

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТЕЧЕНИЙ ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛОСТЯХ

Субботин С.В.

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь, Россия (614990, Пермь, ул. Сибирская, 24), e-mail: subbotin_sv@pspu.ru

Статья посвящена описанию электрохимической тимоловой методики для визуализации потоков жидкости в быстро вращающихся полостях. Суть методики состоит в локальном изменении цвета жидкости при изменении ее pH. Изменение pH достигается путем пропускания через жидкость постоянного электрического тока, вследствие чего около катода генерируются гидроксильные ионы, локально изменяющие кислотность. На изменение кислотности реагирует кислотно-щелочной индикатор тимоловый синий, изменяя окраску раствора. Поскольку окрашенная жидкость обладает нейтральной плавучестью, то с легкостью увлекается потоком и визуализирует структуру течения. Данная методика особенно продуктивна в случае сильных центробежных полей, когда классические методы визуализации с помощью частиц-трассеров затруднены. Еще одним преимуществом является то, что спустя некоторое время кислотность восстанавливается и раствор принимает прежний оттенок. В качестве примера использования методики приводится визуализация течения в быстровращающейся вокруг горизонтальной оси сферической полости, содержащей легкое сферическое тело.

Ключевые слова: методика, эксперимент, визуализация, сферический слой, pH.

ELECTROCHEMICAL TECHNIQUE OF FLOW VISUALIZATION IN ROTATING CONTAINERS

Subbotin S.V.

Perm State Humanitarian Pedagogical University, Perm, Russia (614990, Perm, street Sibirskaya, 24), e-mail: subbotin_sv@pspu.ru

This article describes electrochemical thymol technique of flow visualization in rapidly rotating containers. The essence of the method is the local change of the liquid color due to the change of pH. The change of pH is achieved by passing through the liquid of direct electric current, whereas at the cathode the hydroxyl ions are generated changing the local acidity. The acid-base indicator thymol blue is reacted due to the change of the acidity and the color of the solution changes. As the colored liquid has the neutral buoyancy, then it is entrained by the flow and visualizes it. This technique is proper in the case of strong centrifugal fields where visualization with use of tracers is difficult. The next advantage is that acidity takes the initial value over time and the solution becomes transparent. As an example of the use of the technique the liquid flow visualization in a rapidly rotating horizontal spherical cavity containing a light spherical body is documented.

Keywords: technique, experiment, visualization, spherical shell, pH.

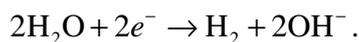
В отсутствие включений чистые жидкости и газы прозрачны, поэтому их движение остается невидимым для человеческого глаза. В связи с этим одним из распространенных методов механики жидкости, позволяющих получить реальное представление о структуре течения, не прибегая к расчетам, является визуализация.

Обзор основных экспериментальных методов визуализации и их применение к конкретным задачам приведено в книгах [8, 9]. Большое количество фотографий течений, полученных с помощью разнообразных методик, собрано в альбоме Ван Дайка [2]. Классической техникой является добавление в жидкость некоторого индикатора (например, мелких частиц – трассеров). Но при визуализации быстровращающихся потоков следует учитывать, что в центробежном поле происходит разделение частиц по плотности, поэтому последние не всегда могут адекватно отражать структуру течения. В связи с этим

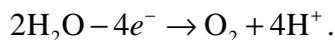
желательно, чтобы индикатор обладал нейтральной плавучестью. Такому требованию удовлетворяют красители, однако после эксперимента рабочая жидкость оказывается окрашенной и непригодной к дальнейшему использованию. Возможным решением является использование электрохимической тимоловой методики, впервые предложенной Бэйкером [6, 5]. В основе метода лежит искусственное локальное изменение уровня рН жидкости, на которое откликается изменением цвета индикатор кислотности (тимоловый синий $C_{27}H_{30}O_5S$).

Напомним, что под рН понимают концентрацию ионов водорода, значение которого составляет $pH = 7$ для среды нейтральной кислотности (когда количество ионов водорода H^+ и гидроксильных ионов OH^- в среде совпадает). В нейтральной среде раствор тимолового синего имеет желтый оттенок, в щелочной – синий, а в кислой – малиново-красный. Переход от красного оттенка к желтому происходит в интервале $pH = 1.2 - 2.8$, а от желтого к синему при $pH = 8.0 - 9.6$ [1]. Последнее значение не сильно отличается от показателя нейтральной среды ($pH = 7$).

Согласно Бэйкеру [6] рабочий раствор готовится путем добавления тимолового синего в дистиллированную воду в количестве 0.01% по весу. Отметим, что порошок тимолового синего плохо растворяется в воде, для смачивания можно добавить небольшое количество поверхностно-активного вещества (ПАВ), либо предварительно разбавить порошок в слабом спиртовом растворе. Полученный раствор титруется до значения $pH \approx 8.0$ путем добавления по каплям однонормального раствора едкого натра $NaOH$ до тех пор, пока не появится синяя окраска. Затем добавляется одна или две капли однонормального раствора соляной кислоты HCl , при этом раствор принимает желто-оранжевый оттенок. Для увеличения проводимости в раствор добавляется небольшое количество поваренной соли $NaCl$ (обычно достаточно 0.1% по весу). Если в рабочий раствор опустить электроды и приложить к ним постоянное напряжение ~ 10 В, то на катоде происходит процесс восстановления воды с образованием молекул водорода (газ). В то же время у катода возникают гидроксильные ионы:



Одновременно на аноде происходит реакция окисления:



В результате на катоде уровень рН повышается, и жидкость приобретает синюю окраску. Окрашенная метка обладает нейтральной плавучестью и легко увлекается потоком.

В качестве электродов используются медные или стальные проводники, которые могут быть с легкостью вмонтированы в стенки кюветы. Их основной недостаток заключается в

быстрой коррозии. Выходом является использование электродов из графита или нержавеющей стали.

Особенностью метода является быстрое восстановление уровня pH до нейтрального после перемешивания жидкости. Это происходит потому, что локальное изменение кислотности крайне слабо влияет на кислотность всего объема рабочей жидкости. Тем не менее, после длительного использования рабочий раствор немного темнеет, в этом случае достаточно одной капли однонормального раствора HCl для восстановления желто-оранжевого оттенка. Несомненным преимуществом является возможность использования в качестве рабочей жидкости водоглицеринового раствора.

Для апробации методики используется установка, схематично изображенная на рис. 1а. В кювету 1 сферической формы ($R_1 = 3.60$ см) помещается легкое сферическое тело 2 радиуса $R_2 = 1.77$ см и средней плотности $\rho_s = 0.23$ г/см³. Кювета представляет собой два плексигласовых параллелепипеда, в которых выточены две полусферы одинакового радиуса, которые соединяются с помощью системы стягивающих болтов. Кювета заполняется жидкостью (водоглицериновая смесь кинематической вязкости $\nu = 4.0$ сСт и плотности $\rho_L = 1.10$ г/см³) и закрепляется в шарикоподшипниках двух неподвижных опор, что позволяет ей свободно вращаться вокруг горизонтальной оси. Вращение кюветы задается шаговым двигателем FL86STH80-4208A и передается при помощи гибкой передачи. Управление двигателем осуществляется посредством драйвера SMD-42. Скорость вращения кюветы регулируется с помощью генератора звуковых колебаний ГЗ-112/1.

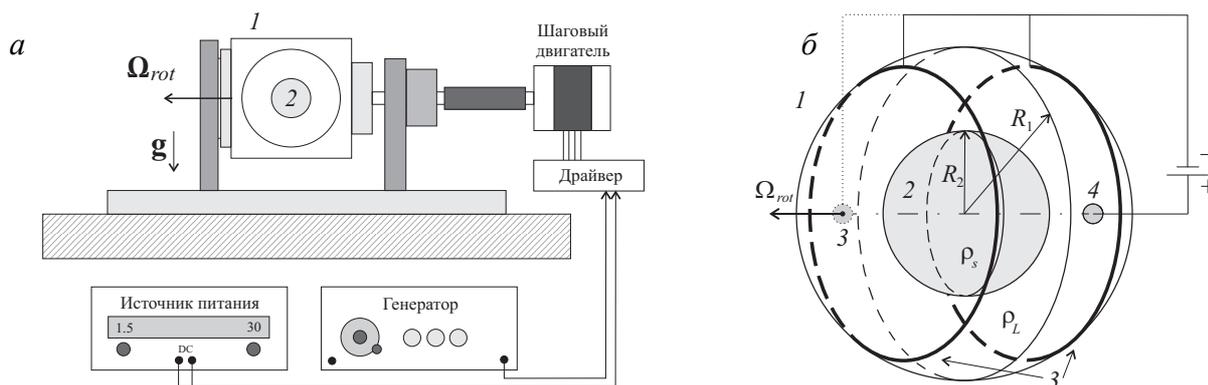


Рис. 1. Схема установки для изучения поведения вращающихся систем (а) и схема расположения электродов в полости (б)

В отсутствие вращения легкое тело занимает положение вблизи границы полости, вверху. При задании скорости вращения полости Ω_{rot} и ее плавном повышении тело увлекается жидкостью в направлении вращения, оставаясь у боковой границы, и, по достижении некоторого критического значения Ω_{rot} , центрифугируется – занимает

устойчивое положение на оси вращения полости. В ходе эксперимента Ω_{rot} поддерживается постоянной и составляет 190 с^{-1} . Действие статического в лабораторной системе отсчета поля силы тяжести вызывает поляризованные по кругу колебания тела, в результате которых последнее приводится в равномерное вращение относительно полости (дифференциальное вращение) со скоростью $\Omega_s < \Omega_{rot}$ [4], при этом жидкость в сферическом слое также приходит в относительное движение.

Для визуализации структур используется два варианта расположения электродов. В первом случае катод 3 (рис. 1б, сплошные линии) изготавливается из тонкого медного провода диаметром $d = 0.3 \text{ мм}$ и крепятся с помощью прозрачной самоклеющейся пленки на стенку полости в виде двух концентрических колец одинакового радиуса. Медные кольца соединяются друг с другом и, через отверстие на экваторе полости, подключаются через скользящий контакт к источнику питания. Рабочими являются только те части электродов, которые образуют кольца, все соединительные части электроизолированы. Вторым электродом (анодом) является стальной болт 4, герметизирующий кювету. На электроды подается постоянное напряжение от источника питания MASTECH NY5005E-2 порядка 10 В. Фотосъемка осуществляется в проходящем свете от стробоскопической лампы СШ-5. Частота мерцаний стробоскопа подбирается таковой, чтобы на один оборот полости приходилась одна вспышка.

В отсутствие напряжения между электродами кислотность жидкости нейтральна, последняя имеет желто-оранжевую окраску (рис. 2а, б). При пропускании электрического тока жидкость возле катодов (кольца) приобретает темную окраску. Темное облако в течение нескольких минут распространяется от электродов к экватору, постепенно окрашивая всю жидкость в прилегающей области (рис. 2в). Фотосъемка вдоль оси вращения (рис. 2б, г) показывает, что окрашенная жидкость циркулирует только в приэкваториальной области, а ее распространения во весь объем, не происходит. Так, на рис. 2г хорошо видно темное внешнее кольцо, внутри которого жидкость сохранила желто-оранжевый оттенок. Внутренний радиус кольца составляет $0.78R_1$. Результаты свидетельствуют, что в приэкваториальной области существуют несколько тороидальных потоков, формирующих цилиндрическую границу раздела на расстоянии $0.78R_1$ от оси вращения (рис. 3).

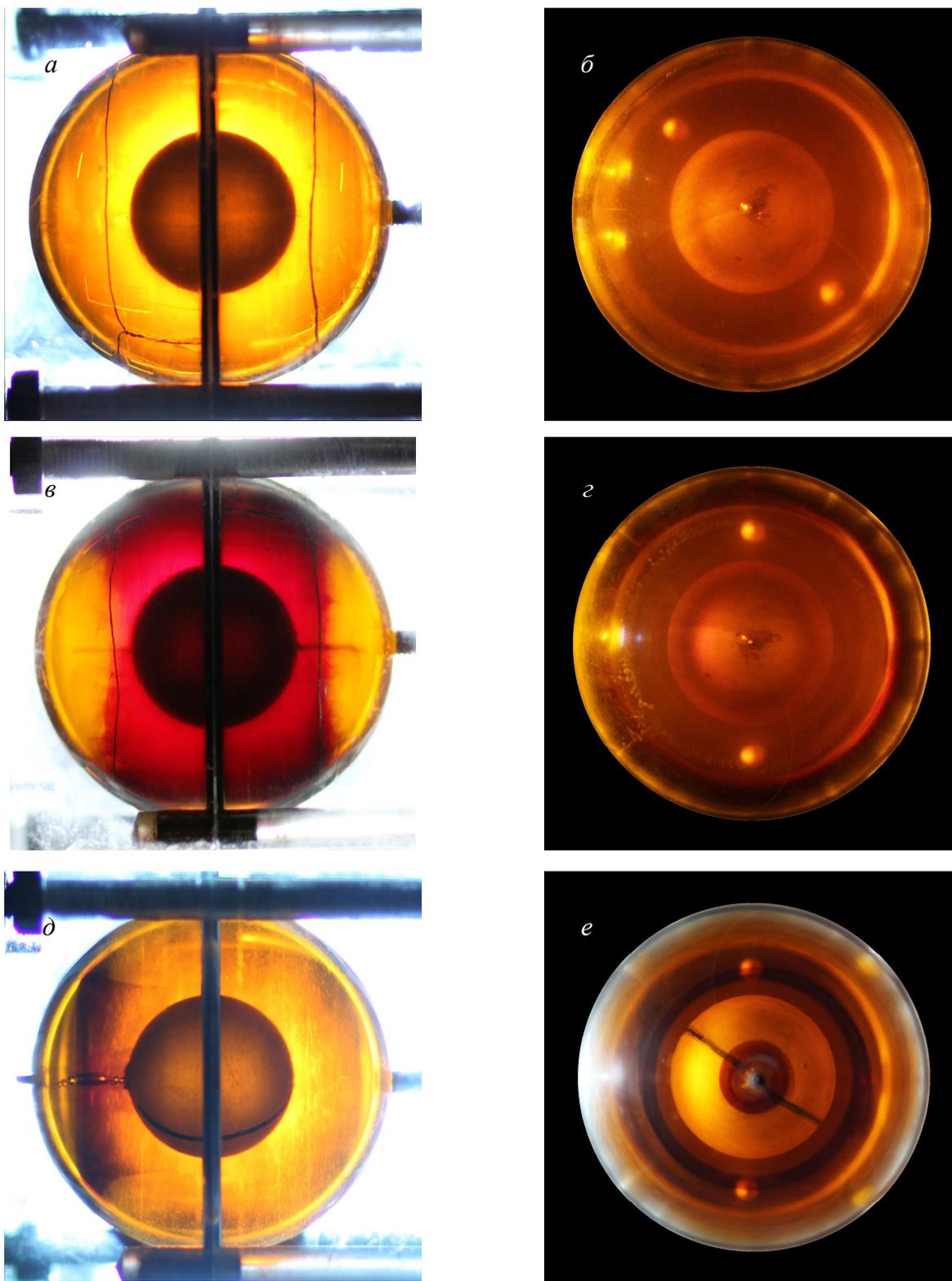


Рис. 2. Эксперимент до (а, б) и после пропускания электрического тока через жидкость (в – е). На фотографиях а – г катод имеет форму двух колец, расположенных на одинаковом расстоянии от экватора; на фотографиях д – е катод имеет форму диска и располагается на оси вращения

Второй вариант расположения катода схематично изображен на рис. 1б штриховой линией. Катод 3 располагается на оси вращения полости и имеет форму диска диаметром 5 мм. Катод подсоединяется к источнику питания посредством скользящего контакта через небольшое отверстие, сделанное в полюсе кюветы. На этот раз при разности потенциалов между электродами порядка 10 В образование мути происходит на оси вращения. Первоначально визуализируется цилиндрическая граница, поперечный размер которой составляет $0.20R_1$ (рис. 2д, е). Через несколько секунд на расстоянии $\sim 0.55R_1$ образуется

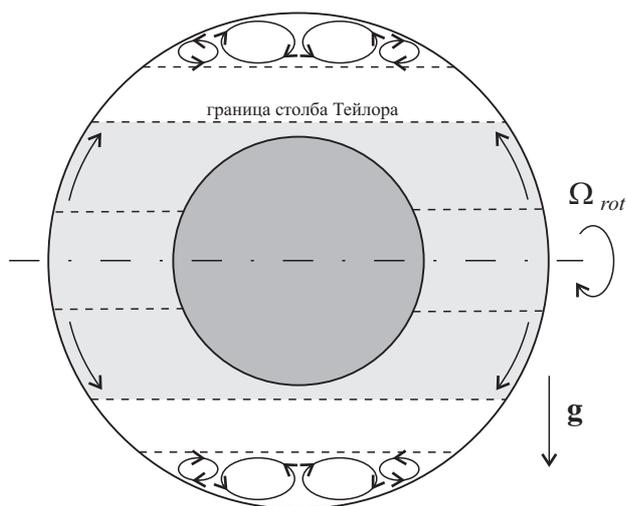


Рис. 3. Структура течения в сферическом слое. Штриховыми линиями показаны цилиндрические границы сдвиговых потоков

темное кольцо. Образование кольца объясняется наличием радиального движения в пограничном слое Экмана на стенке полости, направленным от оси вращения [3] (показано стрелками на рис. 3). Так как скорость вращения тела меньше скорости вращения полости, окрашенная жидкость перемещается от оси вращения на периферию. Если прекратить подачу электрического тока, то в течение нескольких минут кольцо переместится в экваториальную плоскость. При непрерывном выделении красителя из кольца постепенно формируется цилиндрическая поверхность (столбик Тейлора–Праудмена [3], рис. 2д).

Отметим, что при напряжениях более 10 В на катоде начинает выделяться большое количество пузырьков водорода, которые не обладают нейтральной плавучестью, но в отдельных случаях могут дать полезную информацию о структуре течения. Уменьшить количество пузырьков можно, если уменьшить напряжение на электродах, однако при этом уменьшится и интенсивность окраски. Если наличие пузырьков не принципиально, хорошую визуализацию можно получить при напряжении 20 В и более. Но с увеличением напряжения, будет возрастать и сила тока, что может привести к неконтролируемому тепловыделению в жидкости и изменению структуры течения.

В качестве заключения приведем схему течения в сферическом слое при условии, когда тело совершает поперечные оси вращения колебания малой амплитуды относительно полости (рис. 3). Вращение тела приводит к формированию двумерного азимутального течения в виде столба Тейлора–Праудмена (рис. 2д), вытянутого вдоль геометрического продолжения тела. Граница столба характеризуется скачком азимутальной скорости жидкости внутри него и за его пределами. Этот результат качественно согласуется с

экспериментами, выполненными в [4], где столбик Тейлора–Праудмена был визуализирован с помощью частиц-трассеров. Кроме этого, тимоловая методика позволила обнаружить две дополнительные сдвиговые границы, расположенные по обе стороны от столбика Тейлора–Праудмена, не существующие в отсутствие колебаний тела [7]. Таким образом, течение в сферическом слое имеет форму трех вложенных столбов, которые в докритической области (слабое дифференциальное вращение) имеют форму цилиндров кругового сечения.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ 2014/372 (проект 2176) и Программы стратегического развития ПГГПУ (проект 029-Ф).

Список литературы

1. Бейтс Р. Определение рН. Теория и практика. – Л.: Химия, 1972. – 400 с.
2. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
3. Гринспен Х. Теория вращающихся жидкостей. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 304 с.
4. Козлов В.Г., Козлов Н.В., Субботин С.В. Движение жидкости и твердого ядра в сферической полости, вращающейся во внешнем силовом поле // Докл. РАН. – 2014. – Т. 454, № 2. – С. 173–177.
5. Ястребов Г.В. Применение электрохимической методики для визуализации конвективных движений быстровращающейся жидкости // Уч. зап. Перм. ун-та. Сб. «Гидродинамика». – 1974. – Вып. 5. – С. 287–293.
6. Baker D.J. A technique for the precise measurement of small fluid velocities // J. Fluid Mech. – 1966. V. 26, Pt. 3. – P. 573–575.
7. Hollerbach R. Instabilities of the Stewartson layer. Part 1. The dependence on the sign of Ro // J. Fluid Mech. – 2003. V. 492. – P. 289–302.
8. Merzkirch W. Flow Visualization. – Academic Press Inc., 1987. – 260 p.
9. Smits A.J., Lim T.T. Flow Visualization. Techniques and Examples. – Imperial College Press, 2012. – 427 p.

Рецензенты:

Козлов В.Г., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь.

Иванова А.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры общей и экспериментальной физики, ФГБОУ ВПО «Пермский государственный гуманитарно-педагогический университет», г. Пермь.