

УДК 532.574.8

© 1993 г. Е. М. ФИЛИН, В. Н. ЮРЕЧКО

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ ВНУТРИ ТАРЕЛЬЧАТОГО КЛАПАНА МЕТОДОМ ФОТОХРОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

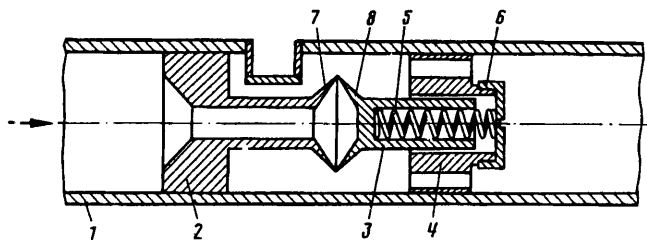
В работе применен метод фотохромной визуализации для исследования гидродинамики потока, возникающего внутри клапана золотникового типа во время его работы. Описаны экспериментальная установка и результаты наблюдений течений. Исследовались нестационарные течения с различными амплитудами и частотами колебаний расхода через клапан. Описанная методика позволяет определять структуру потока, строить профили скоростей и касательных напряжений во всей области внутри клапана, а также получать данные для обчета гидродинамических характеристик клапана.

1. Безынерционный переливной клапан. Важными узлами ряда технических устройств являются переливные клапаны, обеспечивающие поддержание заданного перепада давления при переменном расходе жидкости. Эти клапаны находят применение в гидравлических демпферах, предназначенных для поглощения механической энергии. Характерной особенностью таких демпферов является кратковременная работа при резко изменяющемся во времени расходе жидкости, достигающем больших максимальных значений (130—160 л/с). Существуют переливные клапаны прямого действия и дифференциальные с сервоприводом. Важными компонентами этих клапанов являются золотник и пружина. Во время работы клапан, испытывая воздействие упругой пружины, совершает колебательное движение с собственной частотой, зависящей от характеристик клапана, в частности от его массы и жесткости пружины. Работа клапана в нестационарном режиме может сопровождаться нежелательными скачками давления, величина которых сильно зависит от собственной частоты колебаний подвижных частей клапана, т. е. от его конструктивных особенностей.

Безынерционный переливной клапан — новый тип клапана, в котором функции затвора, седла и упругого компонента совмещены в одном элементе, выполненном в виде пары тарельчатых пружин. Давление жидкости действует на торцевые поверхности пружин через золотник, они деформируются и жидкость вытекает через кольцевую щель, образуемую между их кромками. Давление, при котором образуется щель (давление настройки), определяется величиной предварительного поджатия пружин. Пара тарельчатых пружин образует элементарный клапан с изменяющимся в ограниченных пределах расходом.

При резких изменениях давления и расхода жидкости большое влияние на характеристики клапана оказывают параметры собственных колебаний его движущихся частей. Известно, что в случае, когда частота изменения расхода сказывается соизмеримой с частотой собственных колебаний клапана, в потоке могут наблюдаться пики давления, достигающие в случае клапанов с затвором 50% давления настройки клапана. В клапанах с тарельчатыми пружинами перемещающаяся масса минимизирована, что делает клапан практически безынерционным. При оценке частоты собственных колебаний принимается во внимание взаимодействие подвижных элементов с жидкостью.

В экспериментах по отработке клапанов на гидравлическом стенде измеряются только основные интегральные характеристики. Для повышения точности расчета большое значение имеет исследование структуры нестационарного гидродинамического потока через клапан. Нестационарное взаимодействие клапана с жид-



Фиг. 1

костью влияет как на собственную частоту колебаний подвижных элементов клапана, так и на проточные характеристики. Структура потока (присоединенные массы, срывы потока с кромок запорных элементов, застойные зоны) оказывает влияние на сопротивление клапана, собственную частоту колебаний подвижных элементов и может существенно влиять на его характеристики.

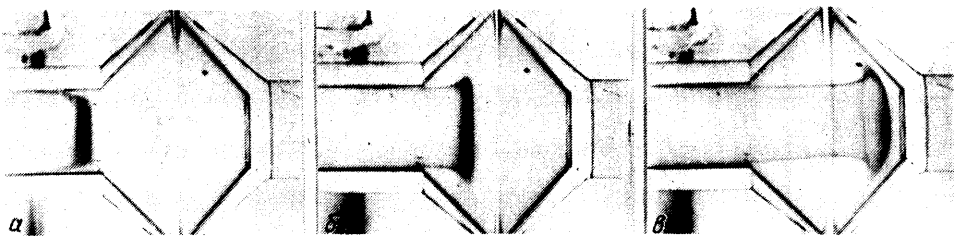
Для изучения особенностей структуры нестационарного потока жидкости внутри клапана выполнена серия экспериментов на лабораторной модели клапана, изображенной на фиг. 1, где 1 — корпус, 2 — внутренний канал со стойкой, 3 — втулка, 4 — удерживающая стойка, 5 — пружина, 6 — регулировочная гайка, 7 — тарельчатый клапан, 8 — золотник. Внешний поток давил на золотник, пружина сжималась и створки открывались. Регулировочная гайка 6 позволяла изменять усилие поднятия пружины.

2. Экспериментальная установка. Для определения уточненных гидродинамических характеристик и понимания механизма воздействия среды на внутреннюю поверхность тарельчатого клапана важно знать поведение потока среды внутри клапана. Наиболее предпочтительны методы, позволяющие в реальном масштабе времени визуально наблюдать поведение потока. В данной работе использовался метод фотохромной визуализации. В основе этого метода лежит явление фотохромизма в специальных растворах органических веществ [1]. Под действием лазерного излучения в потоке фотохромного вещества создаются цветные метки, регистрация движения которых в потоке осуществляется скоростной камерой. Впервые метод фотоактивации фотохромного раствора использован Поповичем и Хаммелем в 1976 г. для изучения характеристик турбулентного потока вблизи стенок канала [4].

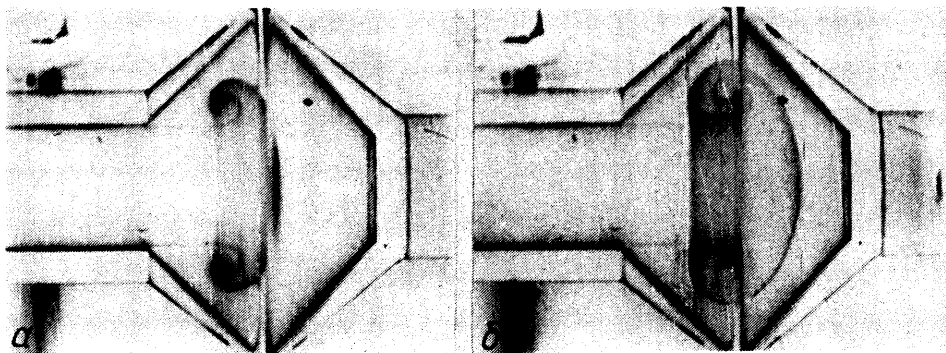
Для создания цветных меток в фотохромных растворах использовалась экспериментальная установка на основе второй гармоники двух твердотельных импульсных рубиновых лазеров — источников иницирующего излучения с длиной волны  $\lambda = 347$  нм. Лазеры располагались друг над другом, что позволяло получать метки более высокой оптической плотности. Твердотельные лазеры на рубине работали в режиме модуляции добротности, которая осуществлялась с помощью пассивных модуляторов. Для уменьшения теплового воздействия использовался тепловой фильтр. Энергия накачки лазера и концентрация фотохромного вещества в растворе подбирались такими, чтобы цветная метка была как можно более контрастной при заданной длине порядка 5 см (половина высоты модели клапана).

Изготовленная из оргстекла модель тарельчатого клапана устанавливалась в гидродинамическом стенде, служащем для создания нестационарного течения. Для этого на поверхность жидкости в напорной емкости подавалось переменное давление. Зависимость давления от времени была близка к синусоидальной.

Получать такое изменение давления воздуха удавалось с помощью аппарата вспомогательного кровообращения «Синус-ВК2». Давление воздуха, создаваемое этим аппаратом в напорной емкости, вызывало движение жидкости, которая протекала через модель тарельчатого клапана. Когда давление падало, тарельчатый клапан закрывался. Во второй напорной емкости, куда поступала жидкость, за счет перетекания увеличивалась высота уровня поверхности. Избыток возвращался



Фиг. 2



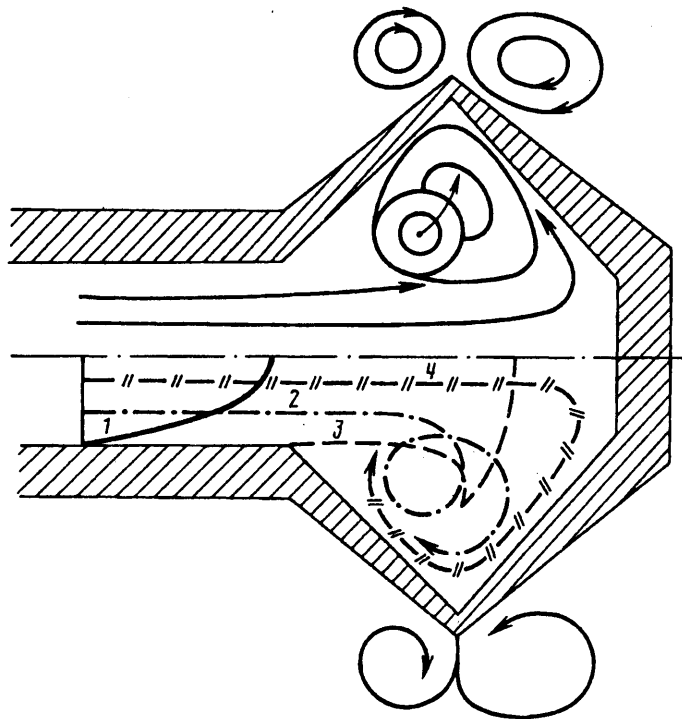
Фиг. 3

в первую емкость через обратный клапан. Таким образом формировался нестационарный поток жидкости через модель тарельчатого клапана без высокочастотных пульсаций, что достигалось специальной конструкцией стенда, а также выбором вязкости рабочей среды.

В опытах использовалась смесь водной среды с глицерином. Наличие глицерина позволяло за счет увеличения вязкости избежать турбулизации потока. В качестве фотохромной добавки использовалось вещество из класса индолинового спиро-пирана СПП-11. Состав по весу фотохромного раствора: дистиллированная вода 36,50%, глицерин 58,46%, поверхностно-активное вещество 0,588%, поваренная соль 0,77%, индолиновый спиропиран 0,002%, реополиглюкин 3,65%. Вязкость такого фотохромного раствора, измеренная на вискозиметре ВПЖ-1 при комнатной температуре, составляла  $0,10 \text{ см}^2/\text{с}$ .

Использование фотохромного раствора с высокой вязкостью позволяло ликвидировать возмущение на потоке со стороны стенда и регистрировать влияние на структуру потока только самого клапана.

3. Результаты. На модели тарельчатого клапана (фиг. 1) проводились исследования по определению структуры потока и перепада давления при меняющемся внешнем воздействии. Суть экспериментов заключалась в том, что перед исследуемым сечением формировалась линейная цветовая метка. Движение метки в потоке регистрировалось скоростной кинокамерой и видеокамерой. На фиг. 2, 3 показаны типовые фотографии положения цветовой метки в потоке в различные моменты времени после ее формирования. Обработка полученных кинонегативов позволяла определять профили скорости. Съемка движения фотоиндуцированных меток проводилась со скоростью 80 кадр/с, временем экспозиции  $4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , длительностью инициирующего импульса лазера  $8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ , что и определяло время образования цветовой метки.



Фиг. 4

Поскольку время между кадрами  $10^{-2}$  с, то момент образования цветовой метки мог попадать во временной интервал между кадрами, что обычно приводило к появлению на первом кадре деформированной потоком непрямолинейной метки. Поскольку во время эксперимента проводилась синхронная временная регистрация работы камеры и моментов образования цветowych меток, то этот эффект не влиял на точность определения временных интервалов между моментом образования метки и моментом ее регистрации на кинокадре, которая составляла  $5 \cdot 10^{-3}$  с.

Для подтверждения отсутствия конвективного движения цветовой метки, вызванного местным нагревом от лазерного излучения, проводилась контрольная киносъемка метки в покоящейся жидкости. Анализ полученных данных показал, что за время, достигавшее 2 с, метка не смещалась. Съемка движения фотоиндуцированных меток в потоке проводилась менее 2 с. За это время она смещалась по потоку на расстояние до 5 см, пока не выходила из зоны наблюдения. Для измерения смещения меток относительно первоначального положения полученные негативы проецировались на экран.

Полученные данные дают подробную информацию о гидродинамике потока внутри модели клапана. На фиг. 4 схематически обозначены типовые метки, соответствующие различным временам распространения по потоку (1, 2), и линии тока (3, 4). Результаты позволяют выяснить структуру потока, разбить его на зоны, различающиеся по характеру течения (струйные, вихревые и т. п.), определить момент возникновения нестационарности потока, исследовать характер течения и появление вихревых образований в зоне смещения. Кривая расхода близка к синусоиде. Исследование профилей скорости во внутреннем канале клапана показало, что течение близко к ламинарному.

Эксперименты проводились в диапазоне частот от 30 до 180 Гц и при изменении амплитуды давления. Работу клапана в рассматриваемом режиме

можно разбить на две стадии: ускорения и замедления. На фиг. 2 показаны фотографии, соответствующие стадии ускорения. Отметим, что в этой стадии существенную роль играет настройка пружины клапана.

Все эксперименты проводились при одном усилии раскрытия клапана. Максимальная щель раскрытия приблизительно 2 мм. Небольшое усилие раскрытия клапана позволяло сформировать квазистационарное течение через клапан. Это связано с тем, что как только внешнее воздействие начинало увеличиваться и расход во внутреннем канале становился положительным, клапан открывался и в таком положении оставался 80% времени всего цикла.

Форма метки, представленной на фиг. 2, *a*, близка к профилю Пуазейля. В начале периода колебаний, когда происходит ускорение потока через клапан и жидкость поступает в рабочую полость, происходит внезапное расширение и формируется затопленная струя (фиг. 2, *b*). Пиковая скорость падает, формируется пологий профиль. На фотографии видно, что метка, ударяясь о внутреннюю стенку золотника, растекается по створкам (фиг. 2, *в*). Затем начинает формироваться торообразный вихрь. Приблизительно с момента максимального расхода и вплоть до момента, когда образуется обратное течение, в центральной части полости присутствует торообразный вихрь (фиг. 3). Поток ударяет во внутреннюю поверхность золотника и вдоль его створок вытекает в зазор между золотником и клапаном. В верхней и нижней частях клапана видно наличие крупных вихрей, мешающих истечению жидкости из полости. На выходе из полости клапана также наблюдались устойчивые вихревые образования. Истечение из полости происходило в виде тонкой струи, которая попадала сразу в закрученный поток и уносилась вместе с основным потоком.

На фиг. 4 схематически показана динамика процесса внутри полости в стадии ускорения. Торообразный вихрь увеличивается в размерах и заполняет больший объем, приобретая треугольную форму.

Стадия замедления не представляет интереса, так как на нее приходится только 20% цикла работы клапана. Как только створки начинают закрываться, происходит отток жидкости через внутренний канал. Наличие вихревых образований в полости клапана сохраняется.

Измерение давления в системе производилось с помощью датчиков давления фирмы «Вауп» и тензометрической станции. Перепад давления на модели измерялся следующим образом: два идентичных датчика с усилителем подкреплялись к камере до и после модели. Выходы усилителей соединялись по общему проводу так, чтобы с усилителей снималась разница сигналов с датчиков. Получены кривые перепада давления для частот 30, 60, 90, 120, 180 Гц и для амплитуд давления воздуха 20 и 40 мм рт. ст. Изменение амплитуды давления и частоты колебаний существенно не меняло форму кривых зависимости перепада давления от времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юречко В. Н., Рязанцев Ю. С., Барачевский В. А. и др. Исследование гидродинамических характеристик потоков жидкости методом фотохромной визуализации: Препринт № 263. М.: ИПМ АН СССР, 1985. 36 с.
2. Ryazantsev Yu. S., Yurechko V. N. Investigation of thermoconvective motion of liquid in enclosure by photochromic flow visualization//Acta Astronautica. 1991. V. 25. № 10. P. 659—664.
3. Юречко В. Н., Рязанцев Ю. С. К исследованию гидродинамики искусственных клапанов сердца методом фотохромной визуализации//Изв. АН СССР. МЖГ. 1986. № 4. С. 179—183.
4. Popovich A. T., Hummel R. L. A new method for non-disturbing turbulent flow measurements very close to a wall//Chem. Eng. Sci. 1967. V. 22. № 1. P. 21—25.