

УДК 550.4.02

**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ПЛАСТОВЫХ НЕФТЕЙ
НА КАПИЛЛЯРНОМ ВИСКОЗИМЕТРЕ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ PVT-ТЕСТОВ**¹Даренский А.Н., ^{1,2}Гончаров И.В., ^{1,2}Обласов Н.В.¹ОАО «ТомскНИПИнефть», Томск, e-mail: GoncharovIV@nipineft.tomsk.ru;²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

С использованием индивидуальных соединений и жидкостей с известной вязкостью были проведены замеры и выполнены сравнительные расчёты вязкости подходами, которые используются в практике работы на капиллярном вискозиметре на сегодняшний день. Особое внимание было уделено значениям вязкости, в области нижнего рабочего предела измерения вискозиметра (0.3 сП). Были выявлены значительные отклонения табличных значений от фактически замеренных методом предусмотренным руководством по эксплуатации. В рамках работы рассмотрены причины и предложены несколько способов расчёта, позволяющих снизить погрешность измерения.

Ключевые слова: Капиллярный вискозиметр, Число Рейнольдса, уравнение Хагена-Пуазейля, поправка Хагенбаха

**DETERMINATION OF RESERVOIR OIL VISCOSITY BY A CAPILLARY
VISCOMETER IN THE CONTEXT OF PVT-TESTS**¹DaRenskiy A.N., ^{1,2}Goncharov I.V., ^{1,2}Oblasov N.V.¹JSC «TomskNIPIneft», Tomsk, e-mail: GoncharovIV@nipineft.tomsk.ru;²National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

Based on individual compounds and liquids of known viscosity, this study is aimed at measuring and calculating viscosity by the methods that are currently used in the capillary viscometry practice. It pays the special attention to viscosity values in the lower measurement limit of the viscometer (0.3 cP). The significant deviations of Reference values from actual ones measured by the method prescribed in the operation manual are revealed. The study considers causes of measurement errors and proposes several calculation methods to reduce them.

Keywords: Capillary viscometer, Reynolds number, Hagen-Poiseuille equation, Hagenbach correction factor

Вязкость пластовой смеси является одним из важнейших параметров при гидродинамическом моделировании движения нефти в пласте. Поэтому получение корректных данных о вязкости является одной из основных задач PVT-исследований. Вязкость пластовой нефти колеблется в широких пределах и зависит от многих факторов (состав флюида, температура, давление, количество растворённого газа и др.).

При определении величины вязкости пластовой нефти могут использоваться капиллярный, шариковый или электромагнитный вискозиметры. У каждого из них есть свои преимущества и недостатки.

У капиллярного вискозиметра есть несколько важных преимуществ. Во-первых, в отличие от шарикового вискозиметра, он непосредственно встроен в систему установки PVT, что позволяет определить изменение вязкости при изменении состава флюида при частичном разгазировании. Это необходимо при проведении некоторых тестов, например, теста дифференциального разгазирования. Во-вторых, для работы с капиллярным вискозиметром в серии экспериментов требуется меньшее количество пластового флюида, что очень важно при небольших объёмах пробы. Например, на электромагнитном и шарико-

вом вискозиметрах, часть флюида после измерения вязкости в дальнейших исследованиях не используется и выводится из системы. В-третьих, капиллярный вискозиметр высокого давления, по сути, это трубка с заданными параметрами длины и внутреннего диаметра, которые всегда можно рассчитать для получения необходимого диапазона измерения вязкости. Найти изготовителя подобных капилляров можно не только за рубежом, но и в России или странах СНГ. Всё это делает капиллярный вискозиметр более практичным и доступным, в силу чего он получил широкое распространение в практике проведения исследований пластовых флюидов.

Тем не менее, несмотря на значительные преимущества, измерение вязкости на капиллярном вискозиметре сопряжено с рядом проблем. Одна из них связана с минимальным пределом вязкости, которая согласно инструкции по эксплуатации не должна быть меньше 0.3 сантипуаз (сП). Кроме того, практика показывает, что часто при исследовании жидкостей с известной вязкостью наблюдается существенное расхождение между истинным и экспериментальным значением. Поэтому целью данной работы было выявление причин больших погрешностей и поиск решения для их снижения.

Оборудование и материалы

Для проведения экспериментов использовалась установка фазового поведения CHANDLER 3000 – GL PVT system, схема которой показана ниже (рис. 1). Установка оснащена двумя ячейками рабочим объёмом 400 см³ и 100 см³ соответственно. Вязкость замерялась на капиллярном вискозиметре с диапазоном измерения 0,3–50 сП (длина и диаметр капилляра – 365.76 и 0.0381 сантиметра (см) соответственно), а плотность на плотнометре mPDS 2000. Регулировка давления и скорость подачи жидкостей осуществлялась при помощи внешнего насоса VINCHI pump 500cc-1000 Bars-SS. Для охлаждения использовалась система Polyscience 3000-CLG-SPR. Выбор жидкостей для тестов был обусловлен их вязкостью, которая при калибровке должна охватывать нижнюю часть рабочего диапазона вискозиметра. На нижнем пределе использовались индивидуальные вещества высокой чистоты с известной вязкостью, такие как декан, толуол, а также калибровочная жидкость N2 компании CANON, которая, к сожалению, аттестована только при атмосферном давлении. Поэтому перед использованием, вязкость жидкостей CANON замерялась на шариковом вискозиметре CHANDLER, модель 1602, при разных температурах и давлениях. Значения вязкости для декана и толуола были взяты из программы REFPROP v9.0, разработанной Национальным институтом стандартов и технологий (NIST). Эта программа позволяет вычислять термодинамические и транспортные свойства промышленно важных жидкостей и их смесей. Эксперименты выполнялись с учётом требований и рекомендаций [4, 5].

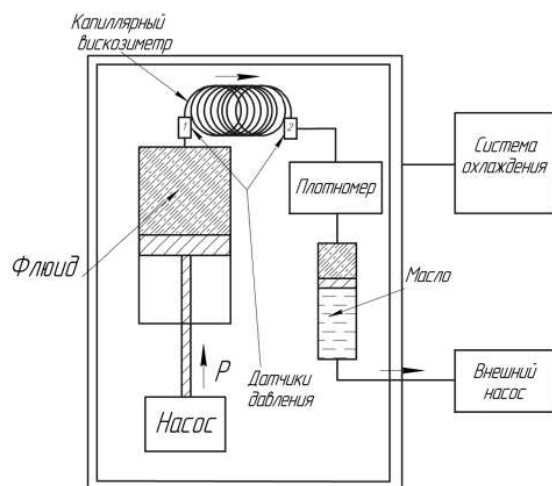


Рис. 1. Схема измерения вязкости капиллярным вискозиметром

Результаты измерения и основные расчёты

В основе процедуры определения вязкости пластовой нефти на капиллярном вискозиметре заложено уравнение Хагена-Пуазейля:

$$\mu_p = Kv \cdot \frac{C \cdot D^4 \cdot \Delta P}{Q \cdot L}, \text{ сП} \quad (1)$$

где μ_p – расчётная вязкость, сП; C – постоянная, равная 14.726213×10^8 , для использования с перечисленными здесь единицами; ΔP – разность давления на входе и выходе капилляра, МПа; D – внутренний диаметр трубки, см; Q – объёмная скорость потока, см³/мин; L – длина капилляра, см; Kv – калибровочный коэффициент вискозиметра, который определяется экспериментально для каждого капилляра путём его калибровки с использованием эталонных жидкостей с известной вязкостью.

Конкретное значение для нашего вискозиметра составляет 1.29. Относительное отклонение при анализе эталонных жидкостей рассчитывалось по формуле:

$$\Delta = \left(\frac{\mu_p - \mu_T}{\mu_T} \right) \cdot 100, \% \quad (2)$$

где μ_p – расчётная вязкость, сП; μ_T – табличная вязкость, сП.

Результаты измерений приведены в таблице и на рис. 2. Как видно из таблицы и рисунка, использование стандартного подхода в расчёте вязкости в диапазоне от 50 до 1,5 сП удовлетворяет требованиям заявленной в инструкции по эксплуатации погрешности определения $\pm 2,5\%$. Однако при анализе жидкостей с вязкостью ниже 1 сП наблюдается существенное отклонение замеренной величины от истинного значения, которое с понижением исследуемой вязкости становится весьма значительным и достигает 80% и более (рис. 2).

Важно отметить, что нефти с вязкостью около 1,0 сП широко распространены на севере Западной Сибири, в их числе и нефть недавно открытого месторождения «Победа» в Карском море.

В таблице и на рис. 2 приведены далеко не все результаты экспериментов. Представлена только часть данных, характеризующая диапазон вязкости вблизи нижнего предела рабочего диапазона вискозиметра, т.к. именно при измерении в этом диапазоне наблюдается существенное расхождение между табличной и расчётной вязкостью.

Чтобы понять причины роста относительного отклонения необходимо сравнить принципы замера вязкости для всех типов обычно используемых вискозиметров. Так,

для шарикового и электромагнитного вискозиметра вязкость определяется по изменению параметров движения тела, определённых геометрических размеров и массы, в постоянном объёме жидкости, находящейся в состоянии покоя. Вязкость в капиллярном вискозиметре определяется параметрами течения жидкости в полой трубе, т.е. капилляре, определённой геометрии. Таким образом, исходная формула расчёта (1) учитывает параметры течения жидкости (Q , ΔP) и геометрию капилляра (D , L) в котором оно проходит, но не учитывает характера этого

течения или возможность его изменения, т.к. предполагается наличие ламинарного течения во всём диапазоне измерений. По нашему мнению, именно эта особенность расчёта вязкости является ключевой в возникновении больших отклонений.

Из формулы (1) следует, что при измерении вязкости учитывается только два параметра – объёмная скорость потока (Q) и разница давления на входе и на выходе капилляра (ΔP). Остальные параметры, включая калибровочный коэффициент капилляра K_v , являются постоянными.

Результаты замера и расчёта вязкости эталонных жидкостей в соответствии с инструкцией по эксплуатации

Жидкость	Давление, МПа	Температура, °С	Скорость потока жидкости при замере, см ³ /мин	Перепад давления между датчиками на входе и на выходе капилляра, МПа	Вязкость, сП		Величина относительного отклонения при замере вязкости на капиллярном вискозиметре с постоянным $K_v = 1.29$
					Справочная или замеренная на шариковом вискозиметре	Замеренная на капиллярном вискозиметре при использовании постоянного $K_v = 1.29$ без корректировки	
N2	30.0	25	2.2	0.56	2.77	2.77	0.14
	25.0	25	5.0	1.20	2.61	2.63	0.64
	20.0	25	2.0	0.45	2.46	2.48	0.9
	10.0	25	5.0	1.00	2.19	2.19	0.08
	30.0	50	4.5	0.72	1.76	1.75	0.74
	25.0	50	4.5	0.69	1.68	1.67	0.45
	15.0	50	9.0	1.25	1.52	1.52	0
	30.0	100	7.0	0.61	0.91	0.95	4.4
	15.0	100	7.0	0.53	0.75	0.82	9.3
	5.0	100	8.0	0.57	0.66	0.77	16.7
	30.1	100	12.0	1.17	0.91	1.07	17.6
	15.0	100	12.0	1.02	0.75	0.93	24
	5.0	100	12.0	0.94	0.66	0.85	28.8
Декан	20.0	20	6.4	0.69	1.14	1.18	3.5
	20.0	40	8.1	0.69	0.86	0.93	8.1
	10.0	40	8.6	0.69	0.78	0.88	12.8
	5.0	40	9.0	0.69	0.73	0.84	15.1
	15.1	100	12.5	0.69	0.43	0.60	39.5
	24.4	100	19.5	1.38	0.48	0.77	60.4
	6.5	100	22.0	1.38	0.40	0.69	72.5
Толуол	10.0	25	7.0	0.45	0.60	0.70	16.7
	10.0	25	9.0	0.61	0.60	0.75	25
	5.0	25	12.0	0.86	0.58	0.79	36.2
	15.0	100	10.0	0.43	0.31	0.47	51.6
	15.0	100	12.0	0.54	0.31	0.50	61.3
	5.0	100	12.0	0.52	0.28	0.48	71.4
	5.0	100	15.0	0.70	0.28	0.51	82.1

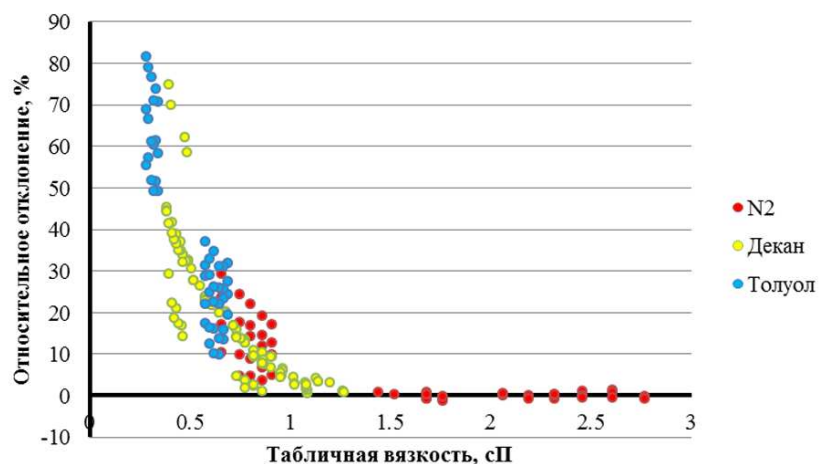


Рис. 2. Величина относительного отклонения расчётной вязкости от её табличного значения

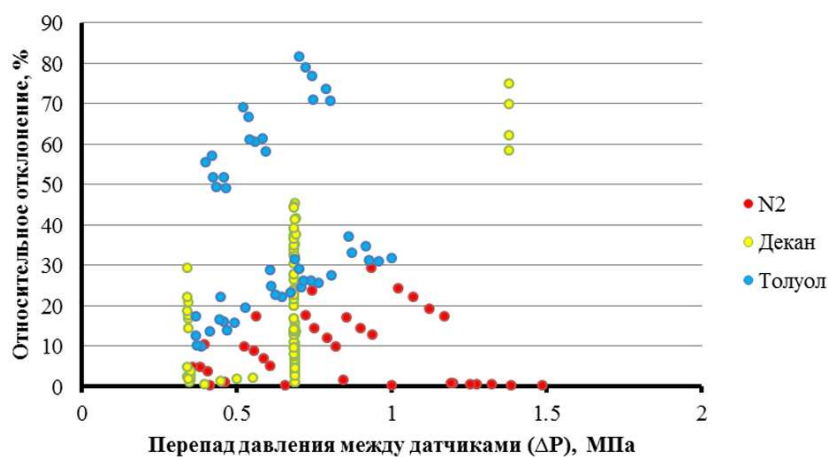


Рис. 3. Величина относительного отклонения расчётной вязкости в зависимости от перепада давления (ΔP) при разных температурах и давлении

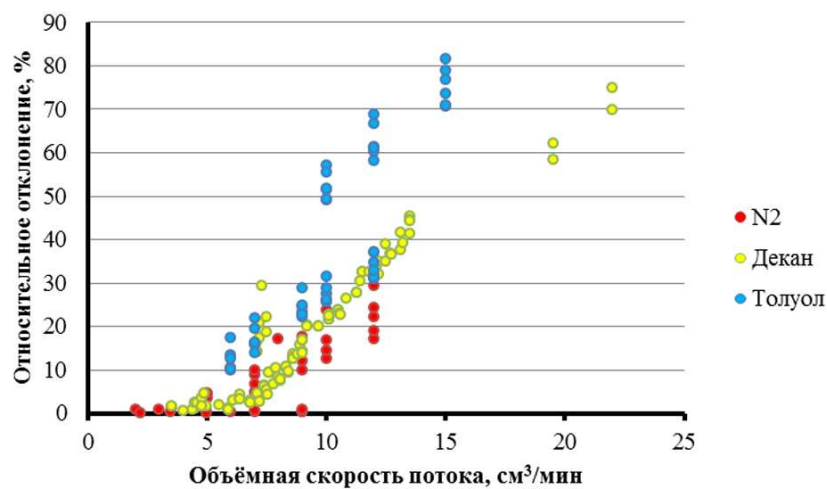


Рис. 4. Величина относительного отклонения вязкости без учёта поправки в зависимости от скорости потока жидкости

На рис. 3 и 4 показана зависимость величины относительного отклонения (2) от ΔP и Q .

В соответствии с руководством по эксплуатации для получения корректного результата, перепад давления между датчиками должен не менее 0.34 МПа. Естественно, для жидкостей с низкой вязкостью при одном и том же ΔP , скорость потока в капилляре будет выше. Из рис. 3 и таблицы видно, что при близких значениях ΔP наибольшее отклонение имеют жидкости с наименьшей вязкостью (толуол и декан). Вероятно, между скоростью течения жидкости и величиной стандартного отклонения существует связь. Действительно, при сопоставлении величины относительного отклонения и скорости потока (рис. 4) наблюдается вполне отчетливый тренд.

Исходя из формулы расчёта (1) видно, что рост μ_p происходит параллельно с ростом ΔP . Известно [1, 3], что при определённых условиях движения жидкости

в капилляре происходит формирование параболического профиля скоростей, изменяется аксиальное и радиальное давление, которое обусловлено ускорением потока жидкости вдоль оси капилляра. В результате этого происходит не только продольное, но и поперечное перемещение жидкости, возникают вихри, ламинарный режим сменяется турбулентным, т.е. не соблюдается основное условие применимости уравнения (1) – наличие ламинарного потока.

Для корректировки расчётной вязкости было рассчитано Число Рейнольдса (Re), так как эта безразмерная величина является основной для определения характера турбулентного течения. Число Рейнольдса рассчитывается по формуле:

$$Re = \frac{2.12206 \cdot Q \cdot \rho}{d \cdot \mu_p} \quad (3)$$

где d – внутренний диаметр капилляра, см;
 ρ – плотность жидкости, г/см³

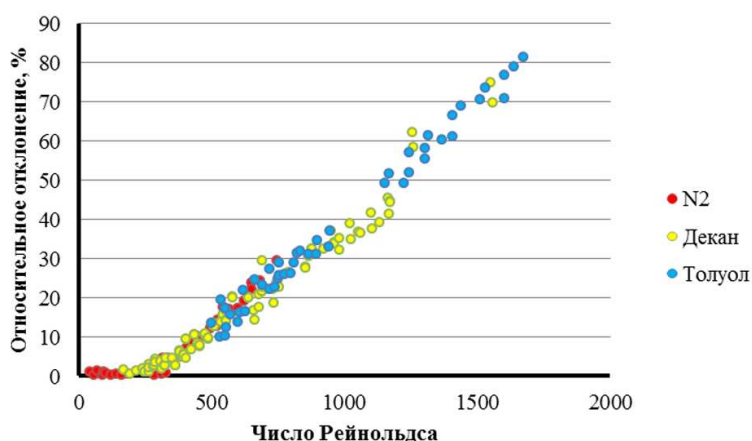


Рис. 5. Величина относительного отклонения расчётной вязкости от числа Re

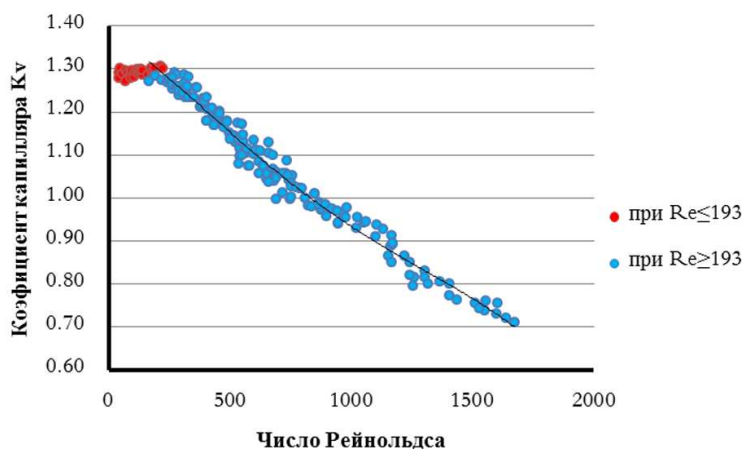


Рис. 6. Зависимость коэффициента капилляра K_v от числа Re

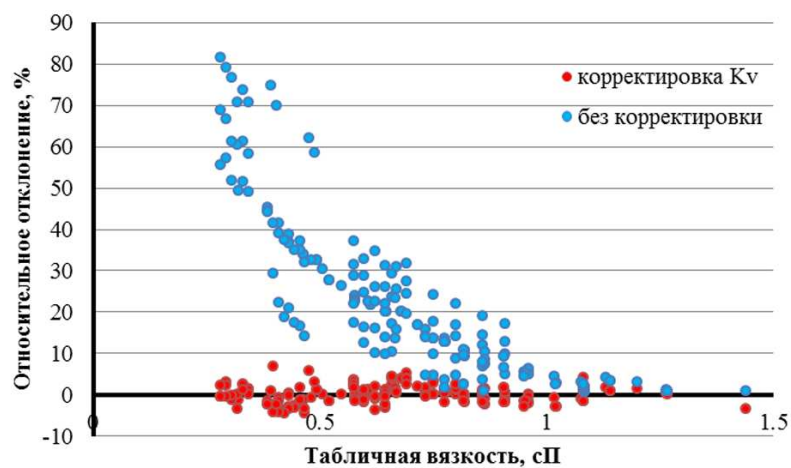


Рис. 7. Величина относительного отклонения расчётной вязкости от табличной при использовании уравнения Хагена-Пуазейля с корректировкой K_v и без

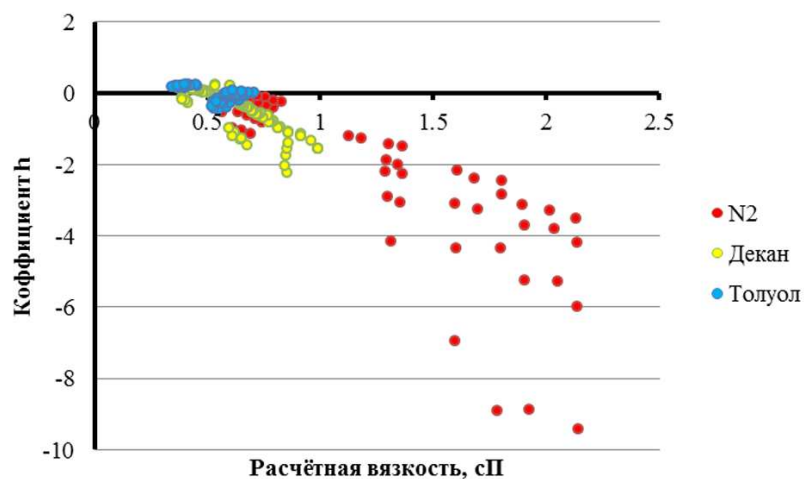


Рис. 8. Величина коэффициента Хагенбаха в зависимости от расчётной вязкости

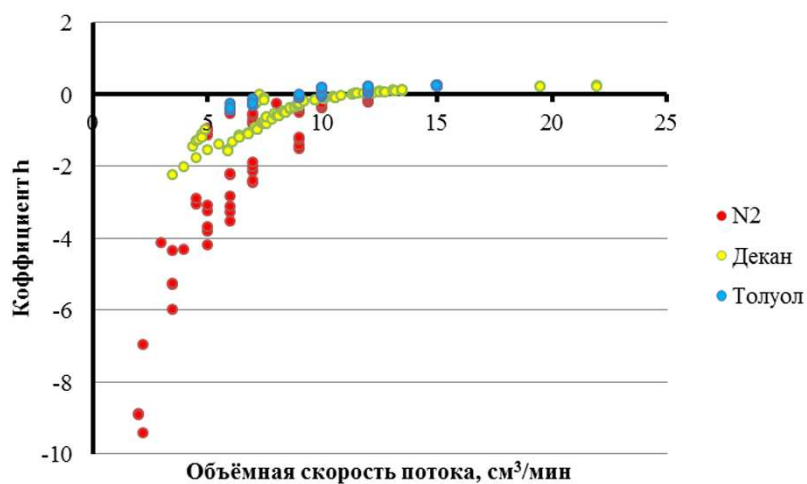


Рис. 9. Величина коэффициента Хагенбаха в зависимости от скорости потока жидкости

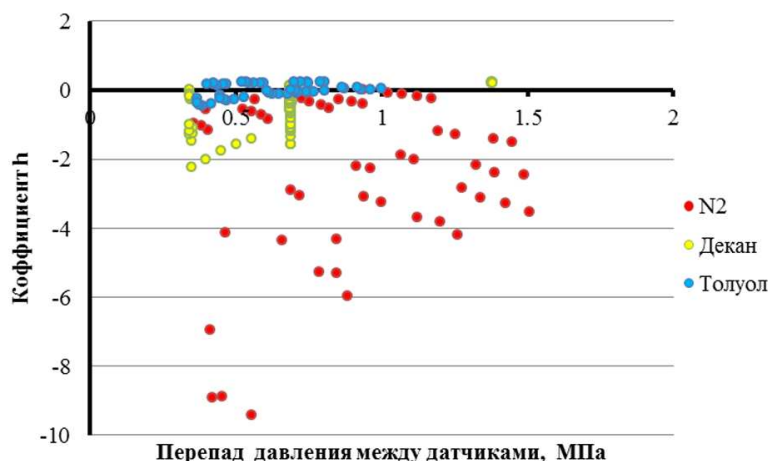


Рис. 10. Величина коэффициента Хагенбаха в зависимости от перепада давления

Оказалось, что между величиной отклонения вязкости и числом Re наблюдается очень хорошая взаимосвязь (рис. 5), которую можно успешно использовать в основе дополнительной корректирующей величины для уравнения Хагена-Пуазейля.

Эксперимент показывает, что на использованном нами вискозиметре отклонение в значениях расчётной вязкости μ_p от табличного значения μ_t появляется при величинах числа Re более 193 (рис. 5) и это значение необходимо принимать как критическое для конкретного вискозиметра. Для учёта характера течения жидкости нами был модифицирован коэффициент вискозиметра (K_v) из постоянной в переменную величину, значение которой зависит от Re . Для нашего вискозиметра, если значение Re меньше 193, то можно использовать постоянное значение $K_v = 1,29$ в уравнении (1), тогда как при Re больше 193, K_v описывается функцией от Re .

Таким образом, конечная формула расчёта вязкости (4) будет иметь тот же вид, что и формула (1), но при достижении числа $Re \geq Re_{крит}$ коэффициент капилляра K_v будет рассчитываться как функция от числа Re .

$$\mu_p = f(Re) \cdot \frac{C \cdot D^4 \cdot \Delta P}{Q \cdot L}, \text{ сП.} \quad (4)$$

Существует другой способ корректировки расчётной вязкости. Очевидно, что при движении жидкости, возникающем вследствие ΔP на входе и выходе капилляра, часть энергии, расходуется не только на преодоление сил трения жидкости, но и на придание ей определённой кинетической энергии. Величина этой энергии будет пропорциональна скорости потока и его массе. С учётом этого обстоятельства в уравнение

Хагена-Пуазейля нужно внести некую поправку на кинетическую энергию, называемую поправкой Хагенбаха [1–3]. Уравнение расчёта вязкости с поправкой Хагенбаха выглядит следующим образом:

$$\mu_t = \mu_p - \frac{h \cdot Q \cdot \rho}{8 \cdot \pi}, \text{ сП} \quad (5)$$

где μ_t – табличная вязкость, сП; μ_p – расчётная вязкость из уравнения (1) (при $K_v = \text{const} = 1,29$), сП; h – коэффициент Хагенбаха; Q – объёмная скорость, $\text{см}^3/\text{мин}$; ρ – плотность жидкости, $\text{г}/\text{см}^3$; π – постоянная, которая равна 3.14159.

Однако использование данной поправки в таком виде затруднено тем, что в расчёте отсутствует параметр относительно, которого можно определить значение коэффициента Хагенбаха (h) для какой-то жидкости с неизвестной вязкостью. При построении зависимости h от любого известного в расчёте параметра (μ_p , Q , ΔP) наблюдается большой разброс значений (рис. 8–10).

В работе [3] приведены данные о расчётных и экспериментальных значениях h для разных веществ, которые получали в своих исследованиях Шиллер, Голдстейн, Шмидт, Зелдин, Руска, Врентас и др. В работах этих авторов величина h варьирует от 0,1 до 1,5, при этом предпочтение отдается значениям, полученным экспериментальным путём.

Расчёт вязкости по уравнению (1) с корректировкой K_v по числу Re показал хорошую сходимость между табличной и расчётной вязкостью, однако такой способ подразумевает разделение расчёта на две части. Поэтому более удобным является расчёт вязкости по уравнению (5) с определением значения h через зависимость от числа Re . Используя правую часть урав-

нения (5), находим значение коэффициента h при необходимой поправке вязкости и построим его зависимость от $\ln(Re)$, т.е. $h = f(\ln Re)$ (рис. 11). Конечная формула расчёта будет иметь вид:

$$\mu_T = \mu_p - \frac{f(\ln Re) \cdot Q \cdot \rho}{8 \cdot \pi}, \text{ сП.} \quad (6)$$

В обоих способах, т.е. «двухэтапном» по уравнению (1) и уравнению (6), для корректировки используется число Re , поэтому величины отклонения практически совпадают (рис. 12). Однако, используя для расчёта уравнение (6), не нужно определять зоны постоянного и меняющегося коэффициента капилляра K_v .

Расчёт вязкости в области турбулентного течения с корректировкой через число Re позволяет на порядок снизить величину от-

носительного отклонения – с 80 до 7% от истинного значения, что будет составлять всего лишь 0,03–0,05 сП в диапазоне от 0,3 до 1,5 сП. В зоне же ламинарного течения отклонение не превышает 2,5%.

Выводы

Для повышения точности измерений на капиллярном вискозиметре в широком диапазоне значений необходимо:

1. Провести тщательную калибровку вискозиметра с использованием индивидуальных веществ и определить K_v . Для калибровки следует использовать индивидуальные вещества высокой чистоты, для которых известна табличная плотность и вязкость при разных значениях температуры и давления.

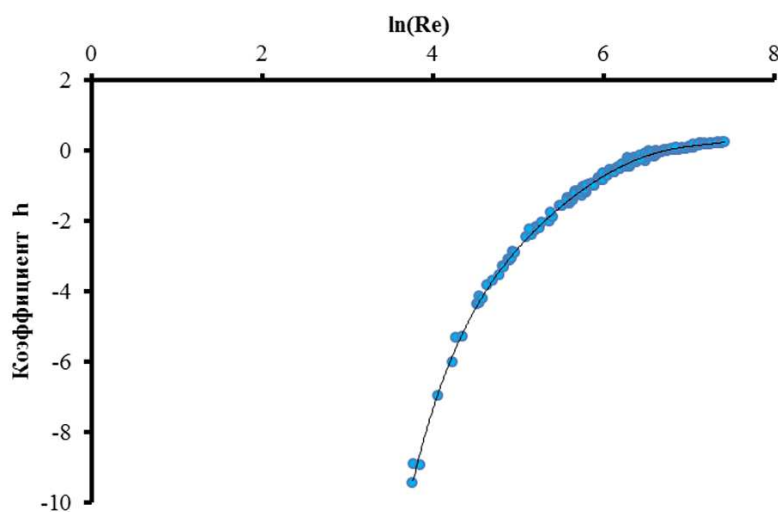


Рис. 11. Зависимость коэффициента h от $\ln(Re)$



Рис. 12. Величина относительного отклонения расчётной вязкости от её табличного значения при корректировке коэффициента K_v и поправки Хагенбаха по числу Re

2. Определить значение числа Рейнольдса, соответствующее началу зоны турбулентного течения жидкости.

3. Точность измерения вязкости во многом зависит от качества полученных данных при калибровке, поэтому независимо от выбора уравнения расчёта (1) или (6), в зоне ламинарного потока до достижения критического числа Re лучше использовать постоянный коэффициент K_v .

4. Использование переменной поправки в области турбулентного течения жидкости позволяет существенно повысить точность измерений, однако при этом величина относительного отклонения будет несколько выше, чем в области ламинарного течения. Это обстоятельство необхо-

димо учитывать при выдаче результатов PVT – исследований.

Список литературы

1. Tanner R.I. «A new kinetic energy correction for capillary tube viscometers». – Australian Journal of Physics, 1965. – № 18. – P. 381–383.
2. Satish G. Kandlikar, Levi A. Campbell. «Effect of entrance condition on frictional losses and transition to turbulence». – ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition. November 17–22, 2002, New Orleans, Louisiana.
3. Лапардин Н.И. «Исследование вязкости фреонов – 152А и 218», диссертация на соискание учёной степени к.т.н., Одесский Технологический Институт Пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова, 1983 г.
4. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.
5. РМГ 61-2010 ГСИ. Показатели точности, правильности, прецизионности методик количественного химического анализа. Методы оценки.