

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ НА ВИСКОЗИМЕТРАХ СВОБОДНОГО ИСТЕЧЕНИЯ В НЕФТЕГАЗОДОБЫЧЕ

В.Б. Демьяновский
ИПНГ РАН, e-mail: demian20@yandex.ru

При разработке нефтяных и газовых месторождений необходим оперативный контроль вязкости различных текучих систем, например, буровых растворов при бурении нефтяных и газовых скважин, технологических жидкостей в процессе эксплуатации, во время проведения ремонтных работ и опытно-промышленных испытаний новых технологий.

Для получения характеристик реологических свойств текучих материалов существует большое разнообразие конструкций вискозиметров. Однако среди этого множества для практической работы зачастую востребованы вискозиметры именно на основе свободного истечения жидкости из резервуара через сужающий канал – капиллярную трубку или малое отверстие. В отличие от метода ротационной и вибрационной вискозиметрии этот метод не связан с необходимостью применения сложных электронных схем для своей реализации, так как необходимая для перемещения жидкости энергия – это потенциальная энергия образца, задаваемая его положением в гравитационном поле. Из различных конструкций остановимся на типичных представителях: вискозиметр-воронка для буровых растворов типа ВБР, вискозиметр для лакокрасочной продукции ВЗ-246, вискозиметр ВПЖ-2 (рис. 1, см. Приложение).

Вискозиметры, основанные на свободном истечении жидкости из резервуара, имеют продолжительную историю, которая отражена также в многочисленных стандартах на определение вязкости [1–7]. Первичным регистрируемым показателем при определении вязкости является время истечения испытуемой жидкости из рабочего объема вискозиметра. Время истечения в этом случае часто называют условной вязкостью и выражают в секундах. Для перехода к показателям кинематической вязкости требуется пересчет этого времени в показатели вязкости. Наиболее правильными считаются измерения вязкости на вискозиметрах свободного истечения, произведенные на специализированных капиллярных вискозиметрах, конструкции которых допускаются действующими стандартами. Элементы конструкции капиллярных вискозиметров имеют пропорции, позволяющие максимально просто связать время истечения испытуемого образца и кинематическую вязкость (ν), как, например, в стандарте ГОСТ 33-82 [3]:

$$v=C \cdot t, \quad (1)$$

где C – константа вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$; t – среднearифметическое время истечения жидкости в вискозиметре, с.

Однако не всегда между временем истечения и вязкостью имеется такая простая зависимость. Формулу (1) рекомендуется применять для расчета вязкости в вискозиметрах типа ВПЖ при времени истечения более 200 с. В ГОСТ 33-2000, заменившем ГОСТ 33-82, при меньшем времени истечения рекомендуется учитывать кинетическую энергию струи, вводить поправку на кинетическую энергию и применять формулу с двумя константами вида:

$$v=C \cdot t - \frac{B}{t^2}, \quad (2)$$

где B – коэффициент при множителе t^2 (называется в данном уравнении коэффициентом кинетической энергии [2]).

С другой стороны Хагенбахом предложена поправка на кинетическую энергию, с которой зависимость вязкости от времени истечения выглядит следующим образом [8]:

$$v=C \cdot t - \frac{B}{t}. \quad (3)$$

Объединяющим уравнением для (2) и (3) будет уравнение, в котором поправка на кинетическую энергию входит с переменным показателем степени n :

$$v=C \cdot t - \frac{B}{t^n}, \quad (4)$$

где n принимает значение 2, как в уравнении (2), или 1, как в уравнении (3).

Поскольку опытами подтверждаются оба варианта зависимостей, то представляет интерес исследовать также зависимость и при $n=0$, то есть считать поправку на кинетическую энергию для данного устройства постоянной величиной. Соответствующее уравнение примет вид:

$$v=C \cdot t - B. \quad (5)$$

Неопределенность вида зависимостей вязкости от времени истечения, известных в литературе, ставит задачу выбора наиболее рациональной из них для практического использования на рассматриваемых типах вискозиметров.

Экспериментальная часть

В настоящей работе исследованы различные формы зависимостей кинематической вязкости от времени истечения рабочего объема вискозиметра на примере измерений на различных конструкциях технических вискозиметров. С этой целью использованы два

конструктивно схожих вискозиметра – ВБР-2 и ВЗ-246. Вискозиметр ВЗ-246 (и аналогичные по конструкции иностранные аналоги) во многих отношениях является удобным средством определения вязкости в широком диапазоне значений вязкости за счет штатных и дополнительных сменных насадок, через которые происходит истечение жидкости. Кроме того в ГОСТ 9070-75 [7] в качестве приложения представлены графические зависимости кинематической вязкости от времени истечения для штатного набора насадок этого вискозиметра, но эти зависимости не являются линейными и неудобны в пользовании. Другой недостаток штатного набора насадок вискозиметра ВЗ-246 – это малая длина насадок (4 мм), что ведет к тому, что в процессе истечения перепад давления, под действием которого происходит истечение жидкости, стремится к нулю в конце истечения рабочего объема вискозиметра, а это приводит к неточности определения времени истечения. В вискозиметре для буровых растворов за счет наличия трубки длиной 100 мм такого не происходит. Для устранения этого недостатка для вискозиметра ВЗ-246 дополнительно изготовлены насадки с длиной 50 и 100 мм.

Для эмпирического построения искомых зависимостей использован набор жидких эталонов вязкости. В качестве эталонов применялись силиконовые масла с вязкостью 100–1000 сСт, углеводородные жидкости, гликоли и вода. Измерения проводили при 20–22 °С.

Интерпретация полученных результатов проводилась после представления графических зависимостей вязкости от времени истечения в координатах, в которых уравнения (2–5) представляют собой линейную зависимость с параметрами эмпирических констант А и В. Для этого все слагаемые уравнения (2) умножили на t^2 и получили уравнение:

$$vt^2 = C \cdot t^3 - B. \quad (6)$$

В уравнении (3) слагаемые умножены на t и получено уравнение:

$$vt = C t^2 - B. \quad (7)$$

Построение линейных зависимостей в координатах vt^2-t^3 , $vt-t^2$ и $v-t$ позволяет определить искомые константы для различных форм искомых зависимостей (рис. 2, 3).

Результаты измерений с рассчитанным коэффициентом корреляции приведены в табл. 1. Из представленных данных видно, что значения коэффициента С для всех зависимостей близки друг к другу. Коэффициент В, который связывается с поправкой на кинетическую энергию, оказывается различным и возрастает при увеличении степени

параметра t , входящего в уравнение (4). Наименьшее значение B имеет место при $n=0$ и возрастает с ростом n .

Таблица 1

Сравнение функциональных зависимостей вязкости от времени истечения для различных конструкций вискозиметров

№	Тип вискозиметра	Геометрия вискозиметра			Константы эмпирических уравнений и коэффициенты линейной корреляции		
		рабочий объем, мл	диаметр сопла, мм	длина сопла, мм	C	B	r^2
уравнение: $v=C \cdot t - B$ в координатах $v-t$							
1	ВБР	100	5	100	3.1009	-11.058	1
2	ВЗ-246	100	5	50	2.85	-12.02	0.9995
3	ВЗ-246	100	5	100	1.90	-6.389	0.9996
4	ВБР	500	5	100	0.985	-13.57	0.9994
уравнение: $v=C \cdot t - \frac{B}{t}$ в координатах $vt-t^2$							
5	ВБР	100	5	100	2.954	-95.63	0.9998
6	ВЗ-246	100	5	50	2.692	-109.21	1
7	ВЗ-246	100	5	100	1.838	-46.8	1
8	ВБР	500	5	100	0.872	-276.56	0.9997
уравнение: $v=C \cdot t - \frac{B}{t^2}$ в координатах vt^2-t^3							
9	ВБР	100	5	100	2.945	-2130.5	0.9999
10	ВЗ-246	100	5	50	2.6779	-2071.7	1
11	ВЗ-246	100	5	100	1.8354	-966.91	1
12	ВБР	500	5	100	0.8652	-10600	0.9998
уравнение: $v=C \cdot t - B$ в координатах $v-t$ (для штатных насадок ВЗ-246 расчет – по данным приложения ГОСТ)							
13	ВЗ-246	100	2	4	0.9577	3.507	0.9979
14	ВЗ-246	100	4	4	4.566	-23.28	0.9998
15	ВЗ-246	100	6	4	19.539	-27.484	0.9999

Изученные зависимости показывают хорошую линейную корреляцию в выбранных системах координат во всех изученных случаях. Следует отметить, что поправка на кинетическую энергию, интерпретируемая в координатах «вязкость-время» не зависит от вязкости (и времени истечения). В представленных зависимостях характерным является то, что время истечения при интерполяции на нулевую вязкость стремится к конечной

величине, которая имеет смысл времени истечения идеальной (невязкой) жидкости для данной конструкции вискозиметра.

Выводы

Изучены варианты зависимостей кинематической вязкости от времени истечения (условной вязкости) для группы технических вискозиметров на основе истечения фиксированного объема через насадки. Показано, что связь вязкости с временем истечения может быть описана тремя видами линейных зависимостей в различных координатах на основе известных эмпирических уравнений, но наиболее просто – в координатах «вязкость-время», причем поправка на кинетическую энергию при этом не зависит от вязкости.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности», № АААА-А16-116031750016-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1532-81 (взамен ГОСТ 1532-54) Вискозиметры для определения условной вязкости. Технические условия (с Изменениями № 1, 2).
2. ГОСТ 8.290-78 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Вискозиметры типа ВУ. Методы и средства поверки.
3. ГОСТ 33-82 (взамен ГОСТ 33-66) Нефтепродукты. Метод определения кинематической и расчет динамической вязкости (с Изменениями № 1–4).
4. ГОСТ 33-2000 (ИСО 3104-94) (взамен ГОСТ 33-82) Нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости.
5. ГОСТ 33-2016 (взамен ГОСТ 33-2000) Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости.
6. ГОСТ 33213-2014 (ISO 10414-1:2008) Контроль параметров буровых растворов в промысловых условиях. Растворы на водной основе.
7. ГОСТ 9070-75 (взамен 9070-59) Вискозиметры для определения условной вязкости лакокрасочных материалов. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4).
8. *Карабин А.И., Раменская Е.С., Энно И.К.* Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. М.: Металлургия, 1966. 372 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

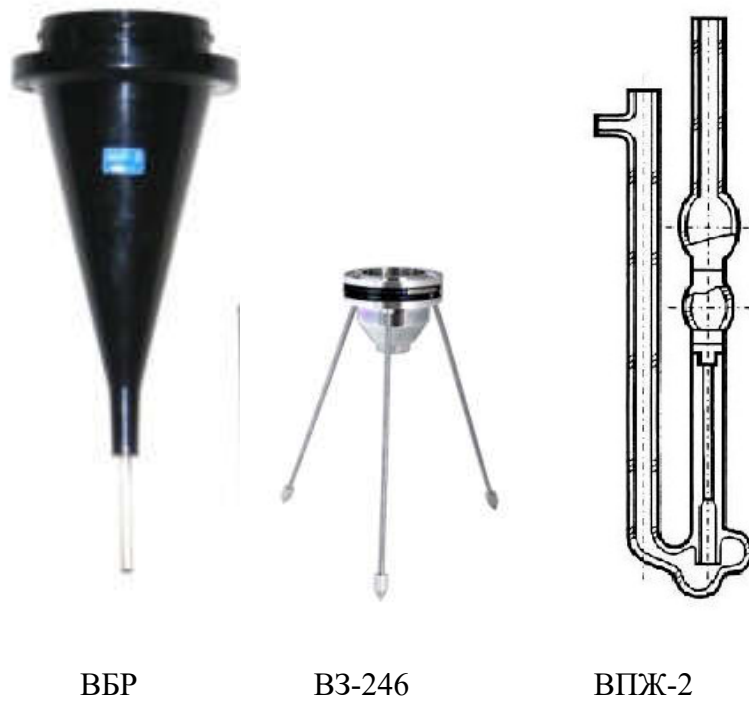


Рис. 1. Вискозиметры, основанные на свободном истечении

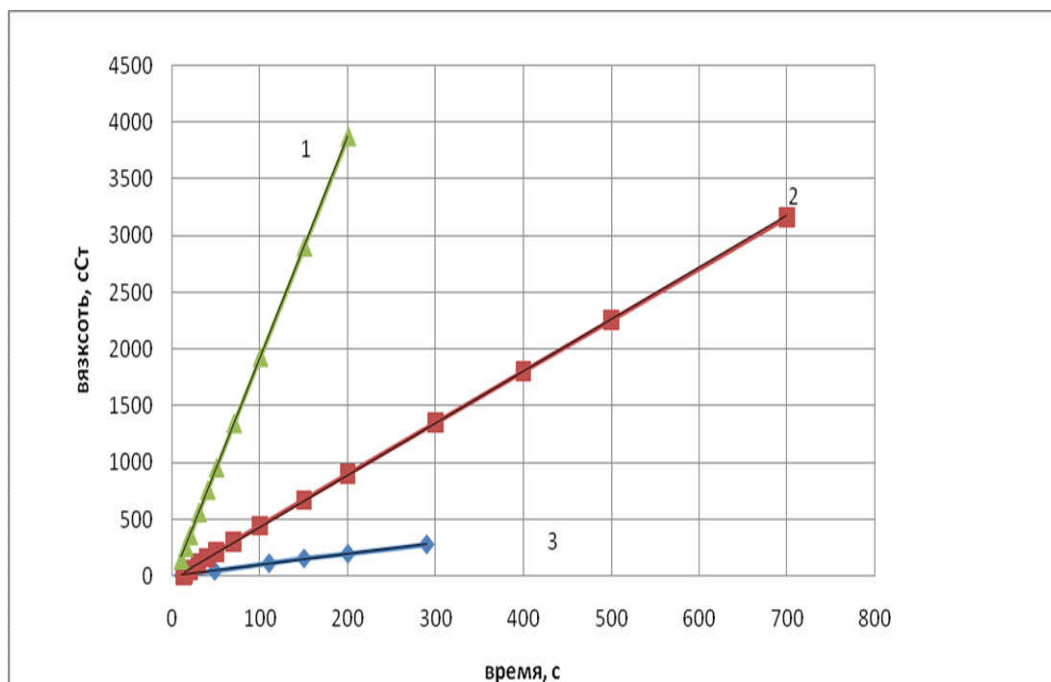


Рис. 2. Зависимость «вязкость-время» на вискозиметре ВЗ-246 на штатных насадках:
1 – 6 мм, 2 – 4 мм, 3 – 2 мм

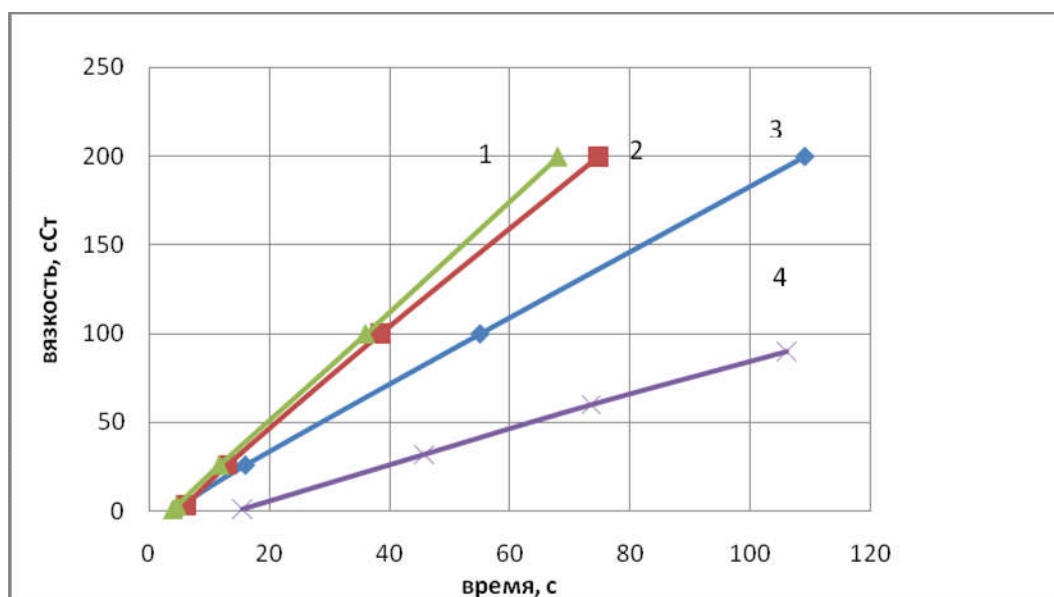


Рис. 3. Зависимость «вязкость-время» для разных конструкций вискозиметров:
1 – ВБР-(5/100/100), 2 – ВЗ-(5/50/100), 3 – ВЗ-(5/50/100), 4 – ВБР-(5/100/500);
формат обозначений:
вискозиметр-(диаметр канала, мм/длина канала, мм/объем резервуара, мл)