

УДК 532.528+532.574

О НОВОМ МЕТОДЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ КАПЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ И ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

КАРЛИКОВ В. П., ХОМЯКОВ А. Н., ШОЛОМОВИЧ Г. И.

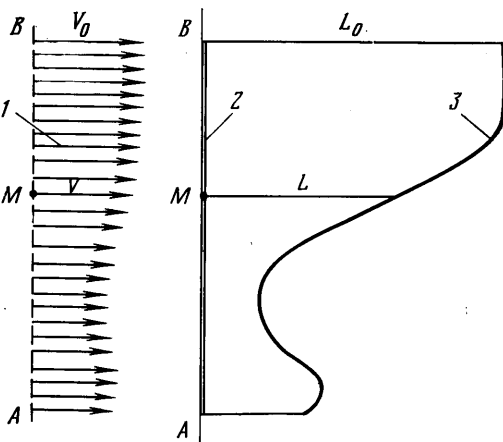
Известно небольшое число методов визуализации пространственных потоков капельных жидкостей, дающих возможность получить представление не только о структуре потока в целом, но и позволяющих произвести количественную оценку поля скоростей. Таким методом является, например, визуализация течения с помощью мелких газовых пузырьков, создаваемых в потоке путем электролиза [1]. Фотографируя поток с фиксированной экспозицией, можно по длине трассы, прорезанной отдельным пузырьком, судить о величине и направлении скорости в месте его нахождения. Аналогичен метод, использующий введение в поток нерастворимых твердых и жидких частиц [2].

Общей особенностью указанных методов является визуализация потока лишь в отдельных точках, положение которых к тому же не фиксировано заранее. Дискретный характер присущ и общеупотребительным методам измерения величины скорости, например с помощью вводимых в поток термоанемометров или трубок Пито — Прандтля, которые, существенно деформируя поток в своей окрестности, не позволяют одновременно измерить скорость в близких точках.

В настоящей работе обсуждается предложенный в Институте механики МГУ в 1967 г. [3] метод визуализации и измерения поля скоростей потока жидкости, состоящий в создании и регистрации размеров искусственной кавитационной полости за протяженным кавитатором с малым поперечным размером (кавитационным зондом), устанавливаемым поперек потока в заданном его участке. Малость поперечного размера зонда обеспечивает незначительность деформации потока.

1. На фиг. 1 показан профиль скорости V в точках неравномерного установившегося потока на линии AB , где размещен участок зонда 2 с кавитационной полостью 3 за ним. Метод основан на установлении соответствия между длиной каверны в каждой плоскости, перпендикулярной к зонду, и местными значениями характеристик исследуемого потока (давления и скорости) в точке пересечения зонда с этой плоскостью.

Получим приближенные формулы, связывающие отношение длин каверн в двух плоскостях, перпендикулярных зонду, с отношением местных скоростей изучаемого потока в точках пересечения этих плоскостей с линией расположения зонда. Во внутренних и внешних задачах гидродинамики могут существовать области течения с неоднородным профилем



Фиг. 1

скоростей, в которых вдоль линии расположения зонда статическое давление является переменным, и области, где оно не меняется.

Действительно, например, при обтекании в канале вертикально установленного профиля (стойки) ламинарным потоком жидкости можно в каждой горизонтальной плоскости указать участки, где переменности скорости вдоль фиксированной линии сопутствует переменность давления (область ближнего следа), и участки, где имеет место изобаричность течения (область дальнего следа). Переменность скорости в этом примере может быть вызвана как деформацией потока профилем, так и необратимыми потерями, обусловленными вязкостью, которые проявляются главным образом в пограничном слое и следе. Очевидно, что при вертикальном или наклонном расположении зонда изменение статического давления вдоль него в исследуемом потоке связано также и с весомостью жидкости.

Рассмотрим сначала случай неоднородного потока, когда зонд расположен горизонтально в области, где отсутствуют значительные необратимые потери энергии, т. е. жидкость можно считать идеальной. Будем исходить сейчас и в дальнейшем из следующих предположений.

При фиксированных размерах и форме сечения прямолинейного кавитационного зонда длина L каверны, образующейся за ним в плоскости, перпендикулярной зонду и пересекающей его в точке M (фиг. 1), как и для плоскопараллельных течений, обратно пропорциональна квадрату местного значения числа кавитаций σ :

$$L = \frac{k}{\sigma^2}, \quad \sigma = \frac{2(P - P_k)}{\rho V^2} \quad (1.1)$$

Здесь P_k — давление в каверне, k — константа, ρ — плотность жидкости, P и V — соответственно давление и скорость в точке M потока до внесения в него зонда.

Для длины каверны L_0 , образующейся за зондом в точке, где известны значения $P = P_0$ и $V = V_0$ (например, в области невозмущенного потока), имеем

$$L_0 = \frac{k}{\sigma_0^2}, \quad \sigma_0 = 2 \frac{(P_0 - P_k)}{\rho V_0^2} \quad (1.2)$$

Возможность использования (1.1) и (1.2) предполагает отсутствие существенного влияния капиллярных сил на размер кавитационной полости. В диапазоне чисел Вебера $We = \kappa / \rho V^2 D$, соответствующих описанным ниже опытам, это влияние было несущественным.

Число Фруда, рассчитанное по поперечному размеру зонда D , достаточно велико, что позволяет считать влияние весомости жидкости на длину каверны пренебрежимо малым. Практически влияние весомости на длину каверны можно считать отсутствующим, если $Fr = V / \sqrt{gD} \geq 25$.

Введем далее понятия местных (в точке M) относительных значений длины каверны $l = L / L_0$ и скорости потока $v = V / V_0$. Согласно (1.1) и (1.2), $l = \sigma_0^2 / \sigma^2$. Поскольку местные значения статического давления и скорости в рассматриваемом случае связаны с параметрами набегающего потока интегралом Бернулли, то в рамках сделанных допущений легко устанавливается следующая связь между v , l и σ_0 :

$$v = \sqrt{l} \sqrt{\frac{\sigma_0 + 1}{\sigma_0 + \sqrt{l}}} \quad (1.3)$$

Метод определения профиля скорости по этой формуле очень прост. По найденному с помощью фотоснимка каверны за зондом распределению величины l и измеренному в опыте значению σ_0 по (1.3) находится распределение относительной скорости v вдоль линии расположения зонда. Формула (1.3) справедлива для случая горизонтального расположения

зонда, когда отсутствует разница Z в глубинах расположения точек, в которых измерены L и L_0 .

Используя интеграл Бернулли для весомой жидкости, легко получить формулу для произвольного расположения зонда

$$v = \sqrt[4]{l} \sqrt{\frac{\sigma_0 + 1 + z}{\sigma_0 + \sqrt{l}}}, \quad z = \frac{2gZ}{V_0^2} \quad (1.4)$$

где z — безразмерная разность глубин.

В формуле (1.4) z имеет положительный знак, если точка, в которой измерено значение L , находится на большей глубине, чем точка, где измерено L_0 , и отрицательный знак — на меньшей глубине. При выводе формулы (1.4) принято, что разность глубин Z мало отличается от расстояния между соответствующими линиями тока в невозмущенном натекающем потоке. Это условие выполняется тем точнее, чем меньше деформирован поток в вертикальной плоскости.

Условие $l \rightarrow \infty$ при $\sigma \rightarrow 0$, следующее из (1.1), налагает ограничение сверху на величину диапазона скоростей, в котором можно пользоваться формулами (1.3) и (1.4). Соответственно получаем

$$v < \sqrt[4]{1 + \sigma_0} \quad (1.5)$$

$$v < \sqrt[4]{1 + \sigma_0 + z} \quad (1.6)$$

Кроме этого, естественным ограничением снизу для относительной скорости v является значение скорости, при котором местное число кавитации еще обеспечивает создание устойчивой кавитационной полости в рассматриваемой точке. Ограниченность (из-за малости величины σ_0) диапазона v не означает отсутствия области приложений метода. Например, для хорошо обтекаемых тел вращения типа вытянутых эллипсоидов вращения можно всегда указать значения относительных удлинений, для которых значение в любой точке потока не выходит за рамки указанных пределов. Другим примером применимости метода к любой внутренней точке потока является исследование поля скоростей при развитом кавитационном обтекании с числом кавитации σ_0 , когда максимальная относительная скорость в потоке достигается на поверхности каверны, где она равна $\sqrt[4]{1 + \sigma_0}$.

Рассмотрим теперь случай, когда кавитационный зонд расположен горизонтально в области, где переменность скорости обусловлена лишь различием предшествовавших необратимых потерь энергии или прироста ее на разных линиях тока, а статическое давление в точках линии расположения зонда является одинаковым. Учитывая, что $P = P_0$, из формулы $l = \sigma_0^2 / \sigma^2$ следует:

$$v = \sqrt[4]{l} \quad (1.7)$$

Определение относительной скорости v по формуле (1.7) не требует измерения числа кавитации, что существенно упрощает эксперимент. Для построения профиля относительной скорости достаточно иметь фотоснимок кавитационной полости за зондом.

Пропорциональность относительной длины каверны в этом случае четвертой степени относительной скорости свидетельствует о высокой чувствительности метода к изменению скорости в потоке. Впрочем, эта особенность метода еще более сильно выражена в случаях использования формул (1.3) и (1.4).

Нетрудно видеть, что в случаях, когда возможно применение формулы (1.7), отсутствует ограничение сверху на величину относительной скорости.

Учет силы тяжести при произвольном расположении зонда дает вместо соотношения (1.7) следующую формулу:

$$v = \sqrt[4]{lV\sqrt{1+z/\sigma_0}} \quad (1.8)$$

где величина z имеет тот же смысл, что и в формуле (1.4). В этом случае становится необходимым измерение числа кавитации σ_0 в точке потока со скоростью V_0 , однако ограничение на величину скорости здесь также отсутствует.

Заканчивая вывод формул для определения относительной скорости, можно для полноты рассмотреть наиболее общий случай, когда неоднородность профиля скоростей может быть связана одновременно и с деформацией потока при обтекании им некоторого тела, и с наличием нединамических необратимых потерь энергии или ее прироста на различных линиях тока. Вводя величину $\Delta\xi$, характеризующую необратимые потери энергии на линии тока, или, наоборот, прирост ее, и используя гидравлическое уравнение Бернулли для несжимаемой жидкости в виде

$$P + \frac{\rho V^2}{2}(1 + \Delta\xi) - \rho gZ = P_0 + \frac{\rho V_0^2}{2}$$

получим

$$v = \sqrt[4]{l} \sqrt{\frac{\sigma_0 + 1 + z - \Delta\xi}{\sigma_0 + \sqrt{l}}} \quad (1.9)$$

При $\Delta\xi = 0$ из (1.9) получается (1.4), а при $\Delta\xi = 1 - v^2$ — формула (1.7).

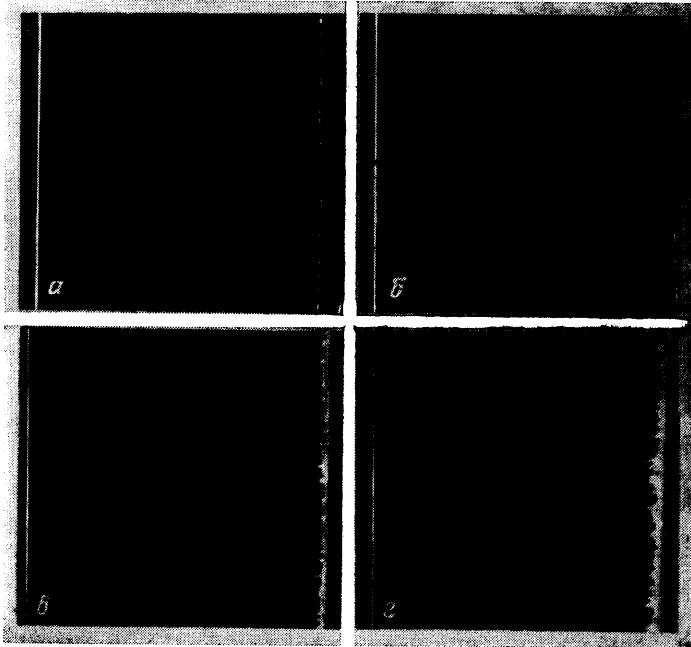
2. Укажем на ряд возможных областей применения рассмотренного метода, опишем опыт использования его в некоторых из них, а также технику проведения экспериментов и обработки полученных данных.

1. Исследование степени неоднородности потока в гидродинамических трубах и каналах.

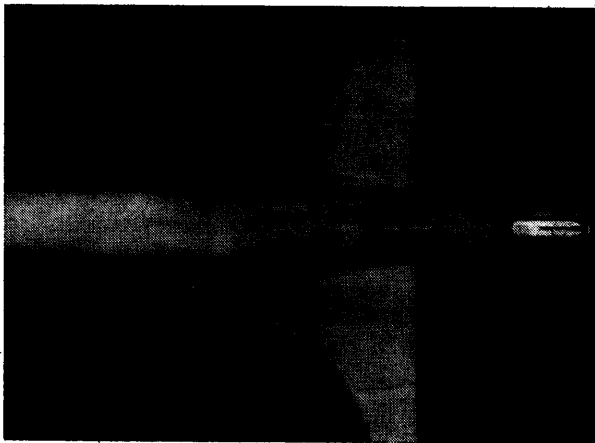
Гидродинамические трубы и каналы являются инструментом, требующим создания в их рабочих участках по возможности более равномерного поступательного потока. Оценка степени неравномерности потока позволяет судить о качестве установки.

Первые испытания кавитационного зонда были связаны с изучением потока в плоском рабочем участке гидродинамической трубы Института механики МГУ, имеющем ширину 1000 мм. Кавитационный зонд представлял собой металлическую струну диаметром 0,3 мм, протянутую горизонтально поперек потока и выведенную из трубы через специальные заглушки в ее стенках. Подача газа в каверну осуществлялась через каналы в заглушках. Другие каналы в заглушках использовались для измерения давления в каверне, необходимого для вычисления числа кавитации σ_0 . Натяжение струны осуществлялось с помощью системы блоков и грузов, обеспечивающей возможность изменения натяжения струны и протяжки для очистки от случайно осевших на нее из потока соринки.

Расход газа для создания и поддержания каверны был весьма мал из-за незначительности уноса его из каверны. Это обстоятельство характерно для зондов с малым поперечным размером, поскольку в силу малости поперечного размера каверны и, следовательно, сильного проявления сил поверхностного натяжения в зоне замыкания ее практически отсутству-



Фиг. 2



Фиг. 3

ет интенсивная возвратная струя и нестационарность течения здесь очень слабо выражена.

На фиг. 2 показаны фотоснимки каверн за зондом при скоростях течения $V_{\infty}=4$ м/с, 6, 8, 10 м/с, сделанных при экспозиции $\frac{1}{30}$ с (поток направлен слева направо).

В результате обработки фотографий установлено, что относительная неравномерность потока в исследованной зоне течения не превышает 0,5%. Поскольку рассмотренный пример соответствует изобарическому случаю, для определения профиля скоростей была использована наиболее простая степенная формула (1.7).

Выполненные опыты указывают на возможность оценки неоднородности потока в тех случаях, если она создается специально, как, например, это делается для исследования работы винтов в условиях неоднородного потока.

2. Исследование поля скоростей в окрестности хорошо обтекаемых тел.

В этом случае, как указывалось, имеется возможность использовать формулы (1.3) или (1.4) без нарушения ограничений типа (1.5) или (1.6). При испытаниях моделей в гидротрубе использование кавитационного зонда может быть особенно полезным для проведения анализа влияния стенок трубы на поле скоростей в окрестности моделей и внесения необходимых поправок.

3. Исследование поля скоростей в окрестности кавитационной полости.

На фиг. 3 показана каверна за зондом при исследовании кавитационного обтекания плоской пластины, поставленной поперек потока. Оказалось, что при пересечении зондом каверны нет необходимости в специальной подаче газа в область за ним, так как каверна за зондом заполняется газом из основной кавитационной полости, образованной за пластиной. На фотоснимке видно, что по мере приближения к поверхности основной кавитационной полости длина каверны за зондом резко увеличивается. В области смыкания ее с основной каверной имеет место интенсивный унос газа. Именно здесь достигается предел возможности использования метода, соответствующий ограничению по скорости (1.5). Как и в предыдущем примере, использование кавитационного зонда при изучении развитых кавитационных течений в трубе дает возможность провести весьма точный анализ влияния границ потока на поле скоростей в окрестности кавитационной полости.

4. Исследование профиля скорости в дальнем следе за обтекаемым телом и использование его для измерения полного сопротивления тела.

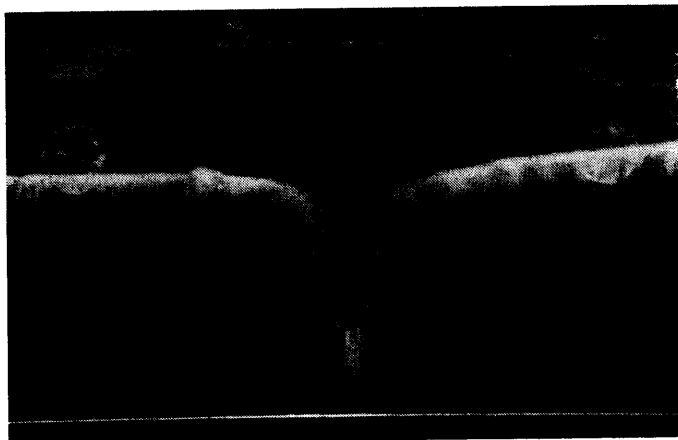
Детальное исследование с использованием кавитационного зонда в такого рода задачах было проведено с пластиной длиной $L_s = 160$ мм и толщиной 1,6 мм, обтекаемой в гидротрубе потоком, параллельным плоскости пластины. С помощью зонда определялось распределение относительной скорости $v = \sqrt{l}$. Кроме того, была измерена и исправлена с учетом загромождения трубы каверной относительная разность давлений $\Delta p = 2(P_\infty - P_0) / \rho V_\infty^2$ между сечением трубы, в котором фиксировалось статическое давление P_∞ и скоростью V_∞ невозмущенного потока, и сечением с давлением P_0 и скоростью V_0 , где помещался зонд. Далее коэффициент сопротивления тонкой пластины определялся по формуле

$$C_x = \Delta p y_1 + (2 + 1,5 \Delta p) \int_{-y_1}^{y_1} v dy - 2(1 + \Delta p) \int_{-y_1}^{y_1} v^2 dy \quad (2.1)$$

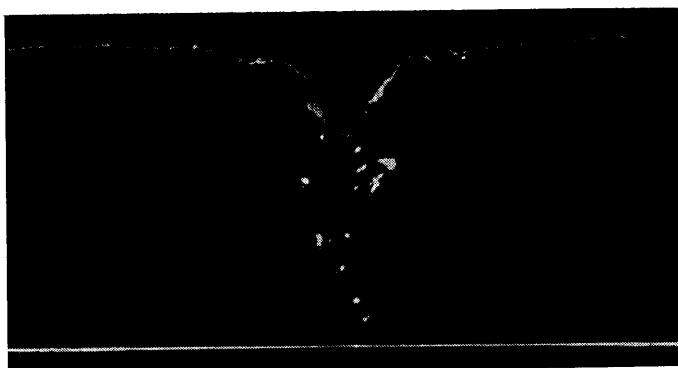
Здесь $2y_1 = 2Y/L_s$ — поперечный размер контрольной поверхности. При выводе этой формулы из уравнения импульсов, учитывая, что зона рабочего участка гидротрубы, где располагалась пластина, имеет ядро, в котором жидкость можно считать идеальной, боковые границы контрольной поверхности выбирались не выходящими за пределы этой области. Это позволило использовать интеграл Бернулли для установления связи между скоростью в невозмущенном потоке V_∞ и скоростью равномерного потока V_0 в сечении, где расположен зонд. При обтекании пластины потоком с числом Рейнольдса $Re = VL_s/\nu = 7 \cdot 10^5$ кавитационная полость за зондом, расположенным за пластиной на относительном расстоянии $x = X/L_s = 1$ от задней кромки пластины, имела вид, показанный на фиг. 4. Фотография

была сделана с экспозицией, равной $1/30$ с. После построения по формуле (1.7) профиля скоростей и вычисления по (2.1) соответствующего коэффициента сопротивления выяснилось заметное отличие его от коэффициента сопротивления, определенного в результате непосредственного измерения силы, действующей на пластину.

Причину расхождения результатов позволила установить фотосъемка кавитационной полости со временем экспозиции, равным 10^{-5} с. Оказа-

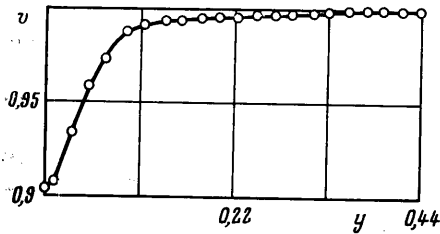


Фиг. 4



Фиг. 5

лось, что светлый непрозрачный участок каверны в центральной части следа на фотографии фиг. 4 представляет собой осредненную за время экспозиции последовательность положений хвостовой части каверны, являющейся в этой области существенно нестационарной из-за турбулентного характера следа. Высокая чувствительность каверн за зондом к продольным и поперечным пульсациям скорости в следе потребовала изменения методики определения средней длины каверны в зоне следа. Была получена последовательность из 12 фотографий каверны, сделанных с временным интервалом 60 с и экспозицией 10^{-5} с. Одна из них показана на фиг. 5. Осреднение длин каверн в фиксированных точках зонда привело



Фиг. 6

к получению профиля скорости в следе, представленного на фиг. 6. Найденное затем по (2.1) значение коэффициента сопротивления пластины оказалось близко совпадающим с определенным по весовым измерениям.

При использовании более коротких за счет меньшей подачи газа каверн за зондом продольные и поперечные пульсации в следе вызывают существенно меньшие по амплитуде

пульсации каверны, что дает на снимках более четкий контур каверны. Однако в связи со снижением точности обработки фотоснимков из-за меньшей протяженности каверны результаты не получаются более точными.

Наилучших результатов применения рассматриваемого метода следует ожидать, очевидно, при исследовании ламинарных течений, а также при отсутствии крупномасштабных пульсаций в турбулентных потоках жидкости. Опыты с пластиной позволяют сделать вывод о возможности получения правильного представления о распределении продольных пульсаций составляющих скорости потока в турбулентном следе.

5. Измерение поля скоростей в струйном пограничном слое.

В этом случае также следует считать предпочтительным исследование ламинарных режимов течения в слое или мелкомасштабных турбулентных потоков.

В заключение отметим, что из-за высокой чувствительности каверны за зондом к незначительным изменениям в поле скоростей может быть изучена возможность применения метода к исследованию слабонестационарных потоков жидкости. Эта особенность каверн за зондом, очевидно, может быть использована при создании специальных индикаторов состояния потока, чутко реагирующих на его изменение, и др. Указанное свойство каверны за зондом следует учитывать также и при разработке конструкций зондов, принимая специальные меры для предотвращения значительного возмущения потока в зоне прикрепления зонда к державкам. Последние не должны кавитировать или существенно деформировать поток в области перед зондом и т. п. Кроме того, при этом должны учитываться сформулированные ранее требования и ограничения к условиям проведения опыта, такие, например, как необходимость обеспечения больших чисел Фруда по диаметру зонда, требование близости к нормальному по отношению к вектору местной скорости расположения измерительного участка зонда, ограничения допустимого предела скорости и т. д.

Эти требования и ограничения, конечно, сужают область приложений метода, однако приведенные примеры свидетельствуют о возможности его усовершенствования и применения во многих практически важных случаях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wortmann F. X. Ein Methode zur Beobachtung und Messung von Wasserströmungen mit Tellur. — *Z. Angew. Phys.*, 1953, В. 5, № 6, S. 201–206.
2. Geller E. W. An electrochemical method of visualizing the boundary layer. — *J. Aeronaut. Sci.*, 1955, v. 22, p. 869–870.
3. Карликов В. П., Федченко В. П., Шоломович Г. И. Способ изучения течения капельной жидкости. А. с. № 224929. — *Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. Официальный бюлл. Госкомизобретений СССР*, 1969, № 26.

Москва

Поступила в редакцию
19.V.1981