

УДК 532.5:519.6

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ПРОТОЧНОЙ ОБЛАСТИ КАПИЛЛЯРНОГО ВИСКОЗИМЕТРА НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLUENT

Кузьмин В.В., Чупаев А.В.

Казанский государственный технологический университет  
Тел. +7(843)2314272. E-mail: [avc@kstu.ru](mailto:avc@kstu.ru)

**Аннотация.** Описываются результаты моделирования течения жидкости в рабочем пространстве капиллярных вискозиметров постоянного расхода различных конфигураций, которые получены на основе 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. С учетом полученных в ходе проведенного математического эксперимента, результатов разработана функциональная схема устройства измерения вязкости.

**Ключевые слова:** моделирование, вязкость, течение, капиллярный вискозиметр, FLUENT.

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 удастся, но ее 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).

Среди современных методов измерения вязкости наибольшее распространение получил капиллярный. Главными его достоинствами являются сравнительная простота реализации и возможность достаточно точного моделирования измерительной процедуры.

Однако в любом случае в основе капиллярного метода измерения при различных способах его реализации лежит закон Пуазейля, который работает при условии существования в потоке полностью сформировавшегося параболического профиля скорости, и при условии постоянства продольного градиента давления по всей длине капиллярной трубки.

Принципиальная схема типового прибора, реализующего этот метод включает в себя три основных элемента – накопительный и приемный резервуары и соединяющая их капиллярная трубка (рис.1).

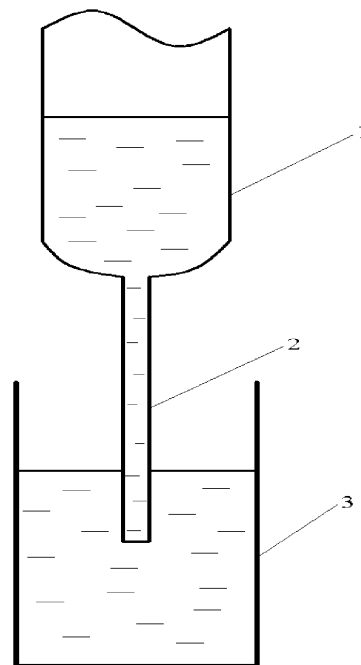


Рис.1 Принципиальная схема капиллярного вискозиметра  
1-накопительный резервуар, 2-капиллярная трубка, 3-приемный резервуар.

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

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

где  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости [Па·с];  $\Delta P_k$  - перепад давления на капиллярной трубке [Па];  $d_k$  - диаметр капилляра [м];  $l_k$  - длина капилляра;  $V$  - объем жидкости [м<sup>3</sup>];  $t_{и}$  - время истечения жидкости [с],

вычисляется искомый параметр  $\mu$  [1]. Главным источником погрешности в определении  $\mu$  при использовании такой процедуры считается неточность отсчета 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 путем проливки через прибор калибровочной жидкости. Однако, на самом деле, при свободном истечении жидкости через капилляр реального вискозиметра любой из известных конфигураций,  $\Delta P_k$  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  $\mu$  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  $\Delta P_k$ . При этом условие  $Q = \text{const}$  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.

Для выяснения возможности и условий возникновения нежелательных гидродинамических эффектов в рабочем пространстве и для оценки их влияния на величину и качество выходного сигнала вискозиметра, проведен специальный математический эксперимент, при котором рабочее пространство вискозиметра задавалось контурами, представленными на рис.2.

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.

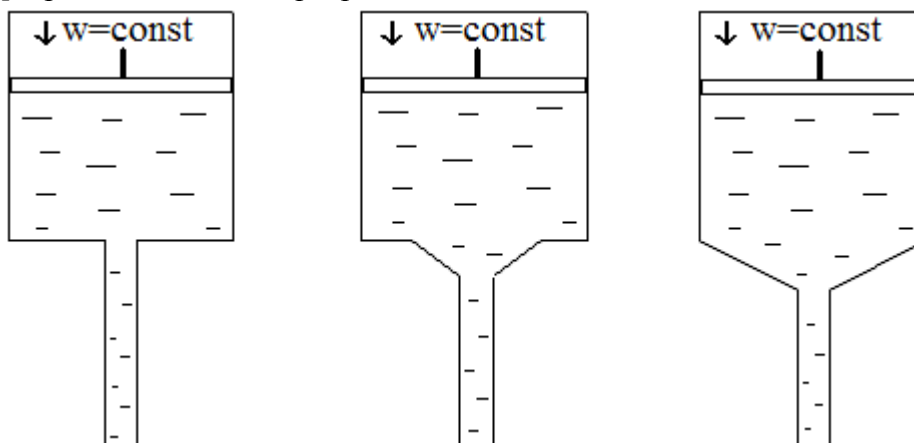


Рис.2 Контурные рабочие пространства вискозиметра

Для дискретизации расчетной области использовались 3-х и 4-х угольные конечные элементы с узлами, расположенными в их углах.левой границей сетки, на которой задавалось условие свободного скольжения, служила ось цилиндрической симметрии, совпадающая с осью X. На границе, представляющей жесткую стенку, задавалось условие прилипания. Задача ставилась осесимметричной, нестационарной, задавалось условие гравитации в направлении оси X. В расчетах использовалась сетка с переменным шагом, причем более мелкий шаг устанавливался в окрестности жесткой стенки и в области сопряжения дна цилиндра с входом в капиллярную трубку. Это позволило точнее проанализировать картину течения в названных областях.

Результаты математического эксперимента, представленные на рис.3 – 7 показали, что на развитие потока в области гидродинамического начального участка капиллярной трубки заметное влияние оказывает форма дна цилиндра, из которого происходит истечение жидкости. Отмеченное обстоятельство заметно влияет на точность определения параметра  $\mu$  (рис.3). Из графика на рис. 4 видно, что существенное влияние на показания капиллярного вискозиметра оказывает также длина рабочего капилляра, а точнее соотношения его полной длины с длиной участка гидродинамической стабилизации потока. 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 протяженности области сужения потока контролируемой жидкости на входе в рабочий капилляр. Сказанное подтверждается распределениями линий тока, представленными на рис. 5 - 7.

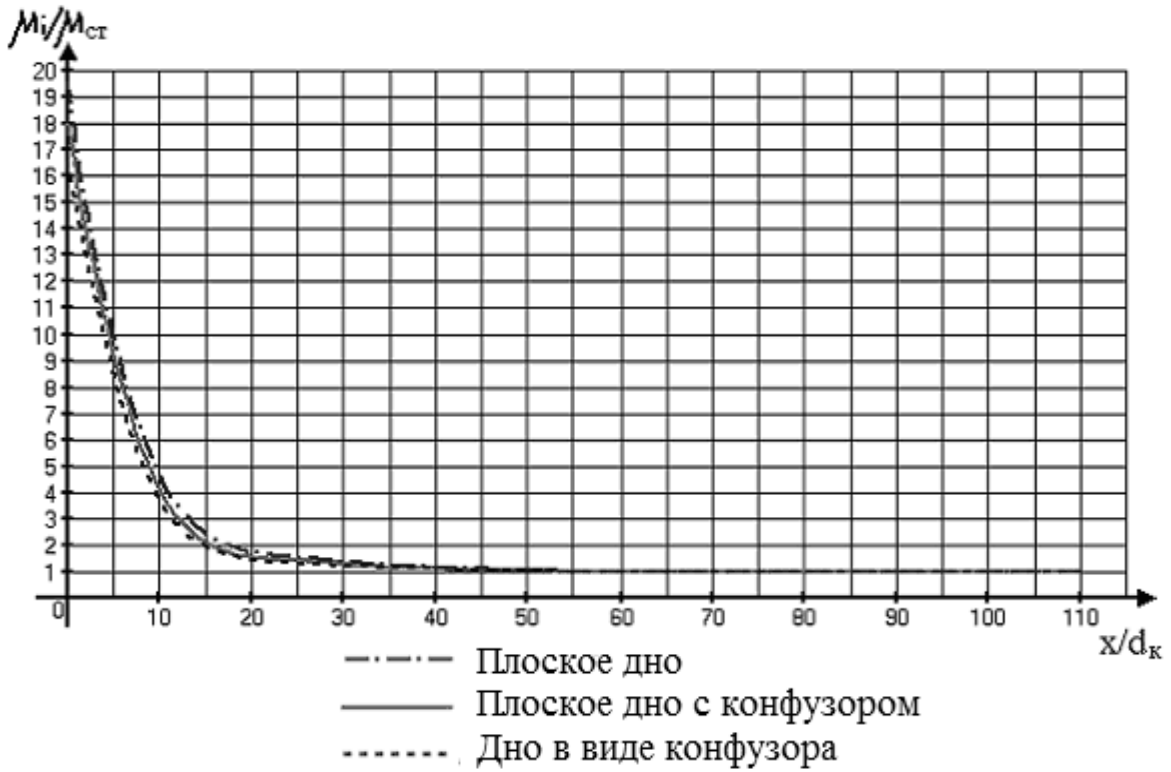


Рис. 3 Влияние формы дна рабочего цилиндра на результаты вычисления вязкости  $d_k=1,31\text{мм}$ ,  $l_k=120\text{мм}$  при  $Re=900$

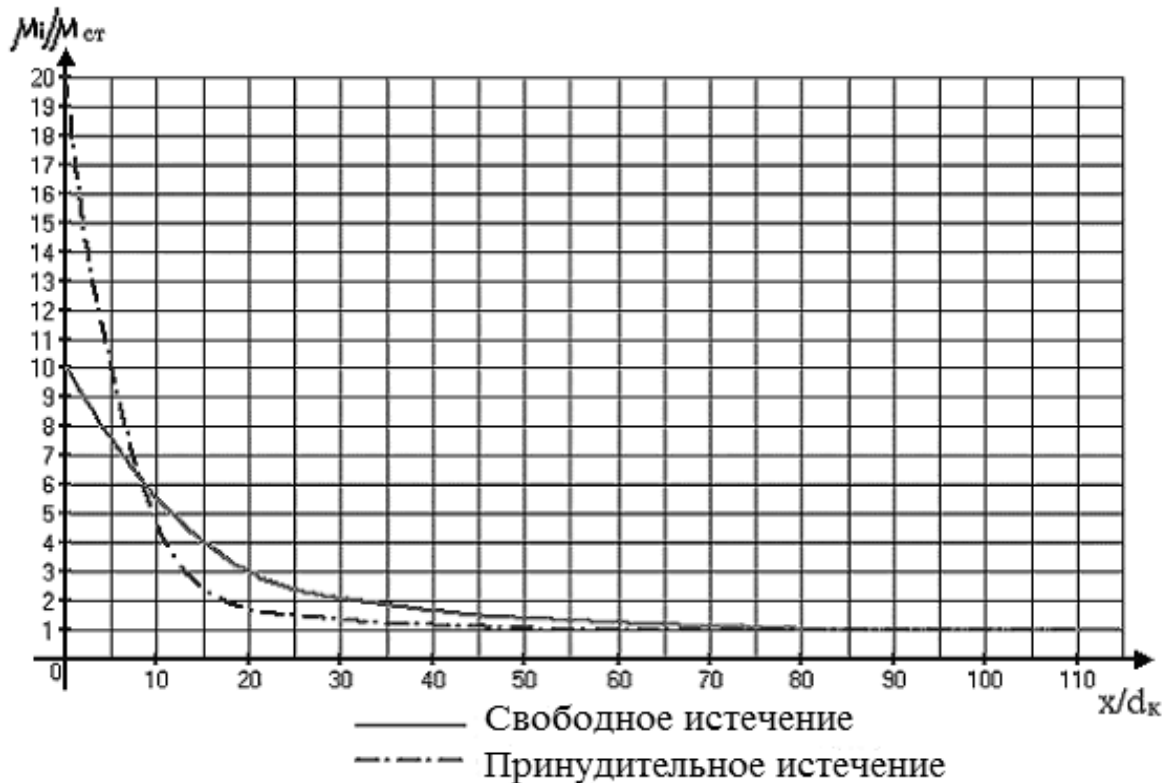


Рис. 4 Влияние длины рабочего капилляра  $d_k=1,31\text{мм}$ ,  $l_k=120\text{мм}$  вискозиметра на результаты вычисления параметра  $\mu$  при  $Re=900$

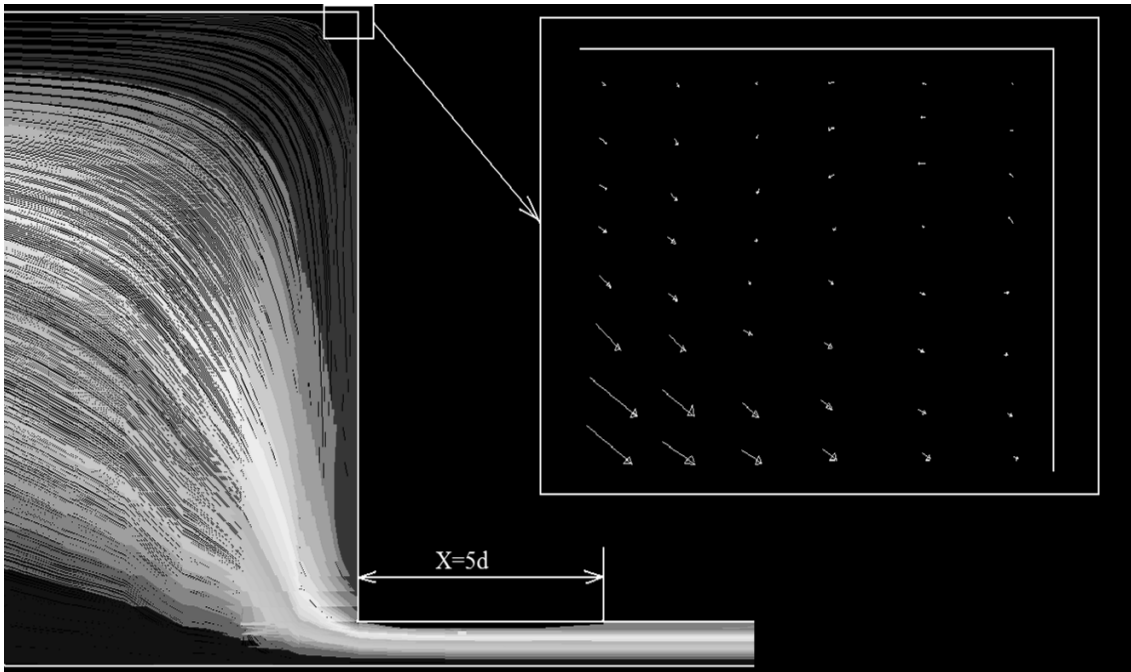


Рис. 5 Распределения линий тока в придонной области рабочего цилиндра вискозиметра с плоским дном в режиме принудительного движения жидкости (дистиллированная вода) через капилляр  $d_k=1,31\text{мм}$ ,  $l_k=120\text{мм}$ ,  $Re=900$

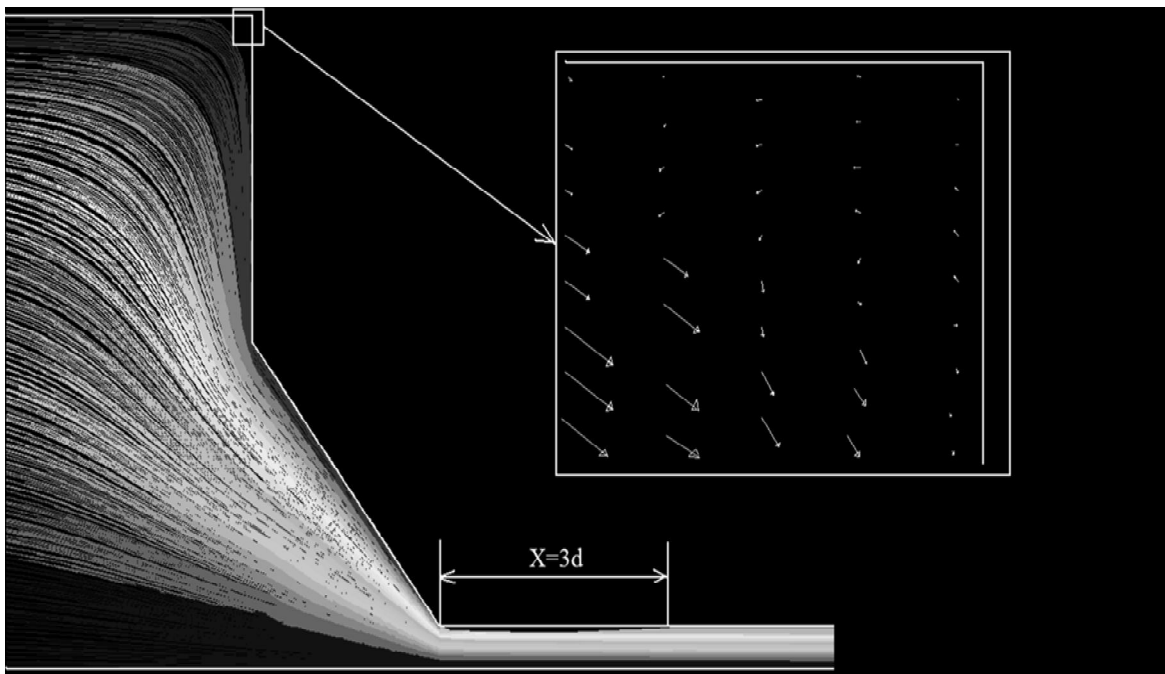


Рис. 6 Распределения линий тока в придонной области рабочего цилиндра вискозиметра с комбинированной формой дна (плоская и коническая формы) в режиме принудительного движения жидкости (дистиллированная вода) через капилляр  $d_k=1,31\text{мм}$ ,  $l_k=120\text{мм}$ ,  $Re=900$

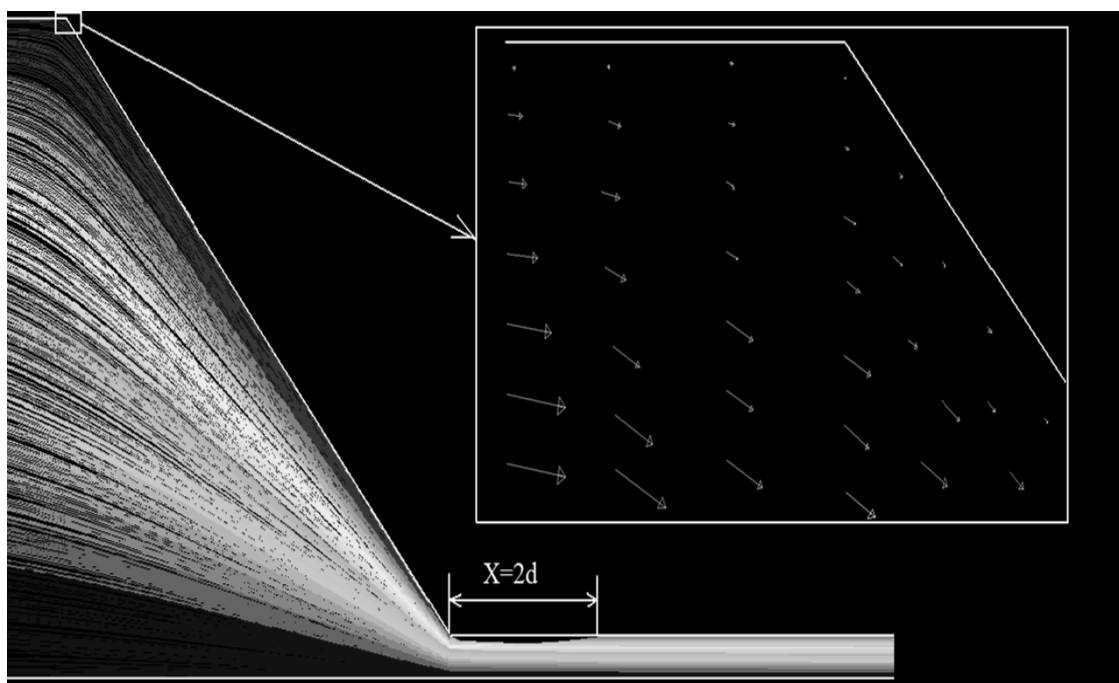


Рис. 7 Распределения линий тока в придонной области рабочего цилиндра вискозиметра с коническим дном в режиме принудительного движения жидкости (дистиллированная вода) через капилляр  
 $d_k=1,31\text{мм}$ ,  $l_k=120\text{мм}$ ,  $Re=900$

Теоретический анализ гидродинамической картины в рабочем пространстве капиллярных вискозиметров постоянного расхода позволил заключить, что указанный тип вискозиметров является наиболее перспективным для дальнейшего совершенствования и, что на их работу заметное влияние могут оказать геометрия накопительного объема, геометрические размеры капиллярной трубки, зависящие от длины гидродинамического начального участка, перестройка кинематической структуры потока по длине проточного тракта, процессы вихреобразования в придонной части накопительного объема, нелинейность распределения давления перед входом в капиллярную трубку. Однако установлено, что негативное влияние вышеуказанных факторов на метрологические характеристики вискозиметров может быть ослаблено использованием конической формы дна накопительного объема вискозиметра, правильным выбором длины капиллярной трубки и режима проведения измерительной процедуры.

На рис. 8 представлена функциональная схема предлагаемого автоматизированного устройства измерения вязкости, разработанная с учетом результатов проведенного математического эксперимента и требований, предъявляемых к современным вискозиметрам [5].

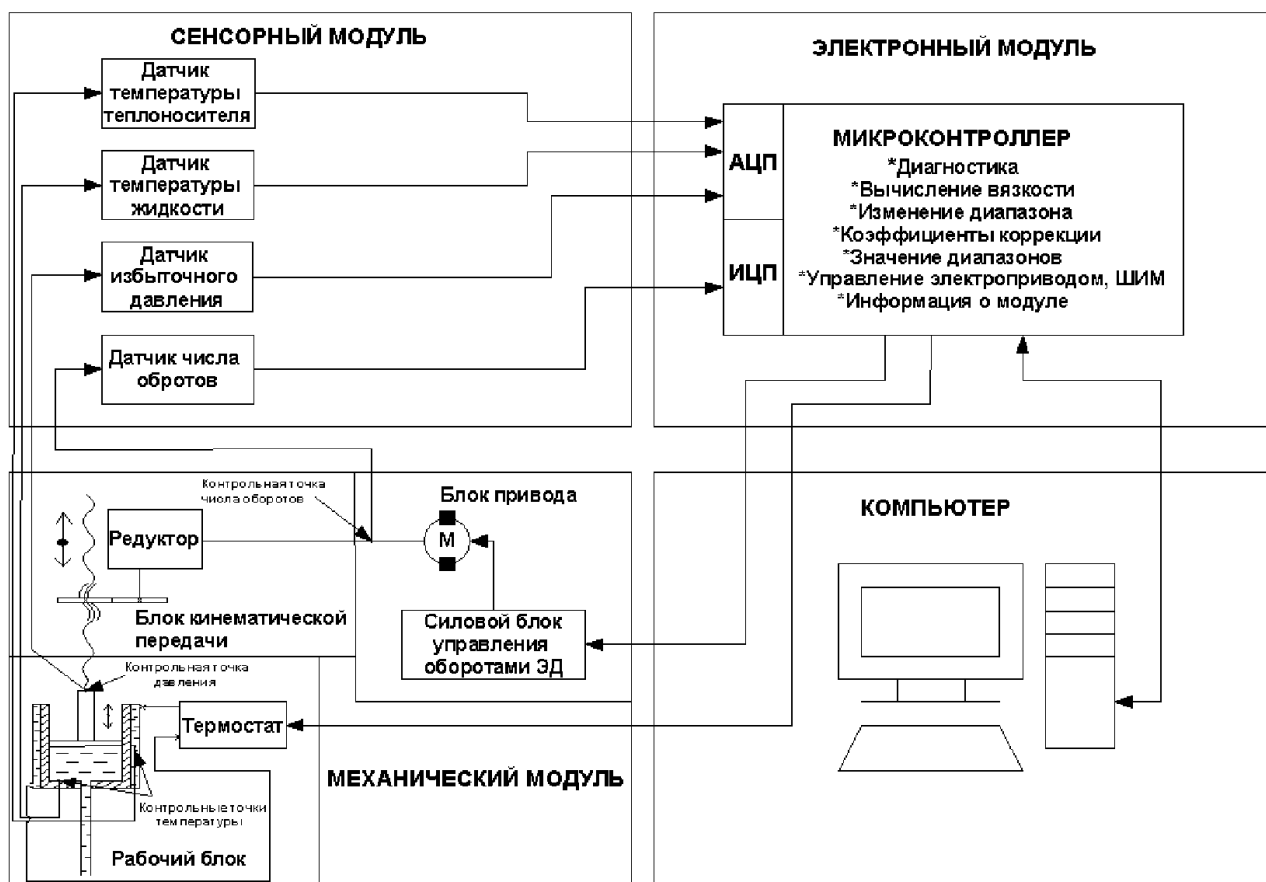


Рис. 8 Функциональная схема автоматизированного устройства для измерения вязкости

По функциональному признаку это устройство делится на 3 модуля: механический, сенсорный и электронный. Механический модуль включает в себя 3 блока: рабочий, блок кинематической передачи и блок привода. Главным элементом электронного модуля является микропроцессорный контроллер, на который возложены функции автоматического управления, обработки данных по алгоритмам, реализующим процедуру измерения, корректировки диапазона измерения, регистрации временных данных процесса, диагностирования функциональных узлов и блоков вискозиметра.

### Литература

1. Гатчек Э.П. Вязкость жидкости. – М.: ГТТИ, 1932.
2. Малкин А.Я. Диффузия и вязкость полимеров/ А.Я. Малкин, А.Е. Чалых, – М.: Наука, 1979.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя/ пер. с немец. – М.: Наука, 1969.
4. Норри Д. Введение в метод конечных элементов. – М.: Мир, 1981.
5. ГОСТ 29226-91. Вискозиметры жидкостей. Общие технические требования и методы испытаний.