

М. А. Готовский, С. Л. Деменок, В. В. Медведев, С. М. Сивуха

ТЕПЛОТДАЧА И СОПРОТИВЛЕНИЕ КАНАЛОВ С ОЛУНЕННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ



УДК 532.546:536.24
ББК 30.124:31.31
Т34

Рецензенты:

доктор технический наук, профессор Судаков А.В.
доктор технический наук, профессор Суслов В.А.

Готовский М.А., Деменок С.Л., Медведев В.В., Сивуха С.М.

Т34 Теплоотдача и сопротивление каналов с олуненными поверхностями: монография. – СПб.: Страта, 2016. – 210 с.

ISBN 978-5-906150-59-2

В монографии рассмотрены вопросы, связанные с изучением теплоотдачи и сопротивления в каналах теплообменных и технологических устройств и аппаратов. Приведены сведения о влиянии высоких чисел Прандтля, наличия отложений, двухфазности потоков.

Предназначена для специалистов, занимающихся решением теоретических и прикладных задач по гидродинамике, тепло- и массообмену.

Ил. 132. Табл. 9. Библиогр.: 96 назв.

УДК 532.546:536.24
ББК 30.124:31.31

© М.А.Готовский, 2016

© С.Л.Деменок, 2016

© В.В.Медведев, 2016

© С.М.Сивуха, 2016

ISBN 978-5-906150-59-2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	12
1. ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ARPD	15
1.1. Трубы с поперечной кольцевой накаткой	16
1.2. Интенсифицирующие поверхности, формованные сферическими лунками	19
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ARPD ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ	25
2.1. Каналы на основе труб с кольцевой накаткой	25
2.2. Цилиндрические каналы с олуенными поверхностями	26
2.2.1. Изготовление олуенных труб	27
2.2.2. Эксперименты ЦКТИ по теплогидравлике кольцевых каналов с олуенной внутренней трубой	31
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОЛУЕННЫХ ПЛОСКИХ КАНАЛОВ (В ТОМ ЧИСЛЕ С НЕСФЕРИЧЕСКИМИ ЛУНКАМИ) ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ	40
3.1. Исследование моделей олуенных каналов для охлаждения мощных электрогенераторов	40
3.1.1. Описание экспериментального стенда.....	43
3.1.2. Описание опытного участка	44
3.1.3. Экспериментальная процедура.....	48
3.2. Исследование конфузورных и дуффузорных олуенных каналов	55
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОЛУЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ГАЗОВЫХ ТУРБИН	65
4.1. Исследование моделей олуенных каналов для охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин.....	65
4.2. Влияние геометрических показателей рельефа из сферических лунок на уровень интенсификации теплообмена	71
4.2.1 Влияние плотности размещения лунок.....	72
4.2.2 Влияние относительной глубины лунок	73
4.2.3 Влияние относительной высоты канала над лунками	74
4.2.4 Влияние схемы размещения (шахматное или коридорное) лунок в регулярных луночных рельефах	75
4.3. Взаимное влияние противоположных трактовых поверхностей целевого канала.....	76

4.3.1 Щелевые каналы с размещением лунок только на одной из поверхностей	76
4.3.2 Щелевые каналы с олуниванием обеих противоположных поверхностей	77
4.4. Зависимости для теплообмена на поверхности регулярных рельефов из сферических углублений в плоском щелевом канале	80
4.5. Исследование роста сопротивления на поверхности с регулярным рельефом из сферических углублений в плоском щелевом канале	81
4.6. Влияние режима течения на зависимости для гидравлического сопротивления	84
5. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ЛУНКАХ	89
6. ИССЛЕДОВАНИЯ ОЛУНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДАМИ CFD	103
6.1. Краткое введение	103
6.2. Постановка задачи	108
6.3. Вычислительные сетки	110
6.4. Результаты вычислительных экспериментов	111
7. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ СРЕД С ВЫСОКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ЛАМИНАРНОГО К ТУРБУЛЕНТНОМУ РЕЖИМУ ТЕЧЕНИЯ	123
8. ПРЕИМУЩЕСТВА КАНАЛОВ С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ПО СРАВНЕНИЮ С ГЛАДКИМИ КАНАЛАМИ И КАНАЛАМИ С КРУПНЫМИ ИНТЕНСИФИКАТОРАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ОТЛОЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОГО ВИДА НА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ	137
9. ВЛИЯНИЕ ОЛУНЕНИЯ НА ТЕПЛОГИДРАВЛИКУ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ ПУЧКОВ ТРУБ	154
10. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ТЕПЛООТДАЧУ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ДЛЯ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ	162
10.1. Интенсификация теплоотдачи при поверхностном кипении воды в трубах	163
10.2. Интенсификация закризисного теплообмена	165
10.2.1 Обратный кольцевой режим	166
10.2.2 Интенсификация теплоотдачи в закризисной зоне с помощью олунивания	167
10.3. Интенсификация теплообмена при конденсации	178
11. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОЛУНЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕПЛООБМЕНА	184

11.1. Некоторые опытные данные по исследованию теплогидравлики каналов с несферическими лунками	184
11.2. Использование олунения непрерывных ребер для повышения эффективности оребрения	188
11.3. Некоторые сведения о применении луночных поверхностей в промышленности	193
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	198
Список литературы.....	200

ВЕДЕНИЕ

Предварительно монографию намечалось посвятить теплоотдаче и гидродинамике элементов теплообменного оборудования, интенсифицированных путем нанесения на поверхности теплообмена сферических лунок. Однако, для большей информативности изложения, в ней будут рассматриваться и другие типы поверхностей, удовлетворяющих определению, предложенному одним из авторов – искусственная шероховатость, созданная путем деформации стенки давлением (в английском варианте *artificial roughness created by wall pressure deformation – ARPD*). В эту группу входят, кроме олуненных, также поверхности с кольцевой и спиральной накаткой, которые достаточно широко применяются на практике. Принципиальное отличие этих поверхностей от известных ранее, на которых осуществлялась пристенная интенсификация теплообмена, состояло в том, что интенсифицирующие элементы изготавливались путем деформирования самой теплообменной поверхности. Такой метод изготовления приводит к образованию на внутренней поверхности канала, например, трубы, ответного рельефа, который также является интенсифицирующим. Например, при использовании кольцевой накатки на внутренней поверхности трубы появляется система кольцевых выступов. При использовании спиральной накатки на внутренней поверхности трубы появляется система, напоминающая спиральные вставки. Разница, однако, состоит в том, что в отличие от системы диафрагм или проволочной навивки эти рельефы обеспечивают плавный переход к несущей поверхности. Наконец, при использовании системы сферических лунок внутренний рельеф представляет собой регулярную систему сферических выступов на внутренней поверхности трубы, также имеющую плавный переход к несущей поверхности.

Такой подход позволил использовать опытные данные для всех перечисленных поверхностей при сравнительном анализе эффективности ARPD – поверхностей и гладких поверхностей в условиях образования осадений, и при кипении, и при конденсации. Это обеспечивает двустороннюю интенсификацию теплообмена, делает такие трубы еще более ценными для теплообменников.

Но необходимо заметить, что экспериментальные поверхности для исследования теплоотдачи, могут изготавливаться другими способами, так что внутренняя поверхность может оставаться недеформированной. Так, например, можно использовать специальные фрезы, которые создают рельеф на наружной поверхности, оставляя внутреннюю гладкой.

Основной целью этой монографии было обрисовать спектр возможного применения интенсифицирующих поверхностей с ARPD как для повышения эффективности теплообменных аппаратов, так и для снижения уровня отложений. Кроме того, в книге показано, как методы CFD (Computational Fluid Dynamics) позволяют упростить поиск оптимальных реализаций указанного типа поверхностей. Авторы рассчитывают на то, что приведенные в книге материалы будут способствовать росту интереса к использованию на практике описанных здесь рельефов.

На наш взгляд, краткое изложение истории появления этих поверхностей в теплообменниках также должно оказаться интересным.

INTRODUCTION

Preliminary monograph was planned to devote heat transfer and hydrodynamics of heat transfer equipment elements, enhanced by the relief formation of spherical and non-spherical dimples on heat transfer surface (dimpling). However, for greater information content of the presentation, it will be treated, and other types of surfaces that satisfy the definition proposed by one of the authors - an artificial roughness created by the deformation of the pressure wall (ARPD). This group includes in addition to dimpled surfaces also surfaces with annular and helical rolling which are used fairly often in practice. The principal difference of these surfaces of the known before, which was performed for near-wall heat transfer enhancement, lay in the fact that intensify the elements were produced by deformation of heat exchange surface itself.

Such a manufacturing method results in the formation on the inner surface of the channel, for example, pipes, response relief, which is also enhancing. For example, when using the annular rolling system of annular projections appears on the inner surface of the pipe. When using helical rolling system occurs resembling spiral coil insert in the tube.

The difference, however, is that unlike the system of diaphragms or wire winding these reliefs provide a smooth transition to the bearing surface. Finally, when using spherical dimples relief on the outer surface system of spherical protrusions arises on the inner surface of the tube ,which also provide a smooth transition to the bearing surface.

This approach allowed us to use the experimental data for all of these surfaces in a comparative analysis of the effectiveness of ARPD-surfaces and smooth surfaces in the conditions of formation of depositions, and boiling and condensation. It provides two-way enhancement of heat transfer, making such tubes even more valuable to the heat exchangers.

1. ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ARPD

Интересно отметить, что все поверхности рассматриваемого типа появились в Советском Союзе. Но перед тем как изложить историю их появления, мы должны сказать несколько слов об эффективности интенсифицированных поверхностей. Этот вопрос будет более подробно рассмотрен ниже, однако без некоторой краткой информации дальнейшее изложение будет недостаточно ясным. В теории тепло-гидравлических процессов вводится понятие аналогии Рейнольдса, которая отражает тот факт, что процессы переноса теплоты и импульса происходят при турбулентном течении подобным образом.

Формально указанная аналогия для теплопередающих каналов при числе Прандтля (Pr) теплоносителя равного единице выражается следующим равенством:

$$St = \zeta/8, \quad (1.1)$$

где $St = Nu/(Re Pr)$, Re – число Рейнольдса, Nu – число Нуссельта, а ζ – коэффициент гидравлического сопротивления. Для интенсифицированных каналов аналогия Рейнольдса не выполняется и, как правило, нарушается в пользу коэффициента сопротивления. То есть последний растет значительно быстрее, чем коэффициент теплоотдачи.

Если мы сравниваем гладкий (обозначаемый ниже индексом «0») и интенсифицированный канал, то можно использовать отношения Nu/Nu_0 и ζ/ζ_0 . В такой системе координат аналогия Рейнольдса соответствует биссектрисе угла между координатными линиями. Такая координатная система показана на рис.1.1. Если мы проводим серию экспериментов с различными интенсифицированными каналами с замером теплоотдачи и сопротивления, то экспериментальные точки с ростом скорости (или числа Рейнольдса) оказываются, как правило, ниже биссектрисы. Причем это снижение получается тем более сильным, чем более высокой степени интенсификации мы пытаемся добиться. В англоязычной литературе для этого роста потерь используют термин «плата» (penalty).

Качественно эта картина изображена на рис.1.1. Аномально эффективные методы интенсификации должны давать соотношение между приростом коэффициента теплоотдачи и коэффициента сопротивления равные или превышающие величину, соответствующую аналогии Рейнольдса (то есть $Nu/Nu_0 \geq \zeta/\zeta_0$).

Наличие таких методов позволило бы существенно улучшить массогабаритные характеристики теплообменного оборудования и понизить его стоимость.

Nu/Nu_0

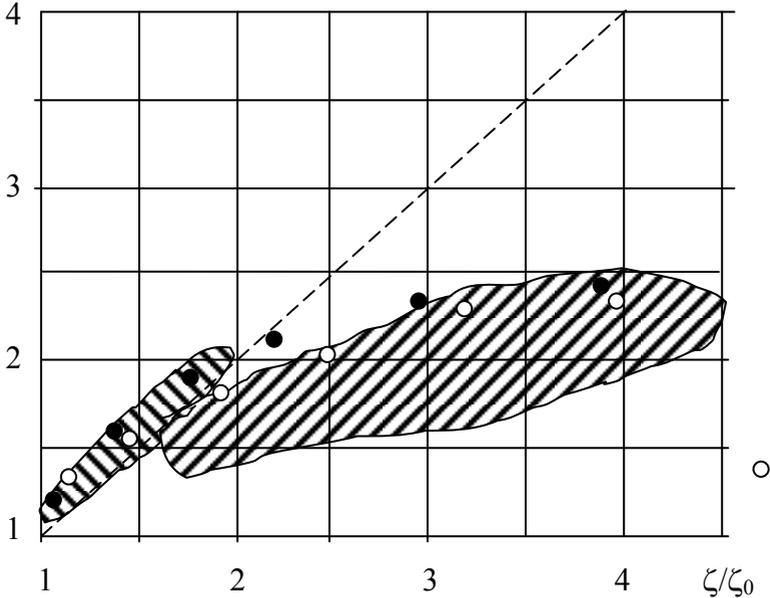


Рис.1.1. Качественное сопоставление относительного роста теплоотдачи и сопротивления при переходе от гладкого к интенсифицированному каналу.

 – аномально эффективный метод относительной интенсификации

 – обычные методы интенсификации

1.1. Трубы с поперечной кольцевой накаткой

Первая попытка объявить о создании аномально эффективного метода интенсификации относится к 60-м годам прошлого века и принадлежит группе ученых МАИ, возглавлявшейся Э.К. Калининым и Г.А. Дрейцером. Это использование труб с поперечной кольцевой накаткой. Схема указанного способа интенсификации изображена на рис.1.2.

Накатка характеризуется двумя параметрами – глубиной δ и шагом S . При описании полученных данных авторами также вводится величина $d = D - 2\delta$.

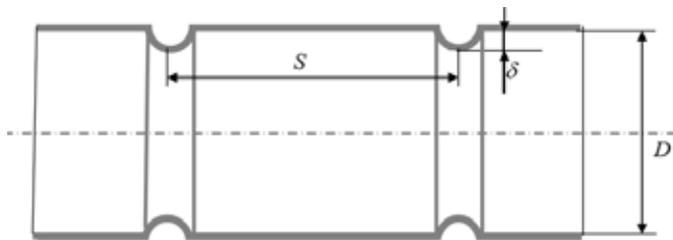


Рис.1.2. Труба с кольцевой поперечной накаткой

Часть приведенных авторами работы [1] опытных данных по исследованию теплогидравлических характеристик труб с кольцевой накаткой представлена в табл.1.1 и 1.2. В этих таблицах введем обозначения $A = Nu/Nu_0$ и $B = \zeta/\zeta_0$.

Таблица 1.1

Значения A и B при различных d/D и Re ($S/D = 0,5$)

Re	10^4		$2 \cdot 10^4$		$4 \cdot 10^4$		10^5		$2 \cdot 10^5$		$4 \cdot 10^5$	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
d/D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,99	1,23	1,34	1,28	1,12	1,22	1,16	1,25	1,20	1,28	1,20	1,32	1,08
0,98	1,50	1,68	1,52	1,40	1,45	1,40	1,48	1,48	1,55	1,45	1,61	1,37
0,97	1,70	2,04	1,75	1,70	1,65	1,80	1,71	1,84	1,80	1,88	1,88	1,73
0,96	1,88	2,40	1,92	2,10	1,86	2,30	1,92	2,36	2,04	2,50	2,10	2,25
0,95	2,05	2,90	2,08	2,90	2,06	3,04	2,12	3,05	2,21	3,22	2,28	2,97
0,94	2,20	3,45	2,26	3,60	2,24	3,80	2,22	3,90	2,38	4,08	2,45	3,81
0,93	2,32	4,00	2,40	4,50	2,38	4,60	2,37	5,00	2,50	4,92	2,61	4,80
0,92	2,40	4,70	2,54	5,30	2,50	5,45	2,49	6,16	2,61	5,90	2,74	5,78
0,90	2,54	6,30	2,69	7,20	2,68	7,28	2,67	8,56	2,77	8,13	2,92	8,30
0,89	2,58	7,30	2,70	8,20	2,70	8,50	2,70	9,90	2,81	9,65	2,98	9,80
0,88	-	8,50	2,72	9,23	-	10,10	-	11,50	2,85	10,50	3,00	11,60

На рис.1.1 приведены несколько точек из табл.1.1 для чисел Re $2 \cdot 10^5$ (светлые точки) и $4 \cdot 10^5$ (черные точки).

Эти точки выделены в таблице с помощью прямоугольника. Как можно видеть из рис.1.1, точки, относящиеся к малым глубинам накатки, попадают в зону аномально высокой относительной интенсификации. Аналогичный вывод можно сделать при анализе данных табл.1.2.

Основные работы по исследованию описанного метода интенсификации теплообмена проводились в 1957-1964 гг. Дальнейшие работы в этом направлении были связаны с внедрением метода и исследования возможностей его использования для более сложных процессов и, в частности для двухфазных потоков.

Таблица 1.2

Значения А и В при различных d/D и Re ($S/D = 1,0$)

Re	10^4		$2 \cdot 10^4$		$4 \cdot 10^4$		10^5		$2 \cdot 10^5$		$4 \cdot 10^5$	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,99	1,13	1,05	1,13	1,07	1,15	1,08	1,15	1,11	1,16	1,07	1,12	1,08
0,98	1,27	1,10	1,25	1,15	1,30	1,16	1,34	1,27	1,40	1,28	1,28	1,20
0,97	1,41	1,15	1,40	1,20	1,45	1,27	1,54	1,45	1,55	1,53	1,43	1,40
0,96	1,57	1,25	1,55	1,30	1,61	1,50	1,70	1,72	1,70	1,85	1,60	1,65
0,95	1,69	1,40	1,65	1,46	1,73	1,82	1,85	2,02	1,82	2,20	1,75	1,95
0,94	1,81	1,80	1,82	1,72	1,86	2,30	1,97	2,39	1,96	2,61	1,90	2,40
0,93	1,93	2,44	1,95	2,08	1,98	2,94	2,05	2,85	2,08	3,07	2,08	2,90
0,92	2,06	3,05	2,09	2,80	2,13	3,50	2,21	3,45	2,20	3,52	2,21	3,40
0,91	2,17	3,72	2,21	3,76	2,23	4,30	2,32	4,38	2,32	4,04	2,35	4,18
0,90	2,27	4,52	2,38	4,80	2,35	5,50	2,41	5,60	2,40	4,76	2,47	5,08
0,89	2,38	5,62	2,48	5,90	2,45	6,90	2,52	6,80	2,50	5,80	2,57	6,20
0,88	2,48	7,00	2,60	7,30	2,58	8,25	2,60	8,30	2,60	7,20	2,66	7,45
0,87	2,54	10,00	2,70	9,95	2,66	10,00	2,67	10,00	2,68	9,50	2,74	9,00
0,88	2,62	-	2,81	-	2,75	-	2,72	-	2,75	-	2,80	-

Полученные результаты позволили авторам работы [1] подать в 1976 году заявку, а в 1981 году получить свидетельство об открытии, определяемое следующей формулой: «Установлена неизвестная ранее закономерность изменения теплоотдачи на стенках каналов с дискретной турбулизацией потока при вынужденной конвекции, заключающаяся в том, что при определенном диапазоне соотношений размеров и расположений турбулизаторов рост теплоотдачи больше роста гидравлического сопротивления по сравнению с аналогичным гладким каналом».

На основании того, мы видели выше можно сказать, что диапазон, о котором идет речь, достаточно узок и, что самое главное, он касается лишь не слишком высоких значений относительной интенсификации теплообмена. Сами авторы этого метода, определяя оптимальные параметры накатки, пришли к оптимальной относительной глубине $d/D = 0,92$. Если взглянуть на табл. 1.1 и 1.2, то мы уви-

дим, что при этом значении d/D мы уже далеко уходим от области, в которой заявленный эффект имеет место. Тем не менее, следует признать, что рассмотренный метод интенсификации имеет достаточно высокую эффективность.

Через некоторое время появились интенсифицированные трубы с винтовой накаткой. В них наряду с вихреобразованием на элементах накатки имела место и закрутка потока, которая тоже должна была вносить вклад в интенсификацию. Кроме того, их изготовление не требовало дискретной подачи инструмента или оснастки при формировании поверхности.

Но наиболее значимым шагом в развитии ARPD явилось появление олуненных поверхностей.

1.2. Интенсифицирующие поверхности, формованные сферическими лунками

Насколько известно авторам идея использовать систему мелких сферических лунок для интенсификации теплообмена была предложена группой специалистов ИАЭ им. И.В. Курчатова, возглавляемой Г.И. Кикнадзе. Исходной внешней информацией, давшей толчок к исследованию указанного метода, явились наблюдения зарождения торнадо в выемках на поверхности земли и данные исследования аэродинамики мячей для игры в гольф, представленные в работе [2]. Но прежде, чем продолжить изложение результатов этой, а также более поздних работ по изучению аэродинамики олуненных сфер, посвятим несколько слов истории появления современных мячей для гольфа.

Гольф берет свое начало от шотландской пастушеской игры «гоуф» (по-шотландски «гоуф» означает «бить»). На это, кроме названия, указывает и специфика поля для гольфа. Поле усеяно многочисленными неровностями, искусственными прудами и песчаными «ловушками» – так выглядели узкие прибрежные равнины горной Шотландии. Мячом для игры в «гоуф» служил скрепленный смолой клоч овечьей шерсти. Это происходило уже в 16 веке, но началось, конечно, гораздо раньше.

В дальнейшем форма, размер и материал для изготовления мяча менялись многократно. Мы, однако, пропустим длинную историю этой эволюции и вернемся к эволюции мяча лишь к середине 19 ве-

ка, когда была открыта гуттаперча. Гуттаперча – эластичное вещество, по составу сходное с каучуком, добывается из растений, произрастающих в Юго-Восточной Азии. Изготавливать мячи из гуттаперчи оказалось легко и недорого. Комок гуттаперчевой смолы размягчали в теплой воде, скатывали из него шарик и оставляли застывать на холоде. Впервые за всю историю игры, за которой к тому времени уже закрепилось название «гольф», игрокам стали доступны мячи идеально круглой формы. И тут случился неожиданный конфуз – оказалось, что идеально круглый мяч летит совсем не так точно и далеко, как рассчитывали игроки и производители.

Вскоре гольфисты заметили, что от ударов клюшками и падения на грунт на мячиках появляются выбоины – лунки, и такие «ушибные» мячики неожиданно ведут себя лучше идеально круглых, летят дальше и точнее. И тогда игроки стали специально «портить» мячики. Идею подхватили производители, и вскоре мячик для гольфа стал приобретать знакомый нам вид шара, равномерно покрытого лунками (рис.1.3). Причины данного явления, обсуждаются до настоящего времени. Оболочка эта и удерживает мяч на постоянном «летном курсе». Кроме того, в силу аэродинамических свойств, мяч с лунками имеет тенденцию к вращению, а полет вращающегося тела всегда стабильнее, точнее и дальше, подобно снаряду, выпущенному из нарезного ствола.



Рис.1.3. «Олуненный» мяч для гольфа

В конце девятнадцатого века началось массовое промышленное производство гуттаперчевых мячей («гутти», как ласково прозвали их англичане) современной «лунчатой» формы, а в 1889 году свет увидел первый мяч из каучука. Каучуковый мяч при сходной массе обладал гораздо большей пружинистостью, и потому, при той же силе удара, летел значительно дальше «гутти».

Еще почти сто лет продолжались эксперименты с конструкцией мячиков и материалами для их изготовления. Производились мячики с ядром из металла, дерева, ртути, титана, а также с камерой, с закачаным под давлением воздухом. Современная двухкомпонентная конструкция мяча была разработана в 1972 году, и остается практически неизменной по сей день. Профессиональная ассоциация гольфа (PGA) утвердила окончательно современную форму мяча и размер 1,7 дюйма (4,8 см). Основой для этих параметров стал американский стандарт мячиков для гольфа.

После этого небольшого экскурса вернемся к описанию результатов более «свежих» исследований аэродинамики олуненных шаров. В работе [2] представлены исследования аэродинамического сопротивления мячей для игры в гольф при нанесении на их поверхность системы сферических лунок (см. рис.1.3). Из результатов, представленных на рис.1.4, видно, как существенно падает коэффициент сопротивления шаров, покрытых сферическими лунками по сравнению с гладкими шарами.

Необходимо заметить, что явление кризиса сопротивления шара, с ростом числа Рейнольдса хорошо известно. Оно связано с турбулизацией пограничного слоя, что приводит к сдвигу точки его отрыва вниз по потоку. Граница возникновения этого эффекта по числу Re зависит от величины шероховатости поверхности шара. Не секрет применение искусственной шероховатости, выполненной, например, из проволочного кольца, надетого на шар со стороны натекания потока для провоцирования кризиса сопротивления. Но данные для олуненного шара имеют следующую особенность. После достижения значения числа Re , соответствующего кризису сопротивления коэффициент сопротивления падает примерно в 2 раза и, в отличие от шероховатых шаров, не возрастает снова с дальнейшим ростом числа Re . Г.И. Кикнадзе использовал этот результат как подтверждения того факта, что на олуненной поверхности возникает особое течение,

отличное от обычно рассматриваемых турбулентных течений. Следует отметить, что олунение поверхности может выполняться не только на сферических поверхностях, но и, например, на наружных поверхностях компрессорных лопаток [3].

Об истории появления лунок уже говорилось выше. Прежде всего, изготовители мячей заметили, что при этом легче придать мячу устойчивое направление. Однако уже вскоре было обнаружено, что при этом достигается и существенно большая дальность полета мяча. В частности, была выбрана глубина впадин (лунок) 0,25 мм.



Рис.1.4. Зависимость коэффициента сопротивления для шаров с гладкой и шероховатой поверхностью и олуненного мяча для игры в гольф: ○ – мяч с лунками $h/d = 0,009$; 2, 3, 4 – шары с относительной шероховатостью h/d 0,0015, 0,005 и 0,0125 соответственно h – размер шероховатости или глубина лунки, d – диаметр шара [4]

На рис.1.5 показана зависимость дальности полета мяча для гольфа от глубины лунок. Учитывая, что стандартный диаметр мяча равен 42,7 мм, можно видеть, что величина относительной глубины лунок 0,009 (абсолютная глубина 0,25 мм) соответствует максимуму кривой на рис.1.5. Таким образом, можно говорить о наличии оптимальной глубины с точки зрения снижения сопротивления. Она обеспечивает дальность полета близкую к максимальной. Таким образом, первично обнаруженный эффект связан лишь со снижением сопротивления.

Сравнительно недавно были проведены новые опыты по исследованию аэродинамики шаров с лунками с использованием новых методов эксперимента и, в частности, метод цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry – PIV), который позволяет наглядно показать распределение скорости. Кроме того, в этих исследованиях изучалось также влияние вращения, которое, как уже упоминалось выше, оказывает большое влияние на устойчивость полета шара.

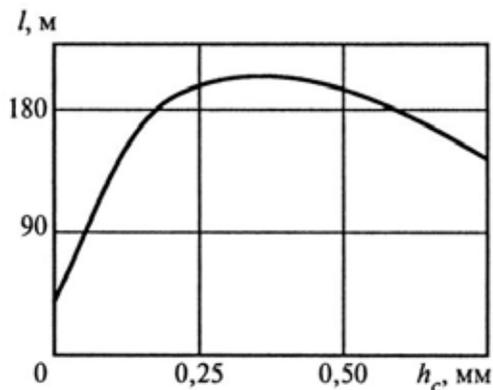


Рис.1.5. Зависимость дальности полета мяча для гольфа от глубины лунок [4]

В работе [5] рассмотрена различная плотность олунения. При максимальной плотности олунения кризис сопротивления возникает в интервале $Re = 50-100 \cdot 10^3$ (рис.1.6), а для глубоких лунок даже при $Re \sim 30000$. Обратим внимание на то, что для гладкого шара кризис сопротивления происходит при $Re \sim 300000$.

Всплеск интереса к олунению поверхностей, в 1980 годах, относится к появлению данных о возможности использовать такие поверхности также для интенсификации теплоотдачи прежде всего в каналах. Инициатором этих работ явился Г.И. Кикнадзе, который на основе визуальных наблюдений образования торнадо и поведения потока в лунках впервые обратил внимание на подобие этих явлений самоорганизации. Отсюда появился термин TLJT (tornado-like jet technology) [4]. Практическим толчком к развитию исследований в этой области явилось с одной стороны получение первых многообещающих результатов в области теплообмена, а с другой стороны –

внешняя простота задачи исследования одиночной сферической лунки, учитывая быстрый прогресс в области вычислительной гидрогазодинамики (CFD).

Представленные на начальной фазе работы показали неоднозначные результаты. Однако, постепенно появилась некоторая ясность, которая позволяет более или менее объективно оценить тот большой объем экспериментального и теоретического материала, который появился в течение последних тридцати лет.

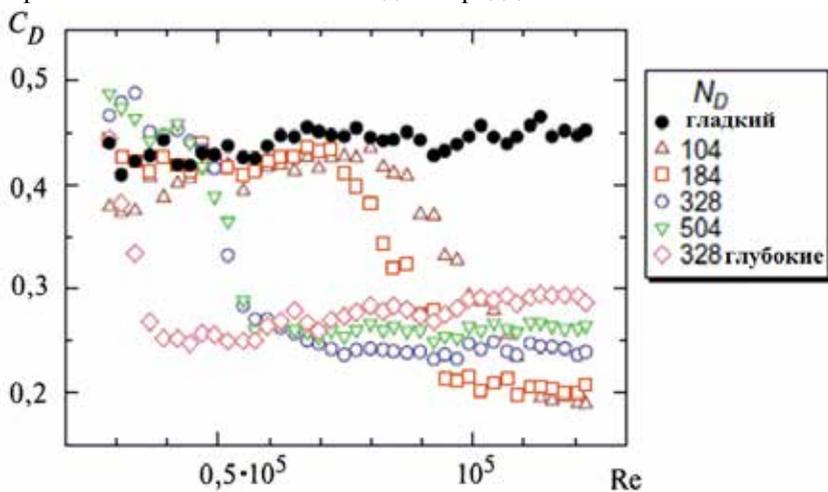


Рис.1.6. Результаты исследования коэффициента сопротивления олуненного шара в работе [5]: N_D – количество лунок

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ПОВЕРХНОСТЯМИ ARPD ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ

В настоящем разделе будут рассматриваться лишь результаты исследований, проведенных в условиях развитого турбулентного течения. Выделение этой области связано с тем обстоятельством, что для небольших чисел Re необходимо учитывать особенности, связанные со снижением критического числа Рейнольдса и влиянием числа Прандтля. Поэтому этот случай будет рассмотренодельно.

2.1. Каналы на основе труб с кольцевой накаткой

Мы начинаем изложение с этого типа интенсификаторов по той причине, что для них имеется максимальный объем экспериментального материала. Это связано с тем обстоятельством, что исследованиями занимался коллектив МАИ, руководимый группой специалистов высокого класса, обладавший большими возможностями. С другой стороны, как мы увидим ниже, многие эффекты для поверхностей с кольцевой накаткой и олуненных поверхностей качественно близки между собой.

Материал, поясняющий конструкции этих труб, был приведен в главе 1.

Выше приводились таблицы, в одной из которых выделена зона превышения эффекта роста теплоотдачи над эффектом роста коэффициента сопротивления. Она оказывается достаточно узкой и реализуется лишь при числах Рейнольдса, превышающих 10^5 . Отметим, что изложенный здесь материал, как и табл. 1.1, 1.2, в основном заимствован из монографии [1]. При анализе указанных таблиц можно сделать вывод о том, что попытки увеличить относительный рост теплоотдачи по сравнению с гладким каналом приводят к все большему его отставанию от относительного роста коэффициента сопротивления. Подробно далее рассматривать эти данные, относящиеся к конвективному теплообмену, здесь не имеет смысла. Поэтому перейдем к характерным свойствам поверхностей с искусственной ше-

роховатостью, которые проявляются в процессах кипения и конденсации, а также при образовании отложений на интенсифицированных поверхностях.

Но предварительно отметим, что основная идея этой работы, как и большинства других работ по интенсификации теплообмена состоит в использовании эффектов вихреобразования, являющихся результатом появления отрывных зон. В зависимости от конкретной формы интенсифицированной поверхности эти процессы могут протекать с разной степенью сложности. Отклонения от аналогии Рейнольдса зависят от роли диссипативных процессов в формировании этих вихревых движений. Это замечание необходимо было сделать, поскольку наиболее глубоко процессы формирования и эволюции вихрей были исследованы именно в рамках описания гидродинамики лунок и олуненных поверхностей.

При этом надо отметить, что, поскольку трубы с кольцевой накаткой предлагалось использовать для теплообменников, то было необходимо определить их характеристики и для наружного обтекания. Но здесь авторы метода не получили столь хороших результатов. Интенсификация теплоотдачи при продольном обтекании пучков таких труб оказалась весьма слабой [1]. Исключение составило их использование для увеличения теплоотдачи при конденсации на наружной поверхности. Однако, речь об этом пойдет ниже. В этой главе рассматривается лишь однофазный поток.

2.2. Цилиндрические каналы с олуненными поверхностями

Предварительно необходимо заметить, что исследования цилиндрических каналов с олуненными стенками сводились в основном к кольцевым каналам с обогреваемой внутренней олуненной трубкой. Причина такой ситуации была чисто практического свойства. Формирование олуненной поверхности металлических трубок осуществлялась путем выдавливания лунок на их наружной поверхности. Поэтому олуненная поверхность простого канала могла оказаться лишь внутренней поверхностью кольцевого. А на внутренней поверхности трубки могла оказаться только система виступов. Этой проблемы не было у создателей труб с цилиндрической накаткой, поскольку для них именно система кольцевых виступов являлась основной интенсифицирующей геометрией.