

УДК 532.582, 533.6.013.12

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ КОРМОВОЙ СТЕНКИ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КАВЕРНЫ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КАВЕРН

**В. Г. БЕЛИНСКИЙ**, Г. А. ВОРОПАЕВ, А. В. ВОСКОВОЙНИК,  
Ю. А. ПАРАМОНОВ

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев  
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев, Украина  
voropaiev.gena@gmail.com

Получено 21.10.2015

Представлены результаты измерений силы сопротивления прямоугольных каверн, в форму кормы которых внесены некоторые конструктивные изменения. Испытания проводились в гидродинамической трубе в турбулентном потоке на модели крыла малого удлинения. На плоской нижней поверхности модели крыла устраивались прямоугольные каверны с изменяемой формой кормовой стенки каверны. Результаты испытаний представлены в виде зависимостей коэффициента сопротивления каверны от числа Рейнольдса и от относительного удлинения каверны. Представлены также результаты визуализации течений в кавернах. Показано, что рассмотренными в работе вариантами геометрии кормовых стенок каверн можно существенно снизить сопротивление прямоугольной каверны фиксированного размера и повысить устойчивость вихревых структур внутри каверны.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** гидродинамическое сопротивление каверн, вихревое течение, устойчивость вихревых структур

Наведено результати вимірювань сили опору прямокутних каверн, в форму корми яких були внесені деякі конструктивні зміни. Випробування було проведено в гідродинамічній трубі при турбулентному обтіканні моделі крила малого видовження. На плоскій нижній поверхні моделі крила утворювались прямокутні каверни з змінюваною формою кормової стінки каверни. Результати випробувань наведено у вигляді залежностей коефіцієнта опору каверни від числа Рейнольдса та відносного видовження каверни. Наведено результати візуалізації течій в кавернах. Показано, що розглянутими в роботі варіантами геометрії кормових стінок каверн можна суттєво зменшити опір прямокутної каверни фіксованого розміру та збільшити стійкість вихрових структур всередині каверни.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** гідродинамічний опір каверн, вихрова течія, стійкість вихрових структур

The results of measuring the resistance force of rectangular cavities in the form which made some design changes. The tests were carried out in the hydrodynamic pipe at turbulent flow of the wing model of small aspect ratio. On the flat bottom surface of the cavity arranged pattern of various shapes. The caverns located along the wingspan perpendicular incident flow. Results are presented as the cavity drag coefficient on the Reynolds number and the elongation of the cavity. The results of flow visualizations in caverns are presented. It is shown in particular that the methods discussed in the paper can significantly reduce the resistance of rectangular cavities and increase the sustainability of trends within these cavities.

**KEY WORDS:** cavity drag, vortex flow, stability of vortex structures

### ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление прямоугольных каверн, расположенных на поверхностях тел, обтекаемых потоком жидкости, а также визуализация течений в таких кавернах исследовались в работах [1–4]. Анализ результатов этих работ показывает, что сопротивление прямоугольных каверн в турбулентном потоке определяется в основном относительной длиной каверны  $l/h$ , относительной шириной  $l/s$  каверны и степенью устойчивости течения внутри каверны. Здесь  $l$ ,  $h$  и  $s$  соответственно длина, высота и ширина каверны. Так, у относительно длинных каверн при  $l/h \approx 2$ , внутри которых ре-

ализуются неустойчивые вихревые течения, коэффициент гидродинамического сопротивления достигает значений  $C_x \approx 0,030 \div 0,040$  уже при числах Рейнольдса  $Re > 10^3$ . Тогда как у относительно коротких каверн, поперечное сечение которых близко к квадратному сечению ( $l/h \approx 1$ ) и внутри которых реализуется устойчивое вихревое течение, коэффициент сопротивления достигает значений, близких к нулевому,  $C_x < 0.005$ , в достаточно широком диапазоне чисел Рейнольдса.

Работ, посвященных уменьшению сопротивления именно прямоугольных каверн, мало. Известна, например, работа [5], в которой представлены результаты исследования в аэродинамиче-

ской трубе. Исследовалась возможность уменьшения сопротивления ряда квадратных каверн, расположенных на плоской пластине, в зависимости от расстояния между ними. Общее сопротивление ряда таких каверн оказалось пренебрежимо малым. А некоторое уменьшение коэффициента трения при относительно больших расстояниях между кавернами составило величину порядка одного процента.

Анализ результатов работ, указанных выше, показывает, что уменьшить сопротивление прямоугольных каверн при данном удлинении  $l/h$  можно только изменив структуру течения в каверне, приведя ее к устойчивому виду. Имеется в виду целенаправленное формирование в каверне устойчивых крупномасштабных вихревых структур. Достичь этого можно, например, надлежащей интенсификацией течения в каверне каким-либо из энергозатратных способов (вдув, отсос, подвижные поверхности и др.). Иными словами, это достигается путем превращения "пассивных" каверн в "активные" каверны.

Так, в работе [6], в частности, показано, что "пассивная" вихревая ячейка (каверна) круговой формы, расположенная на поверхности цилиндра, обтекаемого поперечным потоком, не приводит к существенному уменьшению сопротивления этого цилиндра. В то же время, если эту ячейку превратить в "активную", то она может существенно уменьшить сопротивление цилиндра, на котором она расположена. Достичь этого можно, если в центре ячейки разместить вращающийся в соответствующую сторону цилиндр меньшего диаметра, на вращение которого необходимо затратить энергию.

В работе [7] рассматривается обтекание прямоугольной каверны, на некотором участке дна которой применяется равномерно распределенный вдув с заданной периодичностью. Показано, что, изменяя характеристики вдува, можно коренным образом изменять картину течения в каверне. Повидимому, можно изыскать такие способы вдува, которые приведут к такому изменению течения в каверне, в результате которого сопротивление каверны будет уменьшено. Однако рассматриваемая каверна также является "активной". На реализацию такого течения в каверне потребуются определенные энергетические затраты.

Целью данной работы, которая в определенной мере служит продолжением работы [1], является определение возможности уменьшения сопротивления "пассивных" прямоугольных каверн, без превращения их в "активные", путем привлечения дополнительных энергетических затрат.

Для достижения этой цели избран путь, который состоит в некотором отходе в форме каверны от "чисто" прямоугольной. В этом случае применяется некоторое изменение формы задней стенки каверны и места расположения ее острой кромки.

Реализация указанного пути исследования позволяет целенаправленно формировать картину внутреннего течения в каверне и, в том числе, добиваться образования устойчивых крупномасштабных вихревых структур. Указанные меры, в некоторых случаях, приводят к существенному уменьшению гидродинамического сопротивления первоначально "чисто" прямоугольных каверн.

Для всех рассматриваемых вариантов модифицированных таким образом каверн проводится прямое измерение их гидродинамического сопротивления и выполняется визуализация картины течения внутри каверн.

Целью работы является также сравнение коэффициентов сопротивления исходных прямоугольных каверн и модифицированных на их основе указанным выше способом каверн. Сравнению подвергнутся также картины течения в исходных и модифицированных кавернах.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Эксперименты проводились в гидродинамической трубе ИГМ НАНУ с рабочим участком  $2000 \times 400 \times 400$  мм на той же экспериментальной установке, на которой велись исследования прямоугольных каверн, опубликованные в работе [1]. Однако в этой работе исследуются каверны, форма которых отличается от прямоугольных каверн формой задней стенки каверны и местом расположения по высоте ее острой кромки. Общий вид экспериментальной установки и модели крыла – такой же, как и в работе [1] (рис. 1). Испытания проводились при скорости потока воды в трубе, которая изменялась в диапазоне  $0.2 \div 2.8$  м/с.

Объектами исследований были каверны, образованные на базе прямоугольных каверн, у которых была изменена форма задней стенки путем замены ее полуцилиндрической вставкой радиусом  $r$  и устройством переходного участка  $d$ . А к передней стенке добавлен козырек  $c$  (рис. 2). Эти каверны имели постоянную высоту  $h = 60$  мм и ширину  $s = 300$  мм. Длина каверн измерялась от передней стенки каверны до острой кромки задней стенки каверны и изменялась в пределах  $l = (140 \div 40)$  мм, образуя ряд относительных удлинений по глубине  $l/h = 2.33; 2.00; 1.67; 1.33; 1.00$  и  $0.67$  и, со-

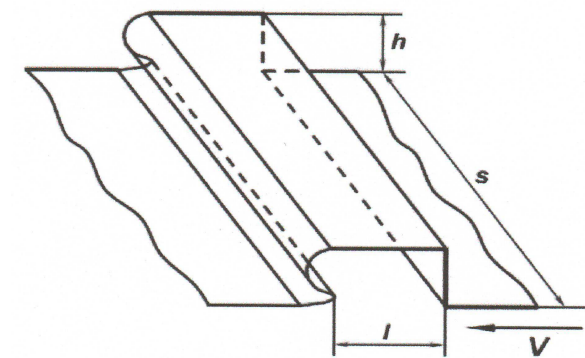
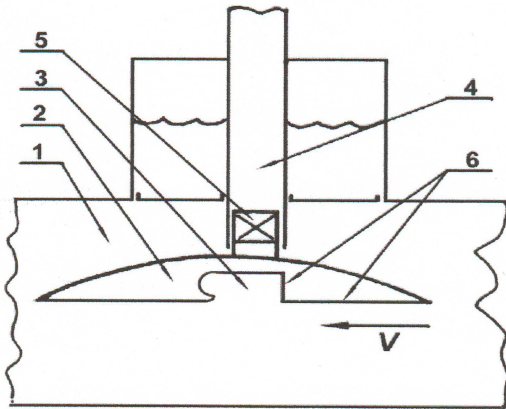


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – рабочий участок гидродинамической трубы, 2 – модель крыла, 3 – каверна, 4 – гидродинамический нож, 5 – тензодинамометр, 6 и 7 – точки, в которых подаётся окрашенная жидкость для визуализации течения

ответственно, по ширине  $l/s = 0.467; 0.400; 0.333; 0.267; 0.200$  и  $0.133$ . Размеры  $c$  и  $d$  были постоянными и составляли  $c = 0.167h$  и  $d = 1.17h$ . Расстояние  $a$  от острой кромки задней стенки каверны до нижней плоскости каверны принимало два дискретных значения  $a = (0,167$  и  $0.333)h$ . Соответственно, радиус полуцилиндрической вставки принимал значения  $r = (0.417$  и  $0,333)h$ . Далее такой вид каверн будем называть "обтекаемые каверны".

При испытаниях измерялись: скорость обтекания модели  $V$  с точностью до  $0.05$  м/с, сила сопротивления модели без каверны  $R_0$  и сила сопротивления модели с каверной  $R_i$  с точностью  $\pm 1\%$  от измеряемой величины.

В данной работе сопротивлением каверны принято считать разность между сопротивлением модели с каверной и модели без каверны:

$$R = R_i - R_0.$$

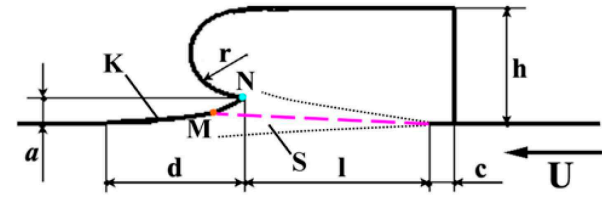


Рис. 2. Схема "обтекаемых каверн": S – слой смешения; M – точка присоединения срединной линии слоя смешения к переходному участку d; N – острая кромка задней стенки каверны

Коэффициент сопротивления каверны:

$$C_x = \frac{R}{0.5\rho V^2 l s},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости.

Исследуется зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса и от относительного удлинения каверны по глубине:

$$C_x = f(\text{Re}, l/h).$$

Число Рейнольдса в работе рассматривается в двух видах: по длине  $\text{Re}_l = Vl/\nu$  и по высоте  $\text{Re}_h = Vh/\nu$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Для простоты в дальнейшем число Рейнольдса по длине будем представлять в виде  $\text{Re}_l = \text{Re}$  без индекса. Результаты представляются в виде графиков зависимостей  $C_x = f(\text{Re})$  и  $C_x = f(l/h)$ .

Визуализация течения в каверне проводилась методом окрашенных струек. Красящий раствор подавался к двум различным точкам по линии симметрии модели на передней стенке внутри каверны и на плоскости перед каверной. При визуализации использовалась цифровая камера с частотой съёмки 25 кадров в секунду.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ниже последовательно для всех исследованных обтекаемых каверн представлены результаты определения коэффициента сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса и результаты визуализации течений в этих кавернах.

Общий вид одной из обтекаемых каверн в процессе испытаний представлен на рис. 3.

На рис. 2 буквой N обозначена острая кромка задней стенки обтекаемой каверны. Буквой M условно обозначена точка присоединения срединной линии слоя смешения S к переходному участку d каверны. Положение острой кромки N относительно передней стенки каверны определяется

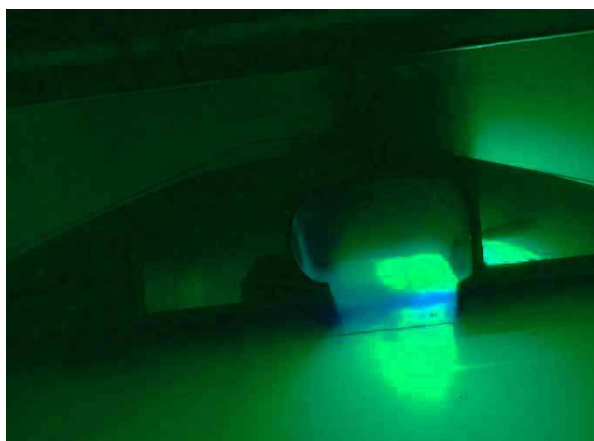


Рис. 3. "Обтекаемая каверна" в потоке жидкости

соотношением  $l/h$ , а относительно нижней плоскости каверны – соотношением  $a/h$ . Каждому положению точки **N** соответствует своё положение точки присоединения **M**. А положение точки **M** на переходном участке **d**, в свою очередь, определяет режим обтекания острой точки **N**.

Наблюдаются пять режимов обтекания острой кромки **N**, которые определяют структуру течения в каверне (рис. 4). Во всех случаях направление внешнего потока происходит справа налево.

Режим обтекания "а", когда точки **N** и **M** практически совпадают (рис. 4, а). В этом случае реализуется безотрывное обтекание острой кромки задней стенки каверны. Внутри каверны в рассмотренном диапазоне чисел  $Re$  образуется один основной вихрь, который вращается по часовой стрелке.

Режим обтекания "б", когда точка **M** немного смещена относительно точки **N** вниз по потоку (рис. 4, б). В этом случае реализуется отрывное обтекание острой кромки. Образуются два вихря: большой вихрь (по часовой стрелке) и малый (против часовой стрелки).

Режим обтекания "в", когда точка **M** ещё больше смещается относительно точки **N** вниз по потоку, но не выходит за пределы переходного участка **d** (рис. 4, в). В этом случае реализуется безотрывное обтекание острой кромки. Образуются также два вихря, большой и малый. Но в этом случае, в отличие от предыдущего, большой вихрь вращается против часовой стрелки, а малый вихрь, который располагается под большим, – по часовой стрелке.

Режим обтекания "г" реализуется тогда, когда срединная линия слоя смещения **S** входит по касательной в полуцилиндрическую часть задней стен-

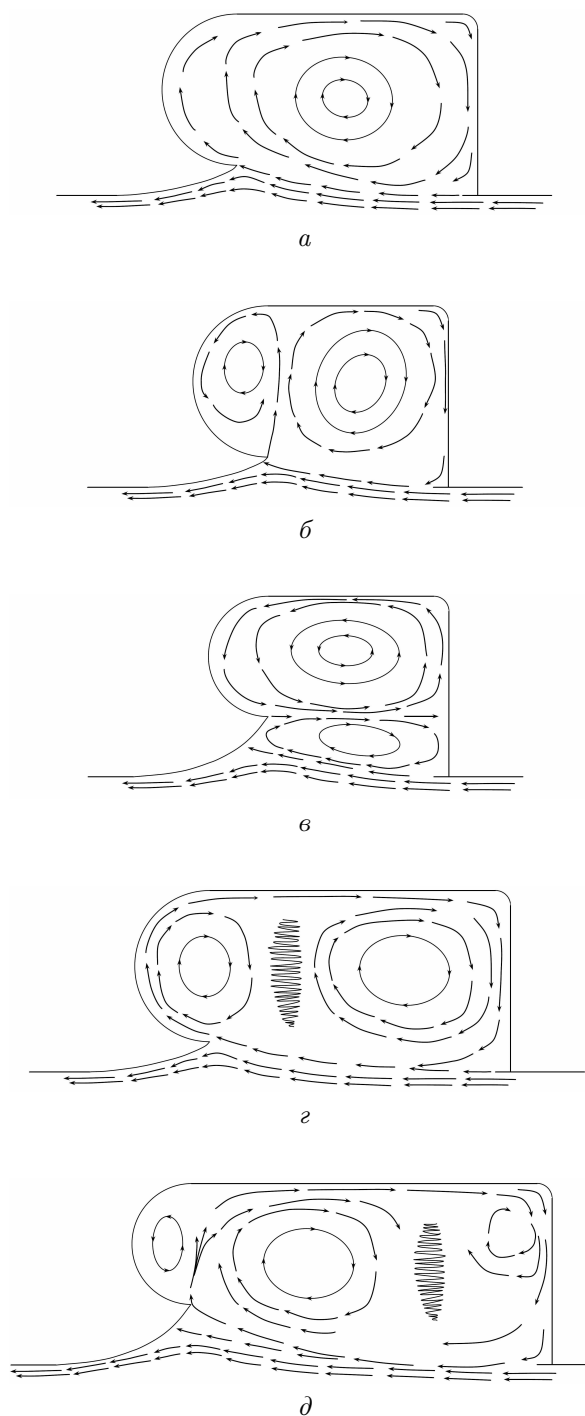


Рис. 4. Схемы вихреобразования в "обтекаемых кавернах" в зависимости от расположения точки присоединения **M**:

$a - l/h = 1, 17, a/h = 0, 167$ ;  $б - l/h = 0, 83, a/h = 0, 167$ ;  $в - l/h = 0, 83, a/h = 0, 333$ ;  $г - l/h = 1, 50, a/h = 0, 167$ ;  $д - l/h = 1, 83, a/h = 0, 333$

ки каверны (рис. 4, *з*). В этом случае острая кромка задней стенки каверны обтекает без отрыва, а в полости каверны образуются два последовательно расположенных вихря. Эти вихри имеют примерно одинаковую интенсивность и вращаются в одну и ту же сторону по часовой стрелке. Такая вихревая система является крайне неустойчивой, вследствие чего один из вихрей этой системы стохастически разрушается с последующим восстановлением.

Режим обтекания "д", когда точка **M** немного смещена относительно точки **N** вниз по потоку, но не выходит за пределы переходного участка **d** (рис. 4, *д*). Этот режим обтекания похож на режим "б", но реализуется для более длинных каверн и при более высоком расположении точки **N**. В этом случае также наблюдается отрывное обтекание острой кромки задней стенки каверны, но при этом в каверне образуются уже три вихря. Один вихрь (малый) по-прежнему расположен в области полуцилиндрической части задней стенки каверны и вращается против часовой стрелки. А в основной части каверны образуются уже два вихря, которые вращаются в одну и ту же сторону (по часовой стрелке) и образуют крайне неустойчивую комбинацию.

### 2.1. Обтекаемые каверны с относительным удлинением $l/h = 0.67$

На рис. 5 представлен график коэффициентов сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса для двух разновидностей каверн, которые отличаются друг от друга положением по высоте острой кромки задней стенки каверны (точка **N** на рис. 4). Как упоминалось выше, эти положения острой кромки соответствуют значениям  $a/h = 0.167$  и  $a/h = 0.333$ . Для сравнения, на этом же графике приведена зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для прямоугольной каверны такого же удлинения.

На рис. 6 представлены результаты визуализации этих течений при числах Рейнольдса  $Re = 0.32 \cdot 10^5$ . На рис. 6, *а* представлена для сравнения визуализация в исходной прямоугольной каверне, в которой, как известно [1], реализуется при данном числе Рейнольдса один устойчивый вихрь. Такое течение обусловило столь низкое значение коэффициента сопротивления этой каверны. Течение в обтекаемых кавернах существенно усложняется. На рис. 6, *б* представлена визуализация течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.167$ , выполненная наружной окрашенной струйкой. Видно как эта окрашенная струйка достигает переходного

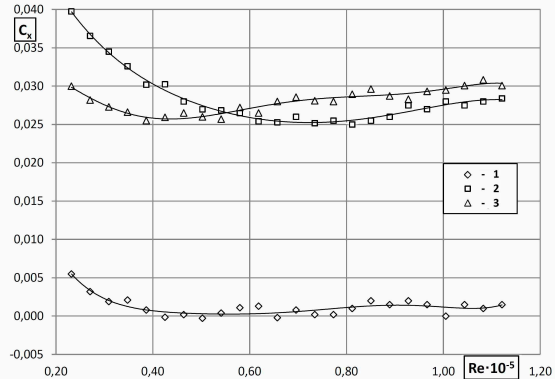
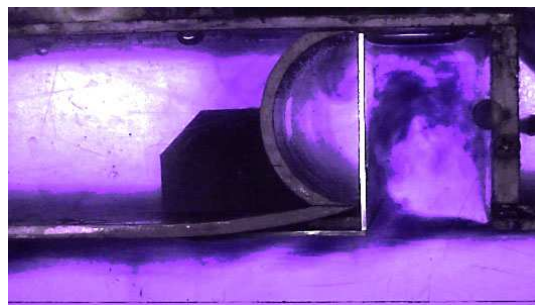


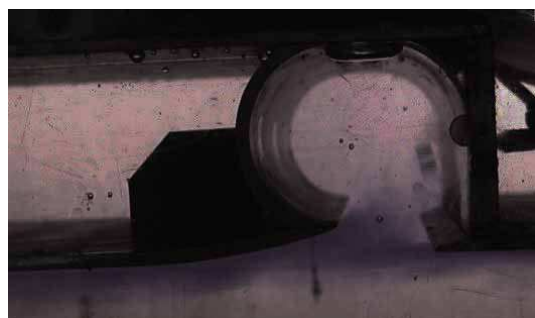
Рис. 5. Коэффициент гидродинамического сопротивления каверн при  $l/h = 0.67$  и  $l/s = 0.133$ :  
1 – прямоугольная; 2 – "обтекаемая"  $a/h = 0,167$ ;  
3 – "обтекаемая"  $a/h = 0.333$

го участка **d** каверны (рис. 2) и разделяется на две части. При этом нижняя ее часть уходит вниз по потоку вне каверны, а верхняя, следуя вверх и вправо вдоль переходного участка **d**, плавно обтекает этот участок, по касательной минует острую кромку и входит в пределы каверны в направлении, обратном направлению движения внешнего потока. От ее взаимодействия с внешним потоком, движущимся в прямом направлении, в нижней части каверны образуется вихрь, вращающийся по часовой стрелке. В то же время, на рис. 6, *в* видно, как внутренняя окрашенная струйка делает видимым другой вихрь большего размера, который занимает всю верхнюю часть каверны вместе с пространством внутри полуцилиндрической части каверны. Этот вихрь вращается в обратную сторону по сравнению с первым вихрем (против часовой стрелки). На рис. 6, *з* представлена визуализация течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.333$ , выполненная одновременно наружной и внутренней окрашенными струйками. Здесь реализуется аналогичное течение, состоящее из двух вихрей – верхнего и нижнего. Причем нижний вихрь также вращается по часовой стрелке, а верхний – против часовой.

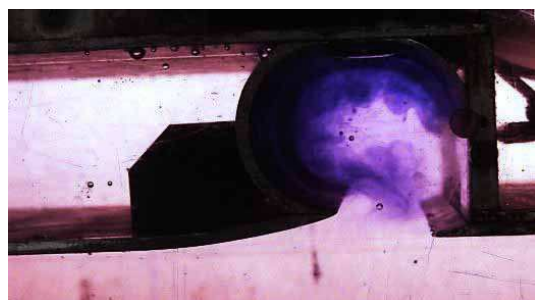
Течение в рассматриваемых обтекаемых кавернах является устойчивым. Но сложность этих течений заключается еще и в том, что больший верхний вихрь вращается в обратную сторону по сравнению с вихрем в прямоугольной каверне (рис. 6, *а*). Это служит причиной того, что сопротивление этих каверн существенно больше, чем у исходной прямоугольной каверны. Эскиз отраженного на рис. 6, *б*, *в*, *з* течения представлен на рис. 4, *в*.



а



б



в



г

Рис. 6. Визуализация течения прямоугольной и "обтекаемых" каверн при  $l/h = 0.67$  и  $l/s = 0.133$ ,  $Re = 0.32 \cdot 10^5$ :  
 а - прямоугольная; б -  $a/h = 0,167$ ;  
 в -  $a/h = 0,167$ ; г -  $a/h = 0,333$

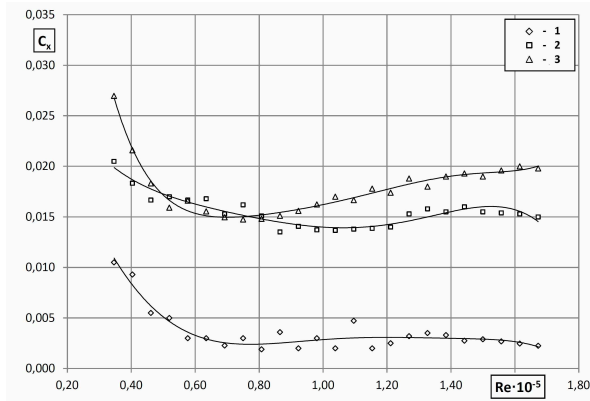
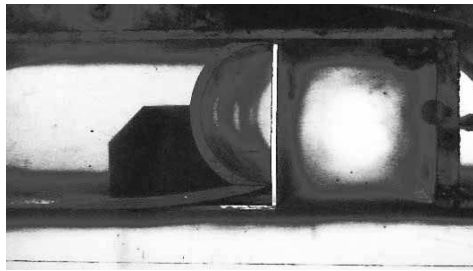


Рис. 7. Коэффициент гидродинамического сопротивления каверн при  $l/h = 1.00$  и  $l/s = 0.200$ :  
 1 - прямоугольная; 2 - "обтекаемая"  $a/h = 0.167$ ;  
 3 - "обтекаемая"  $a/h = 0.333$

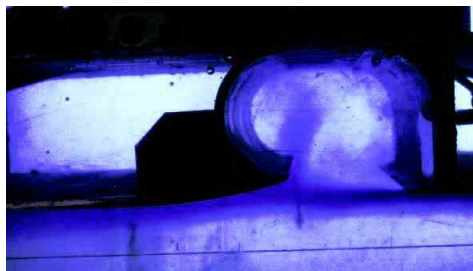
**2.2. Обтекаемые каверны с относительным удлинением  $l/h = 1.00$**

На рис. 7 представлен график коэффициентов сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса для двух разновидностей обтекаемых каверн (при  $a/h = 0.167$  и  $0.333$ ) и прямоугольной каверны. Для всех каверн  $l/h = 1.00$ . Из графика видно, что при данном удлинении каверн коэффициент сопротивления прямоугольной каверны, как и в предыдущем случае, существенно меньше, чем у обтекаемых каверн как при  $a/h = 0.167$ , так и при  $a/h = 0.333$ .

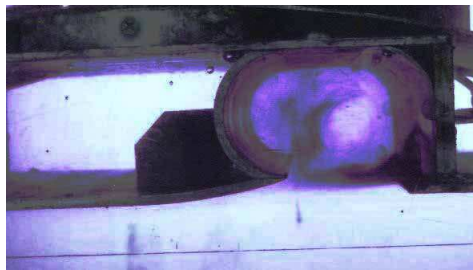
На рис. 8 показаны результаты визуализации этих течений при числах Рейнольдса  $Re = 0,71 \cdot 10^5$ . На рис. 8, а представлена для сравнения визуализация в исходной прямоугольной каверне, в которой, как и в предыдущем случае, реализуется один устойчивый вихрь, вращающийся по часовой стрелке. Такое течение обусловило столь низкое значение коэффициента сопротивления этой каверны. Течение в обтекаемых кавернах здесь также существенно усложняется по сравнению с прямоугольной каверной. На рис. 8, б представлена визуализация течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.167$ , выполненная наружной окрашенной струйкой. Видно как эта струйка рассекается острой кромкой задней стенки каверны на две части, большая из которых уходит вниз по потоку, а меньшая вовлекается внутрь каверны. На рис. 8, в визуализация течения в той же каверне выполнена внутренней окрашенной струйкой. Здесь видно как и эта струйка также рассекается острой кромкой на две части. Но в этом случае большая часть струйки остается внутри каверны, а меньшая уxo-



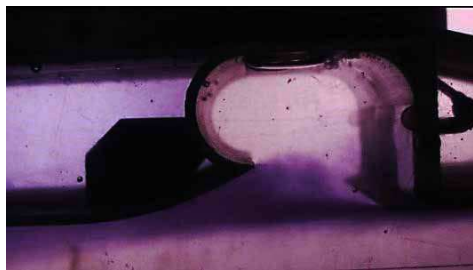
а



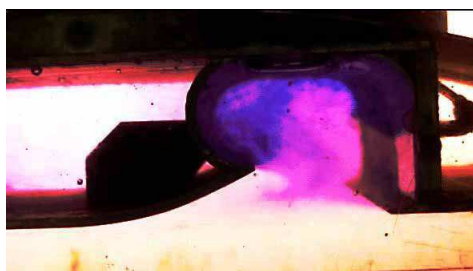
б



в



г



д

Рис. 8. Визуализация течения прямоугольной и "обтекаемых каверн" при  $l/h = 1.00$  и  $l/s = 0.200$ ,  $Re = 0.71 \cdot 10^5$ : а – прямоугольная; б –  $a/h = 0.167$ ; в –  $a/h = 0.167$ ; г –  $a/h = 0.333$ ; д –  $a/h = 0.333$

дит вниз по потоку. И в том и в другом случае четко фиксируется срыв потока, поступающего в каверну с острой кромки задней стенки каверны. При этом в каверне образуются два вихря. Один занимает большую часть каверны и вращается по часовой стрелке. Другой локализуется внутри полуцилиндрической части задней стенки каверны и вращается против часовой стрелки. Эскиз такого течения представлен на рис. 4, б. Следует отметить, что такое течение в данном случае проявляет признаки устойчивости. Однако спорадически оно разрушается, кратковременно принимает вид, соответствующий рис. 4, в, и вновь принимает прежний вид (рис. 4, б).

Рис. 8, г, д отражают картину течения в той же обтекаемой каверне, но при  $a/h = 0,333$ . Видно, что некоторое смещение острой кромки каверны вверх приводит к коренному изменению картины течения. На рис. 8, г заметно, как внешняя окрашенная струйка достигает переходного участка **d** (рис. 4) ниже по течению, чем при  $a/h = 0.167$ , но также разделяется на две части. При этом нижняя ее часть также уходит вниз по потоку, а верхняя, следуя вверх вдоль переходного участка **d**, плавно обтекает этот участок, по касательной минует острую кромку и входит в пределы каверны в направлении, обратном направлению движения. От ее взаимодействия с внешним потоком, движущимся в прямом направлении, в нижней части каверны образуется вихрь, вращающийся по часовой стрелке. В то же время, на рис. 8, д можно заметить, как внутренняя окрашенная струйка делает видимым другой вихрь, который занимает всю верхнюю часть каверны вместе с пространством внутри полуцилиндрической части каверны. Этот вихрь вращается против часовой стрелки. Эскиз отраженного на рис. 8, г, д течения представлен на рис. 4, в.

Таким образом, течение в каждой из рассмотренных обтекаемых каверн может при некотором изменении отношения  $a/h$  существенно изменяться вплоть до перемены направления вращения основного вихря на обратное направление. В то же время, эти течения являются более сложными по сравнению с течением в прямоугольной каверне данного удлинения, что является причиной их более высокого сопротивления.

### 2.3. Обтекаемые каверны с относительным удлинением $l/h = 1.33$

На рис. 9 представлен график коэффициентов сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса также для двух разновидностей "обтекаемых

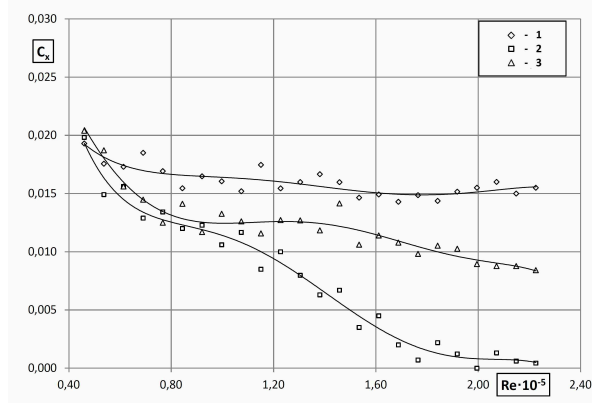


Рис. 9. Коэффициент гидродинамического сопротивления каверн при  $l/h = 1.33$  и  $l/s = 0.267$ : 1 – прямоугольная; 2 – ”обтекаемая”  $a/h = 0.167$ ; 3 – ”обтекаемая”  $a/h = 0.333$

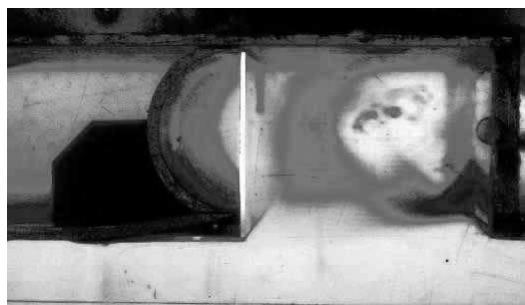
каверн” (при  $a/h = 0.167$  и  $0.333$ ) и прямоугольной каверны. Для всех каверн  $l/h = 1.33$ .

По сравнению с предыдущим случаем ситуация с величиной коэффициентов сопротивления рассматриваемых каверн кардинально изменилась. Коэффициент сопротивления прямоугольной каверны значительно возрос, тогда как для обеих ”обтекаемых” каверн он снизился. Так, для обтекаемой каверны с  $a/h = 0,333$  коэффициент  $C_x$  уменьшился примерно на 30%, а для каверны с  $a/h = 0.167$  коэффициент  $C_x$  при  $Re > 1.6 \cdot 10^5$  приближается к нулевым значениям. Объяснение этого следует искать в существенном изменении структуры течения во всех рассматриваемых кавернах данного удлинения.

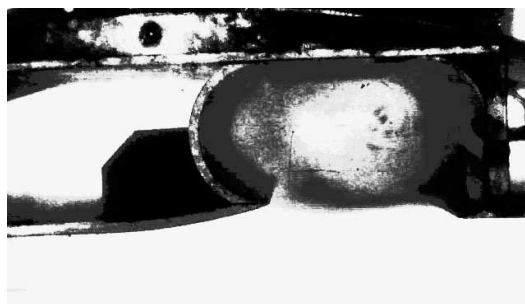
На рис. 10 представлены результаты визуализации этих течений при числе Рейнольдса  $Re = 1.91 \cdot 10^5$ .

На рис. 10, *a* представлена для сравнения визуализация в исходной прямоугольной каверне, в которой формируется неустойчивая трехвихревая структура, определяющая сопротивление такой каверны в рассматриваемом диапазоне числа  $Re$ . Иная картина в ”обтекаемых кавернах” этого удлинения.

На рис. 10, *б* показана визуализация течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.167$ , выполненная с помощью внутренней окрашенной струйки. Здесь показан случай, когда точка присоединения срединной линии слоя смешения примерно совпадает с острой кромкой задней стенки каверны или несколько превышает ее. Такая ситуация в этой каверне складывается, когда  $Re > 1.6 \cdot 10^5$ . При этом в каверне реализуется продолговатое циркуляционное (по часовой стрелке) течение, заполня-



*a*



*б*



*в*

Рис. 10. Визуализация течения прямоугольной и ”обтекаемых каверн” при  $l/h = 1.33$  и  $l/s = 0.267$ ,  $Re = 1.91 \cdot 10^5$ :  
*a* – прямоугольна;  
*б* –  $a/h = 0.167$ ; *в* –  $a/h = 0.333$

ющее весь объем каверны, включая полуцилиндрическую ее часть. Такое течение является устойчивым. В этом режиме течения обмен жидкостью в каверне с внешним потоком минимальный, а сопротивление каверны в этом случае приближается к нулевым значениям. Эскиз такого течения представлен на рис. 4, *a*.

На рис. 10, *в* представлена картина течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.333$ . Эта картина получена также с помощью внутренней окрашенной струйки. Ввиду того, что острая кромка задней стенки каверны находится выше, чем в пре-



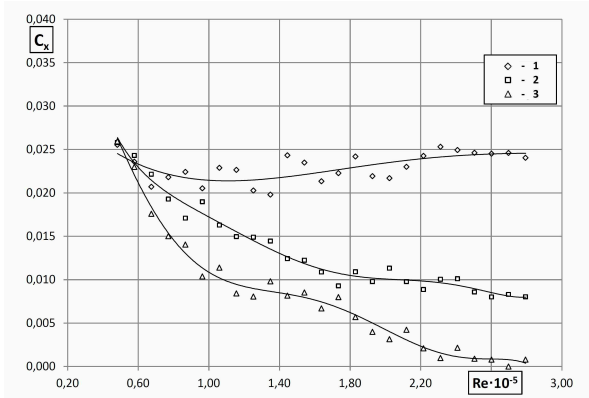


Рис. 11. Коэффициент гидродинамического сопротивления каверн при  $l/h = 1.67$  и  $l/s = 0.333$ :  
 1 – прямоугольная; 2 – “обтекаемая”  $a/h = 0.167$ ;  
 3 – “обтекаемая”  $a/h = 0.333$

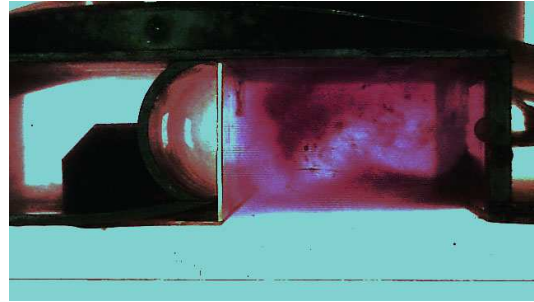
дыдущем случае, срединная линия слоя смешения подходит к задней стенке ниже острой кромки. Видно, как при этом окрашенная струйка частично уходит вниз по потоку ниже острой кромки каверны, а частично обтекает с отрывом острую кромку и движется вверх. В этом случае в каверне образуются два вихря. Один вихрь занимает большую часть каверны и вращается по часовой стрелке. Другой вихрь занимает пространство внутри полуцилиндрической части каверны и вращается против часовой стрелки. Сопротивление каверны по сравнению с предыдущим случаем увеличивается. Эскиз такого течения представлен на рис. 4, б.

#### 2.4. Обтекаемые каверны с относительным удлинением $l/h = 1.67$

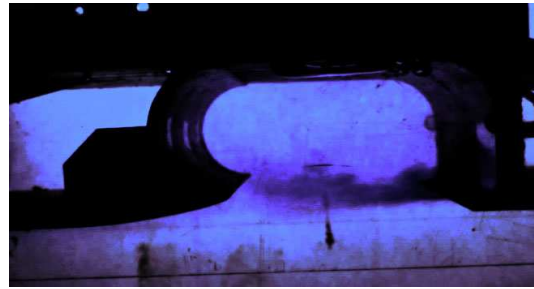
На рис. 11 представлен график коэффициентов сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса также для двух обтекаемых каверн (при  $a/h = 0.167$  и  $0.333$ ) и прямоугольной каверны. Для всех каверн  $l/h = 1.67$ .

Как видно из графика, по сравнению с предыдущим случаем,  $C_x$  прямоугольной каверны увеличился, а графики обтекаемых каверн как бы поменялись местами. Теперь у каверны с  $a/h = 0.333$  величина  $C_x$  при  $Re > 2.20 \cdot 10^5$  принимает значения близкие к нулевым, а у каверны с  $a/h = 0.167$  сопротивление увеличилось. График  $C_x$ , соответственно, занимает промежуточное положение. Эти изменения, как и раньше, связаны с изменением структуры течения в кавернах.

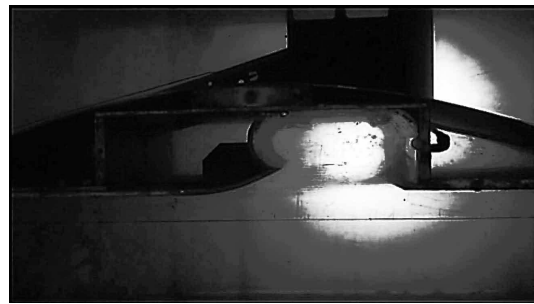
На рис. 12 представлена визуализация течений в этих кавернах при числе  $Re = 2.38 \cdot 10^5$ . На рис. 12, а показана картина течения в прямоу-



а



б



в

Рис. 12. Визуализация течения прямоугольной и “обтекаемых каверн” при  $l/h = 1.67$  и  $l/s = 0.333$ ,  
 $Re = 2.38 \cdot 10^5$ : а – прямоугольная;  
 б –  $a/h = 0.167$ ; в –  $a/h = 0.333$

гольной каверне рассматриваемого удлинения. Согласно [1] в такой каверне фиксируются два больших вихря, которые вращаются в одну сторону по часовой стрелке, а между ними малый, вращающийся против часовой стрелки. Такая конфигурация течения неустойчива, вихри периодически разрушаются. При этом правый вихрь является более устойчивым по сравнению с левым, который разрушается чаще. Сопротивление у этой прямоугольной каверны выше, чем у каверны с меньшим удлинением.

На рис. 12, б представлена визуализация течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.167$ , выпол-

ненная внутренней окрашенной струйкой. Здесь, как и в аналогичной каверне меньшего удлинения (рис. 10, б), точка присоединения срединной линии слоя смешения примерно совпадает с острой кромкой задней стенки каверны или несколько превышает ее. Однако в данном случае ввиду большего удлинения каверны в ней образуется не одно циркуляционное течение, а реализуются два вихря. Оба вихря вращаются в одну и ту же сторону по часовой стрелке. Правый вихрь большего диаметра, который определяется величиной глубины каверны, а левый меньшего, так как он определяется величиной диаметра полуцилиндрической части задней стенки каверны. Между вихрями, где их наружные слои движутся навстречу друг другу, образуется зона дестабилизации течения. Процессы, происходящие в этой зоне, стохастически провоцируют разрушение системы течения из двух вихрей. Эти вихри то периодически сливаются в одно циркуляционное течение, как в аналогичной каверне меньшего удлинения, то снова восстанавливаются. Все это сопровождается пульсирующими выбросами жидкости из каверны. Сопротивление этой каверны больше, чем у упомянутой каверны меньшего удлинения (рис. 10, б), но меньше, чем у прямоугольной каверны рассматриваемого удлинения. Эскиз такого течения приведен на рис. 4, з.

На рис. 12, в представлена визуализация течения в обтекаемой каверне при  $a/h = 0.333$ , также выполненная внутренней окрашенной струйкой. Видно, что в данном случае точка присоединения срединной линии слоя смешения находится ниже острой кромки задней стенки каверны. Часть окрашенной струйки движется вниз по течению за пределы каверны, а другая, двигаясь вверх, обтекает с отрывом острую кромку задней стенки. В результате в каверне образуются два вихря, которые вращаются в разные стороны. Один вихрь (малый) заполняет полуцилиндрическую часть задней стенки каверны и вращается против часовой стрелки. Другой вихрь (большой) заполняет основную часть каверны, имеет продолговатую форму и вращается по часовой стрелке. Такое вихревое образование проявляет признаки устойчивости и отличается малым "транзитом" жидкости через каверну. Это влечет за собой уменьшение сопротивления в такой каверне, которое при  $Re > 2.20 \cdot 10^5$  приобретает значения, близкие к нулевым. Эскиз такого течения в каверне представлен на рис. 4, б.

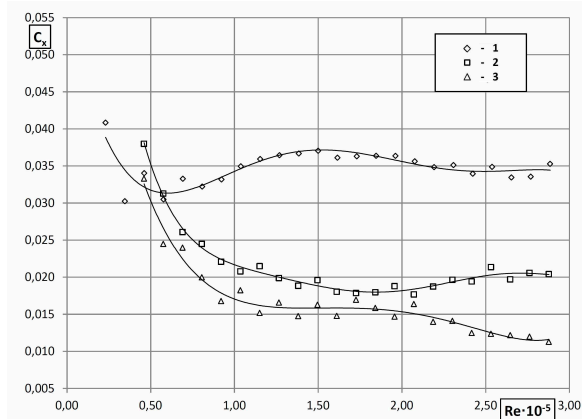


Рис. 13. Коэффициент гидродинамического сопротивления каверн при  $l/h = 2.00$  и  $l/s = 0.400$ : 1 – прямоугольная; 2 – "обтекаемая"  $a/h = 0.167$ ; 3 – "обтекаемая"  $a/h = 0.333$

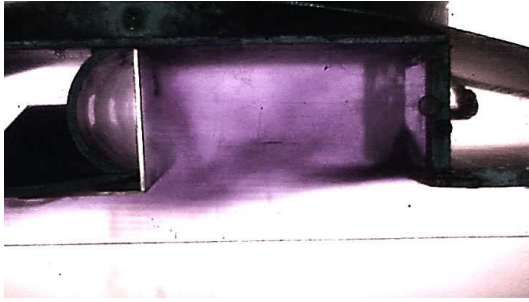
## 2.5. Обтекаемые каверны с относительным удлинением $l/h = 2.00$

На рис. 13 представлен график коэффициентов сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса для двух обтекаемых каверн (при  $a/h = 0.167$  и  $0.333$ ) и прямоугольной каверны. Для всех каверн  $l/h = 2.00$ .

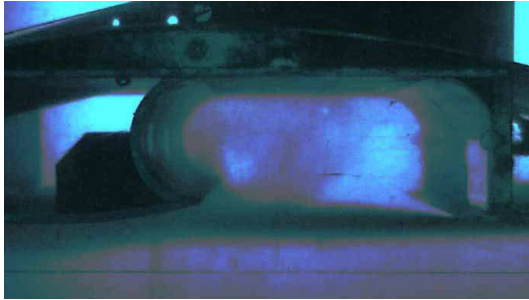
Данные, приведенные на графике, свидетельствуют о том, что сопротивление всех рассматриваемых каверн существенно увеличилось. Тем не менее, сопротивление обтекаемых каверн составляет примерно половину от сопротивления прямоугольной каверны данного удлинения. При этом наименьшее сопротивление имеет обтекаемая каверна с  $a/h = 0.333$ .

На рис. 14 представлена визуализация течения в рассматриваемых кавернах при  $Re = 2.86 \cdot 10^5$ . На рис. 14, а дана картина течения в прямоугольной каверне. Как известно из [1], такое течение характеризуется появлением двух вихрей с одинаковым направлением вращения (по часовой стрелке). Такая вихревая система в рассмотренном диапазоне чисел  $Re$  крайне нестабильная. Вихри периодически поочередно разрушаются со значительным выбросом жидкости из каверны во внешний поток. Этим объясняется сравнительно большое сопротивление такой каверны.

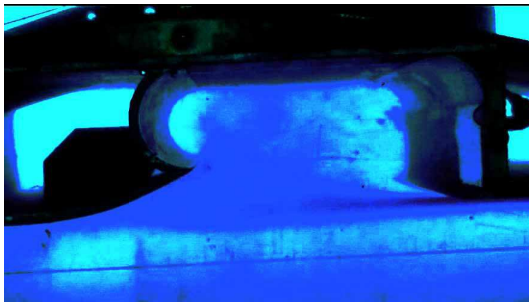
Рис. 14, б представляет визуализацию течения в обтекаемой каверне с  $a/h = 0.167$ , выполненную с помощью наружной окрашенной струйки. В этой каверне, как и в прямоугольной, периодически реализуются два вихря, которые вращаются в одну сторону (по часовой стрелке). Но картина течения больше похожа на приведенную на рис. 12, б.



а



б



в

Рис. 14. Визуализация течения прямоугольной и "обтекаемых" каверн при  $l/h = 2.00$  и  $l/s = 0.400$ ,  $Re = 2.86 \cdot 10^5$ : а – прямоугольная; б –  $a/h = 0.167$ ; в –  $a/h = 0.333$

Здесь также острая кромка кормовой стенки каверны обтекает без отрыва. Левый вихрь заполняет часть своего объема полуцилиндрическую область кормовой стенки каверны и является более устойчивым, чем правый. Возникающая между вихрями зона дестабилизации периодически провоцирует разрушение вихревой системы, в основном за счет правого вихря. Сопротивление каверны также увеличивается. Эскиз такого течения представлен на рис. 4, г.

На рис. 14, в представлена визуализация течения в этой обтекаемой каверне при  $a/h = 0.333$ , также выполненная наружной окрашенной струй-

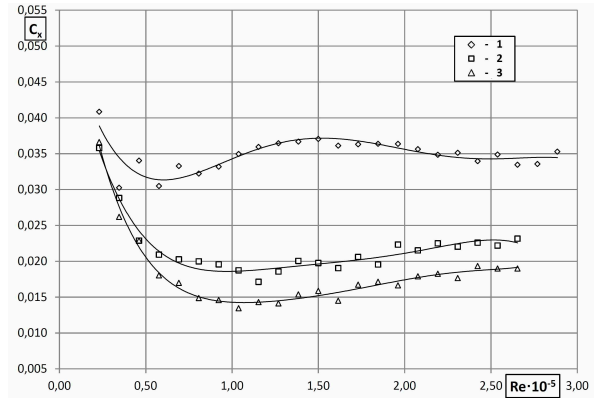


Рис. 15. Коэффициент гидродинамического сопротивления каверн: 1 – прямоугольная при  $l/h = 2.33$  и  $l/s = 0.467$ ; 2 – "обтекаемая" при  $l/h = 2.33$ ,  $l/s = 0.467$ ,  $a/h = 0.167$ ; 3 – "обтекаемая" при  $l/h = 2.33$ ,  $l/s = 0.467$ ,  $a/h = 0.333$

кой. Видно, что срединная линия слоя смешения подходит к кормовой стенке каверны ниже острой кромки, вследствие чего эта кромка обтекает с отрывом. При этом в полуцилиндрической области каверны образуется малый левый вихрь, вращающийся против часовой стрелки. В основной же части каверны образуется циркуляционное течение с направлением вращения по часовой стрелке. Поскольку соприкасающиеся наружные слои этого течения и малого вихря движутся в одном направлении, то малый вихрь является устойчивым. Само же циркуляционное течение, ввиду значительного продольного размера, является неустойчивым и, в свою очередь, периодически разрушается, распадаясь на ряд вихрей и вновь восстанавливаясь. Как правило, формируются большие вихри, вращающиеся в одну сторону (по часовой стрелке), между ними образуется малый сопрягающийся. Но эта картина неустойчива и периодически разрушается. Этот процесс способствует увеличению "транзита" жидкости через каверну и увеличению ее сопротивления. Эскиз такого течения в каверне представлен на рис. 4, д.

## 2.6. Обтекаемые каверны с относительным удлинением $l/h = 2.33$

На рис. 15 представлен график коэффициентов сопротивления обтекаемых каверн при  $a/h = 0.167$  и  $a/h = 0.333$ , для которых  $l/h = 2.33$ , и прямоугольной каверны, для которой  $l/h = 2.00$ .

Из графика видно, что сопротивление обтекаемых каверн данного удлинения несколько увеличилось по сравнению с предыдущим случаем.

По-прежнему наименьшим сопротивлением обладает обтекаемая каверна с  $a/h = 0.333$ . И по-прежнему сопротивление обеих обтекаемых каверн существенно меньше, чем у прямоугольной каверны с удлинением  $l/h = 2.00$ . В то же время видно, что сопротивление обтекаемых каверн проявляет тенденцию к увеличению с ростом числа Рейнольдса.

Визуальное наблюдение течения в рассматриваемых обтекаемых кавернах показывает, что картина течения в них практически не изменилась по сравнению с предыдущим случаем и может быть представлена на рис. 14, з, д. Таким образом, изменение удлинения обтекаемых каверн от  $l/h = 2.00$  до  $l/h = 2.33$  незначительно увеличило сопротивление и не изменило картину течения в этих кавернах.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 16 представлена зависимость коэффициентов сопротивления обтекаемых каверн от относительного удлинения каверн в виде  $l/(h-a)$  при постоянном значении числа Рейнольдса по глубине  $Re_h = 1.5 \cdot 10^5$ , то есть при одной и той же скорости обтекания для всех каверн ( $V = 2.6$  м/с), поскольку глубина для всех каверн одинакова. Для сравнения приведен также график коэффициентов сопротивления для соответствующих исходных прямоугольных каверн. Этот график приведен в зависимости от относительного удлинения каверн в виде  $l/h$  (поскольку для этих каверн  $a = 0$ ).

Из графика видно, что есть область значений  $C_x$  при  $l/(h-a) \leq 1.2$ , где сопротивление обтекаемых каверн превышает сопротивление исходных прямоугольных каверн. При всех же  $l/(h-a) \geq 1.2$  сопротивление обтекаемых каверн меньше, чем у прямоугольных с одинаковым относительным удлинением. Сопротивление прямоугольных каверн с увеличением  $l/h$  всё время возрастает, тогда как сопротивление обтекаемых каверн с увеличением  $l/(h-a)$  сначала уменьшается, достигает значений, близких к нулю (при  $l/(h-a) = 1.6$  и  $l/(h-a) = 2.5$ ), а затем неуклонно возрастает, оставаясь, тем не менее, меньше сопротивления прямоугольных каверн.

Как показали представленные выше результаты визуализации течений в обтекаемых кавернах, наименьшие значения их сопротивления достигаются тогда, когда режимы течения в них являются устойчивыми (рис. 10, б и рис. 12, в) и, соответ-

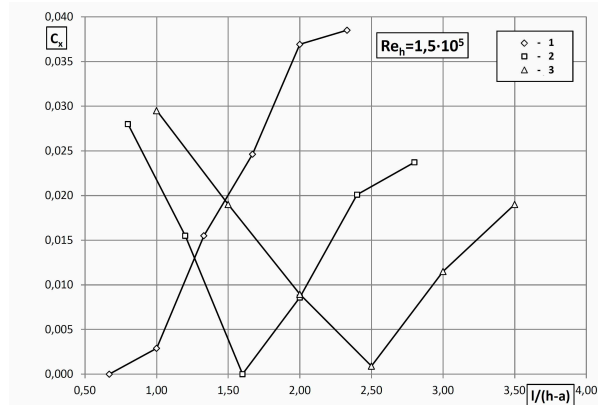


Рис. 16. Зависимость коэффициентов сопротивления обтекаемых каверн от относительного удлинения каверн в виде  $l/(h-a)$ : 1 – прямоугольная; 2 – ”обтекаемая” при  $a/h = 0.167$ ; 3 – ”обтекаемая” при  $a/h = 0.333$

ственно, (рис. 4, а, б). Видимо и во всем интервале значений  $l/(h-a) = 1.6 \div 2.5$  и в ближайшей окрестности этого интервала течения в обтекаемых кавернах будут также устойчивыми и, следовательно, сопротивление обтекаемых каверн будет при этом также близким к нулевым значениям.

Таким образом, изменение положения точки N на задней стенке обтекаемой каверны (рис. 2) по отстоянию ее от передней стенки каверны и от основания каверны позволяет управлять картиной течения в каверне и, соответственно, получать большие или меньшие (вплоть до близких к нулевым) значения сопротивления этих каверн.

Особенностью графика рис. 16 является то, что коэффициенты сопротивления обтекаемых каверн при малых значениях  $l/(h-a)$  превышают значения этих же коэффициентов при больших значениях  $l/(h-a)$ , что, казалось бы, противоречит здравому смыслу. Этот эффект возникает ввиду того, что с целью определения различия в величине сопротивления при переходе от исходных прямоугольных каверн к обтекаемым кавернам в качестве характерной длины рассматривалась длина прямоугольной каверны (рис. 2). Тогда как для обтекаемых каверн следовало бы избрать другую характерную длину, которая учитывала бы наличие у этих каверн полуцилиндрической вставки. Например, в качестве такой новой характерной длины (назовем ее приведенной длиной) можно избрать длину  $l_{пр} = l + r$ , где  $r$  – радиус полуцилиндрической вставки (рис. 2). Тогда сила сопротивления каверн при вычислении  $C_x$  относилась бы не к площади  $S = l \cdot s$ , а к приведенной площади  $S_{пр} = (l + r) \cdot s$ . В таком случае коэффициенты

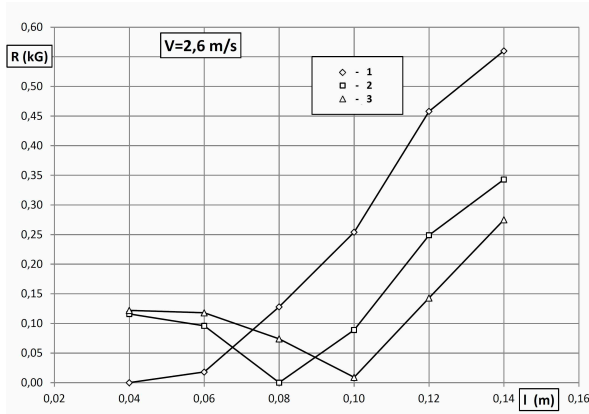


Рис. 17. Силы сопротивления обтекаемых каверн и исходных прямоугольных каверн в размерном виде: 1 – прямоугольная; 2 – ”обтекаемая” при  $a/h = 0.167$ ; 3 – ”обтекаемая” при  $a/h = 0.333$

сопротивления каверн при малых удлинениях возрастут и станут сопоставимы с коэффициентами сопротивления каверн с большими удлинениями. Но качественное соотношение существования минимума для определенного удлинения в зависимости от параметра заглибления  $a/h$  не меняется.

Реальное представление о соотношении сил сопротивления всех испытанных каверн можно получить при рассмотрении графика на рис. 17. На этом графике в размерном виде представлена зависимость силы сопротивления  $R$  всех испытанных каверн от длины каверн  $l$  и от расстояния  $a$  от острой кромки задней стенки каверны до нижней плоскости каверны, определяемых в соответствии с рис. 2. Все силы сопротивления каверн, представленные на этом графике измерены при скорости внешнего потока  $V = 2.6$  м/с.

Независимо от способа представления основные результаты работы сводятся к следующему:

- сопротивление обтекаемых каверн рассмотренных модификаций, начиная с определенного относительного удлинения каверн, становится меньше по величине, чем сопротивление соответствующих им исходных прямоугольных каверн;
- имеется определенный диапазон значений относительных удлинений обтекаемых каверн и диапазон значений отстояний острой кромки задней стенки этих каверн от их основания, при которых сопротивление обтекаемых каверн приобретает минимальные значения, близкие к нулевым.

## ВЫВОДЫ

Путем испытаний в гидродинамической трубе в турбулентном потоке серии прямоугольных каверн с измененной формой задней стенки определены их коэффициенты гидродинамического сопротивления. Испытания проведены в диапазоне чисел Рейнольдса  $Re = (0.2 \div 3.0) \cdot 10^5$ . Испытаны каверны с относительным удлинением  $l/h = 0.67 \div 2.33$ . Проведена визуализация течений в этих кавернах. Установлена связь между картиной течения в кавернах и величиной их коэффициентов сопротивления.

В работе показано, что при предложенной модификации кормовой стенки прямоугольной каверны и в соответствующем диапазоне относительного удлинения этой каверны и скорости потока в каверне формируются квазиустойчивые крупномасштабные вихревые структуры. Это, в свою очередь, приводит к существенному уменьшению гидродинамического сопротивления каверны по сравнению с прямоугольными кавернами при удлинении  $l/h > 1.2$ . При определенном соотношении геометрических параметров кормовой стенки каверны, удлинения каверны и числа Рейнольдса сопротивление каверны может быть пренебрежимо малым в достаточно широком диапазоне чисел  $Re$ .

1. Белинский В. Г., Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Парамонов Ю. А. Экспериментальное исследование сопротивления и картины обтекания прямоугольных каверн в турбулентном потоке // Прикладна гідромеханіка.– 2012.– 14(86), N 4.– С. 3–25.
2. Young A. D., Paterson J. H., Jones J. L. Aircraft excrescence drag // NATO AGARD.– 1981.– N 264.– P. 76–100.
3. Savory E., Toy N., Disimile P. J., Dimicco R. G. The drag of three-dimensional rectangular cavities // Applied Scientific Research.– 1993.– 50.– P. 325–346.
4. Faure T. M., Adrianos P., Lusseyran F., Pastur L. Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers // Exp. Fluids.– 2007.– 42.– P. 169–184.
5. Choi K.-S., Fujisawa N. Possibility of drag reduction using d-type roughness // Applied Scientific Research.– 1993.– 50.– P. 315–324.
6. Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование).– М., СПб.: 2001.–360 с.
7. Воропаев Г. А., Розумнюк Н. В. Управление течением в каверне с помощью периодического ддува // Прикладна гідромеханіка.– 2010.– 12(84), N 3.– С. 3–11.