

## ЛИТЕРАТУРА

1. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде.— Новосибирск: Наука, 1982.
2. Инжекционная газовая электроника/Ю. И. Бычков, Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц и др.— Новосибирск: Наука, 1982.
3. Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток.— М.: Наука, 1971.
4. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах/Под ред. В. С. Комелькова.— М.: ИЛ, 1960.
5. Александров Г. Н., Иванов В. Л., Кизевенипер В. Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции.— Л.: Энергия, 1969.
6. Эфендиев А. З., Аливердиев А. А. Многоканальный разряд в гелии в неоднородном поле // Изв. вузов. Радиофизика.— 1977.— Т. 20, № 8.

Поступила 8/V 1986 г.

УДК 532.574.8

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФОТОХРОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ К ИССЛЕДОВАНИЮ СТЕСНЕННОГО ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБЕ

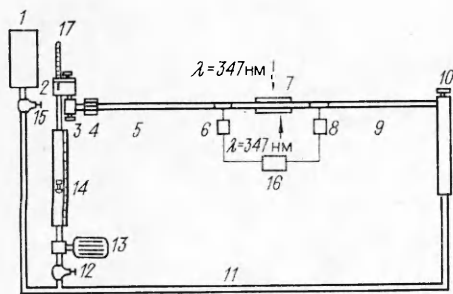
Ю. С. Рязанцев, В. Н. Юречко  
(Москва)

В работе приводятся результаты исследования структуры установившегося потока жидкости в круглой трубе постоянного сечения при наличии препятствия сложной формы, полученные методом фотохромной визуализации (ФХВ) [1—3]. В методе ФХВ информация о движении жидкости основывается на наблюдениях перемещения цветных меток, инициированных УФ-излучением в первоначально бесцветной жидкости, в которой растворено фотохромное вещество [2]. Описана установка и метод регистрации движения фотохромных меток в жидкости усовершенствованной кинокамерой грейферного типа РФК-5 со скоростью до 100 кадр/с, у которой существенно уменьшен период разгона киноплёнки и режим работы контролируется в течение всего периода съёмки. Цель работы состояла в обосновании возможности использования метода ФХВ для анализа структуры гидродинамических потоков в каналах со сложной геометрией (определение локализаций вихревых и застойных зон, точек отрыва и т. п.). Поэтому в цилиндрическом канале установлено препятствие из двух полудисков таким образом, что верхний полудиск был параллелен оси трубы, а нижний перекрывал половину сечения трубы и создавал щель с верхним. Исследовалось поле скоростей при стационарном режиме течения.

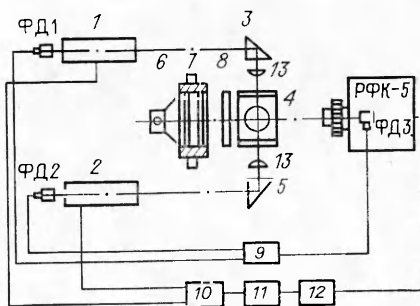
В экспериментах использовался стенд, где установившееся поле скоростей создавалось на горизонтальном участке перед препятствием. Так как расходы, при которых поток в трубе становится неустойчивым, определяются характеристиками стенда (длина трубы, шероховатость внутренней поверхности труб, пульсации насоса и т. д.), а поле скоростей перед препятствием оказывает существенное влияние на структуру потока за ним, в экспериментах наряду с регистрацией поля скоростей за препятствием выполнена визуализация профиля скорости потока в круглой трубе при различных расходах.

Схема гидродинамического стенда представлена на рис. 1, где 1 — напорный бак, 2, 3, 10 — выпускные вентили, 4 — успокоитель, 5, 9 — металлические трубы, 6, 8 — датчики давления, 7 — рабочий участок, представляющий собой трубу из оргстекла, 11 — гибкий шланг, 12, 15 — регулировочные вентили, 13 — центробежный насос, 14 — ротаметр, 16 — осциллограф, 17 — ртутный термометр. Движение рабочего фотохромного раствора в системе осуществлялось центробежным насосом, расход которого регулировался напряжением, подаваемым на электродвигатель, и регулировочными вентилями. Постоянство расхода жидкости поддерживалось с точностью  $\pm 2\%$ . Для уменьшения оптических искажений рабочий участок трубы помещался в прямоугольную кювету, заполненную дистиллированной водой.

Для создания цветных меток использовалось излучение второй гармоники твердотельных оптических квантовых генераторов на рубине. Аппаратура, применявшаяся для создания и регистрации цветных меток в рабочем участке стенда, схематически показана на рис. 2, где 1, 2 —



Р и с. 1



Р и с. 2

твердотельные лазеры, 3, 5 — кварцевые призмы, 4 — сечение гидроканала, 6 — киноосветитель, 7 — тепловой фильтр, 8 — матовый рассеивающий экран, 9 — самописец, 10 — генератор импульсов 15-27, 11 — источник временных сдвигов И1-8, 12 — пульт управления установкой, 13 — цилиндрические кварцевые линзы. Использование двух лазеров, которые располагались друг над другом, позволяло создавать цветные метки в двух сечениях, при этом генератор импульсов Г5-27 обеспечивал на лазеры подачу двух синхронных или сдвинутых между собой по времени импульсов поджига. Выделение второй гармоники с  $\lambda = 347$  нм осуществлялось в кристаллах КДП [4]. При этом твердотельные лазеры работали в режиме регулярных пульсаций постоянной интенсивности для более эффективного преобразования во вторую гармонику [4]. Такой режим работы лазеров позволил увеличить эффективность преобразования во вторую гармонику в 2—3 раза по сравнению со схемой, использующей задающий квантовый генератор с последующим усилением и так же преобразованием во вторую гармонику в кристаллах КДП, как было сделано в [2].

Предложенная схема получения  $\lambda = 347$  нм более проста, хотя длительность импульса пришлось увеличить до  $\tau = 8 \cdot 10^{-4}$  с, в то время как в [2]  $\tau = 50 \cdot 10^{-9}$  с. Съемка движения цветных меток проводилась регистрирующей фотокамерой РФК-5, работающей в частотном режиме со скоростью 100 кадр/с. Такая скорость съемки достигнута за счет изменения передаточного отношения редуктора, передающего вращение от электродвигателя камеры на электромагнитную муфту, включающую в работу лентопротяжный механизм. Моменты срабатывания моноимпульсных лазеров фиксировались сигналами с фотодиодов, установленных за резонаторами лазеров. В кинокамере также был установлен фотодиод, на который поступал световой сигнал через пленку от внешнего источника света в момент открытия кадрового окна. Сигналы с фотодиодов поступали на самописец, где фиксировались время между кадрами, выдержка и моменты срабатывания оптических квантовых генераторов. Система синхронизации обеспечивала запуск лазеров в момент выхода кинокамеры на постоянную скорость. Время разгона камеры составляло 0,03 с.

Чтобы устранить тепловой нагрев в рабочей части гидроканала, в схему подсветки введен тепловой фильтр, содержащий прокачиваемый раствор медного купороса. Стенки теплового фильтра сделаны из оргстекла, концентрация раствора медного купороса в дистиллированной воде 0,3 моль/л и оптимальная скорость прокачки 0,2 л/мин. Зависимость оптической плотности теплового фильтра с толщиной слоя раствора, равной 10 мм, от длины волны получена на спектрофотометре СФ-26 и приведена в [5]. Использование теплового фильтра позволило ликвидировать нагрев рабочей среды от осветителя и увеличить контраст цветовой метки и время жизни фотоиндуцированных цветных меток, которое уменьшается с ростом температуры.

Фокусируемое кварцевыми цилиндрическими линзами в рабочем сечении лазерное излучение создавало цветные метки клинообразной фор-



Р и с. 3

менты времени  $t$  после фотоактивизации ( $a - в$  соответствуют значениям  $Re = 1000, t = 0,015; 0,125; 0,245$  с;  $г - е - Re = 1648, t = 0,09; 0,11; 0,13$  с;  $ж - и - Re = 2400, t = 0,065; 0,07; 0,07$  с).

В экспериментах луч лазера направлялся вертикально сверху вниз по диаметру трубы. Отсчет времени начинался с момента образования луча, когда он имел прямолинейную форму. На рис. 3,  $a - в$  распределение скорости имеет параболическую форму. Эти фотографии воспроизводились с точностью, лежащей в пределах измерения, каждый раз при повторной реализации условий эксперимента.

Отметим, что серия предварительных экспериментов показала высокую чувствительность формы параболического распределения скоростей в потоке к точности стыковки рабочего и вспомогательных участков цилиндрического канала стэнда. Небольшой перекосяк при стыковке приводил к смещению вершины параболы с оси трубы, поэтому при проведении экспериментов приняты специальные меры по строгому контролю соосности всех участков канала.

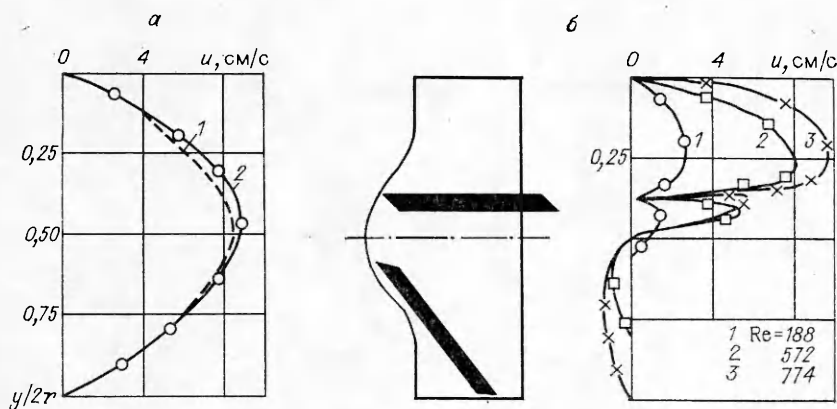
Сравнение распределения скорости (рис. 3,  $a - в$ ) с расчетным профилем Пуазейля для  $Re = 1000$  показано на рис. 4,  $a$ . Видно, что при  $Re = 1000$  в пределах ошибки эксперимента, определяемой толщиной окрашенных линий, наблюдается распределение (кривая 2), совпадающее с распределением скорости по закону Пуазейля (кривая 1).

При увеличении расхода до значений, соответствующих  $Re > 1000$ , характер течения в трубе изменяется. Распределение скорости в сечении перестает быть параболическим и не остается постоянным во времени. Каждая из фотографий рис. 3,  $г - е$  получена через 0,09; 0,11; 0,13 с после создания прямолинейной метки в потоке с постоянным расходом при  $Re = 1648$ . Серия снимков 3,  $ж - и$  получена в потоке с постоянным расходом при  $Re = 2400$ . Видно, что с ростом скорости потока неустойчивость возникает в центральной части потока и область неустановившегося течения с ростом  $Re$  увеличивается. Временной интервал между сериями фотографий составлял несколько минут.

Оценка длины установления профиля Пуазейля в круглой трубе по формуле [6]  $l_{\text{уac}} = 0,024(2d)Re$  показывает, что в используемом стэнде

мы, размер которых в плоскости съемки (толщина) изменялся от 0,07 до 0,03 см, а ширина, одинаковая по всему сечению, равна 3 мм.

Для проверки отсутствия конвективного движения цветовой метки, вызванного местным нагревом от лазерного излучения, проведена контрольная киносъемка метки в покоящейся жидкости. Анализ полученных данных показал, что за время, достигшее 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. На рис. 3 приведены результаты визуализации движения жидкости в трубе без препятствия, представлены снимки положения линейной цветовой метки в потоке при разных числах Рейнольдса в различные моменты времени.



Р и с. 4

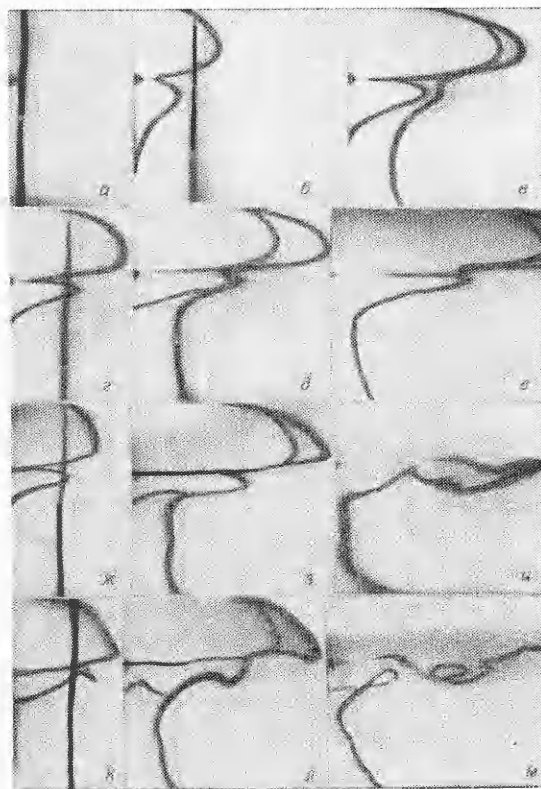
расстояние  $l = 1130$  мм, отделяющее рабочее сечение от входа в канал, удовлетворяет неравенствам  $l > l_{нач}$  при  $Re = 1000$  и  $l < l_{нач}$  при  $Re = 1648, 2400$ . Эти оценки согласуются с экспериментальными данными.

Чтобы избежать возникновения нестационарности во входной части канала, при исследовании обтекания препятствия расход в системе поддерживался постоянным, соответствующим  $Re \leq 1000$ . Препятствие находилось в сечении, удаленном от входа на  $l = 1130$  мм. Расположение препятствия, закрепленного в трубе, схематически показано на рис. 4, б.

В используемой установке предусмотрена возможность получения цветных меток в двух различных сечениях одновременно или со сдвигом во времени, что позволяет получать пересекающиеся линии и по перемещению точек пересечения оценивать скорости жидкости в радиальном направлении.

Обтекание препятствия исследовалось при  $Re = 188, 377, 572, 774, 1000$ . На рис. 5 приведены результаты при визуализации течения в трубе за препятствием при различных  $Re$  с использованием двух меток, когда первая линейная цветовая метка создавалась в сечении, отстоящем от вершины верхнего полудиска на расстоянии 1 мм, а вторая с задержкой во времени, равной  $\Delta t$ , — в сечении, находящемся на 10 мм ниже по потоку. Время задержки  $\Delta t$  формирования цветовой метки во втором сечении относительно момента создания метки в первом выбиралось так, чтобы во втором сечении получать пересечение меток.

На рис. 5 показано несколько типовых примеров, полученных в экспериментах кинокадров, фиксирующих



Р и с. 5

Рис. 5	$t_1$	$\Delta t$	$t_2$	Re	Рис. 5	$t_1$	$\Delta t$	$t_2$	Re
<i>a</i>	0			188	<i>ж</i>	0,115	0,105	0,01	572
<i>б</i>	0,265	0,255	0,01	188	<i>з</i>	0,255	0,105	0,16	572
<i>в</i>	0,615	0,255	0,36	188	<i>и</i>	0,515	0,105	0,41	572
<i>г</i>	0,21	0,2	0,01	377	<i>к</i>	0,09	0,085	0,005	774
<i>д</i>	0,375	0,2	0,175	377	<i>л</i>	0,185	0,085	0,1	774
<i>е</i>	0,55	0,2	0,35	377	<i>м</i>	0,28	0,085	0,195	774

цветовые метки в различные моменты времени в потоке за препятствием при различных Re. Значения Re и времена, отвечающие фотографиям, приведены в таблице, где  $t_1$ ,  $t_2$  — моменты съемки первой и второй метки, отсчитываемые от моментов инициирования этих меток,  $\Delta t$  — интервал времени между моментами инициирования первой и второй меток.

Съемка движения фотоиндуцированных меток проводилась со скоростью 100 кадр/с, время экспозиции  $4 \cdot 10^{-3}$  с, длительность инициирующего импульса лазера  $8 \cdot 10^{-4}$  с определяла время образования цветовой метки, время между двумя кадрами  $10^{-2}$  с, и момент образования цветовой метки мог попадать во временной интервал между кадрами, что обычно приводило к появлению на первом кинокадре сдеформированной потоком непрямолинейной метки. Поскольку во время эксперимента проводилась синхронная временная регистрация работы камеры и моментов образования цветных меток, 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 [5].

Данные, лишь малая часть которых представлена на рис. 5, позволяют получить разнообразную информацию о гидродинамике потока за препятствием, установить структуру потока, разбиение его на струйные и застойные зоны, определить начало возникновения нестационарности потока, исследовать характер течения и появление вихревых образований в зоне смещения. Видно, в частности, что поток за препятствием разбивается на три основные области: верхнюю и центральную области струйного течения и застойную зону в нижней части потока. Кроме того, на фотографиях в нижней части потока заметно движение жидкости вдоль нижней стенки канала, которое связано с неплотным прилеганием нижнего диска к поверхности канала. При увеличении расхода скорость течения через этот зазор растет. Регистрация движения жидкости через малые зазоры методом ФХВ может быть использована для измерения размера зазора в сложных сопряжениях [7].

Форма каждой из зон и распределение скоростей в них зависят от Re. При Re = 188 и 377 во всем поле съемки, т. е. вплоть до расстояния 30 мм от вершины верхнего полудиска, поток в струях, области смещения струй и застойной зоне остается ламинарным и стационарным. При Re = 572 в области смещения верхней струи и на границе центральной струи с зоной возвратных скоростей наблюдается неустойчивое течение с образованием замкнутых циркуляций, образующих вихревую дорожку, начинающуюся на расстоянии 10 мм от точки схода струй с кромки разделяющего поток полудиска. При дальнейшем увеличении Re (см. рис. 5, *к*, *л*, *м*) вихревой след приближается к кромке полудиска, зона смещения захватывает большую часть областей струйного течения, образующиеся вихри становятся более мощными и глубже проникают в застойную зону. При Re = 1000 отчетливо выраженная неустойчивость в зоне течения наблюдается уже на расстоянии 6 мм от среза кольца верхнего полудиска.

Отметим, что в исследованном диапазоне Re течение жидкости в непосредственной близости от плоскости верхнего полудиска остается ста-

ционарным и близким к однонаправленному, поэтому полученные данные о перемещении линейной метки в этой области могут быть использованы для расчета поля скорости жидкости. Рассчитанное по данным фотохромной визуализации распределение скорости в сечении потока, находящемся на расстоянии 1 мм от вершины верхнего полудиска, показано на рис. 4. Эти результаты можно использовать также для расчета сдвиговых напряжений на стенках и в объеме потока.

Таким образом, метод фотохромной визуализации оказывается достаточно эффективным при исследовании особенностей течения жидкостей в потоках со сложной геометрией при умеренных  $Re$ . Можно ожидать, что его применение окажется полезным в задачах о характере движения жидкости в зазоре между двумя параллельными поверхностями [8] и течения через щель [9] и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альварес-Суарес В. А., Барачевский В. А. и др. Метод фотохромной визуализации гидродинамических потоков.— М., 1982.— (Препринт/ИПМ АН СССР; № 203).
2. Барачевский В. А., Маиджиков В. Ф. и др. Фотохромный метод визуализации гидродинамических потоков // ПМТФ.— 1984.— № 5.
3. Palade de Iribarne A., Hummel R. L. et al. Transition turbulent flow parameters in a smooth pipe by direct flow visualization // Chem. Engng Progr.— 1969.— V. 5, N 91.
4. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика.— М.: Радио и связь, 1982.
5. Юречко В. Н., Рязанцев Ю. С. и др. Исследование гидродинамических характеристик потоков жидкости методом фотохромной визуализации.— М., 1985.— (Препринт/ИПМ АН СССР; № 263).
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1984.
7. А. с. 1170271 СССР. Способ измерения зазоров/А. С. Букатов, Н. А. Иофис, Ю. В. Мартынов, Ю. С. Рязанцев, В. Н. Юречко.— Оpubл. в БИ, 1985, № 28.
8. Накоряков В. Е., Кашинский О. Н. и др. Исследование струйного течения, распространяющегося между двумя параллельными стенками // ПМТФ.— 1985.— № 1.
9. Жак В. Д., Мухин В. А. и др. Распространение затопленной струи в узкой щели // ПМТФ.— 1985.— № 3.

Поступила 4/VI 1986 г.

УДК 532.574

### ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ С ФОТОХРОМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ

*Ж. С. Акылбаев, А. О. Цееб*  
(Караганда)

Для измерения профиля скорости и температуры в потоке жидкости выбраны два невозмущающих оптических способа: для измерений профиля температур — метод интерферометрии [1], а для измерения профиля скорости — метод голографической фотохромной жидкости с некоторыми изменениями, необходимыми для совместного использования двух способов. Эти изменения обусловлены тем, что в способе, описанном в [2], в качестве фотохромной жидкости выбран спиртовой раствор вещества класса спиропиранов, меняющий свой цвет от прозрачного на красный под воздействием ультрафиолетового облучения. Однако окрашенная метка имеет низкую контрастность и требует специального вида подсветки, т. е. подбора длины волны подсвечивающего источника.

Применение такой фотохромной жидкости для исследований в пограничном слое вообще затруднено, так как при увеличении окрашенной части жидкости оптической системой, например микроскопом, теряется контраст границы метки вплоть до полного исчезновения при увеличении в  $\sim 50$  раз, что ведет к ошибке при измерении координат окрашенного следа, а следовательно, и к ошибке в измерении скорости в пограничных сло-