

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»**

**Кафедра энергоресурсосберегающих процессов  
в химической и нефтегазовой технологиях**

**Составитель  
Е. Ю. Старикова**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НА КАПИЛЛЯРНОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ**

**Методические указания к лабораторной работе № 13  
по дисциплине  
«Процессы и аппараты химической технологии»**

**Рекомендовано учебно-методическими комиссиями направлений  
подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы  
в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии,  
18.03.01 Химическая технология  
в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе**

**Кемерово 2019**

## Рецензент

Михайлов Г. С. – доцент кафедры энергоресурсосберегающих процессов в химической и нефтегазовой технологиях.

**Старикова Елена Юрьевна.**

**Определение вязкости на капиллярном вискозиметре:** методические указания к лабораторной работе № 13 по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» [Электронный ресурс] для обучающихся направлений 18.03.01 Химическая технология и 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии всех форм обучения / сост.: Е. Ю. Старикова; КузГТУ. – Электрон. издан. – Кемерово, 2019.

Составлены с целью оказания методической помощи при выполнении лабораторной работы по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии». Содержат теоретические положения, методику выполнения работы и контрольные вопросы. Приведен список литературы.

© КузГТУ, 2019

© Старикова Е. Ю.,  
составление, 2019

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель настоящей работы – экспериментальное определение вязкости жидкостей на капиллярном вискозиметре.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При движении реальной жидкости в ней возникают силы внутреннего трения, оказывающие сопротивление движению. Эти силы действуют между соседними слоями жидкости, перемещающимися друг относительно друга. Свойство жидкости оказывать сопротивление усилиям, вызывающим относительное перемещение ее слоев, называется вязкостью.

Представим себе слой жидкости, находящийся между двумя параллельными горизонтальными пластинами (рис. 1). Для того чтобы перемещать верхнюю пластину относительно нижней в горизонтальной плоскости с постоянной скоростью, нужно прилагать некоторую постоянную касательную силу, так как вязкая жидкость оказывает сопротивление такому перемещению. Соответственно в жидкости при наличии указанного перемещения возникнут и будут существовать касательные напряжения между отдельными ее слоями. Весь слой жидкости, расположенной между пластинами, при этом можно представить состоящим из бесконечно большого числа элементарных слоев толщиной  $dn$  каждый. Очевидно, напряжения сдвига будут возникать между любыми соседними элементарными слоями вследствие трения между ними вдоль поверхности соприкосновения слоев. Расположенный выше слой движется со скоростью  $(w+dw)$ , большей, чем скорость расположенного ниже слоя, на бесконечно малую величину  $dw$ .

Касательная сила  $T$ , которую надо приложить для сдвига, тем больше, чем больше градиент скорости  $\frac{dw}{dn}$ , характеризующий изменение скорости, приходящееся на единицу нормали между слоями. Кроме того, сила  $T$  пропорциональна площади соприкосновения слоев  $F$ . Следовательно,

$$T = \mu F \frac{dw}{dn}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент пропорциональности.



Рис. 1. К характеристике вязкости

Возникающая внутри жидкости сила сопротивления равна приложенной силе  $T$  и направлена в противоположную сторону. Отношение этой силы к поверхности соприкосновения слоев обозначают через  $\tau$  и называют напряжением внутреннего трения, а также напряжением сдвига или касательным напряжением. Соответственно уравнение (1) принимает вид

$$\tau = -\mu \frac{dw}{dn}. \quad (2)$$

В форме уравнения (2) обычно выражают закон внутреннего трения Ньютона, согласно которому напряжение внутреннего трения, возникающее между слоями жидкости при ее течении, прямо пропорционально градиенту скорости. Жидкости, подчиняющиеся закону внутреннего трения Ньютона, называются правильными или ньютоновскими. Однако в промышленной практике приходится иметь дело и с неньютоновскими жидкостями, обладающими аномальными свойствами. Не следуют закону Ньютона растворы многих полимеров, коллоидные растворы, густые суспензии, пасты и др.

Знак минус в правой части уравнения (2) указывает на то, что касательное напряжение тормозит слой, движущийся с относительно большей скоростью.

Коэффициент пропорциональности  $\mu$  в уравнении (1) или (2) называется динамическим коэффициентом вязкости, динамической вязкостью или просто вязкостью.

Размерность вязкости в системе СИ выражается следующим образом:

$$[\mu] = \frac{[T]}{[F] \frac{[w]}{[n]}} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2 \frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{м}}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = \text{Па} \cdot \text{с},$$

$$\text{а в системе СГС} - [\mu] = \frac{[T]}{[F] \frac{[w]}{[n]}} = \frac{\text{дН}}{\text{см}^2 \frac{\text{см}}{\text{с} \cdot \text{см}}} = \frac{\text{дН} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} = \text{пуаз (П)}.$$

В справочной литературе значения вязкости часто приводятся не в пуазах (П), а в сантипуазах (сП), равных 0,01 П.

Соотношение между единицами вязкости в системах единиц СИ и СГС:  $1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \frac{100000}{10000} \text{ дН} \cdot \text{с} / \text{см}^2 = 10 \text{ П} = 1000 \text{ сП}.$

В гидравлике часто пользуются величиной, называемой кинематическим коэффициентом вязкости или кинематической вязкостью  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг} / \text{м}^3$ .

В системе СГС кинематическую вязкость измеряют в стоксах (Ст),  $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2 / \text{с}$ . В системе СИ единица кинематической вязкости имеет размерность  $\text{м}^2 / \text{с}$ ,  $1 \text{ м}^2 / \text{с} = 10^4 \text{ Ст}.$

Вязкость капельных жидкостей колеблется в широких пределах. Так, при комнатной температуре вязкость воды составляет ~1 сП, а вязкость глицерина – около 1500 сП. Вязкость газов значительно ниже: например, вязкость воздуха приблизительно в 50 раз меньше вязкости воды.

Вязкость капельных жидкостей значительно снижается с возрастанием температуры. Вязкость газов, наоборот, увеличивается с ее повышением. При умеренном давлении вязкость газов

практически от него не зависит, однако, начиная с некоторого давления, возрастает при его увеличении.

Причины различного влияния температуры на вязкость капельных жидкостей и газов, а также отмеченного характера влияния давления на вязкость последних обусловлены тем, что вязкость газов имеет молекулярно-кинетическую природу, а вязкость капельных жидкостей в основном зависит от сил сцепления между молекулами.

Вязкость оказывает существенное влияние на режимы течения жидкостей и на сопротивления, возникающие при их движении. Поэтому интенсификация многих гидродинамических, а также тепловых и массообменных процессов часто достигается при уменьшении вязкости среды, например, путем повышения температуры капельных жидкостей.

Для разных жидкостей зависимость вязкости от температуры различна. Для воды она имеет вид

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337t + 0,000221t^2}, \quad (3)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Вязкость жидкости возрастает с увеличением давления. Исключением является вода, для которой при температуре до  $32^{\circ}\text{C}$  с повышением давления вязкость уменьшается. При давлениях до 20 МПа изменение вязкости капельных жидкостей весьма мало и при обычных гидравлических расчетах не учитывается.

Вязкость определяют опытным путем при помощи специальных приборов, называемых вискозиметрами.

В капиллярных вискозиметрах вязкость ньютоновских жидкостей определяется путем наблюдения за движением исследуемой жидкости по капиллярной трубке, в которой устанавливается ламинарный режим движения. При ламинарном режиме течения жидкости в трубке расход жидкости определяется по формуле Гагена–Пуазейля [1]:

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta P}{128 \cdot \mu \cdot L} d^4, \quad (4)$$

где  $Q$  – расход жидкости,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\Delta P$  – потеря давления на участке трубы длиной  $L$ , Па;  $d$  – диаметр трубки, м;  $L$  – длина трубки, м.

Широкое применение на практике получил капиллярный вискозиметр Пинкевича–Оствальда (рис. 2). Испытуемая жидкость протекает по вертикальной капиллярной трубке определенного диаметра. Отмечая время  $\tau$  протекания известного объема жидкости через капилляр, можно вычислить ее вязкость. Учитывая, что  $Q = \frac{V}{\tau}$  и  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ , выражение (4) преобразуем к виду

$$\nu = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot d^4}{128 \cdot V \cdot \rho \cdot L} \tau. \quad (5)$$

Так как жидкость протекает через капилляр под действием силы тяжести, то

$$\Delta P = \rho g h, \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота столба жидкости, м.

Подставив в формулу (5) соотношение (6) и разделив обе части уравнения на  $\rho$ , получим выражение для кинематической вязкости

$$\nu = \frac{\pi g h d^4}{128 V L} \tau. \quad (7)$$

Учитывая, что величины  $h$ ,  $d$ ,  $L$  и  $V$  имеют постоянные значения для данного вискозиметра, можно обозначить

$$C = \frac{\pi g h d^4}{128 V L}.$$

Тогда  $\nu = C\tau$  или  $C = \nu/\tau$ . Величина  $C$  называется постоянной вискозиметра. Она не зависит от температуры, а зависит только от геометрических размеров вискозиметра.

Для определения постоянной  $C$  пользуются эталонными жидкостями с известной кинематической вязкостью  $\nu_{\text{ЭТ}}$ . Замеряя на данном вискозиметре время истечения эталонной жидкости  $\tau_{\text{ЭТ}}$ , определяют постоянную вискозиметра

$$C = \frac{\nu_{\text{ЭТ}}}{\tau_{\text{ЭТ}}}, \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (8)$$

Каждый вискозиметр снабжается паспортом, в котором указана его постоянная.

### 3. МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТЫ

С помощью эталонной жидкости определяют константу вискозиметра. Затем экспериментально определяют при различных температурах вязкость воды. По уравнению (3) расчетом определяют кинематическую вязкость при тех же температурах. Уравнение (3) проверяется на соответствие опытным данным по критерию Фишера (проверка на адекватность).

#### 3.1. Экспериментальное оборудование

Лабораторная установка состоит из вискозиметра ВЛЖ-2 (рис. 2), термостата 2 с электроконтактным термометром 3 и термостатирующего сосуда 4.

Вискозиметр представляет собой стеклянную U-образную конструкцию, в одно из колен которой А с двумя расширениями в виде полых шариков (В и С) впаян капилляр D, опущенный нижней своей частью в резервуар Е второго, левого колена F. Вискозиметр вместе с термометром 6 и погружным теплообменником 5 закрепляется в крышке термостатирующего сосуда – стеклянного резервуара 2. В погружной теплообменник 5 из термостата 4 постоянно подается горячая вода для поддержания в сосуде 2 необходимой температуры. Измерение температуры в сосуде 2 осуществляется с помощью термометра 6.

#### 3.2. Порядок выполнения работы

Перед началом работы вискозиметр тщательно промывают и сушат в сушильном шкафу.

Пробу эталонной жидкости (например, этилового спирта) в количестве 15–20 мл наливают в колено F для заполнения резервуара Е вискозиметра. Включают термостат, и термостатирующая жидкость (вода) непрерывно циркулирует по замкнутому контуру: термостат – термостатирующий сосуд – термостат. На контактом термометре 3 задают значение температуры (например,  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). После того, как температура термостатирующей жидкости в сосуде 4 установится постоянной, начинают измерения для определения константы вискозиметра.



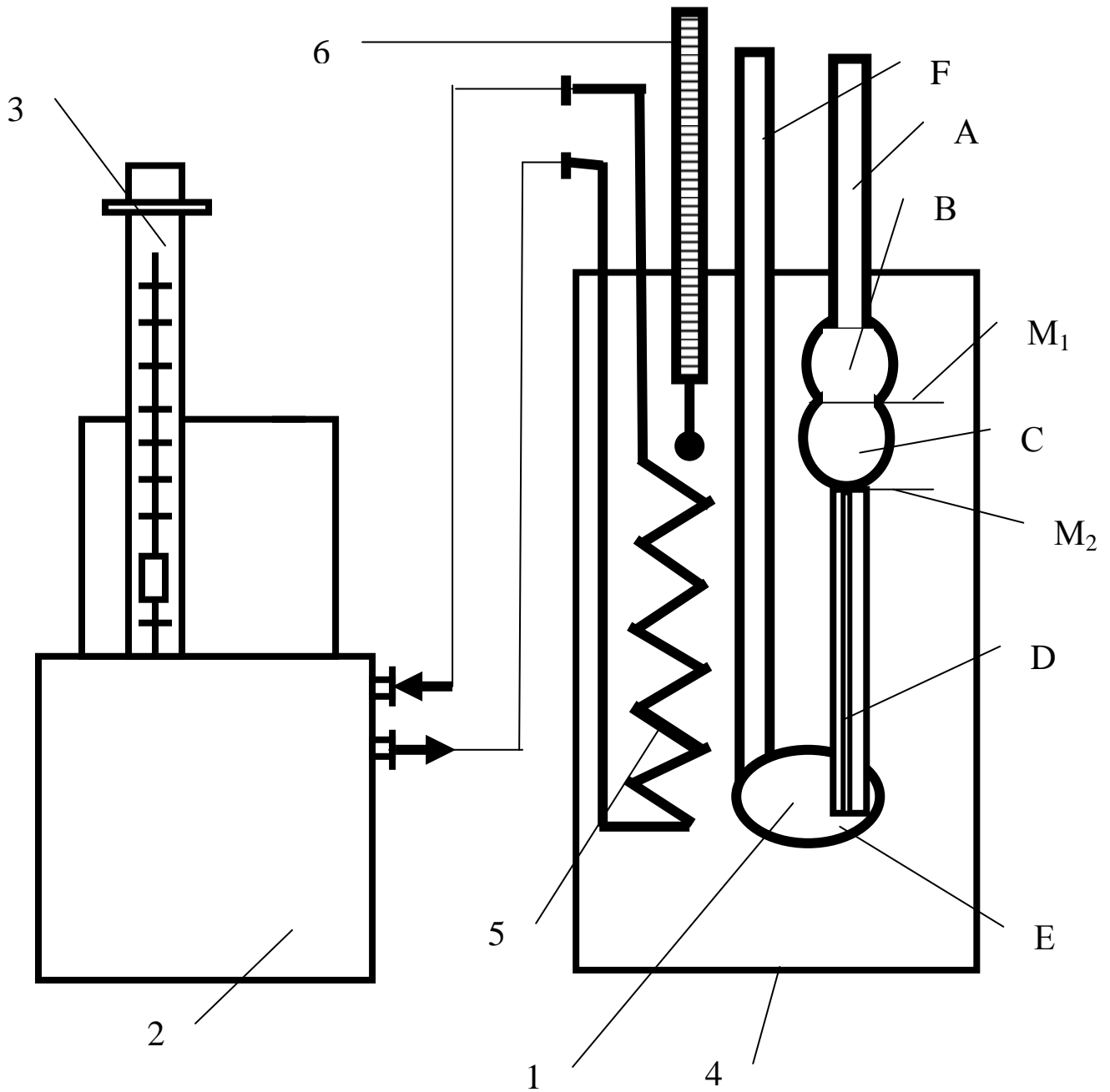


Рис. 2. Схема лабораторной установки для измерения вязкости капельных жидкостей: 1 – вискозиметр; 2 – термостат; 3 – контактный термометр; 4 – термостатирующий сосуд; 5 – погружной теплообменник; 6 – термометр

С помощью резиновой груши, надетой на верхний конец трубки А, засасывают жидкость примерно до 1/3 высоты расширения В. При этом надо следить, чтобы в капилляре D и расширениях В и С не образовывались пузырьки воздуха. После снятия груши с трубки А жидкость под давлением собственного веса начинает перетекать из колена А через капилляр D в резервуар Е. В тот момент, когда уровень жидкости достигнет метки  $M_1$ , включают секундомер и останавливают его в тот момент, когда уровень стекающей жидкости достигнет метки  $M_2$ . Время, отмеченное по секундомеру ( $\tau_{Э1}$ , с), записывают в табл. 1. Определение времени истечения жидкости через капилляр повторяют 4–5 раз.

Освобождают вискозиметр от эталонной жидкости, затем его вновь тщательно промывают и сушат в сушильном шкафу. Набирают пробу испытуемой жидкости (например, дистиллированной воды) в вискозиметр и проводят определение времени прохождения жидкости через уровни меток  $M_1$  и  $M_2$  несколько раз. Результаты измерений записывают в табл. 2.

Таблица 1

Эталонная жидкость	Температура $t$ , °C	$\nu_{ЭТ}$ , $\text{м}^2/\text{с}$	Время истечения жидкости через капилляр, с				Константа $C$ , $\text{м}^2/\text{с}^2$
			$\tau_{ЭТ1}$	$\tau_{ЭТ2}$	$\tau_{ЭТm}$	$\tau_{ЭТСР}$	

Таблица 2

Испытуемая жидкость	Температура жидкости $t$ , °C	Время истечения жидкости через капилляр, с			Кинематическая вязкость, определенная экспериментально, $\text{м}^2/\text{с}$				Кинематическая вязкость, рассчитанная по (3), $\nu_p$ , $\text{м}^2/\text{с}$
		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_m$	$\nu_{Э1}$	$\nu_{Э2}$	$\nu_{ЭТ}$	$-\nu_{iЭ}$	

Измерения осуществляют в интервале температур 25–60 °C с шагом 5–10 °C. Рекомендуется выполнить три серии опытов в заданном интервале температур по 4–5 измерений в каждой серии.

### 3.3. Обработка результатов эксперимента

1. Определяют по данным табл. 1 значение константы вискозиметра  $C$ ,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ , по выражению (8), предварительно определив по справочной литературе  $\nu_{\text{ЭТ}}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , для соответствующей температуры.

2. Определяют по данным табл. 2 значения кинематической вязкости от  $\nu_{\text{Э1}}$  до  $\nu_{\text{Эm}}$  при каждом значении температуры  $t$  как  $\nu_{\text{Э}} = C\tau$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , и среднее значение  $\overline{\nu_{\text{Эi}}}$  для каждой температуры как среднее арифметическое.

3. По опытным данным строится зависимость вязкости испытуемой жидкости от температуры  $\nu_{\text{Э}} = f(t)$ . На графике зависимости наносятся все экспериментальные значения  $\nu_{\text{Э}}$  и через все полученные точки проводится кривая.

4. По уравнению (3) рассчитывают кинематическую вязкость  $\nu_{\text{Р}}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

5. Осуществляется проверка на адекватность уравнения (3). Принцип проверки адекватности заключается в следующем. Разброс опытных данных относительно расчетных сравнивают с ошибкой эксперимента, найденной из параллельных опытов. Если разброс невелик, то уравнение адекватно.

Количественная проверка адекватности проводится по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{НА}}^2}{S_{\text{В}}^2},$$

где  $S_{\text{НА}}^2$  – дисперсия неадекватности;  $S_{\text{В}}^2$  – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия неадекватности определяет разброс опытных данных относительно расчетных:

$$S_{\text{НА}}^2 = \frac{\sum_{q=1}^N (\nu_{\text{Э}q} - \nu_{\text{Р}q})^2}{f_1},$$

где  $\nu_{\text{Э}q}$  и  $\nu_{\text{Р}q}$  – экспериментальные (на  $q$ -м измерении) и расчетные значения кинематической вязкости;  $f_1$  – число степеней сво-

боды,  $f_1 = N - n$ , где  $N$  – число опытов (всех экспериментальных точек),  $n$  – число переменных (варьируемых параметров).

В наших опытах  $n = 1$  (варьируется только температура в заданном интервале значений).

Дисперсия воспроизводимости определяет ошибку опыта

$$S_B^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(v_{\Xi i} - \overline{v_{\Xi}})^2}{f_2},$$

где  $v_{\Xi i}$  – значение измеряемой величины на  $i$ -м измерении;  $\overline{v_{\Xi}}$  – среднее арифметическое значение измеряемой величины,

$\overline{v_{\Xi}} = \frac{\sum_{i=1}^m v_{\Xi i}}{m}$ ;  $f_2$  – число степеней свободы,  $f_2 = m - 1$ ;  $m$  – число параллельных опытов (не менее трех) в данной серии опытов (при одинаковой температуре).

Уравнение (3) адекватно, если  $F \leq F_{\text{ТАБЛ}}$ , где  $F_{\text{ТАБЛ}}$  – табличное значение  $F$ , соответствующее степени свободы  $f_1$  и  $f_2$  и уровню значимости  $\alpha = 0,05$  (табл. 3).

Критерии Фишера ( $F_{\text{ТАБЛ}}$ ) при  $\alpha = 0,05$

Таблица 3

$f_2$	Критические значения $f_1$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	$\infty$
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	248	254
2	18,5	19,0	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,66	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,80	5,63
5	6,61	5,79	5,74	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,56	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	3,87	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,44	3,22
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	3,15	2,93
9	5,12	4,26	3,84	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	2,94	2,71
10	4,95	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,77	2,54
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	2,12	1,84
$\infty$	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	1,57	1,00

## 4. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ

При работе с термостатом необходимо соблюдать правила электробезопасности. Термостат должен быть заземлен и находиться в исправном состоянии. Все токоведущие элементы должны иметь надежную электроизоляцию. В случае любой неисправности или возгорания требуется отключить термостат от электросети.

## 5. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет оформляется на листах бумаги формата А4 (297×210 мм) и должен содержать:

- титульный лист установленного образца;
- кратко изложенные теоретические положения;
- принципиальную схему лабораторной установки;
- порядок выполнения работы;
- таблицы измеренных и рассчитанных величин;
- графики зависимости  $v_{\Sigma} = f(t)$ ;
- анализ результатов и выводы по работе.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова размерность динамической и кинематической вязкости в системе СИ и СГС?
2. Чем отличаются ньютоновские жидкости от неньютоновских?
3. Какова зависимость вязкости капельных жидкостей от температуры и давления?
4. Объясните методику измерений вязкости на капиллярном вискозиметре.
5. Как осуществляется проверка уравнения (3) на адекватность?

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Рабинович, Е. З. Гидравлика: учебное пособие для вузов. – Москва: Наука, 1980. – 278 с.

2. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: учебное пособие для вузов / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов. – Москва: Высш. шк., 1991. – 400 с.