

**УДК 536.53:533.6**

**РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ В ОДИНОЧНОМ УГЛУБЛЕНИИ, ИМЕЮЩЕМ ФОРМУ  
СФЕРИЧЕСКОГО СЕГМЕНТА**

Халатов А. А. Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины ул.

Желябова 2 а Киев Украина 03057 [khalatov@vortex.org.ua](mailto:khalatov@vortex.org.ua)

Коваленко Г. В. Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины ул.

Желябова 2 а Киев Украина 03057 [kovalenko@vortex.org.ua](mailto:kovalenko@vortex.org.ua)

Терехов В. И. Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук просп. Академика Лаврентьева 1 Новосибирск Российская федерация 630090

[terekhov@itp.nsc.ru](mailto:terekhov@itp.nsc.ru)

По результатам экспериментов определены границы существования режимов обтекания одиночных углублений на плоской пластине, выполненных в виде сферических сегментов. Рассмотрены диффузорно-конфузорное обтекание, режим существования подковообразного вихря и режим столбообразного вихря в углублении. Ни подковообразный, ни столбообразный вихри не наблюдались в углублениях с относительной глубиной меньшей 0.1. Переходы от режима диффузорно-конфузорного обтекания к режиму подковообразного вихря, а также от режима существования подковообразного вихря к режиму столбообразного вихря зависят не только от числа Рейнольдса, но и от относительной глубины сферического сегмента. Предложены зависимости для определения границ существования режимов и координаты для обобщения результатов.

## **Введение.**

Установлено, что при обтекании поверхностей с углублениями в виде сферических сегментов рост теплоотдачи сопровождается незначительным относительным увеличением гидравлического сопротивления [1]. Внутри углублений и вблизи их возникают крупномасштабные динамические вихревые структуры, наблюдаемые в широком диапазоне режимов течения. Количество публикаций, посвященных проблемам использования поверхностей с лунками, растет [2], особенно в промышленно развитых странах. Однако ряд дискуссионных вопросов, не нашел окончательного разрешения. К ним можно отнести гипотезу о смерчевом механизме интенсификации теплообмена [1], роль углублений при обтекании их потоками с большой турбулентностью [3], границу между отрывным и безотрывным обтеканием углублений [4], [5]. Это объясняется сложностью явления, на которое влияют помимо скорости потока такие факторы, как размеры углублений, скругление кромок, характер и толщина пограничного слоя на входе в углубление, величина канала.

В настоящей работе сделана попытка определить границы существования режимов течения в углублении в зависимости от скорости внешнего потока и геометрических характеристик лунки на основе обобщения опубликованных в литературе опытных данных. Подобные исследования предпринимались и ранее [4], [6], однако использование большего числа опытных данных позволяет произвести уточнение полученных в прошлом результатов.

### **1. Режимы обтекания углублений.**

При обтекании поверхности с углублением можно выделить следующие картины течения. При малых скоростях поток имеет диффузорно-конфузорный характер. Линии тока, проходящие рядом с углублением, искривляются в сторону углубления. При увеличении скорости потока у входной кромки углубления поток отрывается, образуя зону рециркуляции (**SZ**), и впоследствии присоединяется ко дну углубления (Рис. 1а, тип течения **N**) [1], [7], [8]. В данном случае интенсификация теплообмена, вызванная перестройкой профиля скорости в углублении, по сравнению с теплообменом на плоской поверхности не превосходит 20%.

При дальнейшем увеличении скорости потока в углублении образуется подковообразный вихрь, концы которого опираются на боковые стенки углубления с двух сторон плоскости симметрии углубления (Рис. 1б, тип течения **HS**) [1], [5], [10], [8]. В проекции на плоскость стенки, на которой образовано углубление, видна пара симметричных вихрей. Пограничный слой над углублением периодически сворачивается, отрывается и превращается в дорожку Кармана.

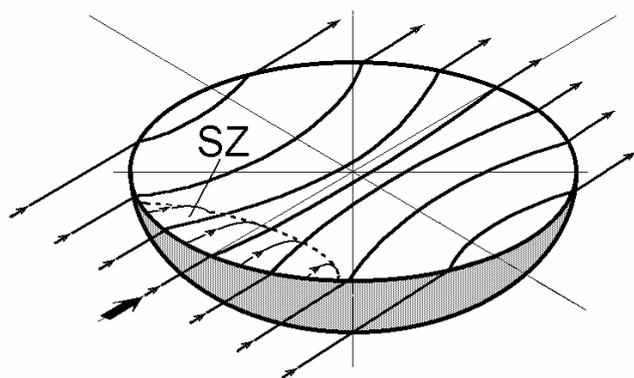


Рис. 1 а. Диффузно-конфузорный режим обтекания углубления (тип течения **N**, **SZ** – зона рециркуляции).

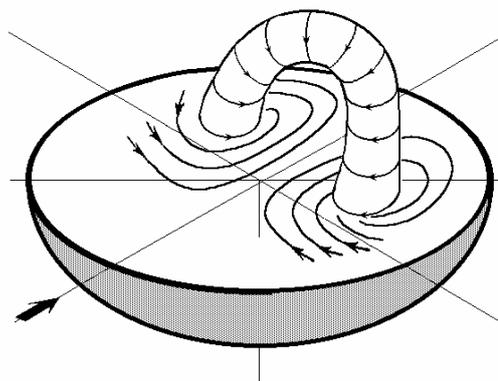


Рис. 1 б. Подковообразный вихрь в углублении (тип течения **HS**.)

И, наконец, при еще большей скорости подковообразный вихрь «не помещается» в углублении, один из его концов поднимается над углублением и «ищет» возможности зафиксироваться на верхней стенке канала или поверхности расположения лунок. Верхняя его часть сносится потоком по течению. Положение вихря неустойчиво и его нижний конец может перескакивать с левой части углубления в правую и наоборот (Рис. 1в, г, столбообразный или смерчеобразный вихрь, тип течения **R**), [1], [10], [8].

В некоторых источниках этот режим назван переключательным. Среда из основного потока поступает в углубление около передней кромки, однократно омывает его поверхность, устремляясь к основанию смерчеобразного вихря, а затем почти

полностью выносятся во внешний поток. Помимо сравнительно медленных перемещений из одной половины углубления в другую, смерч колеблется с высокой частотой поперечно к своей продольной оси. Слой над углублением с частью смерчеобразного вихря отрывается и образует вихревую дорожку. Интенсификация теплообмена при типах течения **HS** и **R** значительна, в некоторых случаях она пропорциональна скорости потока. Основной вклад в увеличение теплообмена вносит зона за углублением. После появления смерчеобразного вихря гидравлическое сопротивление возрастает, и теплогидравлические характеристики поверхности с углублениями ухудшаются.

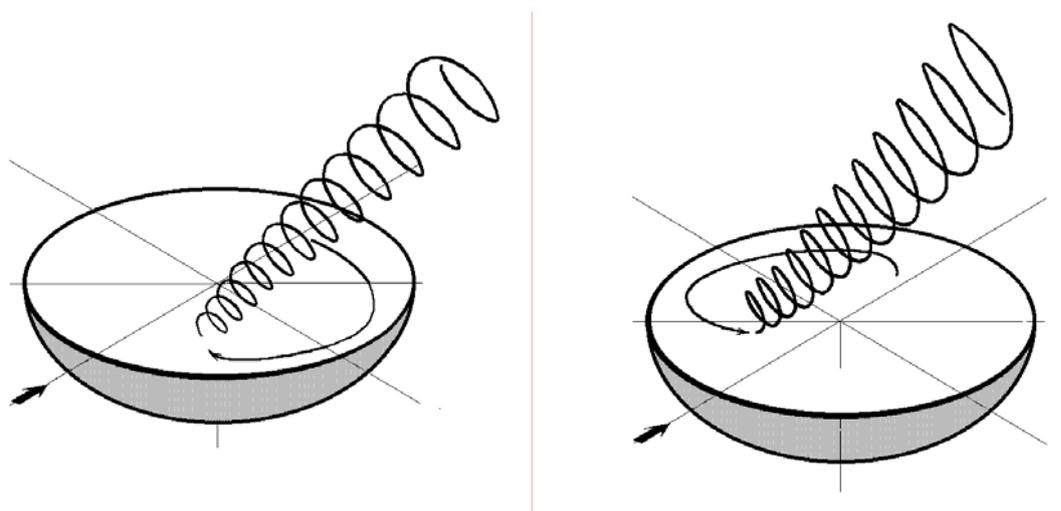


Рис. 1 в, г. Два положения столбообразного вихря в углублении (тип течения **R**).

Необходимо отметить, что указанное деление режимов схематичное. Внутри некоторых типов течений наблюдаются неустойчивые режимы, особенно при переходном и турбулентном режиме течения основного потока. Например, при существовании подковообразного вихря (**HS**) наблюдается смена направления вращения [12], [34]. Вблизи границ существования при неизменных начальных условиях возможен переход к «соседнему» режиму, с последующим возвратом к предыдущему. Визуализация в этих случаях затруднена, если время существования

режима мало. Поэтому в отдельных случаях использованы результаты расчетов по моделям, прошедшим идентификацию с использованием достоверных экспериментов [11], [12].

## 2. Результаты анализа.

Характерные параметры вихревых течений, описанные в литературе, (более 30 источников), сведены в таблицу. (Данные, относящиеся к экспериментам, проведенным на воздухе, условно отмечены буквой **В**, результаты, полученные в опытах, где в качестве рабочего тела использовалась вода, отмечены буквой **А**.) На рисунке 2 эти экспериментальные данные приведены в координатах: относительная глубина лунки -  $h/d$  – число Рейнольдса -  $Re_d$ , определенное по диаметру углубления  $d$  ( $h$  - глубина лунки,  $Re_d = U_\infty \cdot d / \nu$ ,  $\nu$  - коэффициент кинематической вязкости). Цифры около экспериментальных точек соответствуют номерам источников в списке литературы.

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Ни подковообразный, ни столбообразный вихри не наблюдались в углублениях с относительной глубиной  $h/d < 0.1$ . Ниже этой линии расположена граница **Е-Е** появления отрыва в лунке, рассчитанная по данным Никурадзе для диффузоров [32]. Появление отрыва в лунке, отмеченное в обзоре Леонтьева А. И. и др. [26], достаточно хорошо согласуется с этой границей.

2. Удовлетворительным приближением к границе режимов **N** и **HS** в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_d$  меньших 10000 является линия критических высот шероховатости  $h_{cr}$ , [32], которые достаточны для перевода исходно ламинарного пограничного слоя в турбулентный, где за высоту шероховатости принята глубина углубления [32].

$$\frac{h_{cr}}{d} = 15 / (Re_d \sqrt{0.332 \sqrt{d/(x \cdot Re_d)}}) \quad (1),$$

где  $x$  – расстояние от входа в канал.

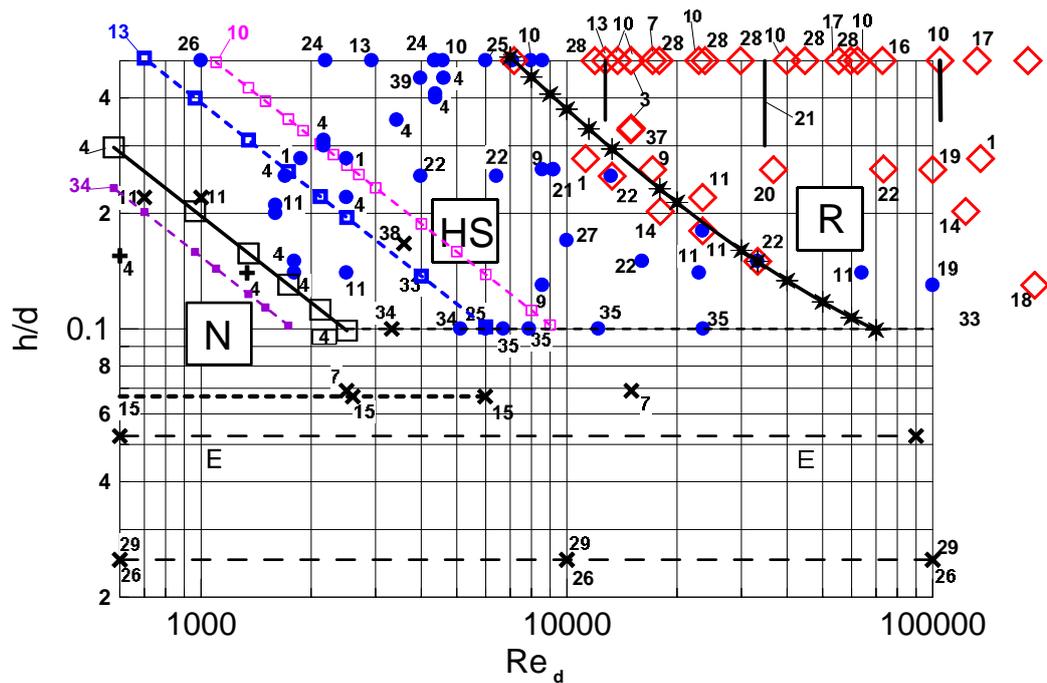


Рис. 2. Диаграмма режимов течения в углублении в координатах: относительная глубина лунки  
-  $h/d$  – число Рейнольдса -  $Re_d$ .

✕, или + - диффузорно-конфузорный режим – N; ● – подковообразный вихрь – HS; ◇ – столбообразный вихрь – R; □ – границы между режимами N и HS, определенные по уравнению (1) для групп экспериментов при различных отношениях  $x/d$  (цифры около кривых соответствуют номерам источников; см. также таблицу); ✱ - граница между режимами HS и R, определенная по уравнению (2); | возникновение турбулентного течения внутри углубления по данным различных авторов [13], [21], [10].

Отметим, что на положение этой границы существенно влияет толщина пограничного слоя перед углублением, которая в свою очередь зависит от расстояния исследуемого углубления от входа в рабочий участок. Результаты экспериментов различных авторов охватывают широкий диапазон отношений  $d/x$  от 0.813 для [34] до 0.00575 для [10], что и объясняет «размытость» границы типов течений.

Границей режимов подковообразного (HS) и столбообразного (R) вихрей является гипербола вида

$$h/d = 3200/Re_d + 0.0536 \quad (2),$$

расположенная в диапазоне  $7000 \leq Re_d \leq 70000$ ,  $0.5 \geq h/d \geq 0.1$ .

3. На обеих границах отмечен гистерезис – при медленном изменении скорости вблизи границы возможно существование режима в несвойственной ему области. При наличии тонкого пограничного слоя переход с режима на режим происходит при меньших скоростях, в каналах с малым отношением высоты к диаметру лунки при увеличении скорости потока смена режима обтекания затягивается (см. таблицу).

4. Подавляющее большинство точек вблизи границы режимов подковообразного (**HS**) и столбообразного (**R**) вихрей относится к ламинарному пограничному слою перед лункой. Отношение толщины пограничного слоя  $\delta$  к полувысоте канала  $H_k/2$  для них находится в пределах  $1.0 \geq 2\delta H_k \geq 0.8$ . При турбулентном пограничном слое перед лункой устойчивость подковообразного (**HS**) вихря выше. Сведения о переходе ламинарного режима течения в турбулентный внутри углубления (наблюдавшиеся или определенные косвенно по изменению закона теплоотдачи) значительно отличаются. Соответствующие данные К. Прессера, В. Терехова и Г. Кикнадзе отмечены вертикальными линиями. Большинство экспериментальных данных получено в нестесненных каналах ( $H_k/d > 0.4$ ). При этом, возмущения потока, генерируемые углублениями, могут диффундировать в его ядро, не оказывая воздействия на гидродинамическую обстановку у стенки. Естественно, смена режима обтекания в таких каналах может происходить в условиях, отличающихся от условий в стесненных каналах ( $H_k/d < 0.4$ ), чем будет обусловлено «размывание» границ их существования.

Была сделана попытка учета, как диаметра лунки, так и ее глубины. В качестве геометрического размера для числа Рейнольдса  $Re_c = U_\infty \cdot C / \nu$  принималась глубина  $C$  такой цилиндрической лунки, у которой при том же диаметре будет тот же объем, что и у лунки, имеющей вид сферического сегмента.

$$C = \frac{h}{6} \cdot \left( 3 + 4 \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^2 \right) \quad (3)$$

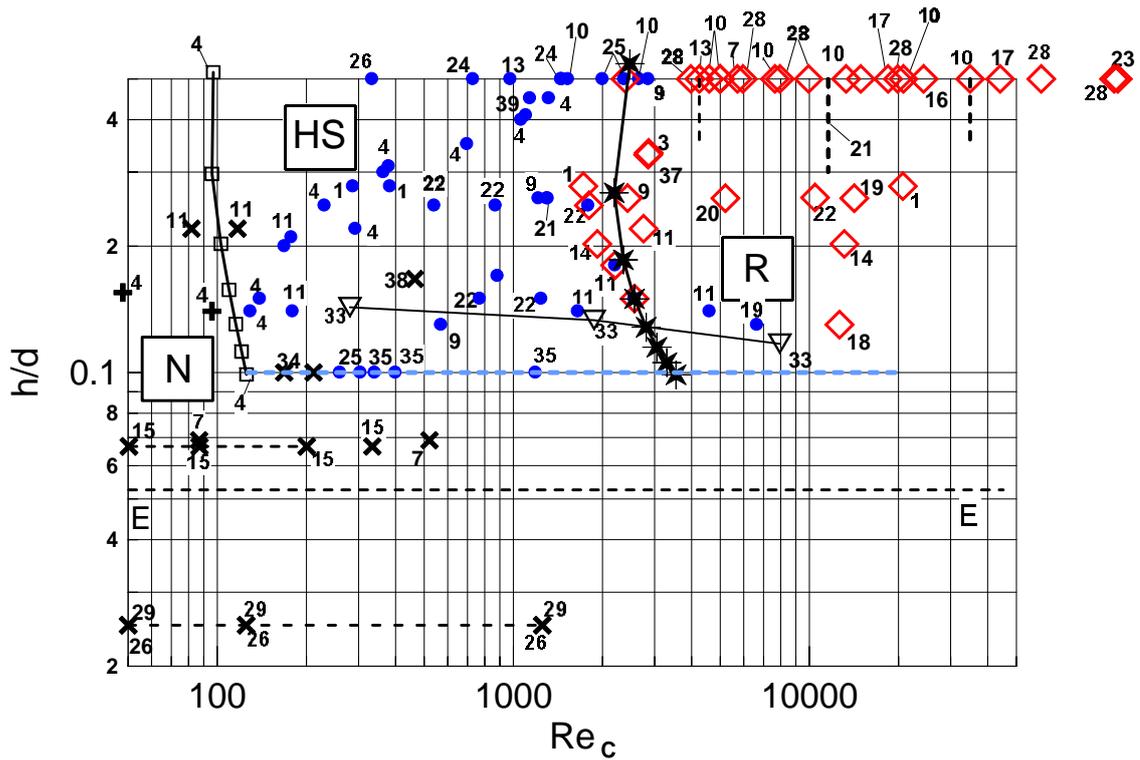


Рис. 3. Диаграмма режимов течения в углублении в координатах: относительная глубина лунки  $h/d$  – число Рейнольдса  $Re_c$ .

**×**, или **+** - диффузорно-конфузорный режим – **N**; **●** – режим существования подковообразного вихря – **HS**; **◇** – режим существования столбообразного вихря – **R**;  
**□** граница между режимами **N** и **HS**, определенная по уравнению (1); **\*** - граница между режимами **HS** и **R**, определенная по уравнению (2); **▽** - граница между режимами **N** и **HS** для цилиндрических лунок, рассчитанная по данным [33]; **|** возникновение турбулентного течения внутри углубления по данным различных авторов [13], [21], [10].

На рис. 3 приведены опытные данные, представленные ранее на рис. 2, но в координатах  $h/d - Re_c$ . Диапазоны чисел Рейнольдса, характеризующие границы режимов, значительно уменьшились. Граница между диффузорно-конфузорным типом течения (**N**) и течением с подковообразным вихрем (**HS**) при относительных глубинах лунок 0.52...0.1 находится в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re_c$  97... 125 (отношение границ диапазона – 1.29). В координатах  $h/d - Re_c$  соответствующее отношение границ диапазона составляло 73.3. Граница между течением с подковообразным вихрем (**HS**) и течением со столбообразным вихрем (**R**)

при относительной глубине лунки  $0.54 \dots 0.1$  находится в диапазоне чисел Рейнольдса -  $Re_c$  2474...3298 (отношение границ диапазона – 1.33). В координатах  $h/d - Re_d$  соответствующее отношение границ диапазона составляло 14.3.

Сравнение полученных результатов с предыдущими исследованиями показывает качественное согласование границы диффузорно-конфузорного течения (**N**) и режима подковообразного вихря (**HS**), предложенной в настоящей работе и в диссертации Щелчкова [4] (прямые кресты). В работе [6] сделан вывод о том, что область существования пары симметричных вихрей ограничена числами Рейнольдса -  $Re_d$  от 4000 до 9000. Использование большего числа источников в настоящем исследовании позволило расширить эту область с учетом ее зависимости ее границ от числа Рейнольдса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При больших относительных глубинах лунок  $0.1 \leq h/d \leq 0.5$  границей между диффузорно-конфузорным режимом (**N**) и течением с подковообразным вихрем (**HS**) может служить линия критических высот шероховатости  $h_{cr}$  (1).
2. Столбообразный вихрь (**R**) существует в течениях, удовлетворяющих двум условиям: числа Рейнольдса больше, чем определяемые уравнением (2) и отношение  $h/d \geq 0.1$ .
3. Область существования подковообразного вихря (**HS**) ограничена следующими пределами: линией критических высот шероховатости  $h_{cr}$  (1), линией минимального отношения  $h/d = 1$  и гиперболой (2).
4. Ни подковообразный (**HS**) ни столбообразный (**R**) вихри не наблюдались в углублениях с относительной глубиной  $h/d < 0.1$ .
5. При малых относительных глубинах лунок  $h/d < 0.1$  во всем исследованном диапазоне чисел Рейнольдса ( $15 < Re_n < 165500$ ) наблюдается диффузорно-конфузорный режим течения (**N**) (у входной кромки возможен отрыв).
6. Для экспресс оценки типа течения в лунке удобными координатами являются  $h/d - Re_c$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гачечиладзе И. А., Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К. и др. Теплообмен при самоорганизации смерчеобразных структур// Тепломассообмен. ММФ. Минск.- 1998.- С. 83-125.
2. Chudnovsky Ya. P. Vortex heat transfer enhancement and its applications. Proceeding of International Symposium on Turbulence? Heat and Mass Transfer. Lisbon, Portugal. August 9-12, 1994.
3. Езерский А. Б., Шехов В. Г. Визуализация потока тепла при обтекании уединенных сферических углублений// Механика жидкости и газа.- 1989.- № 6.-С. 161-164.
4. Щелчков А. В. Теплогидравлическая эффективность интенсификации теплоотдачи в каналах со сфероидальными выемками. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н.- Казань,- 2004.-16 с.
5. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Олейников В. Г., Алексеев В. В. Механизмы самоорганизация смерчеобразных струй при обтекании трехмерных вогнутых рельефов// Труды Второй Российской конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Москва.-2005.-s104.
6. Халатов А. А., Онищенко В. Н. Диаграмма режимов течения в одиночном сферическом углублении с острой кромкой// Промышленная теплотехника.- 2005.-Т. 27, № 4.- С. 5-10.
7. Афанасьев В. Н., Чудновский Я. П. Экспериментальное исследование структуры течения в одиночной впадине// Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение.-1993.-№ 1.-С. 85-95.
8. Кесарев В. С., Козлов А. П. Структура течения и теплообмен при обтекании полусферического углубления турбулизированным потоком воздуха// Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение.- 1993.- № 1.- С. 106-115.
9. Мшвидобадзе Ю. М. Аэродинамика и теплообмен в сферической каверне// Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н.- Новосибирск.-1997.-19 с.

10. Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К., Чушкин Ю. В., Самойлов А. Г., Ануров Ю. М., Кузнецов Н. Д., Нагога Г. П. Интенсификация массо- и теплообмена (обзор полученных результатов). ЦНИИАтоминформ. Москва.-1987.-57 с.
11. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Метов Х. Т., Харченко В. Б. Моделирование влияния вязкости на смерчевой теплообмен при турбулентном обтекании неглубокой лунки на плоскости// ИФЖ.-2002.-Т. 75.-№ 4.- С. 98-104.
12. Исаев С. А., Леонтьев А. И. Моделирование смерчевой интенсификации теплообмена: состояние и перспективы// Труды Второй Российской конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Москва.-2005.-s106.
13. Presser K. H. Empirische Gleichungen zur Berechnung der Stoff- und Wärmeübertragung für den Spezialfall der Abgerissenen Stromung// Int. J. Heat Mass Transfer.-1972.-Vol. 15.-Pp. 2447-2471.
14. Ligrani P. M., Harrison J. L., Mahmood G. I., Hill M. L. Flow structure due to dimple depression on a channel surface// Physics of Fluids. 2001. Vol. 13. N 11. P/ 3442-3451.
15. Афанасьев В. Н., Леонтьев А. И., Чудновский Я. П. Теплообмен и трение на поверхностях, профилированных сферическими углублениями. Издательство МГТУ. 1990.-117 с.
16. Боровой В. Я., Яковлев Л. В. Теплообмен при сверхзвуковом обтекании одиночной лунки// Механика жидкости и газа.-1991.-№ 5.- С. 48-52.
17. Сайред Н., Шукин А. В., Козлов А.П., Буланов О. Ю., Агачев Р. С. Влияние продольной кривизны поверхности на гидродинамику в сферической выемке// Изв. ВУЗов. Авиационная техника.-2000.-№1.-С. 40-44.
18. Терехов В. И., Калинина С. В., Мшвидобадзе Ю. М. Конвективный теплообмен на поверхности в области за каверной сферической формы// Теплофизика и аэромеханика.- 1994.-Т. 1.-№ 1.-С.-29-35.
19. Терехов В. И., Калинина С. В., Мшвидобадзе Ю. М. Теплоотдача от каверны сферической формы, расположенной на стенке прямоугольного канала// Теплофизика высоких температур.-1994.-Т. 32.-№ 2.-С. 249-254.

20. Терехов В. И., Калинина С. В., Мшвидобадзе Ю. М. Поле давлений и сопротивление одиночной лунки с острыми и скругленными краями// Журнал прикладной механики и технической физики.-1993.-Т. 34.-№3.-С. 331-338.
21. Терехов В. И., Калинина С. В., Мшвидобадзе Ю. М. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной// Сибирский физико-технический журнал.-1992.-Вып. 1.-С. 77-85.
22. Волчков Э. П., Калинина С. В., Матрохин И. И., Мшвидобадзе Ю. М., Терехов В. И., Третьяков С. П., Ярыгина И. И. Некоторые результаты экспериментального исследования аэрогидродинамики и теплообмена на поверхности с полусферическими кавернами// Сибирский физико-технический журнал.-1992.-Вып. 5.-С. 3-9.
23. Снидекер Р., Дональдсон К. Исследование течения с двумя устойчивыми состояниями в полусферической каверне// РТК.-1966.-№ 4.-С. 227-228.
24. Щукин А. В., Ильинков А. В., Агачев Р. С., Козлов А. П., Масленников А. Н. Гидродинамика в полусферической выемке при малых скоростях потока// Ракетная техника и космонавтика.-1966.-№ 4, С. 88-89.
25. Громов П. Р., Зобнин А. Б., Рабинович М. И., Сушик М. М. Рождение уединенных вихрей при обтекании мелких сферических углублений// Письма в ЖТФ.- 1986.-Т. 12, Вып. 21.-С. 1323-1328.
26. Леонтьев А. И., Олимпиев В. В., Дилевская Е. В., Исаев С. А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими лунками// Известия Академии наук. Энергетика.- 2002.-№ 2.-С. 117-135.
27. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. В. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепломассообмена, сопровождающая это явление. Издательство МЭИ.- Москва.- 2005.- 83 с.
28. Кикнадзе Г. И., Краснов Ю. К., Подымака Н. Ф., Хабенский В. Б. Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки// Доклады Академии наук СССР.-1986.-Т. 291.-№ 6.-С. 1315-1318.

29. Щукин А. В., Козлов А. П., Агачев Р. С., Чудновский Я. П. Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов. Изд-во Казанского государственного технического университета. Казань.-2003.-143 с.
30. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимпиев В. В., Щелчков А. В. Течение и теплоотдача в каналах со сфероидальными интенсификаторами при вынужденной конвекции газа// Труды Второй Российской конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Москва.-2005.-s102.
31. Воскобійник А. В. Формування когерентних вихорових структур у закручених потоках та заглибленнях. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к. т. н.- Київ.- 2005.-19 с.
32. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Издательство «Наука». Москва.-1969.-742 с.
33. Wiegardt K. Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen. Techn. Berichte.-1943.-V. 10.-N 9. P. 65-81.
34. Khalatov A. A., Byerley A., Soeng-Ki Min, Ochoa D. Flow characteristics within and downstream of spherical and cylindrical dimple on a flat plate at low Reynolds number. ASME Paper N GT 2004- 33656, 2004.
35. Khalatov A. A., Byerley A., Soeng-Ki Min, Ochoa D. Application of advanced techniques to study fluid flow and heat transfer within and downstream of a single dimple. Proceeding of V Minsk International Heat and Mass Transfer Forum. Minsk: Belarus. 2004. 1-82.
36. Дрейцер Г. А. Критический анализ современных достижений в области интенсификации теплообмена в каналах// Труды 2-ой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ 2). Т. 6. Интенсификация теплообмена. М.: Изд-во МЭИ. 1998. С. 55-59.
37. Мусиенко В. П. Экспериментальное исследование обтекания локализованных углублений// Бионика.- 1993. Вып. 26.-С. 31-34.
38. Бабенко В. В., Мусиенко В. П., Коробов В. И., Пядишюс А. Выбор геометрических параметров лунки, генерирующей возмущения в пограничном слое// Бионика.- 1998.. Вып. 27-28.-С. 42-47.

39. Турик В. Н., Бабенко В. В., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины// Вестник Национального технического университета Украины «КПИ».-2006.-Вып. 48. С. 79-85.
40. Babenko V. V., Korobov V. I., Musienko V. P. Formation of vortex structure on curvilinear surfaces and semi-spherical cavities. Proceeding of 11<sup>th</sup> International COUETTE-TAYLOR WORKSHOP. Bremen. 1999. P. 103.

Таблица. Экспериментальные данные, опубликованные в литературе

№		$h/\delta$	$d$ , мм	$h$ , мм	$h/d$	$H_k$ , мм	$B_k$ , мм	$x$ , мм	$\delta$ , мм	$Re_d$	Тип
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	<b>A</b>	1.0	36	10	0.2778	20	80	800	10	2500	<b>HS</b>
1	<b>A</b>	1.0	36	10	0.2778	20	80	800	10	11250	<b>R</b>
1	<b>A</b>	1.0	36	10	0.2778	20	80	800	10	135000	<b>R</b>
1	<b>A</b>	1.0	36	10	0.2778	20	80	800	10	1875	<b>HS</b>
3	<b>B</b>	1.0	30	10	0.3333	20		400	10	14985	<b>R</b>
3	<b>B</b>	1.5	30	15	0.5	20		400	10	14985	<b>R</b>
3	<b>B</b>	1.5	30	15	0.5	20		400	10	37463	<b>R</b>
3	<b>B</b>	1.0	30	10	0.3333	20		400	10	37463	<b>R</b>
4	<b>B</b>	3.666	58	29	0.5	12	96	190	6	4350	<b>HS</b>
4	<b>B</b>	4.000	58	24	0.4138	12	96	190	6	4375	<b>HS</b>
4	<b>B</b>	3.000	58	18	0.31	12	96	190	6	2167	<b>HS</b>
4	<b>B</b>	2.133	58	12.18	0.21	12	96	190	6	1600	<b>HS</b>
4	<b>B</b>	1.353	58	8.12	0.14	12	96	190	6	1800	<b>HS</b>
4	<b>B</b>	1.498	58	8.99	0.155	12	96	190	6	600	<b>N</b>
4	<b>B</b>	1.353	58	8.12	0.14	12	96	190	6	1336	<b>N</b>
5	<b>A</b>		20	3.5	0.175					10000	<b>HS</b>
5	<b>A</b>		20	4	0.2					50000	<b>R</b>
5	<b>A</b>		50	10	0.2					200000	<b>R</b>
7	<b>B</b>		36	2.4	0.069	16.5				2500	<b>N</b>
8	<b>B</b>	5.0	150	75	0.5	202			15	182000	<b>R</b>
8	<b>B</b>	5.0	150	75	0.5	202			15	331000	<b>R</b>
9	<b>A</b>	0.797	46	5.98	0.13	15	115	600	7.5	8572	<b>HS</b>
9	<b>A</b>	1.595	46	11.96	0.26	15	115	600	7.5	8572	<b>HS</b>
9	<b>A</b>	1.595	46	11.96	0.26	15	115	600	7.5	17145	<b>R</b>
9	<b>B</b>	3.067	46	23	0.5	15	115	600	7.5	8572	<b>HS</b>
9	<b>B</b>	3.067	46	23	0.5	15	115	600	7.5	17145	<b>R</b>



№		$h/\delta$	$d,$ MM	$h,$ MM	$h/d$	$H_{\kappa},$ MM	$B_{\kappa},$ MM	$x,$ MM	$\delta,$ MM	$Re_d$	Тип
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25	<b>B</b>		30	15	0.5					7100	<b>HS</b>
25	<b>B</b>		30	15	0.5					7171	<b>R</b>
25	<b>B</b>		30	15	0.1					6000	<b>HS</b>
25	<b>B</b>		30	15	0.5					6000	<b>HS</b>
26	<b>B</b>				0.025					600	<b>N</b>
26	<b>B</b>				0.025					100000	<b>N</b>
26	<b>B</b>				0.5					1000	<b>HS</b>
27	<b>A</b>		18	3	0.17					10000	<b>HS</b>
28	<b>A</b>	2.0	4	2	0.5	2	19	800	1	182000	<b>R</b>
28	<b>A</b>	2.0	4	2	0.5	2	19	800	1	330000	<b>R</b>
28	<b>A</b>	2.0	4	2	0.5	2	19	800	1	23857	<b>R</b>
28	<b>A</b>	2.0	4	2	0.5	2	19	800	1	59642	<b>R</b>
28	<b>A</b>	1.5	3	1.5	0.5	2	19	800	1	17893	<b>R</b>
28	<b>A</b>	1.5	3	1.5	0.5	2	19	800	1	44732	<b>R</b>
28	<b>A</b>	1.0	2	1	0.5	2	19	800	1	11928	<b>R</b>
28	<b>A</b>	1.0	2	1	0.5	2	19	800	1	29821	<b>R</b>
29	<b>B</b>				0.025					600	<b>N</b>
29	<b>B</b>				0.025					10000	<b>N</b>
29	<b>B</b>				0.025					100000	<b>N</b>
30	<b>B</b>				0.14		90			1893	<b>HS</b>
30	<b>B</b>				0.21		90			1904	<b>HS</b>
30	<b>B</b>				0.31		90			2419	<b>HS</b>
30	<b>B</b>				0.41		90			4390	<b>HS</b>
30	<b>B</b>				0.5		90			4400	<b>HS</b>
31	<b>B</b>	1.154	20	9	0.45			504	7.80	3571	<b>HS</b>
31	<b>B</b>	1.217	20	9	0.45			504	7.40	3968	<b>HS</b>
31	<b>B</b>	1.44	20	9	0.45			504	6.25	5555	<b>HS</b>
34	<b>A</b>	1.102	50.8	5.08	0.1	610	457	62.6	4.61	3220	<b>N</b>
34	<b>A</b>	1.129	50.8	5.08	0.1	610	457	62.6	4.50	4170	<b>N</b>
34	<b>A</b>	1.251	50.8	5.08	0.1	610	457	62.6	4.06	5125	<b>HS</b>
34	<b>A</b>	1.431	50.8	5.08	0.1	610	457	62.6	3.55	6710	<b>HS</b>
35	<b>A</b>	1.553	50.8	5.08	0.1	610	457	62.6	3.27	7892	<b>HS</b>
36	<b>A</b>	2.674	50.8	5.08	0.1	610	457	62.6	1.90	23450	<b>HS</b>
37	<b>A</b>	0.223	15	5	0.33	20	200	950	22.4	14951	<b>R</b>
38	<b>A</b>	0.417	30	5	0.167			694	12.0	3588	<b>N</b>
39	<b>B</b>	1.129	20	9	0.45			504	7.97	3984	<b>HS</b>