

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕРЧЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ОКОЛО ЛУНОЧНЫХ РЕЛЬЕФОВ (СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ)

АННОТАЦИЯ

Моделирование вихревой интенсификации теплообмена при обтекании луночных рельефов анализируется с позиций разработки и применения численных и экспериментальных методов. Несмотря на некоторый прогресс в понимании физических механизмов самоорганизации струйно-вихревых структур в пристеночном слое, остается довольно много открытых вопросов для исследователей. К тому же диапазоны большого числа определяющих геометрических и режимных параметров отличаются широтой, а имеющиеся базы расчетных и экспериментальных данных крайне ограничены. Таким образом, обосновывается перспективность тематики. Обсуждаются несколько актуальных вопросов, связанных с сочетанием численного и физического моделирования, с влиянием обнаруженной перестройки структуры вихревого ламинарного течения на интенсификацию теплообмена, с предельными характеристиками луночных рельефов на стенках узкого канала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вихревая интенсификация теплообмена при использовании луночных технологий, называемая иначе смерчевой интенсификацией из-за подчеркивания определяющей роли генерации закрученных струйных потоков в пристеночном слое, формируемых вогнутостями, привлекает большой интерес в мировом теплофизическом сообществе. Изданные в России в последние годы монографии [1-4], а также циклы многочисленных статей зарубежных исследователей (среди них следует отметить работы Ф. Лиграни с соавторами) ознаменовали наступление стадии обобщения в этой, насчитывающей несколько десятилетий развития, проблематике. Возникшая ситуация, усиленная многочисленными попытками внедрения луночных технологий в промышленности, создает иллюзию ее исчерпанности и стимулирует усилия по критической оценке состояния исследований в данной области с определением “точек роста”.

Постепенно центр тяжести в работах переносится с использования экспериментальных методов на численное моделирование на основе разработанных пакетов прикладных программ типа FLUENT. Особо следует выделить отечественный специализированный для решения задач вихревой интенсификации теплообмена пакет VP2/3, базирующийся на разработанных многоблочных вычислительных технологиях (МВТ) [4]. Его отличает способность улавливать разномасштабные, структурные элементы отрывных течений за счет привязки введенных

расчетных сеток к масштабам выделяемых особенностей. Постоянно проводятся тестирование пакета на задачах вихревой динамики и теплообмена вблизи лунок и траншей, а также сравнение с результатами расчетов с использованием других пакетов. Намечены перспективы его развития в алгоритмическом аспекте и, главное, в расширении модельного ряда, в особенности при интерпретации турбулентности.

Два направления перспективных исследований кратко иллюстрируются. Одно из них связано с совместным анализом физического и численного моделирования процессов конвективного теплообмена при ламинарном режиме обтекания сферической лунки и пакета лунок. А второе направление акцентирует внимание на предельных характеристиках луночных рельефов на стенке узкого канала.

2. КРАТКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ЛУНОЧНОЙ ПРОБЛЕМАТИКИ

2.1. Луночные технологии, судя по ИНТЕРНЕТ и рекламе, остаются пока дизайном, нежели научно обоснованными системами. Лишь в немногих, конкретных условиях, в основном для узких каналов энергетических устройств, получили обоснование рельефы из сферических лунок, близкие к рациональным по максимальному теплоотводу и теплогидравлической эффективности.

Поэтому требуется разработать системный подход к научному обоснованию выбора рациональных луночных рельефов на базе совместных расчетных и экспериментальных исследований. Особое внимание следует уделить определению гидравлических потерь, которые в физических опытах оцениваются неточно (потери полного давления заменяются перепадом статического давления).

2.2. Несмотря на предложенные карты режимов, проведенные замеры (в основном интегральных характеристик), базы данных по ним не только не сформированы, но и носят крайне обрывочный характер.

Следовательно, необходимо разработать структуру и наполнить базы данных по типовым луночным рельефам. Это многопараметрическая проблема, решение которой требует очень широкого численного эксперимента. Физический опыт призван верифицировать результаты расчетов.

2.3. В рассматриваемой проблематике подчас смешиваются стационарные, турбулентные и неста-

ционарные ламинарные трактовки наблюдаемых вихревых процессов. Следует не только их четко разделить, но и показать различие стационарных и нестационарных турбулентных режимов конвективного теплообмена около луночных рельефов.

Вывод: требуется исследовать влияние возмущений на отрывное обтекание рельефов с лунками. Особое внимание важно уделить циклическим гидродинамическим и теплообменным процессам.

2.4. Несмотря на то, что подход на основе RANS (уравнений Рейнольдса) имеет еще ряд нерешенных задач, прежде всего в сфере выбора и модификаций полумпирических моделей турбулентности, для моделирования нестационарных турбулентных режимов течения и теплообмена целесообразно применение LES/DES, а также URANS с пониженной вихревой вязкостью.

Поэтому целесообразно модифицировать основанный на МВТ моделирующий комплекс (в однопроцессорном варианте для персональных компьютеров и в распараллеленном варианте для многопроцессорных кластеров).

2.5. Явно не хватает тонких современных измерительных методов экспериментальных исследований типа ЛДИС, термокрасок, хотя следует признать, что подчас тяжело выполнить замеры параметров в очень тонких пристеночных слоях мелко-масштабных опытных образцов.

Крайне важно применить комплексно современные методы экспериментальной диагностики в сочетании с численным моделированием.

2.6. Пока исследования обтекания луночных рельефов ограничиваются рассмотрением в основном сферических лунок и в качестве рабочей среды воздуха. Практически отсутствует понимание теплогидравлического проектирования рельефов с позиций генерации желательных для обеспечения положительных эффектов вихревых структур. Последнее касается как форм лунок, так и их расположения в ансамблях.

Таким образом, необходимо предложить рациональные по теплогидравлической эффективности и теплоотводу луночные рельефы с оригинальными траншейными лунками, а также рассмотреть рабочие среды с переменными физическими свойствами и сопряженные постановки задач с учетом свойств материалов стенок с различной теплопроводностью.

2.7. Важно констатировать, что пока отсутствует критериальный подход к выбору рациональных луночных рельефов по наибольшей теплогидравлической эффективности и теплоотводу. Целесообразно развить обобщенный подход к их построению на базе термодинамики (на основе оценки энтропии).

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛИ

Вихревой теплообмен при турбулентном движении вязкой несжимаемой жидкости вдоль стенки с лунками, в том числе в узком канале, описывается системой уравнений Навье—Стокса и энергии. Ис-

ходная система уравнений решается с помощью МВТ, реализованной в пакете VP2/3 [4].

В качестве характерных параметров задаются диаметр сферической лунки, максимальная (или среднemasсовая) скорость потока и температура ($T=293\text{K}$) во входном сечении.

4. ПЕРЕСТРОЙКА ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ ЛАМИНАРНОГО ОБТЕКАНИЯ ЛУНКИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ТЕПЛООБМЕН

Визуализация течения около лунки умеренной глубины (0.1) на плоской стенке в гидротрубе при $Re=9400$ [2] показала, что вихревая структура в ближнем следе асимметричная (рис.1,а). Ранее выполненные численные исследования [5,6] продемонстрировали симметричный характер ламинарного обтекания глубокой ($\Delta=0.22$) сферической лунки при числах Re , не превышающих 2.5×10^3 , в то время как бифуркация картины течения отмечена при турбулентном режиме ($Re=2.35 \times 10^4$) [7].

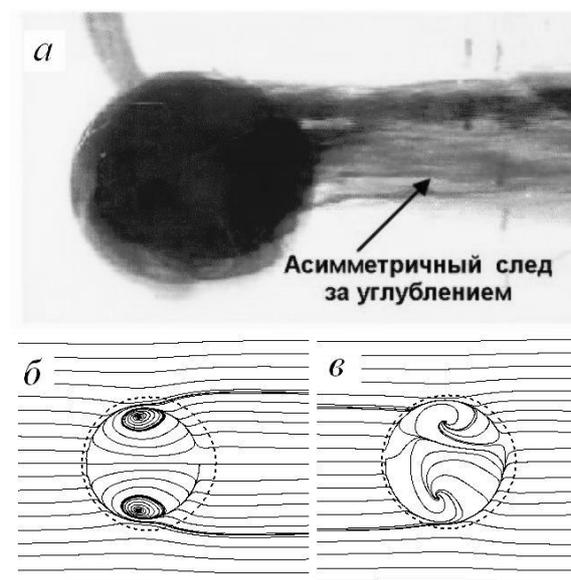


Рис. 1. Визуализация течения вблизи сферической лунки ($\Delta=0.1$) в гидротрубе при $Re=9400$ [2] (а) и рассчитанные картины растекания жидкости по стенке с такой же лункой при $Re=4000$ (б) и 9400 (в). Края лунки показаны штриховой линией

Возникло предположение о том, что трансформация вихревой картины обтекания лунки на плоской стенке вызвано влиянием числа Рейнольдса. Для его проверки в рамках условий эксперимента [2] рассчитано ламинарное течение около лунки при $Re=4000$ и 9400 (рис.1,б, в). Оказалось, что для довольно мелких лунок (Δ порядка 0.1) с острыми кромками при высоких числах Рейнольдса действительно наблюдается перестройка структуры течения с асимметризацией ближнего следа.

Для оценки ее влияния на теплообмен проведен численный эксперимент с периодическим канальным ($H=0.8$) модулем, содержащим две сферические лунки глубиной 0.2 с радиусом скругления кромки 0.25 и шагом между лунками 1.8 (рис. 2).

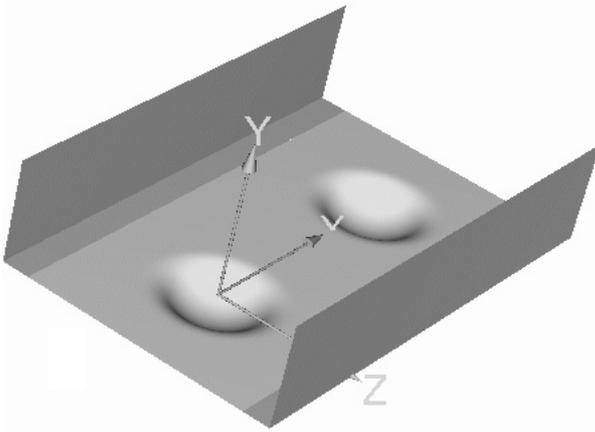
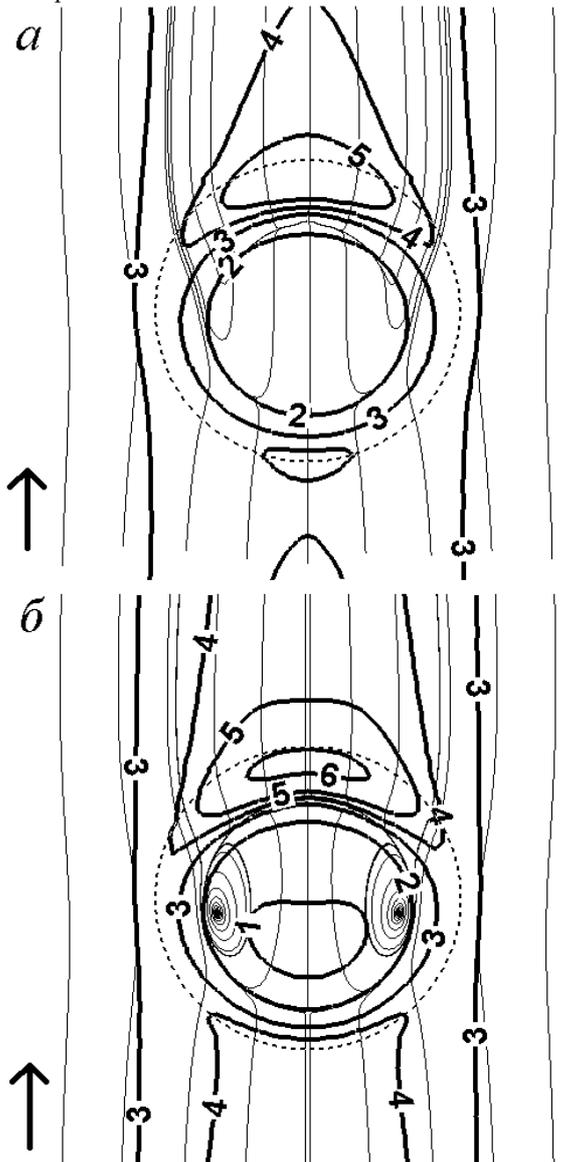


Рис. 2. Периодический модуль с двумя сферическими лунками

При решении используются процедуры коррекции давления и среднемассовой температуры, следуя [4].

Число Рейнольдса изменяется от 400 до 4000. На проточных границах модуля ставятся условия периодичности. На омываемых стенках задается условие прилипания.



Нижняя, нагретая до 373К, и верхняя, поддерживаемая при “комнатной” температуре, стенки полагаются изотермическими, а боковые стенки теплоизолированы. В качестве теплоносителя рассматривается воздух ($Pr=0.72$).

По мере увеличения Re с 400 до 2500 отрывное течение в пределах лунки интенсифицируется, при этом постепенно охлаждается центральная часть лунки и растут тепловые нагрузки в зоне ближнего следа. В пределах Re от 2500 до 4000 происходит перестройка вихревой структуры с переходом от двух симметричных вихревых ячеек к монотонной картине обтекания.

Как следует из рис.3, 4 и табл. 1, трансформация структуры сопровождается резкой интенсификацией течения и теплообмена, причем теплоотвод возрастает более, чем вдвое при существенном отставании роста гидравлических потерь.

На рис.5 и в табл. 2 приведены данные по теплообмену в узком канале с 18 лунками при $Re=10^3$.

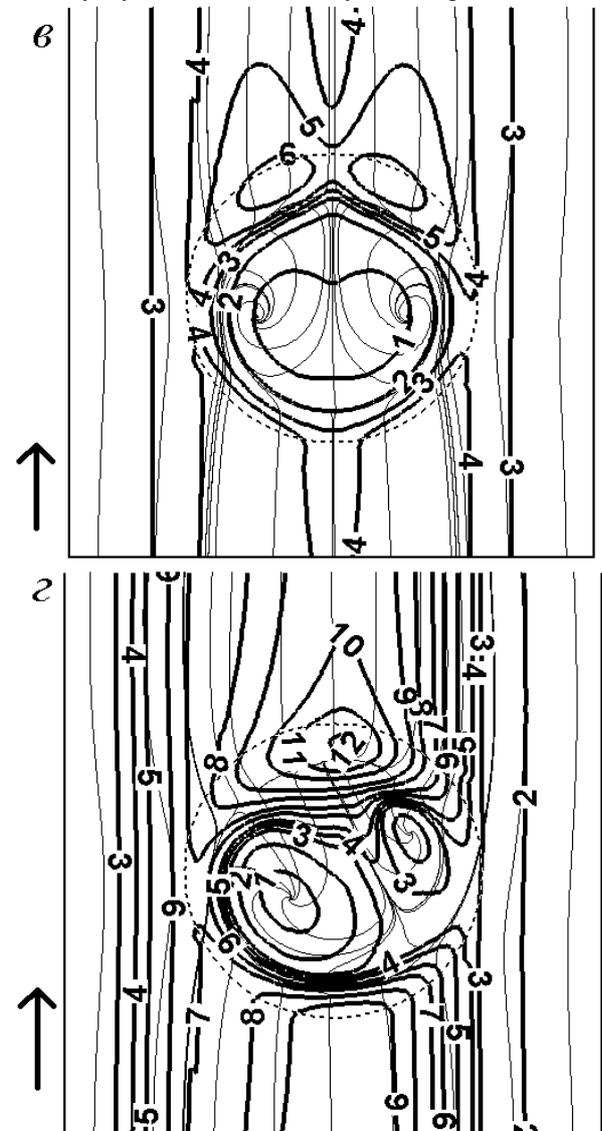


Рис. 3. Картины растекания и поля относительных локальных тепловых нагрузок на стенке канала со сферическими лунками при $Re=400$ (а), 10^3 (б), 2500 (в), 4000 (з): 1 – $Nu/Nu_{pl}=0.2$; 2 – 0.6; 3 – 1; 4 – 1.2; 5 – 1.4; 6 – 1.8; 7 – 2.2; 8 – 3; 9 – 4; 10 – 6; 11 – 8; 12 – 11

Таблица 1. Сравнение относительных суммарных теплоотводов, гидравлических потерь и теплогидравлической эффективности канала с периодической лункой при различных числах Рейнольдса

Re	Nu/Nu _{pl}	ξ/ξ_{pl}	(Nu/Nu _{pl})/(ξ/ξ_{pl})
400	1.000	0.993	1.007
1000	1.024	0.999	1.025
2500	1.053	1.008	1.045
4000	2.147	1.232	1.743

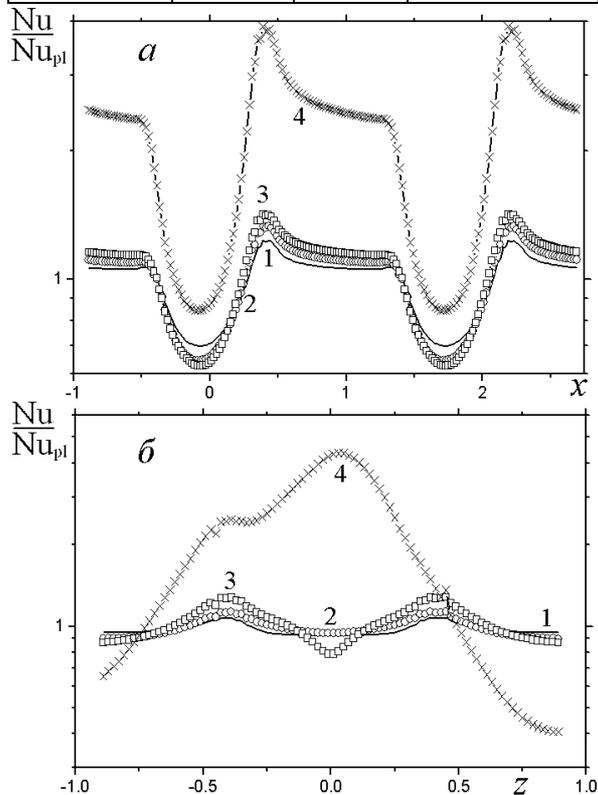


Рис. 4. Осредненные по полосе с лунками относительные тепловые нагрузки в продольном (а) и поперечном (б) направлениях для сферических лунок при различных Re: 1 – Re = 400; 2 – 1000; 3 – 2500; 4 – 4000

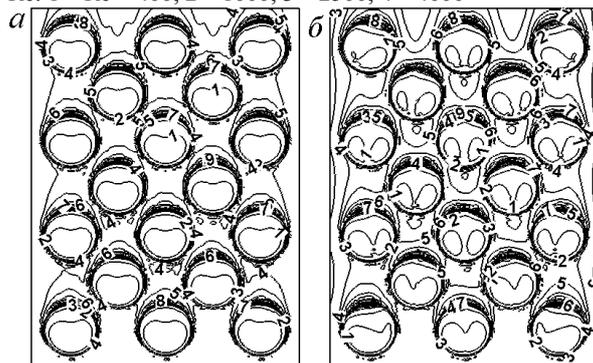


Рис. 5. Сравнение картин растекания и полей относительных тепловых нагрузок в канале с 18-ю лунками в пакете Лигнани ($\gamma=0.6$; $\Delta=0.28$) при $H=1$ (а) и 0.3 (б)

Таблица 2. Сравнение относительных суммарных теплоотводов, гидравлических потерь и теплогидравлической эффективности канала с 18 лунками при различных высотах H для $Re=10^3$

H	Nu/Nu _{pl}	ξ/ξ_{pl}	(Nu/Nu _{pl})/(ξ/ξ_{pl})
1	1.001	0.973	1.034
0.3	1.094	0.852	1.284
0.2	1.025	0.818	1.254

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткий анализ состояния проблематики смерчевой интенсификации теплообмена показал широкие перспективы ее дальнейшего развития.

Одно из интересных направлений связано с анализом перестройки течения в сферических лунках от двух симметричных вихревых ячеек к монотерчевой картине. Показано, в ламинарном режиме она происходит при высоких Re в мелких лунках. Уменьшение высоты канала с пакетом лунок не столько повышает теплоотвод, сколько уменьшает относительные гидравлические потери.

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 – высота канала;
- Δ, r – глубина, радиус скругления сферических лунок;
- γ – плотность пакета лунок;
- Re, Pr, Nu – числа Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта;
- T – температура;
- ξ – коэффициент гидравлических потерь;
- ТГЭ = $(Nu/Nu_{pl})/(\xi/\xi_{pl})$ – теплогидравлическая эффективность.
- Индексы:
 - pl – параметры на плоской стенке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щукин 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. 143 с.
2. **Халатов А.А.** Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). Киев: ИТГФ, 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.: Издательство МЭИ, 2005. 84с.
4. **Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб** / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. СПб.: Судостроение, 2005. 398с.
5. **Идентификация самоорганизующихся струйно-вихревых структур при численном моделировании ламинарного течения и теплообмена в окрестности несимметричной уединенной лунки** / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, А.Е. Усачов, Д.П. Фролов // Энергетика. 1999. №2. С.126-136.
6. **Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учетом ее асимметрии** / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов и др. // ИФЖ. 2001. Т.74. №2. С.62-67.
7. **Бифуркация вихревого турбулентного течения и интенсификация теплообмена в лунке** / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов, А.Е. Усачов // Доклады РАН. 2000. Т.373. №5. С.615-617.