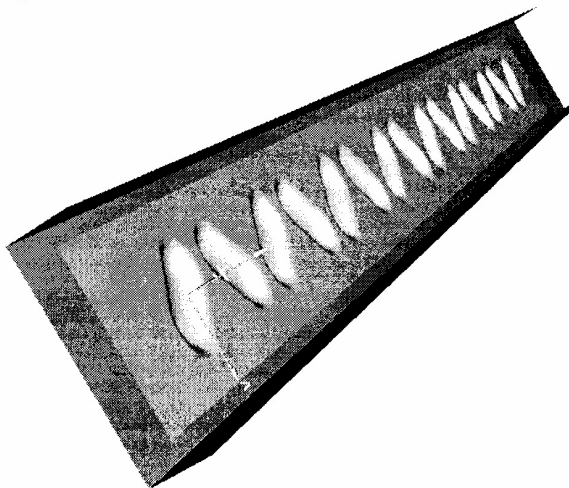


Рис.1. Пример рассматриваемого узкого канала с нанесенными на нижнюю стенку лунками (со снятой верхней стенкой).

Во входном сечении, следуя [5], определяются параметры потока в пристеночном слое, соответствующие выбранной толщине пограничного слоя (0.15). Фооновая турбулентность в ядре потока задается невысокой ($Tu=0.5\%$). В выходном сечении характеристики течения и теплообмена рассчитываются условия продолжения решения или мягкие граничные условия. На омываемых стенках ставятся условия прилипания. Нижняя, нагретая до 373K,

и верхняя, поддерживаемая при “комнатной” температуре, стенки полагаются изотермическими, а боковые стенки теплоизолированные. В качестве теплоносителя рассматривается воздух ($Pr=0.72$), а число Рейнольдса полагается равным 10^4 .

Для решения задачи используется расчетная сетка, состоящая из двух блоков и содержащая порядка 2.7 млн. ячеек. Границы лунок не выделяют, и они рассматриваются как часть рельефа.

Вторая задача о периодически повторяющемся канальном модуле ставится аналогично задаче об удаленном цилиндре в трубном пакете [5].

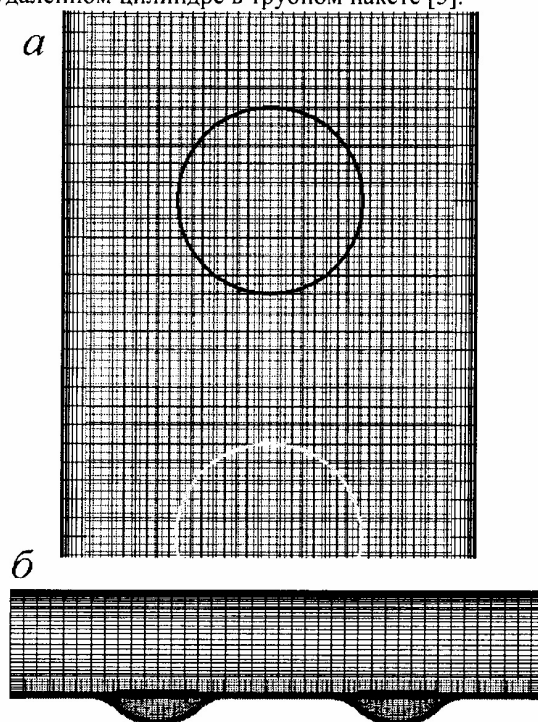


Рис.2. Двухблочная расчетная сетка в периодическом модуле с двумя сферическими лунками (а – вид сверху, б – вид сбоку).

Параметры во входном и выходном сечении определяются из условия периодичности. На омываемых стенках характеристики определяются так же, как и в первой задаче. При решении используются процедуры коррекции давления и среднемаховой температуры, следуя [5].

Следует отметить тематическую близость решаемых задач с проблемой интенсификации теплообмена на периодических выступах [6]. Хорошее соответствие приведенных в ней рассчитанных и измеренных характеристик подтверждает приемлемость выбранной полуэмпирической модели турбулентности.

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛЕ С 15-Ю ЛУНКАМИ

Сравниваются два рельефа, состоящие из сферических лунок и траншейных (с длиной цилиндрической вставки 0.8 и углом разворота 45°). Их глубина 0.2 и радиус скругления 0.25. Плотность первого ансамбля – 0.24, а второго – 0.49. Интегральные и локальные характеристики каналов с

лунками нормируются по аналогичным параметрам для канала с плоскопараллельными стенками.

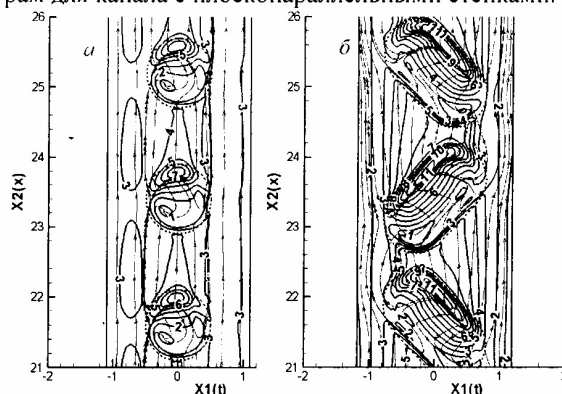


Рис.3. Картины растекания и поля относительных, локальных тепловых нагрузок на последние три лунки в канале со сферическими (а) и траншейными (б) лунками. 1 – $Nu/Nu_{pl}=0.2$; 2 – 0.6; 3 – 1; 4 – 1.4; 5 – 1.8; 6 – 2.2; 7 – 2.6; 8 – 3; 9 – 3.4; 10 – 3.8; 11 – 4.2.

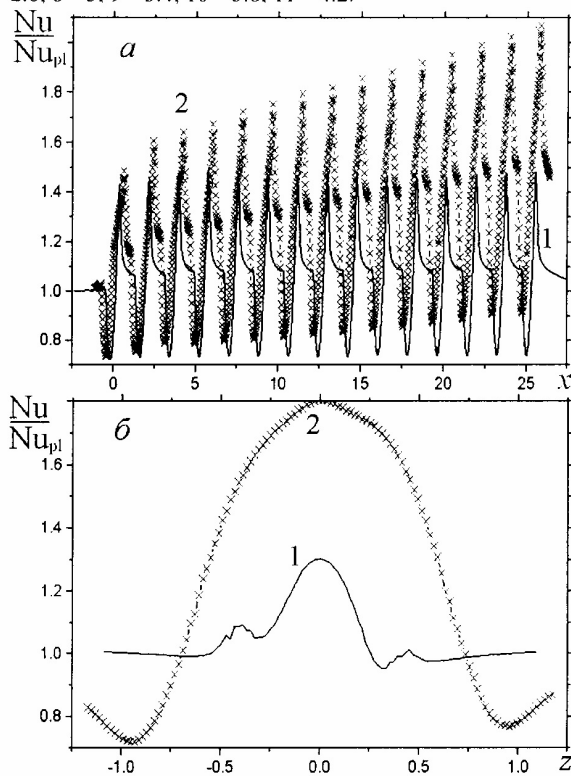


Рис.4. Осредненные по длине с лунками относительные тепловые нагрузки в продольном (а) и поперечном (б) направлениях для сферических (1) и траншейных (2) лунок.

Таблица 1. Сравнение относительных суммарных теплопроводов, гидравлических потерь и теплогидравлической эффективности рельефов с 15-ю лунками

| Тип лунок | Nu/Nu_{pl} | ξ/ξ_{sp} | $(Nu/Nu_{pl})/(\xi/\xi_{sp})$ |
|-------------|--------------|----------------|-------------------------------|
| Сферические | 1.074 | 1.081 | 0.994 |
| Траншейные | 1.32 | 1.27 | 1.039 |

Траншейные лунки располагаются “зигзагом” (рис.1), чтобы вызвать попеременное изменение направления потока в пристеночном слое.

На рис.3,4 и в таблице 1 приводятся некоторые из полученных результатов. Для однорядных сферических лунок наблюдается синхронизация вих-

ревых структур аналогично многорядным упорядоченным лункам. Предложенный тип расположения траншейных лунок позволяет организовать устойчивое вторичное движение с переменным направлением сгенерированных закрученных струй к боковым стенкам. Происходит существенное увеличение (рис.3) локальных тепловых нагрузок по мере продвижения от лунки к лунке, причем нельзя говорить об асимптотическом поведении $Nu/Nu_{pl}(x)$ для данной компоновки. Следует отметить, что для примерно одинаковых полос с лунками теплогидравлическая эффективность (ТГЭ) канала со сферическими лунками оказывается несколько меньше 1, в то время как для канала с траншейными лунками относительный теплоотвод заметно превышает относительные гидравлические потери.

4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА АСИМПТОТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОБМЕНА В КАНАЛЕ С ЛУНКАМИ

Выбор периодического расчетного модуля с двумя лунками продиктован конфигурацией рельефа с траншейными лунками (типа "зигзага").

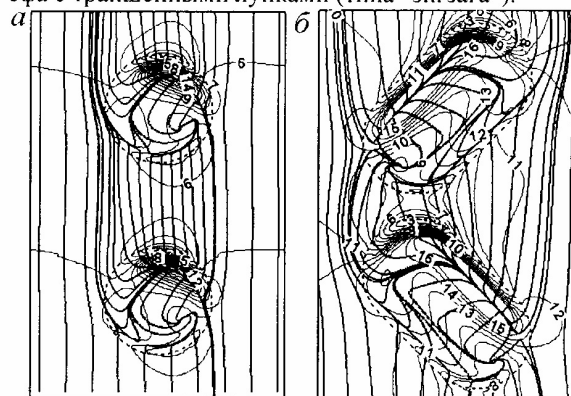


Рис.5. Сравнение картин растекания и полей давления на рельефах со сферическими (а) и траншейными (б) лунками. 1 – (-0.12); 2 – (-0.1); 3 – (-0.08); 4 – (-0.06); 5 – (-0.04); 6 – (-0.02); 7 – 0; 8 – 0.02; 9 – 0.04; 10 – 0.06; 11 – 0.08; 12 – 0.1; 13 – 0.12; 14 – 0.14; 15 – 0.16; 16 – 0.18.

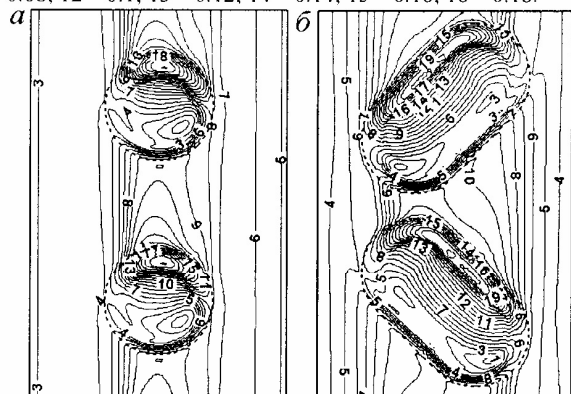


Рис.6. Сравнение полей относительных, локальных тепловых нагрузок на рельефах со сферическими (а) и траншейными (б) лунками. 1 – $Nu/Nu_{pl}=0.2$; 2 – 0.4; 3 – 0.6; 4 – 0.8; 5 – 1; 6 – 1.2; 7 – 1.4; 8 – 1.6; 9 – 1.8; 10 – 2; 11 – 2.2; 12 – 2.4; 13 – 2.6; 14 – 2.8; 15 – 3; 16 – 3.2; 17 – 3.4; 18 – 3.6; 19 – 3.8; 20 – 4; 21 – 4.2.

Прежде всего, представляло интерес рассмотреть компоновку лунок, аналогичные ранее проанализированным в канале с пятнадцатью лунками (раздел 3).

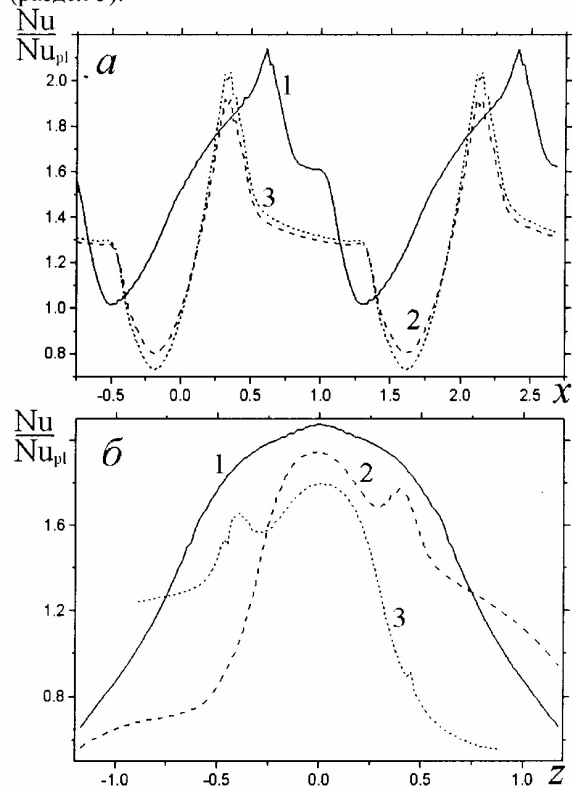


Рис.7. Осредненные по полосе с лунками относительные тепловые нагрузки в продольном (а) и поперечном (б) направлениях для траншейных (1) и сферических (2,3) лунок. 1,2 – $H_z = 2.8$; 3 – 2.2.

Таблица 2. Сравнение относительных суммарных теплоотводов, гидравлических потерь и теплогидравлической эффективности предельных рельефов

| Тип лунок | Nu/Nu_{pl} | ξ/ξ_{pl} | $(Nu/Nu_{pl})/(\xi/\xi_{pl})$ |
|-----------------|--------------|----------------|-------------------------------|
| Сфер. $H_z=2.8$ | 1.31 | 1.16 | 1.13 |
| Сфер. $H_z=2.2$ | 1.33 | 1.19 | 1.12 |
| Траншейные | 1.61 | 1.34 | 1.20 |
| 2D-траншеи | 1.31 | 1.40 | 0.95 |

В таблице 2 и на рис.7 включены также данные, соответствующие пакету сферических лунок в более узком ($H_z=2.2$), чем базовый ($H_z=2.8$) канале.

Структуры вихревого обтекания периодических лунок и поля локальных тепловых нагрузок (рис.5, б), в целом, аналогичны ранее отмеченным на рис.3 для канала с ограниченным числом лунок. А осредненные по полосе с лунками Nu/Nu_{pl} , как и относительные интегральные характеристики участка с лунками оказываются существенно выше (рис.7 и таблица 2). Интересно отметить, что двумерные канавки, повторяющие по форме центральное сечение сферических лунок, эквивалентны им по теплоотводу, но значительно уступают по теплогидравлической эффективности.

Можно было предположить, что создание зигзагообразной структуры вторичного вихревого

течения в пристеночном слое с помощью сферических лунок, расположенных со смещением в поперечном направлении от центрального сечения канала, позволит усилить интенсификацию теплообмена.

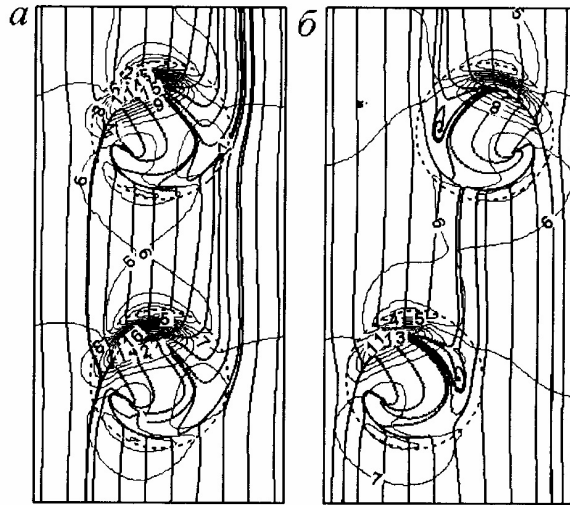


Рис.8. Сравнение картин растекания и полей давления на рельефах со сферическими лунками без (а) и с (б) эксцентриситетом. Обозначения, как на рис.5.

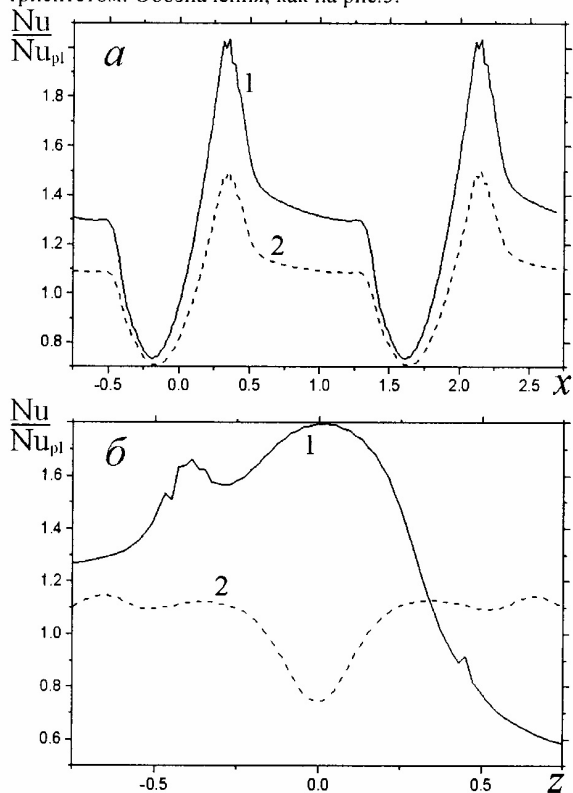


Рис.9. Осредненные по лункам относительные тепловые нагрузки в продольном (а) и поперечном (б) направлениях для сферических лунок без (1) и с (2) эксцентриситетом.

Таблица 3. Влияние эксцентриситета сферических лунок на асимптотические относительные интегральные характеристики предельных рельефов

| Тип лунок | Nu/Nu_{pl} | ξ/ξ_{pl} | $(Nu/Nu_{pl})/(\xi/\xi_{pl})$ |
|-----------|--------------|----------------|-------------------------------|
| б/э | 1.33 | 1.19 | 1.12 |
| с/э | 1.09 | 1.12 | 0.97 |

Однако, как следует из рис.8,9 и таблицы 3, результат получился противоположный – резкое ослабление теплоотода и теплогидравлической эффективности. Причина, по-видимому, кроется в том, что интенсификация теплообмена связана с размещением лунки в ближнем следе за передней лункой, а смещение лунки ослабляет ее влияние.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые исследована вихревая интенсификация теплообмена в узком канале с одним продольным рядом упорядоченных лунок и предложена эффективная схема расположения траншейных лунок “зигзагом”. Показано, что эта схема с траншейными лунками обладает существенными преимуществами по сравнению со сферическими лунками.

На основе анализа периодического расчетного модуля определены асимптотические характеристики канала с рельефом при неограниченном числе лунок.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ по грантам №№ 05-01-00162, 06-08-81005 и 05-02-16184.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

x, y, z – продольная, вертикальная и поперечная координаты;

H_z – ширина канала;

Δ, r – глубина, радиус скругления лунок;

Re, Pr, Nu – числа Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта;

p, T – давление и температура;

ξ – коэффициент гидравлических потерь;

$TГЭ = (Nu/Nu_{pl})/(\xi/\xi_{pl})$ – теплогидравлическая эффективность.

Индексы:

pl – параметры на плоской стенке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П.** Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов / Под. ред. акад. В.Е.Алемасова. Казань: КГТУ, 2003. 143с.
2. **Халатов А.А.** Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). Киев: ИТТФ, 2005. 76с.
3. **Кикнадзе Г.И., Гаччиладзе И.А., Алексеев В.В.** Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление. М.: МЭИ, 2005. 84с.
4. **Menter F.R.** Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. №93-2906. 21р.
5. **Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев.** СПб: Судостроение, 2005. 398с.
6. **Дрейцер Г.А., Исаев С.А., Лобанов И.Е.** Расчет конвективного теплообмена в трубе с периодически размещенными на поверхности вихревыми генераторами // ТВТ. 2005. Т.43, №2. С.223-230.