

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)

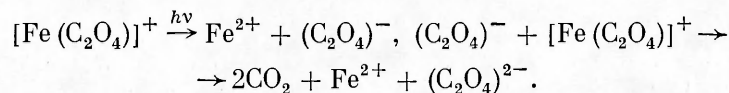
Для измерения профиля скорости и температуры в потоке жидкости выбраны два невозмущающих оптических способа: для измерений профиля температур — метод интерферометрии [1], а для измерения профиля скорости — метод голографической фотохромной жидкости с некоторыми изменениями, необходимыми для совместного 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 ~ 50 раз, что ведет к ошибке при измерении координат окрашенного следа, а следовательно, и к ошибке в измерении скорости в пограничных сло-

ях. Надо отметить и высокую стоимость вещества класса спиропиранов, а также сложность в приготовлении водных растворов фотохромной жидкости. Кроме того, фотохромная реакция такого типа обратима и окрашенная метка существует ограниченное время. Для устранения указанных недостатков, а главное для возможности регистрации окрашенной метки на фоне красного излучения лазера, что необходимо для одновременного исследования поля температур, в качестве фотохромной жидкости применялся водный раствор ферриоксалата калия.

Это позволило получить очень контрастно окрашенную метку, заметную на фоне всего видимого спектра, что дало возможность применить в качестве подсветки излучение гелий-неонового или рубинового лазера. Помимо этого, контрастность метки не снижается при увеличении оптической системой, значит, можно проводить исследования в пограничных слоях. Способность ферриоксалата калия растворяться в воде в отличие от веществ класса спиропиранов, растворимых только в органических жидкостях, позволила упростить процесс приготовления водных растворов фотохромной жидкости и варьировать ее вязкость при помощи добавок глицерина или сахара. Существенные достоинства этого метода — доступность и дешевизна химических компонентов фотохромной жидкости при применении ферриоксалата калия.

Рабочий раствор фотохромной жидкости готовился путем растворения ферриоксалата калия в воде с добавлением серной кислоты. В кислом растворе ферриоксалатные ионы диссоциируют на моно- и диоксалатные комплексы. При облучении светом возникают ионы двухвалентного железа:

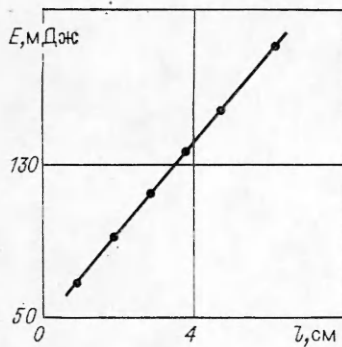


В качестве индикатора, реагирующего на возникновение ионов двухвалентного железа, использовалась красная кровяная соль, также добавленная в раствор: $3\text{Fe}^{2+} + 2[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} = \text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2$.

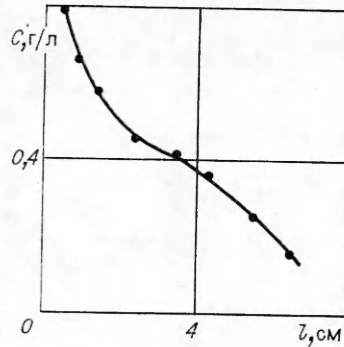
В результате облучения приведенного выше раствора узким лучом лазера в интервале 500—250 нм в растворе возникает ярко окрашенная полоса, состоящая из комплексов соединений двухвалентного железа и красной кровяной соли (турнбулева синь), которая движется вниз по потоку. Регистрируя положение окрашенной метки через равные промежутки времени и измеряя путь, пройденный меткой за это время, определяют скорость. Концентрацию ферриоксалата калия подбирают, исходя из задачи, решаемой экспериментом: если нужно получить длинную окрашенную метку, то концентрацию делают маленькой. Повышают концентрацию, если требуется получить очень плотную контрастную метку небольшой длины (например, в исследованиях пограничного слоя). Вследствие того что продукты фотолиза слабо поглощают иницирующее излучение, длина метки почти линейно зависит от энергии импульса (рис. 1).

Зависимость длины метки от концентрации ферриоксалата калия представлена на рис. 2. Отметим, что при концентрации менее 0,1 г/л метку почти не видно. Согласно экспериментам, ярко окрашенный след возникает при концентрации ферриоксалата калия более 0,2 г/л, с другой стороны, увеличение концентрации ферриоксалата калия ведет к уменьшению длины окрашенной метки. Вероятно, оптимальной является концентрация 0,3 г/л, когда длина метки ~ 3 см при энергии 75 мДж. Реакция окрашивания необратима, и движение метки можно проследивать достаточно долго. Недостаток ферриоксалатной фотохромной жидкости — медленное по сравнению со спиропиранами окрашивание, так как реакция протекает в несколько этапов.

Для исследования поля температур выбран метод голографической интерферометрии, это обусловлено следующими причинами: из оптических методов, дающих количественную информацию о показателе преломления, можно применять либо классическую интерферометрию, либо выб-



Р и с. 1



Р и с. 2

ранный метод голографической интерферометрии. Однако при совместном использовании с методом фотохромной жидкости желательно наблюдать движение окрашенной метки на фоне диффузного освещения, а не на фоне светящейся точки и одновременно использовать этот диффузный свет для изучения профилей температур, что возможно только при применении голограмм.

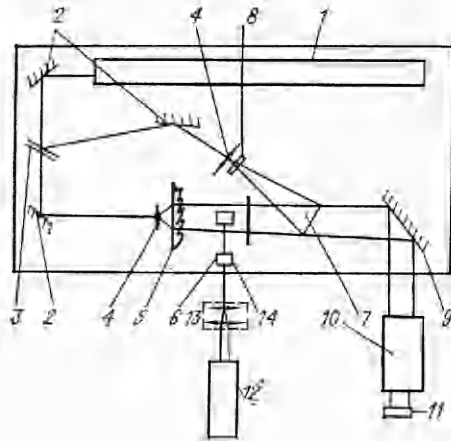
Оптическая схема установки для исследований в реальном масштабе изображена на рис. 3. Луч от гелий-неонового лазера ЛГ-38 1 поворачивается зеркалом 2 и попадает на светоделитель 3, где он делится на два пучка: рабочий и опорный. Рабочий луч поворачивается глухим зеркалом, расширяется линзой 4 и направляется на светорассеиватель 5, установленный перед гидродинамическим каналом или кюветкой с жидкостью 6, после прохождения объекта предметный луч падает на фотопластинку 7. Опорный луч отражается зеркалом, расширяется отрицательной линзой 4, проходит через плоскопараллельную пластинку 8, служащую для изучения методом полос конечной ширины, и также попадает на фотопластинку. После экспозиции (регистрации голографического изображения объекта до возмущений) фотопластинка обрабатывается на месте и через полученную голограмму проводят наблюдения за интерференционными полосами, возникающими вследствие изменения температуры в исследуемой жидкости. Полученная картина отражается в зеркале 9 и попадает на фоторегистрирующую аппаратуру: лупу времени ЛВ-04 10 и фотоаппарат 11. После нагрева исследуемого течения импульсным рубиновым лазером 12 дается импульс излучения, проходящий через обратный телескоп 13 (для создания узкого луча), попадает на кристалл КДР 14, который преобразует длину волны излучения рубинового лазера в свет с длиной волны, вызывающей фотохимическую реакцию в фотохромной жидкости. В фотохромной жидкости создаются цветные метки, которые потоком переносятся вниз по течению. Цветные метки проектируются на фоне освещенного рабочим светом луча рассеивателя на фоторегистрирующую аппаратуру. При этом цветные метки регистрируются вместе с интерференционной картиной. Для увеличения контраста интерференционных полос после объекта устанавливается пленочный поляризатор 15, не пропускающий свет с поляризацией, отличной от поляризации опорной волны. В некоторых экспериментах в качестве регистрирующей аппаратуры применяется кинокамера.

Одновременная регистрация поля скоростей и температур позволяет решить некоторые задачи, которые в случае отдельного исследования температуры и скорости разрешить не удастся.

Пусть течение в некотором объеме описывается уравнениями

$$(1) \quad \rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} \right) = - \nabla p + \rho g \beta \nabla T + \mu_{(T)} \nabla^2 \mathbf{v}, \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T = k \nabla^2 T,$$

где ρ , p — плотность и давление; \mathbf{v} — скорость; μ — динамическая вязкость, которая является функцией температуры; g — гравитационная



Р и с. 3

постоянная; $\bar{\rho}$ — коэффициент термического расширения; T — температура; k — коэффициент теплопроводности; ∇ — оператор Набла.

Из полученных величин температуры и скорости (температура по изменению интерференционных полос, а скорость по движению окрашенной метки) находим градиенты и вторые производные температуры и скорости по пространству, из замеренных величин температуры и скорости в разные моменты времени находим $\partial T/\partial t$ и $\partial v/\partial t$. Зависимость плотности и динамической вязкости от температуры дана в таблицах работы [3].

Подставляя найденные значения для градиентов температуры и скорости в уравнение (1), определяем градиент давления. Считая давление на поверхности фотохромной жидкости равным атмосферному, находим распределение давления в исследуемом объеме в разные моменты времени. Таким образом, одновременное измерение температуры и скорости позволяет получить распределение давления во всем объеме при конвективных течениях, которое другим путем найти (без внесения возмущений в поток) не удастся.

На рис. 4 приведен один из кадров киноплёнки, на котором зафиксировано обтекание цилиндра в канале, интерференционные линии получены методом реального времени по оптической схеме рис. 3. На фотографии видны интерференционные линии 2 и положение цветной метки 1. Как видно, окрашенная метка и интерференционные линии находятся вне резкости, что связано с тем, что интерференционные линии локализируются в области между объектом и голограммой, поэтому объектив кинокамеры приходится наводить между резким изображением цветовой метки и линиями интерферограммы.

Для одновременной резкой регистрации цветовой метки и интерференционных полос необходимо сильно диафрагмировать объектив, что не всегда возможно, так как повлечет за собой необходимость применения высокочувствительной киноплёнки с большой зернистостью и, следовательно, малой разрешающей способностью в полученной информации. Чтобы избежать этого, возможно применение светоусиливающей аппаратуры типа лупы времени, как на рис. 3, либо применение для регистрации интерферограмм с изображением цветовой метки метода двух экспозиций с голограммами с фокусированного изображения.



Р и с. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. Островский Ю. И., Бутусов М. М. Голографическая интерферометрия. — М.: Наука, 1977.
2. Барачевский В. А., Манджиков В. Ф. и др. Фотохромный метод визуализации гидродинамических потоков // ПМТФ. — 1984. — № 5.
3. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — С. 59.

Поступила 28/V 1986 г.

УДК 533.6.011.8

О ВЛИЯНИИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА НА ФУНКЦИЮ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИССОЦИИРУЮЩИХ МОЛЕКУЛ ПО КОЛЕБАТЕЛЬНЫМ УРОВНЯМ

Г. Я. Дынкикова
(Москва)

1. Влияние движения газа на кинетику реакций сильно возбужденных молекул рассматривалось в [1—4], где установлено, что в выражении для макроскопической скорости реакции возникают значительные по величине неравновесные поправки, пропорциональные пространственным производным макроскопических величин, их степеням и производным. В [5—8] показано, что при более полном учете свойств решений кинетических уравнений при больших энергиях молекул они нелинейным образом зависят от пространственных производных. В частности, скорость диссоциации двухатомных молекул — обрезанных гармонических осцилляторов — в неизотермическом конвективном течении экспоненциально зависит от $\nabla \mathbf{u}$, \mathbf{u} — скорость потока [8].

Неравновесные поправки в скорости реакции — следствие возмущения распределения молекул по колебательным уровням. Полученное в [8] решение для функции распределения обладает свойством локальности, что не вполне согласуется с приведенным в [8] объяснением, из которого вытекает, что населенности верхних энергетических уровней не успевают отслеживать изменение поступательной температуры. Ниже дана другая интерпретация полученных результатов.

2. Как известно [9], в модели гармонического осциллятора с бесконечным числом уровней имеет место закон сохранения функции распределения, если начальное распределение бoльцмановское. При этом в каждый момент времени населенность i -го колебательного уровня x_i определяется формулой

$$(2.1) \quad x_i = (1 - q)q^i,$$

где q описывается уравнением

$$(2.2) \quad dq/dt = (q - q_*)/\tau.$$

Здесь $\tau^{-1} = P_{10}Z(1 - q)$; $q_* = \exp(-E_1/KT)$; P_{10} — вероятность перехода с первого уровня в основное состояние; Z — частота столкновений; E_1 — энергия колебательного кванта; K — постоянная Больцмана; T — поступательная температура.

При медленном изменении температуры, когда

$$\frac{\tau}{q_*} \frac{dq_*}{dt} = \frac{E_1 \tau}{KT} \frac{d(\ln T)}{dt} \ll 1,$$

приближенным решением уравнения (2.2) является $q \approx q_* \left(1 - \frac{\tau}{q_*} \frac{dq_*}{dt}\right)$. В этом случае решение (2.1) можно интерпретировать как бoльцмановское распределение с запаздывающей температурой T_1

$$(2.3) \quad q = \exp\left(-\frac{E_1}{KT_1}\right), \quad T_1 \approx T \left(1 - \frac{\tau}{\vartheta}\right), \quad \vartheta = \left(\frac{d(\ln T)}{dt}\right)^{-1}.$$

В модели обрезанного гармонического осциллятора с диссоциацией распределение молекул по колебательным уровням, полученное в [8],