

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ В КОРОТКОМ КРИВОЛИНЕЙНОМ КАНАЛЕ С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ВЫСТУПАМИ

### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты опытных исследований коэффициента гидравлического сопротивления в коротком канале, представляющем собой поворот на  $90^\circ$ , на выпуклой или на вогнутой поверхности которого установлены полусферические выступы. Анализируются данные по коэффициенту давления на выступах, а также скоростные поля в поперечном сечении канала.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка энергосберегающих технологий, совершенствование систем охлаждения высокотемпературных ГТД и ГТУ, создание экономичных теплообменников приводят к необходимости снижения затрат на прокачку теплоносителей.

Использование регулярной макрошероховатости в теплообменных каналах позволяет снизить гидродинамические потери при сохранении умеренной интенсивности теплоотдачи. При этом кроме самих интенсификаторов теплообмена на течение теплоносителя могут воздействовать различные факторы. Одним из возмущающих факторов являются центробежные массовые силы, возникающие в криволинейном течении.

Известно, что воздействие на поток поля центробежных массовых сил изменяет гидродинамику и теплоотдачу. До настоящего времени исследование воздействия продольной кривизны поверхности на теплоотдачу проводилось лишь для сферических выемок [1] и поперечных полуцилиндрических выступов [2].

В докладе приводятся результаты исследования гидравлического сопротивления короткого криволинейного канала с полусферическими выступами для различных значений относительной кривизны поверхности и высоты канала.

### 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опытная установка для исследования гидравлического сопротивления при интенсификации теплообмена сферическими выступами в коротком криволинейном канале представляет собой аэродинамическую трубу, работающую в режиме разрежения. Перед опытным участком установлен плоский канал длиной 1 м.

Схема опытного участка представлена на рис.1. Ширина канала 400 мм, его относительная высота  $H/d$  изменялась от 0,86 до 1,43, где  $d$  – диаметр полусферического выступа.

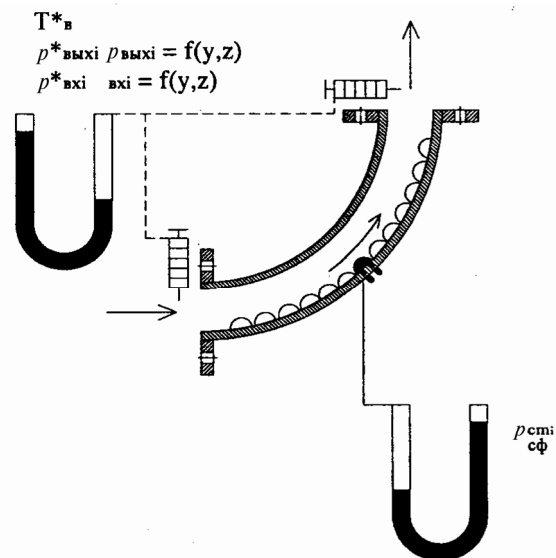


Рис. 1. Схема опытного участка экспериментальной установки

Значение относительной кривизны поверхности  $\delta^{**}/R$  варьировалось путем изменения радиуса кривизны канала ( $\delta^{**}$  – толщина потери импульса во входном сечении опытного участка): значения  $R_{\text{вогн}} = 500, 700$ ;  $R_{\text{вып}} = 400, 600$  мм. Значение  $\delta^{**}$  изменялось также и при варьировании числа  $Re$ .

Поля статического  $p$  и полного  $p^*$  давления измерялись во входном и выходном сечениях канала, где были установлены координатники с трубками Пито-Прандтля. Они перемещались как по высоте, так и по ширине канала, охватывая все его поперечное сечение.

Модели полусферических выступов имели диаметр 70 мм. Матрица из таких выступов устанавливалась на выпуклой или на вогнутой поверхности криволинейного канала (рис. 1) или на стенке прямого канала. Модели выступов размещались в 8 рядов в виде регулярной матрицы в шахматном порядке. Относительный продольный шаг выступов  $t_x/d = 1,14$ , а поперечный  $t_z/d = 1,36$ . Исследуемая модель устанавливалась в 6-м ряду выступов, имитируя таким образом  $i$ -й ряд матрицы равномерно расположенных выступов.

Статическое давление измерялось на модели полусферической выемки, выполненной холодным формованием из меди толщиной 0,8 мм. Отбор статического давления на этой модели осуществлялся в 6-ти точках. Диаметр отверстий на поверхности модели выступа составлял 0,4 мм. Измерения производились с шагом  $\Delta\phi = 45^\circ$ , для чего эта модель поворачивалась относительно ее оси симметрии.

Основные геометрические и режимные параметры в процессе опытов изменялись в следующих пределах: относительная высота канала  $H/d = 0,86 \dots 1,43$ ; число Рейнольдса  $Re_D = w_x D_T / \nu = 2,5 \cdot 10^4 \dots 9,7 \cdot 10^4$ ; относительная кривизна поверхности  $\delta^{**}/R = (0,8 \dots 8,7) \cdot 10^4$ .

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В докладе рассмотрены результаты опытного исследования гидродинамики в коротком криволинейном канале: поля скорости в выходном сечении канала; распределение коэффициента давления по обводу выступа на вогнутой, выпуклой поверхностях криволинейного канала и в прямом канале; коэффициент гидравлического сопротивления в криволинейном канале со сферическими выступами.

Полученные опытные данные о распределении продольной скорости  $w_x$  в выходном сечении криволинейного канала с выступами на вогнутой поверхности и в прямом канале при прочих равных условиях показывают, что около вогнутой поверхности криволинейного канала имеет место более равномерное распределение скорости  $w_x$  по оси  $z$  при  $y/d = \text{const}$ , чем в прямом канале с выступами.

В области расположения выступов на выпуклой поверхности уровень скоростей более низкий, нежели в прямом канале. Так, в одинаковых режимных условиях за центральным выступом на выпуклой поверхности продольная скорость  $w_x$  при  $y/d = 0,07 \dots 0,5$  ( $y = 5 \dots 35$  мм) изменяется от 3,5 до 5 м/с. При этом в прямом канале значения  $w_x$  изменяются от 3,7 до 7,7 м/с. Действительно, консервативное воздействие центробежных массовых сил около выпуклой поверхности приводит к подавлению пульсаций скорости. Вследствие этого интенсивность рециркуляционных течений, генерируемых выступами на выпуклой поверхности, возрастает по сравнению с течением в прямом канале, что снижает значение  $w_x$ .

Отметим, что низкочастотные пульсации давления, связанные с наличием крупномасштабных вихревых структур, прослеживались при измерениях значений  $p^*$  и  $p$  по всей высоте канала для всех значений  $H/d$ . Этот факт согласуется с результатами визуализации течений за поперечно расположенным цилиндром [3], где ширина рециркуляционной области составляет около 3 диаметров цилиндра.

Эксперименты по определению коэффициента давления  $C_p$  на поверхности выступа в прямом и криволинейном каналах свидетельствуют о том, что его распределение качественно не отличается от канонического случая обтекания сферы потенциальным потоком.

Сравнение значений  $C_p$  на боковых поверхностях выступа ( $\varphi = 90^\circ$ ) в случаях криволинейного и прямого каналов показало, что  $C_{p \text{ вогн}} \approx -3,0$ ;  $C_{p \text{ прям}} \approx -2,7$ ;  $C_{p \text{ вып}} \approx -2,3$ . Таким образом, имеем:  $C_{p \text{ вогн}} < C_{p \text{ прям}} < C_{p \text{ вып}}$ . Поскольку центробежные массовые силы около вогнутой поверхности снижают интенсивность рециркуляционных течений за счет

интенсификации турбулентных пульсаций, то это приводит к увеличению скорости течения в области выступов. А на выпуклой поверхности канала центробежные массовые силы подавляют турбулентные пульсации. Последнее способствует интенсификации рециркуляционных течений, генерируемых выступами, что снижает осредненную продольную скорость в этой области.

Полученные опытные данные по коэффициенту гидравлического сопротивления канала с выступами на вогнутой поверхности представлены на рис.2. Видно, что подавляющее большинство значений  $\xi_{\text{выст.вогн}}/\xi_{\text{выст.прям}} > 1$ . Такая же тенденция имеет место и при установке выступов на выпуклой поверхности канала:  $\xi_{\text{выст.вып}}/\xi_{\text{выст.прям}} > 1$ . Из этого следует, что искривление канала с выступами в обоих случаях приводит к увеличению коэффициента гидравлического сопротивления.

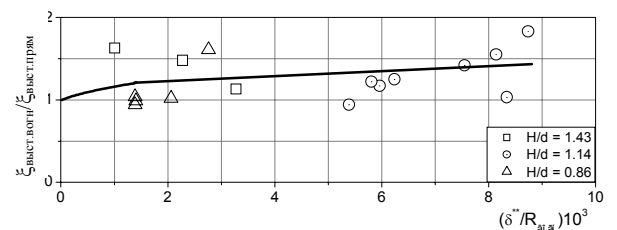


Рис. 2. Изменение коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от относительной кривизны вогнутой поверхности,  $Re_D = 2,54 \cdot 10^4 \dots 9,73 \cdot 10^4$

При расположении выступов на вогнутой поверхности криволинейного канала центробежные массовые силы приводят к ослаблению интенсивности отрывных и присоединяющихся течений в области выступов, что приводит к снижению потерь энергии в этой части канала. Об этом говорит сопоставление распределений продольной скорости потока в области выступов, которая около вогнутой поверхности больше, чем в прямом канале, при прочих равных условиях.

Если же рассмотреть область течения вне выступов ( $y/d > 0,5$ ), то в этой области, за исключением боковых пристенных участков, имеет место соотношение  $w_{x \text{ вогн}} / w_{x \text{ прям}} < 1$ . Более низкие скорости потока  $w_{\text{вогн}}$  по сравнению с  $w_{\text{прям}}$  могут быть вызваны более интенсивными, чем в прямом канале, рециркуляционными течениями вне области выступов. Как показали опыты, пониженные значения  $w_x$  наблюдаются в центральной и особенно в прилегающей к выпуклой поверхности областях поперечного сечения канала. Ввиду того, что около выпуклой поверхности центробежные массовые силы подавляют пульсации скорости, находящиеся там рециркуляционные течения становятся более интенсивными, нежели в прямом канале.

При размещении выступов на выпуклой поверхности криволинейного канала (рис.3) значение  $\xi$  также больше, чем в прямом канале с выступами. Связано это с увеличением потерь энергии за счет

образования более интенсивных рециркуляционных течений при обтекании выступов. Этому способствует подавление турбулентных пульсаций скорости около выпуклой поверхности канала.

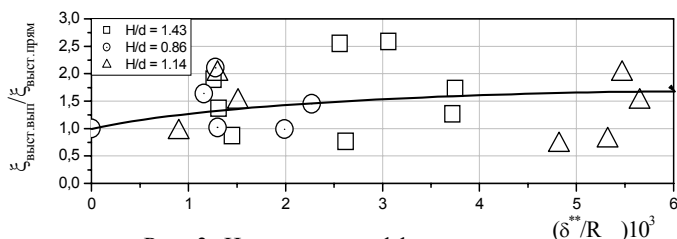


Рис. 3. Изменение коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от относительной кривизны выпуклой поверхности,  $Re_D = 2,54 \cdot 10^4 \dots 7,76 \cdot 10^4$

Из выполненных измерений следует, что в центральной области канала значения скоростей  $w_{x \text{ вып}} \approx w_{x \text{ прям}}$ . В то же время в области выступов имеет место неравенство  $w_{x \text{ вып}} < w_{x \text{ прям}}$ .

Изменение относительной высоты канала  $H/d$  не меняет характера воздействия кривизны поверхности на относительные значения  $\xi_{\text{выст.вогн}} / \xi_{\text{выст.прям}}$  и  $\xi_{\text{выст.вып}} / \xi_{\text{выст.прям}}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты опытных исследований показали, что гидравлическое сопротивление короткого криволинейного канала с выступами на вогнутой или на выпуклой поверхности превышает сопротивление прямого канала с выступами на 30...50% во всем исследованном диапазоне изменения относительной высоты канала. Увеличение сопротивления в обоих исследованных случаях объясняется воздействием на течение центробежных массовых сил через гене-

рацию или подавление турбулентных пульсаций, которые, в свою очередь, изменяют интенсивность рециркуляционных течений в канале.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$d$  – диаметр полусферического выступа;  
 $C_p$  – коэффициент давления;  
 $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  
 $y$  – линейная координата, отсчитываемая по нормали к поверхности;  
 $w_x$  – продольная скорость потока;  
 $H$  – высота канала;  
 $R$  – радиус продольной кривизны поверхности канала;  
 $\delta^{**}$  – толщина потери импульса на входе в опытный участок;  
 $Re_D$  – число Рейнольдса, определенное по гидравлическому диаметру канала;  
 $\varphi$  – полярный угол, отсчитываемый в плане от передней лобовой точки выступа.  
 Индексы:  
 $x, z$  – линейные координаты в продольном и поперечном направлениях;  
 прям, вогн, вып – установка выступа в прямом канале или на вогнутой, выпуклой поверхностях криволинейного канала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П.** Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2003. 142с.
2. **Щукин А.В., Агачев Р.С., Габдрахманов Р.Р., Хасаншин И.Я.** Интенсификация теплообмена поперечными выступами в коротком криволинейном канале // Тр. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 2002, Т.6. С.217 – 219.
3. **Альбом течений жидкости и газа:** пер. с англ./Сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986. 184 с.