

УДК 532;533

Исследование напорных характеристик перфорированной мембраны в осциллирующем потоке жидкости

А.А. Кураев, А.Б. Семёнов

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: agd@craft.nstu.ru

Приводятся результаты параметрических исследований напорных характеристик перфорированной мембраны в осциллирующем потоке жидкости. Дана схема установки для оценки величины напора, развиваемого перфорированной мембраной в осциллирующем потоке.

Ключевые слова: коэффициент расхода, разнорасходность, осцилляции, напор, кавитация.

Известно, что пропускная способность или коэффициент расхода μ отверстия с острыми входными кромками в мембране при совершенном сжатии и числе Рейнольдса потока $Re \approx 10^5$ равняется 0,6 [1], если же входные кромки отверстия скруглить, сделать коноидальными [2], то в этом случае $\mu \leq 1$. Разность между величинами этих двух коэффициентов расхода $\Delta\mu$ достигает 0,4. Если же выходные кромки отверстия заострить, на них при втекании горячей жидкости со стороны заостренных кромок может возникнуть кавитация и отмеченная разность коэффициентов расхода может превысить величину 0,4.

Число Рейнольдса определяется следующим образом: $Re = ud/\eta$, где u — осредненная скорость течения жидкости через отверстие, d — диаметр отверстия в мембране, η — коэффициент динамической вязкости. Под введенным выше термином «совершенное сжатие» понимается такое течение, которое реализуется при втекании жидкости в отверстие, расположенное на расстоянии не менее трех диаметров от ограничивающих поток стенок.

При расчете расхода жидкости через отверстие с коноидальными кромками учитывается минимальная и максимальная площадь отверстия. Это делается с помощью коэффициента расхода, рассчитываемого по формуле $\mu = \varphi_0 \varepsilon = \varphi_0 (S_{сж}/S_0)$, где ε — коэффициент сжатия струи, φ_0 — коэффициент скорости, $S_{сж}$ — площадь сжатого сечения, S_0 — площадь отверстия.

Если установить такую мембрану с отверстием в замкнутый сосуд с осциллирующим вдоль оси отверстия потоком (см. рис. 1), то под действием инерционного напора [3]

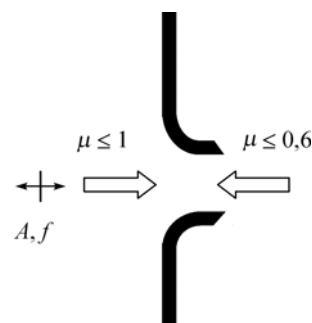


Рис. 1. Конфигурация отверстия в мембране.

A — амплитуда колебаний, f — частота осцилляций потока.

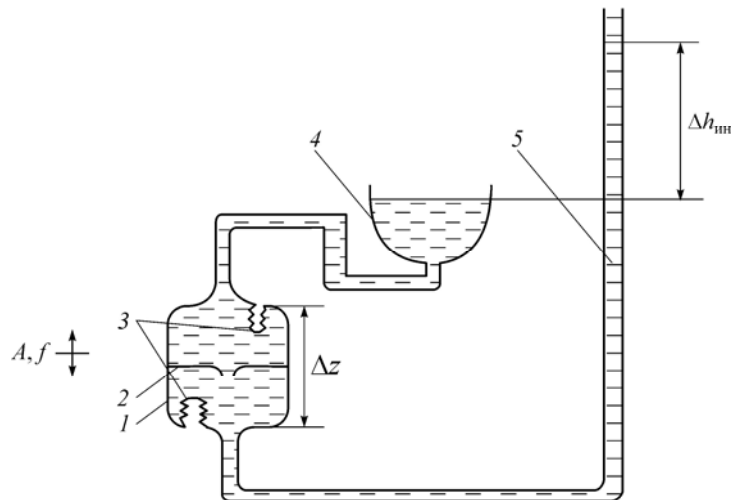


Рис. 2. Экспериментальная установка (схема 1).

1 — корпус, 2 — мембраны, 3 — упругообъемные элементы, 4 — уравнительный сосуд, 5 — пьезометр. Обозначения A, f см. на рис. 1.

из-за разности коэффициентов расхода через отверстие в мембране начнется однонаправленное перетекание жидкости [4].

Величину инерционного напора можно рассчитать с помощью формулы $\Delta h_{ин} = j/g \cdot \Delta z$ (здесь j — ускорение, обусловленное осциллирующим потоком, g — ускорение свободного падения, Δz — высота сосуда, заполненного жидкостью).

Осцилляции (вибрации) в технических устройствах (например, в двигателях внутреннего сгорания) часто имеют гармонический характер, когда отклонение осциллирующего объекта от положения равновесия имеет вид: $y = A \cdot \cos \phi$, где A — амплитуда вибраций, $\phi = \omega t + \phi_0$ — фаза колебаний, ϕ_0 — начальная фаза, $\omega = 2\pi f$ — циклическая частота, f — частота, t — время.

Величину ускорения, которому подвержено техническое устройство в условиях осцилляции, согласно гармоническому закону можно представить в виде $j = -A \omega^2 \cos \omega t$, или (учитывая, что $\omega = 2\pi f$) $j = -A 4 \pi^2 f^2 \cos 2\pi f t$.

Таким образом, ускорение и инерционный напор, вызванные гармоническими колебаниями мембраны, не постоянны по величине, а меняются во времени. Эффективное ускорение j за период можно вычислить с помощью формулы: $j_{эфф} = 0,707 A 4 \pi^2 f^2$ [6]. Схема установки для оценки величины напора, развиваемого перфорированной мембраной в осциллирующем потоке, приведена на рис. 2.

Поскольку вода, заполняющая полость установки, при данных давлении и температуре несжимаема, а разнорасходность проявляется только при протекании жидкости через отверстие мембраны, то в полостях над и под мембраной устанавливаются упругообъемные элементы (например, сильфоны), внутренняя полость которых сообщается с окружающей средой. Сильфоны при расширении выталкивают жидкость через отверстие в мембране. Жесткость сильфонов подбирается так, чтобы они могли деформироваться под действием инерционного напора.

Установка состоит из корпуса 1 с установленной в ее полости мембраной 2 с профилированным отверстием. К внутренней полости корпуса прикреплялись упругообъемные элементы 3, внутренняя полость которых сообщалась с окружающей средой. К верхней полости подсоединен уравнительный сосуд 4. Величина напора, развиваемого мембраной в осциллирующем потоке, измерялась пьезометром 5, представляющим

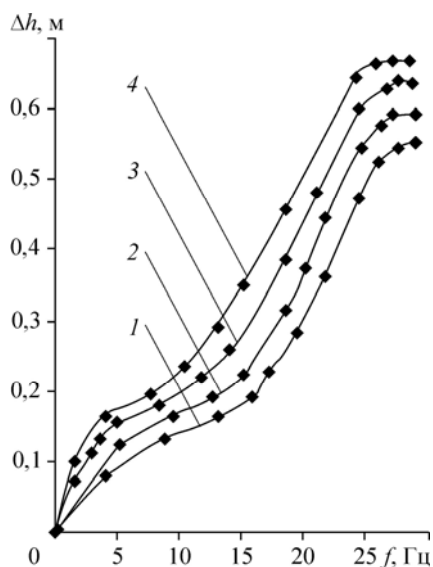


Рис. 3. Напор, создаваемый мембраной в осциллирующем потоке. $A = 2,5$ (1), 3 (2), 4 (3), 5 (4) мм.

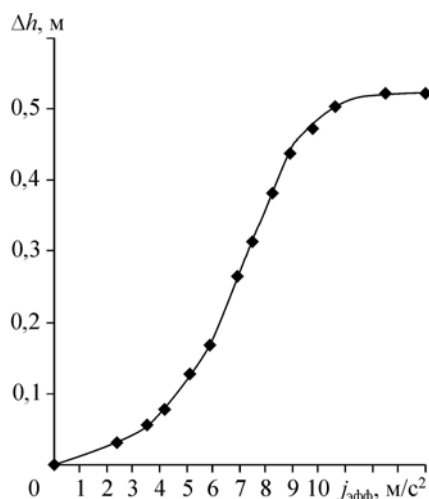


Рис. 4. Осредненный напор, создаваемый мембраной в осциллирующем потоке при варьировании $j_{эфф}$.

собой установленную вертикально стеклянную трубку диаметром $d = 0,006$ м. Осцилляции жидкости в сосуде задавались с помощью приведения сосуда с жидкостью в движение кривошипно-шатунным механизмом с приводом от двигателя постоянного тока П-91 ($N = 1$ кВт). Движение сосуда при этом имело гармонический характер. Частота вращения вала двигателя измерялась лабораторным частотомером МУК-1М и регулировалась плавно с помощью реостата. Погрешность измерения Δh составляла $\pm 0,001$ м, а частоты — не более $\pm 0,1$ Гц.

Наличие однонаправленного осредненного течения через отверстие в мембране проверялось по величине напора, создаваемого перфорированной мембраной, при изменении следующих величин:

- амплитудно-частотных характеристик осцилляции;
- диаметра и количества отверстий в диафрагме;
- объема упругообъемных элементов;
- температуры жидкости.

На рис. 3 приведена зависимость осредненного напора, создаваемого перфорированной мембраной, от амплитуды и частоты осцилляций жидкости в сосуде.

На рис. 4 представлена зависимость осредненного напора от эффективного ускорения, рассчитанного по формуле: $j_{эфф} = 0,707j_{max} = 0,707A\pi^2 f^2$.

На рис. 5 показано влияние диаметра отверстия в мембране на напор. Видно, что наибольший напор развивается при диаметре отверстия около 2 мм. Эти измерения проводились при различном значении $j_{эфф}$, температура жидкости при этом поддерживалась приблизительно на уровне 90–95 °С. Увеличение количества отверстий той же конфигурации на напорных характеристиках мембраны не отразилось.

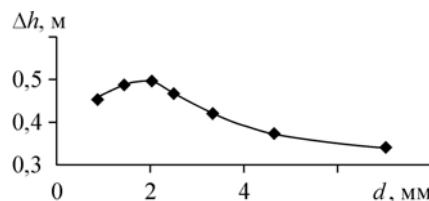


Рис. 5. Зависимость напора от диаметра отверстия. $j_{эфф} = 8$ (1), 6 (2), 4 (3), 2 (4) m/s^2 , $A = 0,0015$ м.

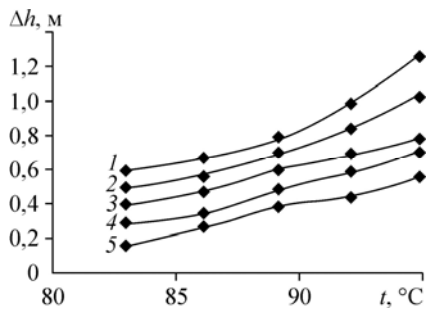


Рис. 6. Зависимость напора от температуры жидкости (схема 2). $j_{эфф} = 2,3$ (1), 2 (2), 1,5 (3), 1 (4), 0,5 (5) m/c^2 , $d = 0,008$ м.

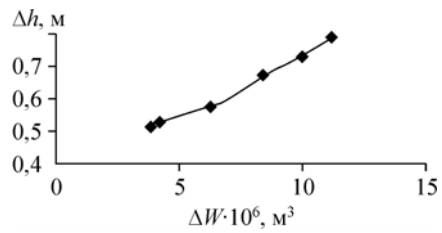


Рис. 7. Зависимость напора от объема ΔW упруго-объемных элементов.

$$j_{эфф} = 4 \text{ м/с}^2.$$

Как было сказано выше, при втекании горячей жидкости со стороны заостренных кромок может возникнуть кавитация. Это может произойти вследствие ускорения потока и появления воздушных включений в нем. Кавитация действительно возникала, так как наблюдалось образование пузырьков в пьезометре. Рисунок 6 демонстрирует влияние температуры жидкости на напор, развиваемый перфорированной мембраной. Увеличение температуры воды приводит к росту напора, что с учетом давления в сосуде, равном $P_0 + g\Delta h$, можно объяснить возможным началом развития кавитации при втекании жидкости со стороны острых кромок. Диаметр отверстия в мембране при этом составлял 0,002 м. Величина температуры измерялась с помощью термопары с точностью до 0,01 °С. Нагревание замкнутого сосуда с жидкостью производилось с помощью спирали нагревания, которая располагалась в нижней части сосуда. Для проведения исследования использовалась водопроводная вода, твердых включений и примесей в ней не наблюдалось.

На рис. 7 показана зависимость напора, создаваемого перфорированной мембраной, от объема упругообъемных элементов. Видно, что с увеличением объема силфона увеличивается напор, это происходит вследствие увеличения количества жидкости, вытесняемой из полостей над и под мембраной.

Проанализировав результаты исследований с использованием экспериментальной установки, изображенной на рис. 2, состоящей из пьезометра, сосуда и жестко прикрепленной к нему мембраны, видно, что в соответствии с этой схемой инерционное ускорение осциллирующего потока приводит к увеличению напора только в течение половины периода осцилляции потока. Для проверки наличия осредненного напора, развиваемого мембранами за полный период осцилляции потока, была построена установка, представленная на рис. 8. Диаметр отверстий диафрагм в этом случае составлял 2 мм,

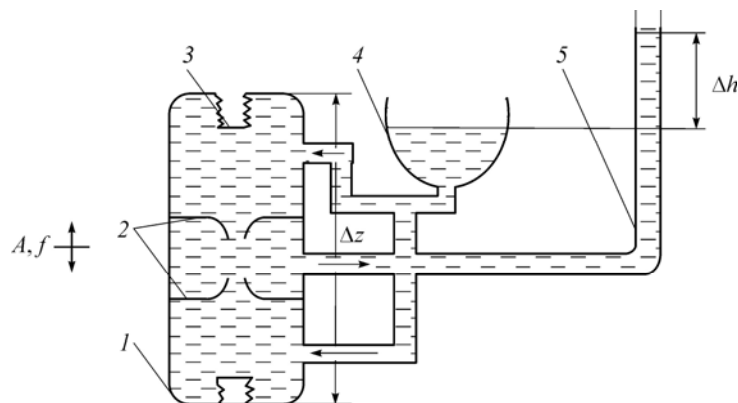


Рис. 8. Экспериментальная установка (схема 2).

1 — корпус, 2 — мембраны, 3 — упругообъемные элементы, 4 — уравнильный сосуд, 5 — пьезометр. Обозначения A, f см. на рис. 1.

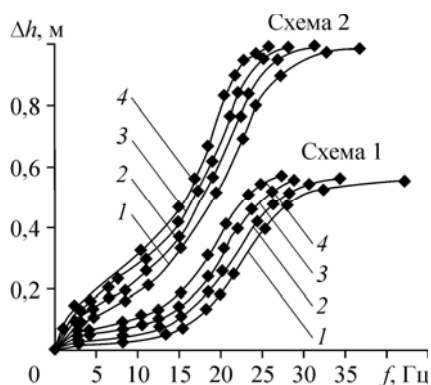


Рис. 9. Напор, создаваемый мембраной в осциллирующем потоке.
 $A = 2,5$ (1), 3 (2), 4 (3), 5 (4) мм.

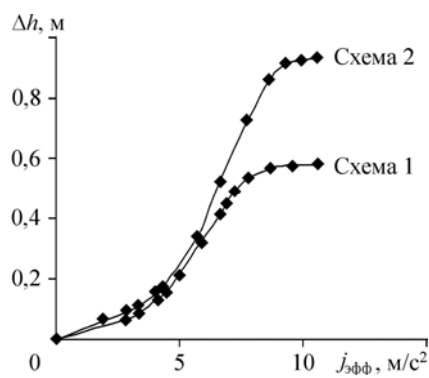


Рис. 10. Напор, как функция ускорения, создаваемого осциллирующим потоком.
 $\Delta W = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

исследования проводились с жидкостью, находящейся в состоянии комнатной температуры, объем сильфона составил $\Delta W = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. В процессе исследования проводились те же измерения, что и с установкой, изображенной на рис. 2. Ниже, на рис. 9, приведены зависимости величины осредненного напора, развиваемого мембраной от амплитудно-частотной характеристики осцилляции потока. На рис. 10 дана зависимость осредненного напора от $j_{\text{эфф}}$. Также на рис. 9, 10 приведены сравнительные графики зависимости напора, развиваемого одной мембраной (рис. 2) и двумя мембранами (рис. 8). Каждая ветвь, пронумерованная на графике, соответствует фиксированной амплитуде вибраций. Видно, что помещение двух мембран, перфорированных отверстиями, кромки которых направлены навстречу друг другу, приводит к увеличению напора приблизительно вдвое по сравнению с напором от одиночной перфорированной мембраны. Полученный напор можно использовать, например, для обслуживания двигателя внутреннего сгорания (для перекачки охлаждающей жидкости [5]).

Список литературы

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Наука, 1970. 216 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
3. Некрасов Б.Б. Гидравлика и ее применение на летательных аппаратах. М.: Машиностроение, 1967. 236 с.
4. Кураев А.А. Гипотезы, постулаты, парадоксы, эффекты в истории механики жидкости, газа и аэромеханики: учебное пособие // Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 28 с.
5. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем. М.: Мир, 1983. 520 с.
6. Пат. РФ 2456466, МПК⁷ F02F11/00. Прокладка под головку блока цилиндров двигателя внутреннего сгорания / Кураев А.А., Семенов А.Б.; патентообладатель Гос. обр. уч-ие высшего профессионального образования "Новосибирский технический университет". № 2010132607/06; заявл. 03.08.2010; опубл. 10.02.2012.

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2012 г.