

состояния, использующим линейную связь скорости ударной волны и скачка массовой скорости. Найдены асимптотики решений для критического угла поворота потока и угла поворота границы раздела при увеличении скорости ударника. Показана важность учета струеобразования при конструировании устройств для сжатия плазмы в условиях остроугольной геометрии.

Автор приносит благодарность В. Е. Фортову за постановку задачи и постоянное внимание к работе, В. Б. Минцеву, А. Н. Михайлову и А. В. Уткину за полезные обсуждения и дискуссии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов С. И., Вовченко В. И. и др. Исследование процесса генерации термоядерных нейтронов при лазерном воздействии на конические мишени.— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, вып. 7.
2. Derentowicz H., Kaliski S., Wolski J., Ziolkowski Z. Generation of thermonuclear fusion neutrons by means of a pure explosion. II. Experimental results.— Bull. Acad. Polon. Sci., 1977, vol. 25, N 10.
3. Войтенко А. Е. Получение газовых струй большой скорости.— ДАН СССР, 1964, т. 158, № 6.
4. Кинеловский С. А., Тришин Ю. А. Физические аспекты кумуляции.— ФГВ, 1980, т. 16, № 5.
5. Walsh J. M., Shleffler R. G., Willing F. J. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions.— J. Appl. Phys., 1953, vol. 24, N 3.
6. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. и др. Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности.— ПМТФ, 1981, № 2.
7. Кузьмин Г. Е., Яковлев П. В. Исследование соударений металлических пластин со сверхзвуковой скоростью точки контакта.— ФГВ, 1973, т. 9, № 5.
8. Chou P. C., Carleone J., Karpp R. R. Criteria for jet formation from impinging shells and plates.— J. Appl. Phys., 1976, vol. 47, N 7.
9. Дерибас А. А., Захаренко П. Д. Определение предельных режимов соударения, обеспечивающих сварку металлов взрывом.— ФГВ, 1975, т. 11, № 1.
10. Годунов С. К., Дерибас А. А., Мали В. И. О влиянии вязкости материала на процесс образования струй при соударениях металлических пластин.— ФГВ, 1975, т. 11, № 1.
11. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
12. Михайлов А. Н., Дремин А. Н., Гордонолов Ю. А., Уткин А. В. Волнообразование на границе соударения металлов как причина распада обратной струи.— В кн.: Междунар. симпоз. «Обработка металлов взрывом». ЧССР, Готвальдов, 1982.
13. Анисимов С. И., Беспалов В. Е. и др. Генерация нейтронов при взрывном иницировании ДД-реакции в конических мишенях.— Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 31, вып. 1.
14. Минцев В. Б., Фортов В. Е. Взрывные ударные трубы.— ТВТ, 1982, т. 20, № 4.

Поступила 4/VII 1983 г.

УДК 532.574.8.

#### ФОТОХРОМНЫЙ МЕТОД ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ

*В. А. Барачевский, В. Ф. Манджиков, Ю. С. Рязанцев,  
Ю. П. Строкач, В. Н. Юречко*

*(Москва)*

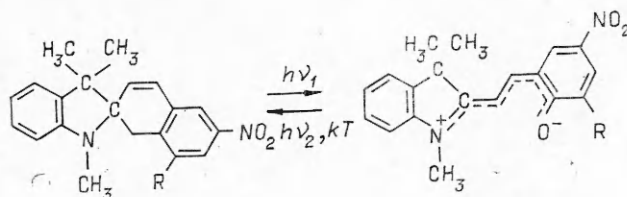
Традиционные методы визуализации течения в капельных жидкостях основаны на введении в жидкость трассеров, подкрашенной жидкости, твердых частиц или пузырьков [1, 2].

Фотохромный метод заключается в визуализации потоков с помощью цветных меток, инициированных УФ-излучением, в первоначально бесцветной жидкости, в которой растворено фотохромное вещество [3]. Поскольку фотоиндуцированная окраска фотохромного раствора сохраняется некоторое время после его фотоактивации, появляется возможность регистрации цветной метки в потоке визуальнo с помощью фотоаппарата или кинокамеры [4].

Фотохромный метод является бесконтактным, практически не вносит возмущения в поток и может обеспечивать многократное безынерционное

создание в заданном месте внутри потока окрашенных линий, пересечений линий и плоскостей путем облучения направленным УФ-излучением.

Впервые фотохромный метод визуализации был предложен в 1967 г. и получил дальнейшее развитие в [5—11]. Метод применялся для изучения турбулентности в круглых трубах, определения поля скоростей при обтекании сферы, изучения пристенного течения в шероховатых трубах [7—11]. В качестве фотохромных соединений применялись в основном производные динитробензилпиридина, которые растворялись в спирте или керосине, и длина окрашенных меток не превышала 2,5 см, что существенно ограничивало область применения метода. В данной работе в качестве фотохромного вещества использовались соединения из класса нитрозамещенных индолиновых спиропиранов (СПП), которые в зависимости от вида СПП и растворителя под действием УФ-излучения образовывали окрашенные метки различного цвета [3]. В экспериментах порошок СПП растворялся в дистиллированной воде, спирте и силиконовом масле. Фотохромная реакция этих растворов под действием УФ-излучения, заключающаяся в обратимом переходе из бесцветного в окрашенное состояние, происходит по схеме:

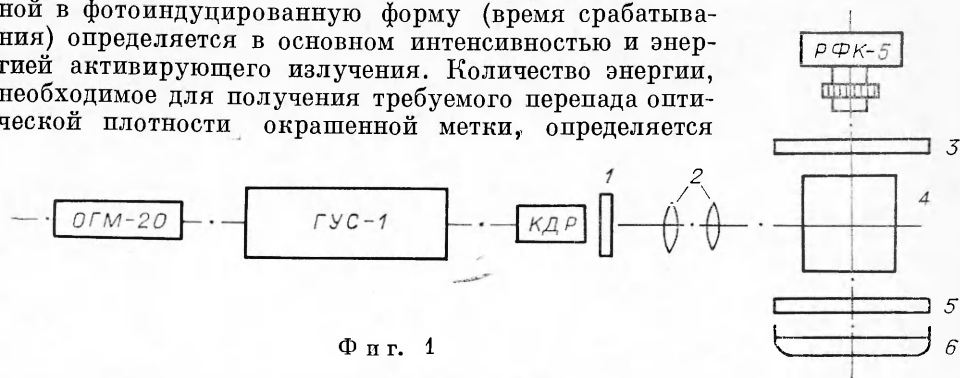


Введение заместителей в положение *R* с различными донорно-акцепторными свойствами может изменять цвет и время жизни окрашенной формы спиропирана.

Эксперименты выполнялись на установке, схема которой представлена на фиг. 1, где 1 — фильтр ФС-7; 2 — линзы; 3 — фильтр ЖЭС-9; 4 — гидроканал; 5 — матовый экран; 6 — киноосветитель КВ-1000. Для получения световой метки использовалось излучение второй гармоники рубинового лазера  $\lambda_2 = 347$  нм. При этом моноимпульсный лазер с модуляцией добротности на рубине ОГМ-20 использовался как задающий генератор с последующим усилением в однопроходном усилительном каскаде ГУС-1 [12]. Для преобразования основного излучения рубина  $\lambda_0 = 649$  нм в излучение второй гармоники с  $\lambda_1 = 347$  нм применялся нелинейный элемент КДР [12]. Энергия основного излучения после усиления равнялась 2—3 Дж. Эффективность преобразования излучения во вторую гармонику составляла 2-3% от основного излучения.

Съемка окрашенных трасс проводилась с помощью регистрирующей фотокамеры РФК-5, работающей в частотном режиме. Для съемки применяли высококонтрастную пленку микрат-200, которая обрабатывалась в мелкозернистом проявителе КЦ-1 [13].

Время перехода фотохромного раствора под действием света из исходной в фотоиндуцированную форму (время срабатывания) определяется в основном интенсивностью и энергией активирующего излучения. Количество энергии, необходимое для получения требуемого перепада оптической плотности окрашенной метки, определяется



Ф и г. 1

светочувствительностью фотохромного соединения.

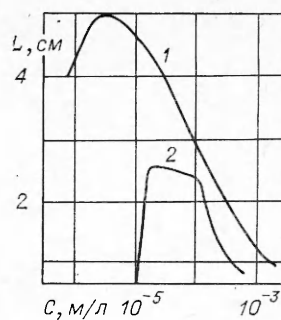
Воздействие излучения второй гармоники рубинового лазера  $\lambda_2 = 347$  нм на фотохромные растворы с СПП приводит к перепаду оптической плотности  $\Delta D = 0,9$  при экспозиции  $H_2 = 9$  кДж/м<sup>2</sup> за время импульса  $\tau = 10^{-8}$  с [14]. Такие времена срабатывания СПП являются следствием практически безынерционного характера окрашивания и обесцвечивания молекул под действием лазерного импульса. Принципиально время срабатывания фотохромных соединений ограничено длительностью фотохимических или фотофизических превращений, которая для большинства фотохромных соединений составляет  $\tau = 10^{-13} - 10^{-7}$  с.

Длина и диаметр окрашенной трассы зависят от энергии активирующего излучения и концентрации фотохромного соединения в растворах. Используемая лазерная установка позволяла получать при одной и той же концентрации фотохромного вещества СПП в исследуемых растворах окрашенные трассы различной длины и диаметра путем уменьшения или увеличения энергии накачки на усилительной головке ГУС-1. Исследования влияния концентрации СПП в растворе на время жизни фотоиндуцированной метки показали, что с изменением концентрации время жизни изменяется незначительно, зависит от используемого растворителя и вида вещества и обычно лежит в интервале от 5 с до 5 мин. На фиг. 2 приведена зависимость длины окрашенной трассы СПП в водном растворе от концентрации при одном и том же уровне энергии активирующего излучения (кривая 1) и зависимость длины окрашенной трассы от концентрации DNBP в спиртовом растворе (кривая 2), полученная в [7].

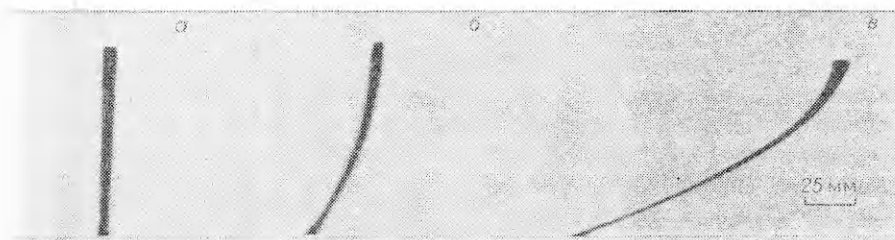
В качестве примера результатов на фиг. 3 приведены фотографии фотохромной визуализации движения жидкости со свободной поверхностью в плоском лотке шириной 4 см под действием перепада давления в напорных и приемных баках; представлены снимки окрашенной метки в потоке, инициированной лазерным излучением в различные моменты времени: а —  $T = 0$ ; б —  $T = 0,1$  с; в —  $T = 0,4$  с. При этом луч УФ-излучения направлялся перпендикулярно движению потока. Учитывая, что окрашенная трасса формируется за  $10^{-8}$  с, можно считать, что окрашенная линия в потоке создается мгновенно. С помощью таких окрашенных линий, которые могут создаваться в потоке повторно заданное число раз, по кинонегативам можно определить режим течения и мгновенный профиль скорости потока. На фиг. 3 зарегистрирован профиль скорости в потоке под действием градиента давления на горизонтальной плоскости.

К недостаткам метода относится ограниченность длины окрашенной трассы, которая не превышает 10 см, необходимость использования в экспериментах каналов с прозрачными стеклами и специальных рабочих жидкостей — фотохромных растворов.

Сопоставление метода фотохромной визуализации с другими методами экспериментального изучения гидродинамических потоков показыва-



Ф и г. 2



Ф и г. 3

ет, что он найдет применение прежде всего для быстрого и эффективного количественного анализа структуры гидродинамических потоков, локализации вихревых и застойных зон, точек отрыва циркуляционных течений, в частности, в системах со сложной геометрией (смесители, диффузоры, изогнутые каналы, каналы переменного сечения, обтекание препятствий и т. п.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Levins D. M., Thompson D. H. Visualization of flow and turbulence in liquids.—Inst. of Eng. (Australia) Mech. Eng. Trans., 1976, vol. 1, N 1.
2. Дюррани Т., Грейгид К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях. М.: Энергия, 1980.
3. Альварес-Суарес В. А., Барачевский В. А. и др. Метод фотохромной визуализации гидродинамических потоков. Препринт № 203. М.: ИПМ АН СССР, 1982.
4. Барачевский В. А., Лашков Г. И., Цехомский В. А. Фотохромизм и его применение. М.: Химия, 1977.
5. Popovich A. T., Hummel R. L. A new method for non-disturbing turbulent flow measurements very close to a wall.— Chem. Eng. Sci., 1967, vol. 22, p. 21.
6. Popovich A. T., Hummel R. L. Experimental study of the viscous sublayer in turbulent pipe flow.— AIChE J., 1967, vol. 13, p. 854.
7. Frantisak F., Palade de Iribarne A. et al. Nondisturbing tracer technique for quantitative measurements in turbulent flow.— Ind. Eng. Chem. Fundam., 1969, vol. 8, N 1.
8. Palade de Iribarne A., Hummel R. L. et al. Transition and turbulent flow parameters in a smooth pipe by direct flow visualization.— Chem. Eng. Progr., 1969, vol. 65, N 91.
9. Seeley L. E., Hummel R. L., Smith I. W. Experimental velocity profiles in laminar flow around spheres at intermediate Reynolds numbers.— J. Fluid Mech., 1975, vol. 68, pt 3.
10. Lavallee H. C., Popovich A. T. Fluid flow near roughness elements investigated by photolysis method.— Chem. Eng. Sci., 1974, vol. 29, p. 49.
11. Dunn S. G., Smith J. W. Some statistical properties of turbulent momentum transfer in rough pipes.— Can. J. Chem. Eng., 1972, vol. 50, p. 561.
12. Белоостоцкий Б. Р. и др. Основы лазерной техники. М.: Сов. радио, 1972.
13. Справочник фотолюбителя. М.: Искусство, 1962.
14. Столяров А. К., Комлев А. А., Аксенчиков А. П. Некоторые особенности поведения фотохромного органического слоя при высокой мощности облучения.— Квант. электроника, 1973, № 3.

Поступила 13/VII 1983 г.

УДК 533.6.014

### ПРИМЕР ОБТЕКАНИЯ НЕСИММЕТРИЧНОГО ПРОФИЛЯ ЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

С. Т. Личук, А. А. Орел  
(Саратов)

Получено частное решение околозвуковых уравнений, описывающих плоские течения идеального газа, соответствующее несимметричному обтеканию некоторого профиля. Найдены аэродинамические характеристики профиля.

На плоскости годографа скорости околозвуковые течения газа описываются уравнением Трикоми

$$(1) \quad \eta \partial^2 \psi / \partial \theta^2 + \partial^2 \psi / \partial \eta^2 = 0$$

для функции тока  $\psi(\theta, \eta)$ . Здесь  $\theta$  — угол наклона вектора скорости к направлению потока на бесконечности;  $\eta$  — введенная Ф. И. Франклем [1] функция модуля скорости, которая  $\geq 0$  соответственно при до- и сверхзвуковых скоростях. Выберем в качестве решения уравнения (1) следующую линейную комбинацию автомодельных решений:

$$(2) \quad \begin{aligned} \psi(\theta, \eta) &= c_1 \psi_1(\theta, \eta) + c_2 \psi_2(\theta, \eta) + c_3 \psi_3(\theta, \eta) + c_4 = \\ &= c_1 \rho^{-5/3} f_{-5/3}(\eta) + c_2 \rho^{1/3} f_{1/3}(\eta) + c_3 \rho^{-2/3} f_{-2/3}(\eta) + c_4, \end{aligned}$$