

УДК 532.5:519.6

© А. В. Чупаев, В. В. Кузьмин

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ КАПИЛЛЯРНЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ ПОСТОЯННОГО РАСХОДА

В статье представлены результаты моделирования гидродинамических процессов, происходящих в рабочем пространстве капиллярных вискозиметров постоянного расхода трёх различных конфигураций. Результаты получены путем численного решения уравнений Навье—Стокса для ламинарного течения с использованием метода конечных элементов. Установлено влияние длины капиллярной трубки и формы дна цилиндра на метрологические характеристики вискозиметра.

Ключевые слова: моделирование течения жидкости, гидродинамические особенности капиллярного метода, капиллярный вискозиметр, измерение вязкости.

Введение

В настоящее время в различных отраслях промышленности происходит существенная интенсификация технологических процессов. Для качественного контроля и управления этими процессами применяются современные автоматизированные системы, включающие в себя множество технических средств. Наибольшую долю погрешности измерений в этих системах имеют технические средства полевого уровня, к числу которых относятся и автоматические капиллярные вискозиметры. Полностью исключить погрешность технических средств первого уровня автоматизации пока не удаётся, но её можно снизить. Повышение точности измерений в настоящее время является актуальной задачей. С этой целью необходимо более глубоко изучать гидродинамические процессы внутри рабочего пространства капиллярных вискозиметров. Решить эту задачу с достаточно высокой точностью позволяют современные методы вычислительной гидродинамики (CFD).

§ 1. Основы капиллярного метода измерения вязкости и его недостатки

В классическом варианте капиллярный метод определения вязкости реализуется по следующей схеме: фиксированный объем V исследуемой жидкости самотёком пропускается через капилляр с точно известными геометрическими размерами d_k и l_k , измеряется время истечения t_u , а затем после подстановки t_u в выражение

$$\mu = \frac{\pi \Delta P_k d_k^4}{128 V l_k} t_u, \quad (1)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости [Па·с]; ΔP_k — перепад давления на капиллярной трубке [Па]; d_k — диаметр капилляра [м]; l_k — длина капилляра [м]; V — объём жидкости [м³]; t_u — время истечения жидкости [с], вычисляется искомый параметр μ [1].

Главным источником погрешности в определении параметра μ при использовании такой процедуры считается неточность отсчёта времени истечения [2]. Остальные величины, входящие в формулу (1) считаются постоянными и вводятся в так называемую «константу прибора». Значение и постоянство самой «константы» определяется и периодически проверяется путём проливки через прибор калибровочной жидкости. Однако, на самом деле, при свободном истечении жидкости через капилляр реального вискозиметра любой из известных конфигураций, ΔP_k не может оставаться постоянным, и непрерывно уменьшается в процессе проведения измерительной процедуры. По этой причине непрерывно уменьшается расход жидкости Q через

измерительный капилляр. Это означает, что из-за нарушения условия $Q = \text{const}$ абсолютное значение коэффициента μ при таком способе его определения, не может быть точным [2]. Последнее обстоятельство является одним из существенных недостатков классического варианта реализации капиллярного метода определения вязкости. Для его устранения измерительную процедуру целесообразно реализовать по схеме с постоянством расхода жидкости, в этом случае коэффициент динамической вязкости является функцией перепада давления на капилляре ΔP_k . При этом условии $Q = \text{const}$ можно обеспечить, используя устройство с принудительным движением жидкости через капилляр с заданной скоростью.

Важным преимуществом этой схемы является то, что она позволяет существенно расширить рабочий диапазон прибора в сторону увеличения вязкости контролируемых сред. Чтобы организовать благоприятный режим работы вискозиметра по данной схеме и выбрать оптимальную конфигурацию его проточных элементов, необходимо знать особенности гидродинамических процессов, происходящих в его рабочем пространстве, таких, например, как формирование потока на начальном участке течения в капиллярной трубке, образование вихревых структур в местах сопряжения стенок цилиндра с дном и дна цилиндра с входом в капиллярную трубку и некоторых других.

§ 2. Условия математического эксперимента

Для выяснения возможности и условий возникновения нежелательных гидродинамических эффектов в рабочем пространстве и для оценки их влияния на величину и качество выходного сигнала вискозиметра, проведён специальный математический эксперимент, при котором рабочее пространство вискозиметра задавалось контурами, представленными на рис. 1.

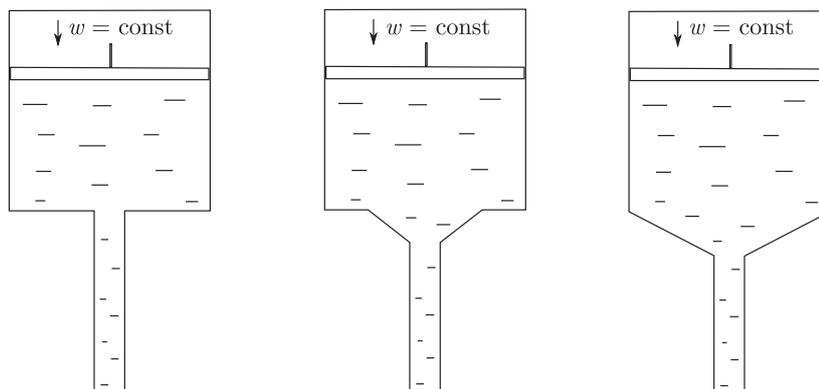


Рис. 1. Контурсы рабочего пространства вискозиметра

Моделирование течения проводилось с использованием двумерной математической модели, основанной на численном решении уравнений Навье–Стокса [3] методом конечных элементов [4] и реализованной в программном комплексе FLUENT.

Для дискретизации расчётной области использовались 4-х угольные конечные элементы с узлами, расположенными в углах четырёхугольника.левой границей сетки, на которой задавалось условие свободного скольжения, служила ось цилиндрической симметрии, совпадающая с осью X . На границе, представляющей жёсткую стенку, задавалось условие прилипания. Задача ставилась осесимметричной, нестационарной, задавалось условие гравитации в направлении оси X . В расчётах использовалась сетка с переменным шагом, причём более мелкий шаг устанавливался в окрестности жёсткой стенки и в области сопряжения дна цилиндра со входом в капиллярную трубку. Это позволило точнее проанализировать картину течения в названных областях.

§ 3. Основные результаты проведённого эксперимента

Результаты математического эксперимента, представленные на рис. 2–6 показали, что на развитие потока в области гидродинамического начального участка капиллярной трубки

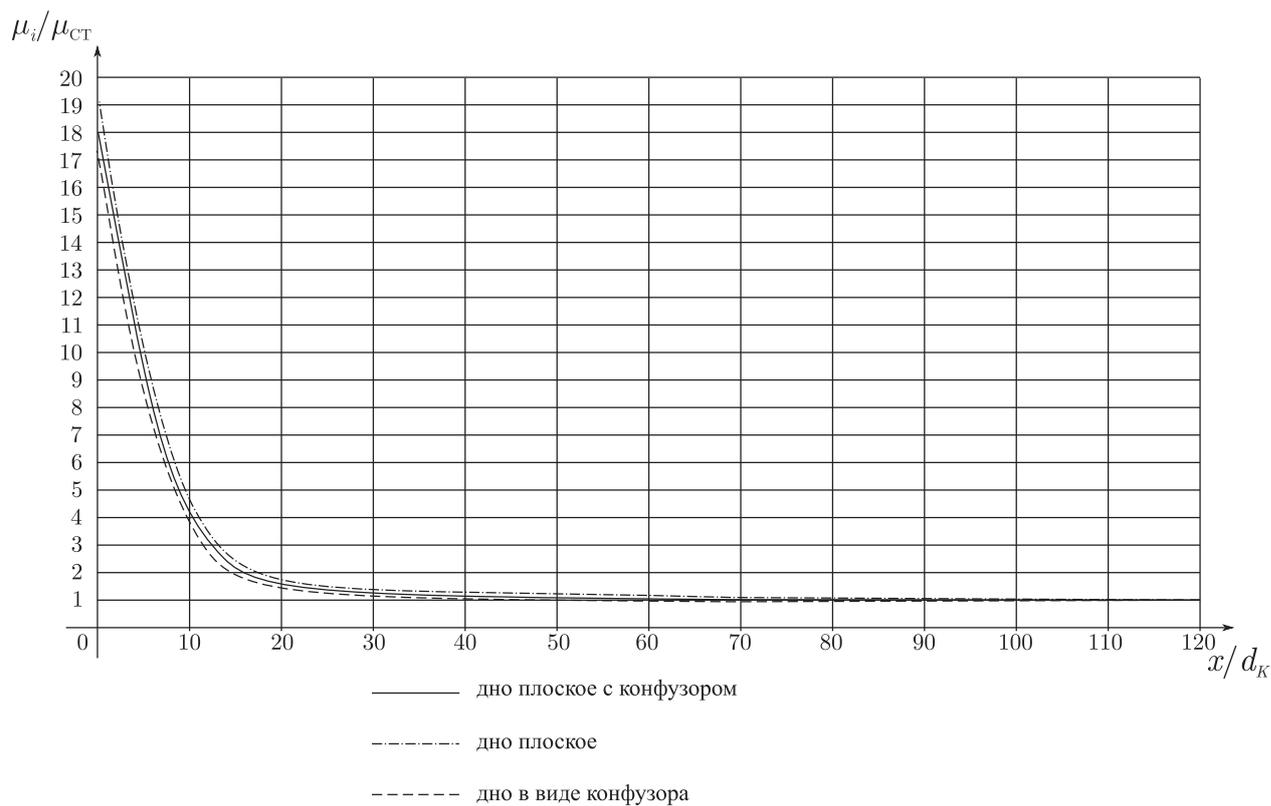


Рис. 2. Влияние формы дна рабочего цилиндра на результаты вычисления вязкости $d_{\kappa} = 1,31$ мм, $l_{\kappa} = 120$ мм при $Re = 900$

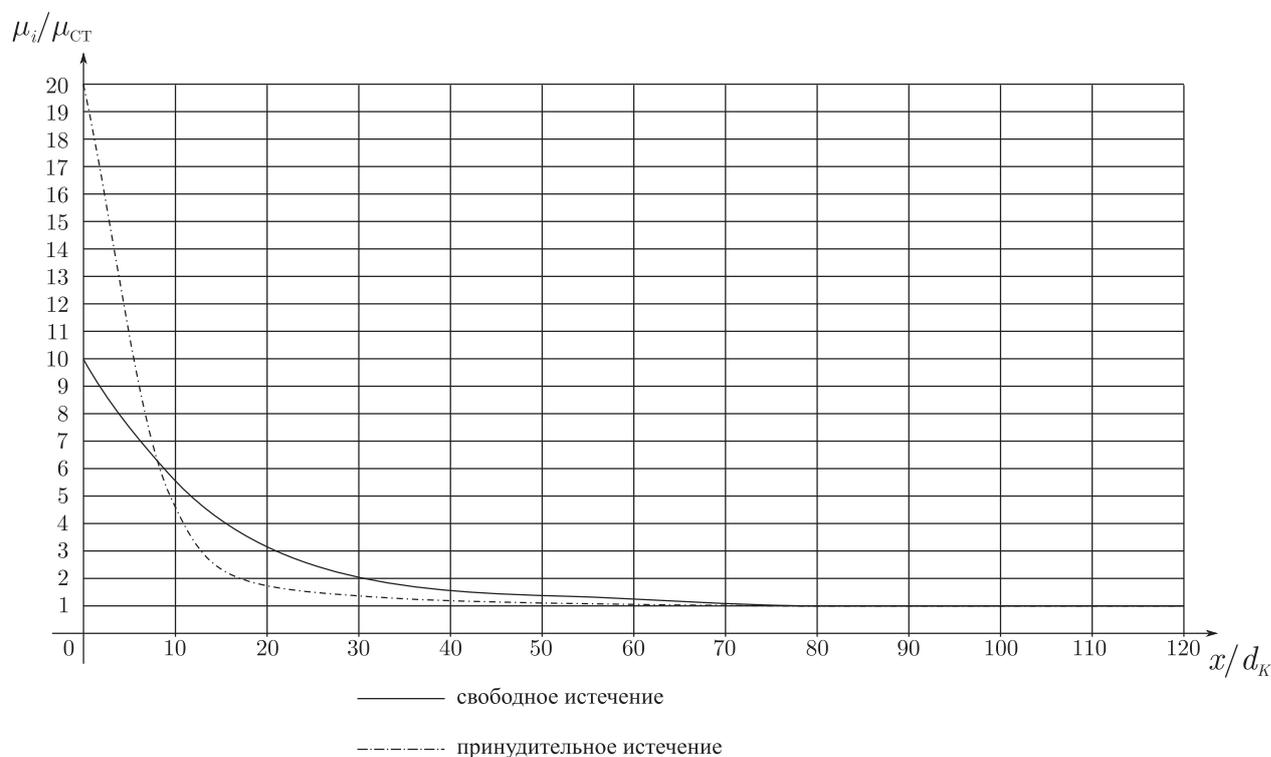


Рис. 3. Влияние формы дна рабочего цилиндра на результаты вычисления вязкости $d_{\kappa} = 1,31$ мм, $l_{\kappa} = 120$ мм при $Re = 900$

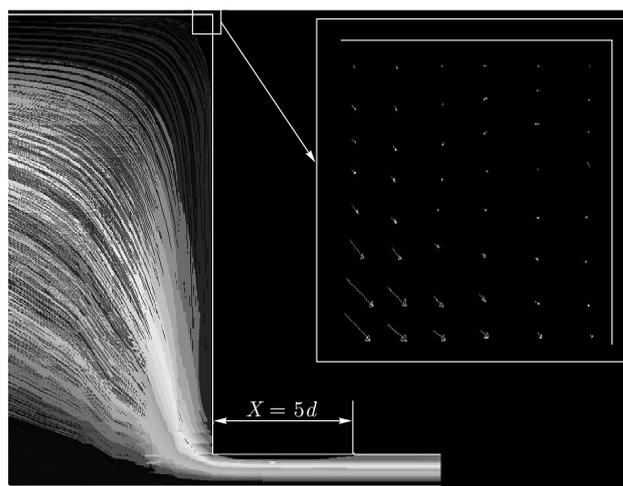


Рис. 4. Распределения линий тока в придонной области рабочего цилиндра вискозиметра с плоским дном в режиме принудительного движения жидкости (дистиллированная вода) через капилляр $d_{\kappa} = 1,31$ мм, $l_{\kappa} = 120$ мм, $Re = 900$

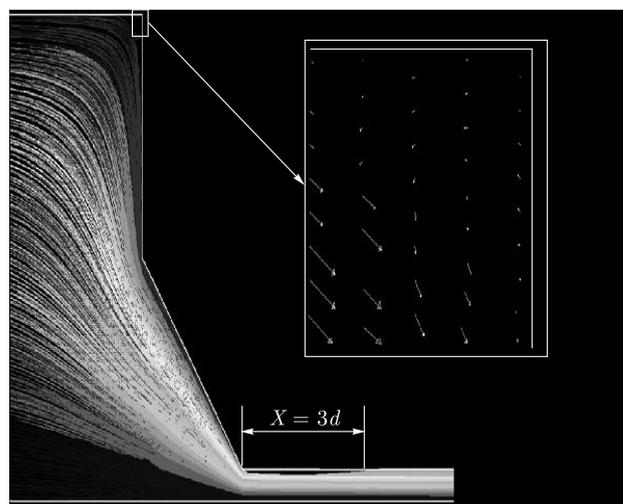


Рис. 5. Распределения линий тока в придонной области рабочего цилиндра вискозиметра с комбинированной формой дна (плоская и коническая формы) в режиме принудительного движения жидкости (дистиллированная вода) через капилляр $d_{\kappa} = 1,31$ мм, $l_{\kappa} = 120$ мм, $Re = 900$

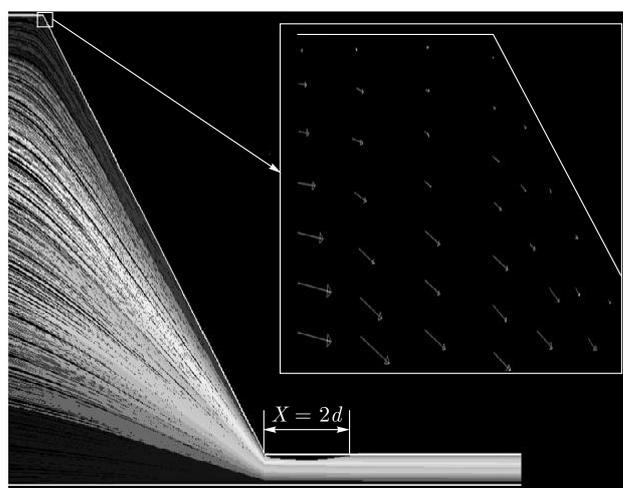


Рис. 6. Распределения линий тока в придонной области рабочего цилиндра вискозиметра с коническим дном в режиме принудительного движения жидкости (дистиллированная вода) через капилляр $d_{\kappa} = 1,31$ мм, $l_{\kappa} = 120$ мм, $Re = 900$

заметное влияние оказывают форма дна цилиндра, из которого происходит истечение жидкости, длина капилляра и процессы вихреобразования в придонной части цилиндра.

Форма дна рабочего цилиндра также влияет ещё и на точность определения искомого параметра μ , что видно из графика на рис. 2. Кроме этого, существенное влияние на показания капиллярного вискозиметра оказывает длина рабочего капилляра, а точнее соотношения его полной длины с длиной участка гидродинамической стабилизации потока (рис. 3).

На нормальный режим течения жидкости в капиллярной трубке способны повлиять также процессы вихреобразования в придонной части цилиндра и связанные с ними явления. Однако, при использовании конической формы дна цилиндра эти негативные воздействия существенно ослабевают. Коническая форма дна способствует также некоторому уменьшению протяжённости области сужения потока контролируемой жидкости на входе в рабочий капилляр. Сказанное подтверждается распределениями линий тока, представленными на рис. 4–6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гатчек Э. Вязкость жидкостей. — М.: ГТТИ, 1935. — 215 с.
2. Малкин А. Я., Чалых А. Е. Диффузия и вязкость полимеров. — М.: Наука, 1979. — 304 с.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1969. — 742 с.
4. Норри Д. Введение в метод конечных элементов. — М.: Мир, 1981. — 304 с.

Поступила в редакцию 20.04.09

A. V. Chupaev, V. V. Kuz'min

The results of liquid flow in the operating space of fixed flow capillary viscometers mathematical modeling

The results of the modeling of hydrodynamic processes in the operating space of 3 different types of fixed flow capillary viscometers are represented in the article. The results were obtained from computational solution of the Navier-Stokes equation for laminar flow with the use of finite-element method. The influence of capillary tube and cylinder bottom shape on the metrological performance of viscometer was established.

Keywords: liquid flow modeling, hydrodynamic features of capillary method, capillary viscometer, measurement of viscosity.

Mathematical Subject Classifications: 76Dxx, 65-04

Чупаев Андрей Викторович,
ст. преподаватель кафедры «Систем автоматизации и управления технологическими процессами»,
Казанский государственный технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68
Т. 231-42-72, E-mail: andrey-8004@mail.ru

Кузьмин Валерий Васильевич,
доцент кафедры «Систем автоматизации и управления технологическими процессами»,
Казанский государственный технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68
Т. 231-42-72, E-mail: sautp@kstu.ru