

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ГИДРОДИНАМИКИ ИСКУССТВЕННЫХ КЛАПАНОВ СЕРДЦА МЕТОДОМ ФОТОХРОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

РЫЗАНЦЕВ Ю. С., ЮРЕЧКО В. Н.

Искусственные клапаны сердца (ИКС) различных типов находят широкое применение в клинической практике. К конструкции клапана предъявляется сложный комплекс требований, учитывающих, в частности, его гидродинамические характеристики. По современным представлениям, такие характеристики потока крови через ИКС, как завихренность, наличие отрывных зон, областей замкнутой циркуляции, интенсивность сдвиговых напряжений, степень турбулизации, оказывают перво-степенное влияние на гемодинамику и в значительной мере определяют степень пригодности ИКС для клинического применения. Получение необходимых для усовершенствования ИКС данных о гидродинамике потока крови через реальный клапан в живом сердце является чрезвычайно сложной задачей и информация в этой области весьма ограничена [1]. Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик ИКС в живом сердце не менее сложно. Информация о гидродинамике ИКС базируется на результатах стендовых лабораторных исследований, в которых клапан помещается в гидроканал, в той или иной степени моделирующий движение крови в клапане. При таком исследовании моделирование потока через ИКС, соответствующего реальным условиям в системе кровообращения (нестационарность со сложным законом изменения давления и скорости, пространственный, без симметриями, характер течения, нестационарность возмущения и т. д.), сопряжено с большими трудностями. Определенные трудности связаны с визуализацией потока.

Вследствие перечисленных причин в настоящее время в литературе имеются лишь немногочисленные экспериментальные данные о картине течения за ИКС, которые ограничены результатами экспериментов на гидродинамических стендах с потоком, свойства которого далеки от свойств потока в реальных условиях работы клапана в живом сердце. Поэтому на основе этих данных можно говорить лишь о гидродинамических характеристиках данного ИКС, находящегося в потоке со свойствами, определяемыми конструкцией используемого гидравлического стенда.

Отметим также, что имеющиеся экспериментальные исследования гидродинамических характеристик ИКС в основном выполнены в условиях стационарного обтекания [2-4].

Данные об обтекании ИКС потоком с известными гидродинамическими характеристиками позволяют судить о характере вносимых клапаном в поток возмущений, однако ввиду большого отличия гидродинамических условий в экспериментальном канале от реальных условий в сердце использование этой информации при разработке конструкций ИКС ограничено. Значение результатов, получаемых в экспериментах по исследованию обтекания ИКС в гидродинамических каналах, существенно возрастает при использовании этих данных для сравнительного анализа гидродинамических характеристик различных вариантов ИКС.

Поддерживая параметры потока на входе в различные ИКС одинаковыми, можно получить надежную информацию о сравнительной интенсивности возмущений, вносимых в поток клапанами различных типов. Полученные в одинаковых условиях, эти данные могут служить для сравнительной оценки гидродинамических свойств ИКС разных модификаций по их склонности к генерации застойных зон, турбулизации потока, созданию зон высоких градиентов скорости, отрывных течений и т. п. и могут быть использованы для усовершенствования ИКС.

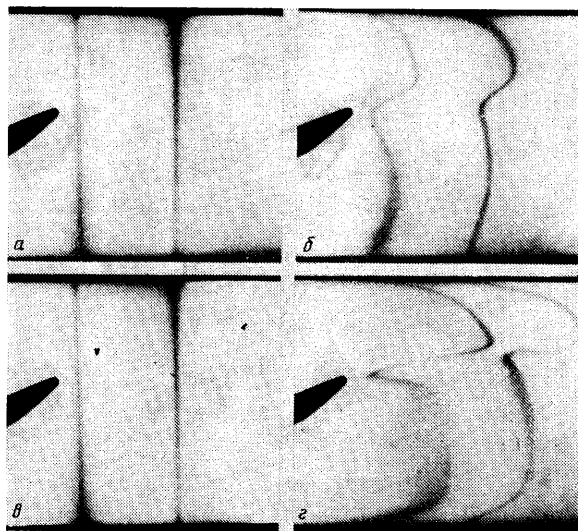
В данной работе на основе метода фотохромной визуализации потоков жидкости [5] разработана методика сравнительного анализа гидродинамических свойств ИКС и приведены результаты исследования потока за дисковыми ИКС. Получены данные о структуре потока за ИКС в двух взаимно перпендикулярных сечениях потока. Приведены данные о профиле скорости в этих сечениях. Проведено сопоставление гидродинамических характеристик двух типов ИКС «Björk-Shiley» [2] и «ЭМИКС» [5], широко используемых в медицинской практике в СССР и за рубежом.

Исследуемые ИКС устанавливались в круглую прозрачную трубу из оргстекла. Труба с ИКС являлась частью замкнутого гидродинамического стенда, в котором движение рабочей жидкости осуществлялось центробежным насосом. Более подробное описание гидродинамического стенда дано в [6].

Дисковые ИКС «ЭМИКС» и «Björk-Shiley» представляют собой выпукло-вогнутые и вогнуто-выпуклые диски, которые могут поворачиваться в ограничителях хода около оси, проходящей в плоскости несущего кольца клапана. Под действием давления жидкости диск клапана поворачивается, разделяя проходное сечение на две зоны, течение жидкости в которых носит разный характер. ИКС «ЭМИКС» и «Björk-Shiley» имеют близкие конструкции, различающиеся расположением ограничителей хода и формой диска, поэтому сравнение их в одинаковых гидродинамических условиях представляет большой интерес.

Метод фотохромной визуализации (ФХВ) заключается в создании в потоке жидкости цветowych меток, инициированных лазерным излучением в первоначально бес-

цветном фотохромном растворе, за времена порядка  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  с [7]. Фотоиндуцированная окраска фотохромного раствора сохраняется некоторое время после его фотоактивации. Это дает возможность регистрировать положение цветовой метки в потоке скоростной кинокамерой. Метод ФХВ является бесконтактным, практически не вносит возмущения в поток исследуемой жидкости и обеспечивает многократное безынерционное создание в заданном месте внутри потока окрашенных линий, пересечений линий и плоскостей путем облучения направленным УФ-излучением. Анализ возможности получения тонких с достаточной оптической плотностью линейных цветowych меток в жидких фотохромных растворах показал, что наиболее эффективным для фотоокрашивания растворов фотохромных соединений является использование интенсивных лазерных источников фотоиндуцирующего излучения.



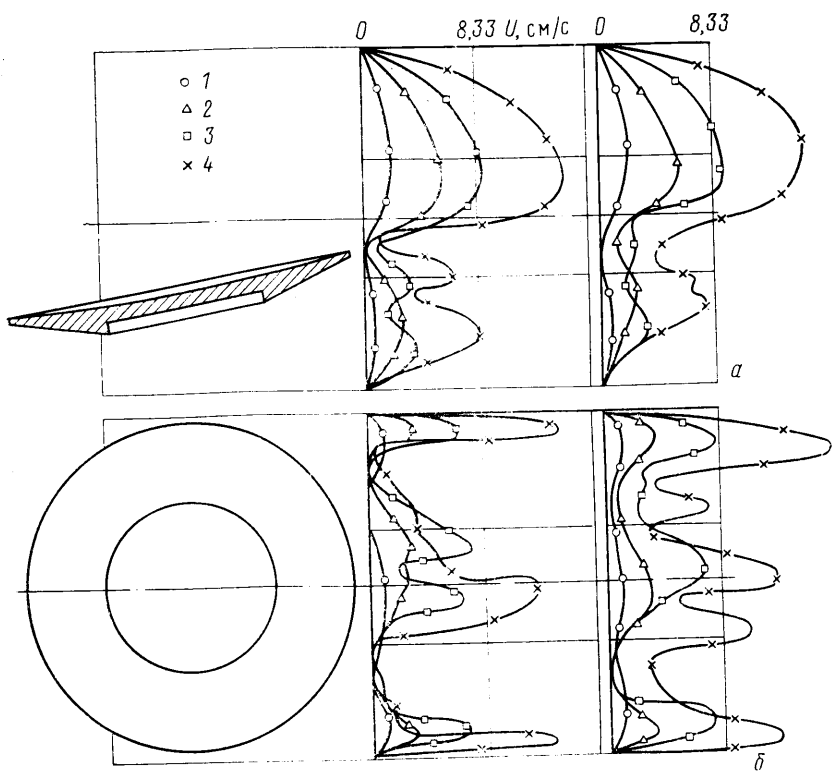
Фиг. 1

Лазерное излучение, фокусируемое цилиндрическими кварцевыми линзами в исследуемое сечение, создавало цветowe метки клинообразной формы, размер которых в плоскости съемки (толщина) изменялся от 0,7 до 0,3 мм, а ширина была одинаковой на всем ее протяжении и равнялась 3 мм. Съемка цветowych меток в потоке осуществлялась кинокамерой со скоростью 40 кадров в секунду. Для получения количественной информации при исследовании гидродинамических потоков методом ФХВ регистрировались не только моменты срабатывания затвора скоростной камеры, но и моменты выхода лазерного излучения из каналов фотоактивации. Детали схемы регистрации приведены в [6].

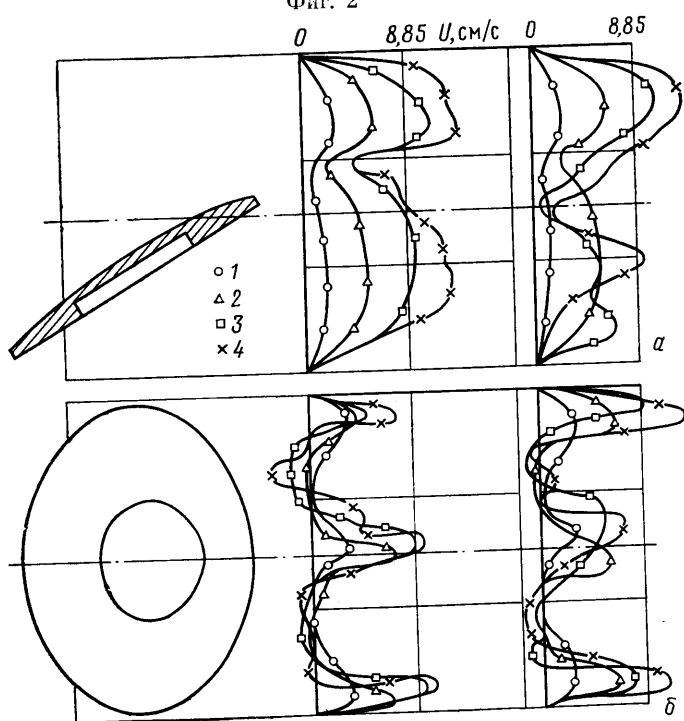
За клапаном, установленным в горизонтальной круглой трубе, создавались одновременно две линейные цветowe метки соответственно на удалении 15 и 25 мм от среза кольца клапана. Перед клапаном создавался ламинарный поток жидкости. Эксперименты велись при фиксированном положении диска клапана, когда угол раскрытия диска был максимальным. Измерения проводились при четырех значениях расхода, соответствующих числам Рейнольдса:  $Re=181, 549, 958, 1380$  для «ЭМИКС» и  $Re=189, 572, 1000, 1439$  для «Björk-Shiley».

В начальный момент времени метка имеет форму прямой линии (фиг. 1, а, в), поскольку образование метки происходит за  $\tau=10^{-6}$  с. На фиг. 1 представлены характерные фотографии метки за дисковым ИКС; на фиг. 1, б — положение цветовой метки спустя 0,25 с после ее образования при  $Re=181$ , на фиг. 1, г — спустя 0,23 с, при  $Re=958$ . Полученные негативы проецировались на экран, на котором измерялись смещения цветowych меток относительно первоначального положения и определялись скорости жидкости в различных точках сечения потока. Расчет скоростей проводился, как и в [8], в предположении, что движение жидкости поступательное. При этом следует отметить, что измерения проводились при небольших числах Рейнольдса, когда движение жидкости ламинарное и осевая компонента скорости значительно больше радиальной. Характеризуя точность полученных данных, укажем, что максимальная величина радиальной составляющей скорости в исследованных режимах не превышала 20% от осевой составляющей. На фиг. 2, 3 приведены профили осевой скорости  $U$ , рассчитанные на основе обработки большого объема экспериментальных данных для разных чисел Рейнольдса.

Для четкого различения на фиг. 2, 3 полученных профилей скорости каждая

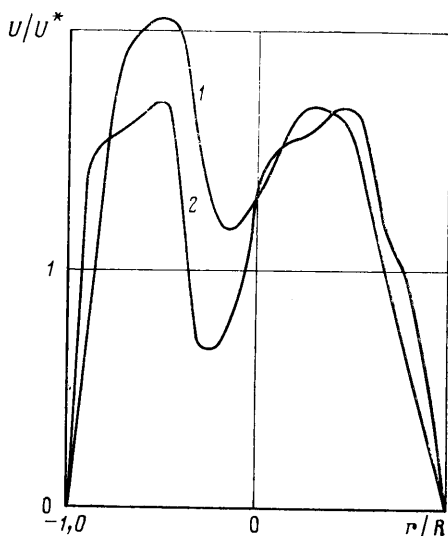


Фиг. 2



Фиг. 3

непрерывная сплошная кривая отмечена точками разной формы. На фиг. 2, а, б представлены профили скорости за ИКС «ЭМИКС» с углом раскрытия диска  $80^\circ$  в осевом вертикальном сечении канала на расстоянии 15 мм от кольца. Кривые 1–4 соответствуют  $Re=181, 549, 958, 1380$ . Видно (фиг. 2, а), что поток в рассмотренных сечениях разбивается диском клапана на две области – верхнюю и нижнюю. Скорость движения в верхней области выше, чем в нижней, что связано с сужением канала диском. В кормовой части диска возникает застойная зона, которая граничит с пиком скорости в верхней области. На границе застойной зоны, которая при исследованных расходах простирается на 25 мм вниз по потоку от кольца клапана, существуют большие градиенты скорости, порождающие сильные сдвиговые напряжения. Неустойчивость потока за ИКС «ЭМИКС» возникает при  $Re=1380$ . В тех же условиях исследовался ИКС «Björk-Shiley» с выпукло-вогнутым диском. Полученные профили скорости показаны на фиг. 3, кривым 1–4 соответствуют значения  $Re=189, 572, 1000, 1439$ . На фиг. 2, б, 3, б приведены распределения скорости за ИКС «ЭМИКС» и «Björk-Shiley» в сечении, перпендикулярном к сечению, показанному на фиг. 2, а, 3, а; линии на фигурах соответствуют тем же значениям чисел Рейнольдса.



Фиг. 4

Приведенные данные позволяют провести сравнение стационарных гидродинамических потоков для двух типов ИКС. Из фиг. 2, а, 3, а видно, что различие распределений скоростей в вертикальной плоскости у ИКС «ЭМИКС» и «Björk-Shiley» проявляется в том, что застойная зона у «ЭМИКС» смещается к оси трубы. Это различие можно связать с различной формой диска клапана, который у ИКС «ЭМИКС» вогнуто-выпуклый, а у «Björk-Shiley» выпукло-вогнутый.

Из фиг. 2, б, 3, б видно, что структура потока в этих сечениях имеет более сложную структуру, чем на фиг. 2, а, 3, б; так, у ИКС «Björk-Shiley» появились три явно выраженных пика скорости, а у «ЭМИКС» – четыре, что связано с центральным расположением ограничителя хода, который разбивает поток на две части. У обоих дисковых ИКС в этом сечении потока имеются значительные зоны отрицательных скоростей, у «Björk-Shiley» скорости в этих зонах при исследованных расходах существенно выше, чем у ИКС «ЭМИКС», что может значительно увеличить статическую регургитацию клапана при работе в реальных условиях [9]. Небольшая несимметрия профилей скорости, приведенных на фиг. 2, б, 3, б, связана с возможностью небольшого перекаса диска в пределах зазора ограничителей хода диска. Структура потока за ИКС в трубе имеет сложный характер; на нее оказывают существенное влияние форма диска ИКС и расположение ограничителей хода запирающего диска. Сравнение профилей скоростей для двух ИКС, находящихся в одинаковых гидродинамических условиях, показывает, что по сравнению с клапаном «ЭМИКС» поток за клапаном «Björk-Shiley» оказывается более неоднородным и характеризуется более высокими значениями градиентов скорости.

Представляет интерес сопоставить полученные данные с результатами исследования профиля скорости методом лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) [2]. В [4] характеристики дискового клапана «Björk-Shiley» исследовались методом ЛДИС при стационарном обтекании в круглой трубе путем измерения скорости в отдельных точках потока. Был изучен профиль скорости на удалении от среза кольца клапана на 21 мм в вертикальной плоскости при  $Re=2003$  – кривая 1 на фиг. 4; кривая 2 соответствует профилю скорости, полученному методом ФХВ на удалении от среза кольца на 15 мм за ИКС «Björk-Shiley» при  $Re=1439$ , где  $U^* = G/F$ ,  $G$  – объемный расход,  $F$  – площадь трубы,  $R$  – радиус трубы,  $r$  – текущий радиус.

При сопоставлении следует учитывать, что кривая 2 описывает средний по времени профиль скорости, поскольку при указанном числе Рейнольдса в потоке начинают появляться пульсации, в то время как кривая 1 соответствует стационарному профилю.

Из результатов приведенных экспериментов можно заключить, что метод ФХВ позволяет производить сопоставление характера и интенсивности неоднородностей потока, порождаемых клапаном, и получать информацию, которая может быть использована при разработке новых конструкций клапана.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мюллер Т. Дж. Применение численных методов к исследованию физиологических течений.— В кн.: Численные методы в динамике жидкостей. М.: Мир, 1981, с. 80—152.
2. Yoganathan A. P., Corcoran W. H., Harrison E. C. In vitro velocity measurements in the vicinity of aortic prostheses.— J. Biomechanics, 1979, v. 12, № 2, p. 135—151.
3. Figlioda R. S., Mueller T. J. On the hemolytic and thrombogenic potential of the occluder prosthetic heart valves from in-vitro measurements.— Trans. ASME. Ser. K, J. Biomech. Eng., 1981, v. 103, № 1, p. 83—89.
4. Chandran K. B., Ferguson T. V., Chen Ching Jen, Khalighi B. Experimental study of flow dynamics behind valve prostheses.— ASAIO Journal, 1983, v. 6, № 3, p. 146—152.
5. Иoffис Н. А., Ветцель Р. Н., Букагов А. С. Протез клапана сердца. А. с. № 1082425.— Оpubл. в Б. И., 1984, № 12, с. 15—16.
6. Юречко В. Н., Рязанцев Ю. С., Барачевский В. А., Манджиков В. Ф., Хуриллава С. Г. Исследование гидродинамических характеристик потоков жидкости методом фотохромной визуализации. Препринт № 263. М.: Ин-т пробл. мех. АН СССР, 1985.
7. Барачевский В. А., Манджиков В. Ф., Рязанцев Ю. С., Строкач Ю. П., Юречко В. Н. Фотохромный метод визуализации гидродинамических потоков.— ПМТФ, 1984, № 5, с. 73—76.
8. Palade de Irebarne A., Hummel R. L., Smith J. W., Frantisak F. Transition and turbulent flow parameters in a smooth pipe by direct flow visualization.— Chem. Eng. Progr. Sympos. Ser., 1969, v. 65, № 91, p. 60—70.
9. Кузьмина Н. Б., Мирный А. Н., Ильина М. Б. О методах исследования гидродинамических свойств искусственных клапанов сердца.— Эксперим. хирургия и анестезиология, 1965, № 2, с. 8—14.

Москва

Поступила в редакцию  
5.II.1986

УДК 533.6.011.5:536.33

### РАДИАЦИОННЫЙ НАГРЕВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕЛ, ОБТЕКАЕМЫХ НЕВЯЗКИМ СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ВОЗДУХА

АШПТЕЙН Э. З., ВАРТАНЯН Н. В., САХАРОВ В. И.

Нахождение лучистых тепловых потоков к поверхности пространственных тел, движущихся со сверхзвуковой скоростью в атмосфере, представляет собой громоздкую задачу. Здесь необходимо решать сложную систему уравнений радиационной газовой динамики, требующую при численной реализации больших затрат машинного времени. Поэтому важным является создание на основе имеющихся численных результатов методик определения лучистых потоков к пространственным и осесимметричным телам, не требующих решения сложной системы уравнений. При этом можно использовать тот факт, что при сверхзвуковом обтекании тел с заданной скоростью распределение относительных лучистых тепловых потоков по их поверхности универсально, т. е. практически не зависит от размеров и формы тела, а также от высоты полета [1, 2].

Для осесимметричных тел оно может быть аппроксимировано аналитической функцией от угла наклона тела  $\theta_w$  или от угла наклона  $\theta_s$  головной ударной волны к набегающему потоку. При обтекании же пространственных тел, как показали расчеты [2], универсальность имеет место лишь в зависимости от  $\theta_s$ . Значение  $\theta_s$  в том или ином сечении пространственного ударного слоя очень слабо зависит от характерного размера тела, скорости и высоты полета. Поэтому значения величин  $\theta_s$  для пространственного тела определенной формы, обтекаемого равносечно реагирующим излучающим газом, могут быть получены из решения задачи об адиабатическом течении около тела такой же формы совершенного газа при какой-либо одной скорости движения.

Еще раз подчеркнем, что для осесимметричного обтекания наличие однозначной зависимости  $q_w(\theta_w)$  позволяет обойтись и без этих расчетов. Для определения абсолютных значений лучистых потоков к телу необходимо иметь данные об их величинах в критическую точку затупленных тел.

В данной работе, являющейся продолжением [2], рассчитывалось обтекание осесимметричных и пространственных тел различной формы (сферы, гиперболоида, параболоида, осесимметричных и пространственных эллипсоидов, тел вращения степенной формы) в диапазоне скоростей  $V_\infty = 10-18$  км/с, высот полета в атмосфере Земли  $H = 40-80$  км и характерных размеров 0,01—20 м. Для коэффициента поглощения использовалась восьмиступенчатая модель [3].

В результате проведенных численных расчетов установлено, что для всех рас-