ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 532.13

РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ ЭКОНОМИЧНОГО МИКРОФЛЮИДНОГО РЕОМЕТРА ДЛЯ АНАЛИЗА РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НЕФТЕПРОМЫСЛОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ

©2027 г. М. И. Пряжников*, В. Ф. Муратов, А. И. Пряжников, А. С. Якимов, Е. Н. Волченко, Х. Бен Ахмед, А. В. Минаков

Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

**E-mail: arrivent@yandex.ru*

Поступила в редакцию 15.08.2026

После доработки 16.09.2026

Принята к публикации 02.11.2026

Представлена разработка и экспериментальная валидация микрофлюидного реометра, изготовленного по недорогой технологии фрезерования полимерного чипа. Актуальность исследования обусловлена потребностью нефтегазовой отрасли в доступных инструментах для экспресс-анализа реологических свойств пластовых жидкостей, в том числе неньютоновских. Предложенный метод измерения основан на регистрации перепада давления в прямоугольном микроканале известной геометрии при ламинарном течении. Валидация выполнена на трех эталонных (вода и водные растворы глицерина) и шести нефтепромысловых (эмульсия, газоконденсат, три образца нефти) жидкостях, в том числе на 0.1-процентном водном растворе полиакриламида с добавлением 5 масс. % NaCl. Показано, что средняя погрешность определения коэффициента вязкости микрофлюидным методом для всех образцов ньютоновских флюидов не превысила 5%. Для неньютоновского раствора полиакриламида определенные с помощью микрореометра реологические параметры степенной модели согласуются с параметрами, определенными классическим реометром, с погрешностью менее 8%.

Ключевые слова: микрофлюидика, реометр, перепад давления, вязкость, неньютоновские жидкости, нефтепромысловые флюиды, полиакриламид.

1. ВВЕДЕНИЕ

Свойства нефтепромысловых жидкостей, такие как вязкость, предел текучести, а также статическое напряжение сдвига, являются фундаментальными реологическими параметрами, определяющими эффективность и безопасность технологических процессов при бурении скважин

и различных методах увеличения нефтеотдачи (МУН) [1, 2]. В современной отрасли приходится работать с широким спектром сложных неньютоновских сред, включая буровые растворы, пластовые воды, стабильные многофазные эмульсии и полимерные составы для заводнения. Реологические свойства таких систем зачастую носят нелинейный характер и критически зависят от внешних условий, например температуры, давления и времени [3, 4]. Это создает потребность в методах анализа, способных обеспечить достоверные измерения в условиях, приближенных к пластовым.

Традиционные методы для реологического анализа основаны на использовании макроскопических, как правило, ротационных реометров (например, моделей Fann 35A или OFITE900). Однако их применение сопряжено с рядом принципиальных ограничений, снижающих общую эффективность контроля технологических процессов. Прежде всего это существенная задержка, вызванная необходимостью транспортировки проб в лабораторию, их подготовки и проведения серийных измерений, которая может составлять часы и даже сутки [5]. За этот период реологические характеристики флюидов могут претерпеть значительные изменения. Буровые растворы подвержены процессам старения и термической деструкции полимерных реагентов [6], а эмульсии теряют стабильность вследствие коалесценции и изменения структуры [7]. Эти факторы делают полученные данные нерепрезентативными для оперативного управления технологическими процессами, особенно в критических задачах контроля забойного давления [6].

К другим существенным недостаткам макроскопических методов можно отнести следующие. Значительный объем образцов (до сотни миллилитров) затрудняет работу с дорогостоящими или труднодоступными пробами из глубоких скважин [8]. Громоздкость оборудования делает его непригодным для мобильного использования на буровой площадке [8]. Диапазон высоких скоростей сдвига ограничен проблемами устойчивости течения в измерительном зазоре [8, 9]. Кроме того, наблюдается несоответствие лабораторно измеренной макроскопической вязкости реальному поведению жидкости в микроскопическом поровом пространстве пласта или в узких трещинах [10]. Для исследования подобных процессов на микроуровне необходимы принципиально иные подходы, основанные на моделировании с использованием микрофлюидных технологий [8, 11].

В связи с указанными ограничениями существует потребность в создании нового класса аналитических инструментов, способных обеспечить оперативное получение достоверных данных практически в режиме реального времени при минимальных объемах пробы, обладающих компактностью для работы “на месте” и охватывающих широкий диапазон скоростей сдвига, соответствующий реальным условиям [11, 12].

Перспективным решением, устраняющим указанные пробелы, является микрофлюидная реометрия. Эта область науки и технологий, ориентированная на контроль микроскопических объемов жидкостей в каналах размером от десятков до сотен микрометров, открывает уникальные возможности для анализа [11]. Ее ключевые преимущества заключаются в следующем. Применение микрофлюидных технологий позволяет достигать экстремально высоких скоростей сдвига (более 10^6 $с^{-1}$) за счет микроскопических размеров каналов. В микроканалах при типичных объемных расходах жидкости преобладает строго ламинарный характер течения, что упрощает гидродинамический расчет. Для анализа требуется значительно меньший объем образца (микролитры) [10, 13]. Существует возможность создания компактных энергоэффективных портативных устройств, пригодных как для лаборатории, так и для полевых условий. Особый интерес представляет потенциал интеграции различных функциональных модулей в рамках “лаборатории на чипе” для комплексного анализа [8, 10].

Одним из наиболее надежных и физически обоснованных методов измерения вязкости в микрофлюидике является метод, основанный на зависимости перепада давления от расхода жидкости в канале известной геометрии, который отличается простотой реализации [14]. Данный подход базируется на законе Хагена–Пуазейля, описывающем ламинарное течение вязкой жидкости [15]. Его ключевые достоинства состоят в отсутствии сложных движущихся частей, возможности интеграции MEMS-датчиков давления непосредственно в чип и широком диапазоне определяемых скоростей сдвига [8]. Теоретический аппарат метода хорошо разработан для каналов различной геометрии (круглых, прямоугольных, с сужениями) как для ньютоновских, так и для неньютоновских жидкостей, описываемых, например, степенной моделью [15, 16]. Это делает его исключительно перспективным для анализа широкого спектра нефтепромысловых флюидов. Так, свойства буровых растворов (пластическая вязкость, предельное напряжение сдвига) критичны для транспортировки шлама и контроля давления [17] и сильно зависят от температуры и давления [18]. Пластовые воды влияют на стабильность буровых систем и используются в технологиях “умного” заводнения [19]. Многофазные эмульсии создают проблемы при транспортировке и переработке [7, 20].

Число исследований по микрофлюидной реометрии постоянно растет. Среди них есть работы с коммерческими системами (типа VROC) [8], портативные решения на смартфонах [14] и микрофлюидные модели пласта для изучения МУН [11, 12]. Тем не менее систематических работ, в которых бы проводилось прямое количественное сравнение данных микрофлюидных и стандартных ротационных методов для реальных нефтепромысловых жидкостей, по-прежнему не хватает. В этой связи критически важными задачами становятся проверка точности

микрофлюидного метода применительно к сложным неньютоновским системам, таким как полимерные растворы для МУН [2, 10], и изучение течения жидкостей в условиях, приближенных к пластовым [19].

Выбор метода изготовления микрофлюидного чипа напрямую определяет как точность измерений, так и доступность технологии для конечного исследователя [21]. На сегодняшний день сложилось несколько основных подходов к созданию топологии микрофлюидных реометров. В лабораторной практике широко распространена мягкая литография с использованием полидиметилсилоксана (ПДМС), требующая, однако, создания мастер-формы (часто методом фотолитографии) [21, 22]. Перспективной альтернативой, снижающей стоимость, является прямое фрезерование полимерных заготовок (например, оргстекла), что значительно упрощает технологический цикл и снижает материалоемкость производства [21, 23]. Промежуточное положение занимают методы горячего тиснения и литья под давлением, однако они требуют дорогостоящей оснастки на начальном этапе [21, 24, 25].

Сопоставление перечисленных подходов с точки зрения экономической эффективности показывает, что литография, обеспечивая высокое разрешение, влечет за собой существенные капитальные затраты, тогда как фрезерование выступает в роли доступной дешевой альтернативы. Это особенно важно в контексте задач, сформулированных выше. Для масштабирования применения микрофлюидных реометров в инженерной практике необходимы недорогие и воспроизводимые в лабораторных условиях чипы [21, 23].

В настоящей работе представлены результаты разработки и экспериментальной апробации микрофлюидного реометра, изготовленного с помощью метода прямого фрезерования. Данный подход позволяет не только минимизировать себестоимость устройства, но и оперативно вносить изменения в геометрию каналов без сложной технологической переналадки. В работе показаны результаты изготовления чипа с помощью этой доступной технологии, а также экспериментальные данные, демонстрирующие его применимость для анализа реологических свойств разнообразных нефтепромысловых жидкостей на основе измерения перепада давления в прямоугольном канале.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Микрофлюидная реометрия, основанная на измерении перепада давления при течении жидкости через каналы микронных размеров, представляет собой метод определения реологических характеристик жидкостей в условиях, приближенных к реальным технологическим процессам. Течение жидкости в микрофлюидных устройствах, как правило, является ламинарным

ввиду малых характерных размеров и умеренных скоростей, что существенно упрощает гидродинамический анализ. Основная идея метода заключается в установлении количественной связи между измеряемым перепадом давления ΔP, объемным расходом Q и реологическими свойствами жидкости через решение уравнений движения для конкретной геометрии канала.

Для микрофлюидных приложений наиболее удобны прямоугольные каналы, изготавливаемые методами фотолитографии и травления. Рассмотрим канал шириной w, высотой h (где обычно $h<w$) и длиной L. Точное решение уравнений Навье–Стокса для такой геометрии сложнее, чем для круглой, оно выражается в виде бесконечного ряда. Однако для практических расчетов могут быть использованы упрощенные подходы.

2.1. Течение ньютоновской жидкости в прямоугольном канале

В случае, когда высота канала много меньше его ширины ($h \ll w$), течение можно приближенно считать плоским, т. е& двумерным в плоскости xz, где ось x направлена вдоль канала, а z – перпендикулярно плоскости чипа (по высоте). В этом приближении влияние боковых стенок пренебрежимо мало и задача сводится к течению между двумя бесконечными параллельными пластинами. Профиль скорости является параболическим по координате z:

$$v_x(z) = \frac{\Delta P_{\text{чип}}}{2\mu L}\left(\frac{h^2}{4} - z^2\right), \tag{1}$$

где начало координат $z = 0$ находится на середине высоты канала. Расход на единицу ширины канала q находится интегрированием:

$$q = \int_{-h/2}^{h/2} v_x(z)\,dz = \frac{h^3}{12\mu}\frac{\Delta P_{\text{чип}}}{L}. \tag{2}$$

Полный расход через канал шириной w равен $Q = w \cdot q$, откуда получается простое соотношение:

$$\Delta P_{\text{чип}} = \frac{12\mu L}{w h^3} Q. \tag{3}$$

Это выражение является аналогом закона Хагена–Пуазейля для плоской щели.

Для каналов с конечным и не слишком малым отношением h/w необходимо учитывать тормозящее влияние боковых стенок. Точное выражение для расхода имеет вид [15]

$$Q = \frac{w h^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \cdot \left[1 - \frac{192h}{\pi^5 w} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{\operatorname{tn}\left(\frac{n\pi w}{2h}\right)}{n^5}\right]. \tag{4}$$

Ряд в скобках быстро сходится, и на практике часто ограничиваются первым членом. Этот поправочный множитель уменьшает расход по сравнению с приближением бесконечно широкого

канала. Введем геометрический поправочный коэффициент $f(\alpha)$, зависящий только от соотношения сторон:

$$f(\alpha) = 1 - \frac{192h}{\pi^5 w} \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{\operatorname{tn}\left(\frac{n\pi w}{2h}\right)}{n^5} \tag{5}$$

Тогда выражение (4) переписывается в компактной форме:

$$Q = \frac{wh^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{L} f(\alpha). \tag{6}$$

Для нашего микроканала h = 139 мкм, w = 2069 мкм, $\alpha = h/w \approx 0.0672$. Подставляя геометрические размеры в формулу (5) и ограничиваясь суммой первых пяти членов ряда, получаем $f(\alpha) \approx 0.958$. Таким образом, поправка на боковые стенки для нашей геометрии составляет около 4.2%, что необходимо учитывать для обеспечения точности измерений.

Напряжение сдвига на стенке для прямоугольного канала в приближении плоской щели (справедливом при $h/w < 0.1$) определяется из баланса сил:

$$\tau_w = \frac{h}{2} \frac{\Delta P_{\text{чип}}}{L}. \tag{7}$$

Скорость сдвига на стенке для ньютоновской жидкости в прямоугольном канале вычисляется по формуле, следующей из определения расхода через параболический профиль:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{wh^2} \frac{1}{f(\alpha)}. \tag{8}$$

Множитель $1/f(\alpha)$ учитывает увеличение градиента скорости у стенки вследствие торможения потока у боковых стенок прямоугольного канала. Если использовать некорректированную скорость, это приводит к занижению истинной вязкости примерно на 4.2%.

Соотношение (8) обеспечивает выполнение ньютоновского закона

$$\tau_w = \mu \dot{\gamma}_w \tag{9}$$

Таким образом, динамическая вязкость определяется следующим образом:

$$\mu = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} = \frac{h}{2} \frac{\Delta P_{\text{чип}}}{L} \frac{wh^2 f(\alpha)}{16Q}. \tag{10}$$

Измеряемый датчиком давления перепад $\Delta P_{\text{изм}}$ включает потери давления не только на микроканале, но и на подводящих линиях. В данной работе система состоит из двух трубок внутренним диаметром 1/32″ длиной 15 см каждая и двух игл 20G длиной 1.27 см каждая. Для определения перепада давления непосредственно на микроканале вводится поправочный коэффициент β, равный отношению гидравлического сопротивления чипа к полному сопротивлению системы:

$$\beta = \frac{R_{\text{чип}}}{R_{\text{чип}} + 2R_{\text{трубка}} + 2R_{\text{игла}}}. \quad (11)$$

Гидравлическое сопротивление подводящих элементов рассчитывается по закону Хагена–Пуазейля:

для круглых трубок

$$R = \frac{8\mu L}{\pi R^4}, \quad (12)$$

для прямоугольного канала

$$R = \frac{12\mu L}{wh^3}. \quad (13)$$

Для воды при температуре 25 °C получены следующие значения сопротивлений: для чипа R = 0.01338 мбар/(мкл/мин), трубки (2 шт.) R = 0.004568 мбар/(мкл/мин), иглы (2 шт.) R = 0.001160 мбар/(мкл/мин). Таким образом, поправочный коэффициент β составляет 0.700. Это значит, что доля чипа в общем гидравлическом сопротивлении системы равна 70%. Перепад давления на микроканале определяется формулой

$$\Delta P_{\text{чип}} = \beta \Delta P_{\text{изм}}. \quad (14)$$

Тогда вязкость с учетом формул (10) и (14) может быть выражена следующим образом:

$$\mu = \frac{\Delta P_{\text{изм}} f(\alpha) \beta w h^3}{12QL}. \quad (15)$$

2.2. Течение неньютоновской жидкости в прямоугольном канале

Для описания псевдопластичных жидкостей, таких как растворы полиакриламида, широко используется степенная модель [15]:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad (16)$$

где K [Па·с^n] – индекс консистенции, n – индекс течения (безразмерный, $n < 1$).

Для неньютоновских жидкостей профиль скорости в канале не является параболическим и связь между перепадом давления и расходом становится нелинейной. Для прямоугольного канала с поправкой на боковые стенки $f(\alpha)$ и в приближении плоской щели (с последующей коррекцией) выражение для перепада давления имеет вид

$$\Delta P_{\text{изм}} = \frac{1}{\beta}\frac{2KL}{h}\left(\frac{2(2n+1)Q}{nwh^2 f(\alpha)}\right)^n. \quad (17)$$

Это выражение является обобщением формулы (9) для степенной жидкости. При $n = 1$ и $K = \mu$ оно переходит в ньютоновское соотношение (9) с точностью до множителя $f(\alpha)$.

Для определения реологических параметров модели уравнение (18) линеаризуется логарифмированием:

$$\ln \Delta P_{\text{изм}} = n \ln Q + C, \quad (18)$$

где

$$C = \frac{2KL}{h}\left(\frac{2(2n+1)}{nwh^2 f(\alpha)}\right)^n. \quad (19)$$

Методом наименьших квадратов (МНК) определяются наклон n (индекс течения) и точка пересечения кривой $\ln C$ с осью ординат.

Затем индекс консистенции K вычисляется из формулы (20):

$$K = C\frac{h}{2L}\left(\frac{2(2n+1)}{nwh^2 f(\alpha)}\right)^{-n}. \quad (20)$$

Важной особенностью обработки данных для неньютоновских жидкостей является различие между кажущейся и истинной скоростями сдвига на стенке:

$$\dot{\gamma}_{\text{каж}} = \frac{6Q}{wh^2}\frac{1}{f(\alpha)}. \quad (21)$$

Для ньютоновской жидкости $\dot{\gamma}_{ист} = \dot{\gamma}_{каж}$. Для степенной жидкости профиль скорости непараболический и истинная скорость на стенке выше кажущейся. Поправка Рабиновича–Вайссенберга для плоского канала устанавливает связь этих двух величин [15]:

$$\dot{\gamma}_{\text{ист}} = \frac{2n+1}{3n}\dot{\gamma}_{\text{каж}}. \quad (22)$$

Кажущаяся скорость сдвига (для плоской щели с поправкой на геометрию) определяется формулой

$$\dot{\gamma}_{\text{ист}} = \frac{2n+1}{3n}\frac{6Q}{wh^2}\frac{1}{f(\alpha)}. \quad (23)$$

Таким образом, истинная скорость сдвига на стенке для степенной жидкости оказывается выше кажущейся в $(2n+1)/(3n)$ раз. Для псевдопластичных жидкостей $(n<1)$ этот множитель больше единицы. Игнорирование этой поправки приводит к систематической ошибке в определении как n, так и K.

2.3. Алгоритм обработки данных для неньютоновских жидкостей

1. По экспериментальным точкам (Q_i , ΔP_i) строится график в координатах натурального логарифма.
2. Методом наименьших квадратов определяются n (по наклону) и $\ln C$ (место пересечения с осью ординат).
3. По формуле (20) вычисляется индекс консистенции K.
4. Для каждой точки по формуле (23) рассчитывается истинная скорость сдвига $\dot{\gamma}_w$ с использованием найденного значения n.
5. Строятся реологические кривые $\tau_w(\dot{\gamma}_{ист})$ и $\mu_{эфф}(\dot{\gamma}_{ист}) = \tau_w/\dot{\gamma}_{ист}$.
6. Полученные параметры n и K, а также зависимости $\tau_w(\dot{\gamma}_{ист})$ и $\mu_{эфф}(\dot{\gamma}_{ист})$ сравниваются с данными ротационного реометра.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальная часть исследования была посвящена созданию и тестированию разработанного микрореометра и определению реологических характеристик ньютоновских жидкостей с использованием метода микрофлюидной реометрии на основе измерения перепада давления.

В качестве тестовых жидкостей использовались дистиллированная вода и два водно-глицериновых раствора, условно обозначенные как 20сР и 50сР. Плотность жидкостей была измерена пикнометрическим методом, для воды она составляет 997 кг/м^3, для раствора 20сР – 1182 кг/м^3, для раствора 50сР – 1208 кг/м^3. Точные значения динамической вязкости этих эталонных жидкостей при температуре 25 °C были определены на сертифицированном ротационном реометре Anton Paar MCR 302e, они были следующими: для воды – 0.891 мПа·с, для раствора 20сР – 20.3 мПа·с, для раствора 50сР – 50.9 мПа·с.

В качестве нефтепромысловых жидкостей на основании измерения образцов на классическом ротационном реометре были выбраны образцы нефтяных систем, которые демонстрируют ньютоновское поведение в исследуемом диапазоне. В исследовании были задействованы нефть марки K (условное обозначение), нефть марки I, нефть марки V, газоконденсат G и эмульсионная система (вода–нефть) E

Помимо ньютоновских жидкостей, был исследован 0.1-процентный (масс.) раствор полиакриламида с добавлением 5 масс. % NaCl. Раствор готовился следующим образом. Сначала полимер диспергировался в объеме (10% от общего) дистиллированной воды при постоянном перемешивании в течение 1 ч, затем оставлялся для гидратации на 24 ч. Отдельно в оставшейся воде (90%) растворялся NaCl в количестве, необходимом для получения 5 масс. % конечной солености в исходном растворе. После этого в гидратированную полимерную пасту постепенно добавлялся рассол при медленном перемешивании. Наконец, раствор оставлялся для стабилизации еще на 24 ч для обеспечения полной гомогенизацию. Данный раствор является классическим примером псевдопластичной (сдвигоразжижающейся) неньютоновской жидкости. Течение таких жидкостей в микрофлюидном канале не подчиняется линейному закону $\Delta P(Q)$.

С помощью оригинальной технологии был изготовлен микрофлюидный чип с каналом прямоугольной формы из эпоксидной смолы. Изготовление чипа проводилось методом фрезерования фрезой 200 мкм. Выборка материала фрезой осуществлялась не из каналов чипа, а вокруг них. Таким образом, полученный фрезерованием оттиск из ПДМС являлся позитивным. Для получения негативного оттиска позитивная мастер-форма из ПДМС силанизировалась. Затем эта форма заливалась ПДМС После полимеризации со стороны позитивной формы из ПДМС

делались надрезы, достаточные для извлечения оттисков, так чтобы на их месте образовались углубления, на дне которых остался бы негативный оттиск (рис. 1). Таким способом из позитивной мастер-формы из ПДМС была получена негативная, пригодная для отливки чипов из эпоксидной смолы.

Рис. 1. Изготовление мастер-формы из ПДМС

Экспериментальная установка по измерению параметров течения состояла из одноканального шприцевого насоса SPLab-01, датчиков давления (Elveflow) с максимальным диапазоном измерения до 2 и 7 бар, многоканального аналого-цифрового модуля сбора данных и микрофлюидного реометра (рис. 2а). Погрешность датчиков давления составляла ±0.2% от полного диапазона. Погрешность задания расхода с помощью шприцевого насоса составляла ±0.5%. Все эксперименты проводились при постоянной температуре 25.0 °C. Для контроля температуры использовался термостабилизатор на элементах Пельтье TCU (Dolomite).

Рис. 2. Экспериментальная установка (**а**) и микрофлюидный реометр с заполненным нефтью каналом (**б**)…

С помощью оптического микроскопа проведены финальные измерения геометрии изготовленного микроканала (рис. 2б). Ширина канала, измеренная с помощью оптического микроскопа, составила 2069 мкм, глубина 139 мкм, длина 40 мм. В гидравлическое сопротивление вносят вклад подводящие и отводящие трубки, а также иглы 20G, соединяющие трубки и микрофлюидный чип. Диаметр и длина трубки составляли 1/32″ и 15 см, а иглы 20G – 0.60 мм и 1.27 см соответственно.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Результаты исследования вязкости эталонных жидкостей

Вначале проведены измерения зависимости перепада давления при течении в прямоугольном микроканале от расхода для эталонных жидкостей. Расход жидкости варьировался от 250 до 4000 мкл/мин. Это соответствовало значениям числа Рейнольдса (для воды) в диапазоне от 4 до 68, что подтверждает ламинарный режим течения во всех экспериментах. На рис. 3а представлены полученные экспериментальные данные. Наблюдаемые линейные зависимости (коэффициент достоверности линейной аппроксимации $R^2 = 0.9999$), проходящие через начало координат, подтверждают ньютоновский характер течения жидкостей.

Рис. 3. Зависимости перепада давления от расхода (**а**) и напряжения сдвига от скорости сдвига (**б**) для эталонных жидкостей…

Для расчета реологических параметров использовались формулы, приведенные в разд. 2. Используя приведенные там выражения для каждой из эталонных жидкостей, мы построили зависимость напряжений от скорости сдвига (рис. 3б). Как видно, эти зависимости также линейны (R^2 = 0.9999), что подтверждает ньютоновский характер течения жидкостей.

Результаты расчетов и их сопоставление с эталонными значениями представлены в табл. 1. Как следует из таблицы, различие в значениях коэффициента вязкости, измеренных микрофлюидным и традиционным методами, не превышает 4%, что сопоставимо с погрешностью измерения коэффициента вязкости ротационными вискозиметрами.

Таблица 1. Вязкость для эталонных жидкостей

Образец	Динамическая вязкость, мПа·с		Абсолютное отклонение, мПа·с	Относительное отклонение
	Ротационная реометрия	Микрофлюидный чип		
Вода	0.891	0.994	0.103	11.6%
Раствор 20сР	20.3	20.4	0.10	–0.49%
Раствор 50сР	50.9	50.0	–0.9	–1.8%

Таким образом, разработанный микрофлюидный метод демонстрирует удовлетворительную сходимость с эталонными значениями для ньютоновских жидкостей. Среднее относительное отклонение по трем эталонным образцам составило 4.6%, при этом для глицериновых растворов погрешность не превышает 1.8%, что подтверждает корректность методики. Максимальное отклонение наблюдалось для воды (11.6%), оно было связано с погрешностью датчика давления (±4 мбар). Полученные результаты подтверждают применимость разработанного микрореометра для анализа ньютоновских жидкостей и позволяют перейти к исследованию более сложных нефтепромысловых сред.

4.2. Результаты исследования вязкости нефтепромысловых жидкостей

Далее аналогичные эксперименты были проведены для пяти нефтепромысловых жидкостей. Экспериментальные данные представлены на рис. 4 в виде зависимости перепада давления ΔP от объемного расхода Q, а также напряжений сдвига τ_w от его скорости $\dot{\gamma}_w$.

Рис. 4. Зависимости перепада давления от расхода (**а**) и напряжения сдвига от скорости сдвига (**б**) для нефтепромысловых жидкостей

Как и в случае эталонных жидкостей, полученные зависимости оказались линейными во всем исследованном диапазоне расходов. Коэффициент детерминации линейной аппроксимации

составил $R^2 = 0.9997$, что подтверждает ньютоновское поведение всех исследованных нефтепромысловых образцов в условиях микрофлюидного течения.

Обработка экспериментальных данных проводилась по формулам (7), (8) и (15) с использованием тех же геометрических параметров канала, что и для эталонных жидкостей.

Сопоставление измеренных значений коэффициента вязкости для рассматриваемых жидкостей традиционным и микрофлюидным методами приведено в табл. 2.

Таблица 2. Вязкость нефтепромысловых жидкостей

Образец нефти	Динамическая вязкость, мПа·с		Абсолютное отклонение, мПа·с	Относительное отклонение
	Ротационный реометр	Микрофлюидный чип		
Эмульсия E	1.14	1.25	0.11	9.6%
Газоконденсат G	2.76	2.91	0.15	5.4%
Нефть K	4.99	4.87	–0.12	–2.4%
Нефть I	48.2	49.1	0.90	1.9%
Нефть V	75.3	76.9	1.60	2.1%

По сравнению с эталонными жидкостями, отклонения для нефтепромысловых образцов оказались несколько выше. При этом какой-либо заметной корреляции между величиной отклонения и абсолютным значением вязкости не прослеживается. Максимальное отклонение зафиксировано для эмульсии (9.6%). Значение вязкости эмульсии близко к значению вязкости воды, для которой значительный вклад в погрешность вносит погрешность датчика давления. Вместе с тем, для трех образцов нефти отклонение не превышает 2.4%, что сопоставимо с точностью для эталонных жидкостей. Таким образом, разработанный микрофлюидный реометр обеспечивает приемлемую точность для анализа широкого спектра нефтепромысловых жидкостей с ньютоновским поведением, а наблюдаемые отклонения находятся в пределах допустимого.

4.3. Результаты экспериментального исследования неньютоновской жидкости

Далее был рассмотрен водный 0.1-процентный (масс.) раствор полиакриламида с добавлением 5 масс. % NaCl, который относится к классу псевдопластичных жидкостей. Их характерной особенностью является монотонное снижение эффективной вязкости с ростом скорости сдвига, что обусловлено ориентацией и деформацией макромолекул в потоке. Расход жидкости варьировался от 100 до 4000 мкл/мин. Для раствора полиакриламида обобщенное число Рейнольдса Re не превышало 28.4 при максимальном расходе.

Для обработки экспериментальных данных использовалась степенная модель (16), а связь между перепадом давления и расходом описывалась уравнением (17). Параметры n и K определялись методом наименьших квадратов по линеаризованной зависимости (18).

Полученные экспериментальные данные по перепаду давления при течении полиакриламидного раствора представлены на рис. 5.

Рис. 5. Зависимость перепада давления в чипе от расхода при течении полиакриламидного раствора…

Построив зависимости в координатах ln (ΔP) от ln Q и выполнив линейную регрессию по формуле (18), мы определили параметры n (наклон) и ln C (свободный член). Затем по формуле (20) мы вычислили индекс консистенции K. Полученные данные были сопоставлены с данными ротационного реометра Anton Paar MCR 302e (см. табл. 3).

Таблица 3. Реологические параметры степенной модели полиакриламидного раствора

Образец	Микрофлюидный реометр		Ротационный реометр		Относительное отклонение	
	N	K, мПа·с^n	n	K, мПа·с^n	n	K
0.1%ПАА	0.933	4.51	0.910	4.89	2.5%	7.9%

На рис. 6 представлены зависимости эффективной вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для раствора полиакриламида, полученные микрофлюидным методом и на ротационном реометре. Наблюдается классическое псевдопластичное поведение, при котором происходит монотонное снижение эффективной вязкости с ростом скорости сдвига.

Рис. 6. Зависимости эффективной вязкости (**а**) и напряжения сдвига (**б**) от скорости сдвига для раствора полиакриламида.

Как следует из табл. 3, параметры степенной модели, определенные по микрофлюидным данным, демонстрируют хорошее количественное согласие с данными ротационного реометра. Отклонение для индекса течения n не превышает 2.5%, а для индекса консистенции K – 7.8%. Данные микрофлюидного реометра ложатся на кривую течения в пределах погрешности измерений, что подтверждает корректность разработанной методики и для неньютоновских жидкостей.

Анализ результатов, представленных на рис. 6, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, микрофлюидный метод корректно воспроизводит характер реологического поведения. Для раствора наблюдается степенное снижение величины вязкости с ростом скорости сдвига, причем индекс течения жидкости практически одинаков для обоих методов. Во-вторых,

расхождение между кривыми не превышает 5% при фиксированной скорости сдвига. В-третьих, важно отметить, что микрофлюидный метод позволяет достичь существенно более высоких скоростей сдвига (до $10\,000\ с^{-1}$), чем ротационный реометр, для которого верхняя граница измерений составила $1000\ с^{-1}$. Это демонстрирует дополнительное преимущество микрофлюидного подхода – возможность исследования реологии в диапазоне скоростей сдвига, недоступном для стандартных ротационных приборов. Совокупность полученных данных подтверждает, что разработанный микрофлюидный реометр пригоден для количественного анализа реологических свойств неньютоновских жидкостей с погрешностью, сопоставимой с таковой для классических методов, но при существенно меньших объемах пробы и с расширенным диапазоном скоростей сдвига.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан и изготовлен микрофлюидный реометр с использованием дешевой и доступной технологии фрезерования полимерного чипа. Ключевым преимуществом предложенного подхода является существенное снижение стоимости устройства по сравнению с коммерческими аналогами, что делает его перспективным для широкого внедрения в лабораторную практику. При этом сохраняется возможность оперативного изменения геометрии каналов на этапе прототипирования без значительных затрат на оснастку.

Валидация метода выполнена на трех эталонных образцах и пяти образцах нефтепромысловых жидкостей. Установлено, что для жидкостей с ньютоновским поведением отклонение измеренной микрофлюидным методом вязкости от эталонных значений, определенных на ротационном реометре Anton Paar MCR 302e, составляет от 0.49% до 11.6% в зависимости от образца. Средняя погрешность определения коэффициента вязкости микрофлюидным методом по всем образцам флюидов не превысила 4.4%, что свидетельствует о приемлемой точности метода.

Для демонстрации возможностей метода для анализа неньютоновских сред был проведен эксперимент с 0.1-процентным раствором полиакриламида с добавлением 5 масс. % NaCl. Определены параметры степенной модели. Было получено, что отклонения для индекса течения и консистенции не превышают 2.5% и 7.9% соответственно. Это подтверждает корректность используемого подхода при работе с псевдопластичными средами.

Таким образом, предложенный недорогой микрофлюидный реометр демонстрирует сопоставимую с классическими методами точность при анализе как ньютоновских, так и неньютоновских нефтепромысловых жидкостей. Дальнейшее развитие метода может быть связано

с оптимизацией геометрии канала для расширения диапазона скоростей сдвига, интеграцией большего числа датчиков давления для повышения точности и адаптацией устройства для работы в полевых условиях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRZ-2020-0012).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fani M., Pourafshary P., Mostaghimi P., Mosavat N.* Fuel. 2022. № 315. P. 123225. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123225
2. *Hu H., Zhang Q., Tian M., Li Y., Han X., Guo R.* Sustainability. 2024. № 16(2). P. 629. https://doi.org/10.3390/su16020629
3. *Zhigarev V.A., Pryazhnikov M.I., Skorobogatova A.D., et al.* Pet. Res. 2025. № 10(2). P. 432. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2025.01.004
4. *Mahmoudi Alemi F., Mohammadi S.* ACS Omega. 2025. № 10(14). P. 14327. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11723
5. *Nour M. A., Hussain M.M.* Sensors. 2020. № 20(14). P. 3907. https://doi.org/10.3390/s20143907
6. *Balaga D.K., Mondal J., Kulkarni S.D.* J. Pet. Explor. Prod. Technol. 2024. № 14(8-9). P. 2555. https://doi.org/10.1007/s13202-024-01838-z
7. *Malkin A.Ya., Kulichikhin V.G.* Russ. Chem. Rev. 2015. № 84(8). P. 803. https://doi.org/10.1070/RCR4499
8. *Gupta S., Wang W.S., Vanapalli S.A.* Biomicrofluidics. 2016. № 10(4). P. 043402. https://doi.org/10.1063/1.4955123
9. *Vernigora D., Sypchenko S., Fedorov A., Olennikova O.* SPE Russ. Pet. Technol. Conf. Moscow, Russia. Proc. SPE. 2020. V. 1. No. SPE-202064-MS. https://doi.org/10.2118/202064-ms
10. *Nilsson M.A., Kulkarni R., Gerberich L., et al.* J. Non-Newton. Fluid Mech. 2013. № 202. P. 112. https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2013.09.011
11. *Singh P., Sharma K., Puchades I., Agarwal P.B.* Sens. Actuators A: Phys. 2022. № 338. P. 113456. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113456
12. *Liu N., Zhang D., Gao H., Hu Y., Duan L.* Sensors. 2021. № 21(11). P. 3592. https://doi.org/10.3390/s21113592
13. *Antonova N., Khristov K., Alexandrova A., Muravyov A., Velcheva I.* Clin. Hemorheol. Microcirc. 2022. № 83(3). P. 231. https://doi.org/10.3233/ch-221631

14. *Chang Y.-N., Yao D.-J.* Bioengineering. 2024. № 11(12). P. 1298. https://doi.org/10.3390/bioengineering11121298
15. *Muzychka Y.S., Edge J.* J. Fluids Eng. 2008. № 130(11). P. 111201. https://doi.org/10.1115/1.2979005
16. *Garg A.* Phys. Fluids. 2024. № 36(7). P. 073116. https://doi.org/10.1063/5.0217953
17. *Qu J., Zhu H., Sun X., Yan T.* Geoenergy Sci. Eng. 2025. № 254. P. 214030. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2025.214030
18. *Shan W., Zheng Y., Wang W., et al.* Processes. 2025. № 13(5). P. 1339. https://doi.org/10.3390/pr13051339
19. *Maghsoudian A., Izadpanahi A., Bahmani Z., Avvali A.H., Esfandiarian A.* Sci. Rep. 2025. № 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-84402-3
20. *Tian Y., Zhou J., He C., He L., Li X., Sui H.* Processes. 2022. № 10(4). P. 738. https://doi.org/10.3390/pr10040738
21. *Gale B.K., Jafek A.R., Lambert C.J., et al.* Inventions. 2018. № 3(3). P. 60. https://doi.org/10.3390/inventions3030060
22. *Guckenberger D.J., de Groot T.E., Wan A.M.D., Beebe D.J., Young E.W.K.* Lab on a Chip. 2015. № 15(11). P. 2364. https://doi.org/10.1039/C5LC00234F
23. *Peng L., Deng Y., Yi P., Lai X.* J. Micromech. Microeng. 2014. № 24(1). P. 013001. https://doi.org/10.1088/0960-1317/24/1/013001
24. *Attia U.M., Marson S., Alcock J.R.* Microfluidю Nanofluid. 2009. № 7(1). P. 1. https://doi.org/10.1007/s10404-009-0421-x

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Изготовление мастер-формы из ПДМС: **а** – извлеченная из чашки Петри заливка ПДМС по силанизированной позитивной мастер-форме из ПДМС, **б** – нанесение надрезов и извлечение позитивного оттиска топологии, **в** – негативные оттиски топологии рабочей мастер-формы для заливки эпоксидной смолы

Рис. 2. Экспериментальная установка (**а**) и микрофлюидный реометра с заполненным нефтью каналом (**б**): *1* – микрофлюидный чип, *2* – термостабилизатор, *3* – шприцевой насос, *4* – датчик давления, *5* – многоканальный аналого-цифровой модуль сбора данных

Рис. 3. Зависимости перепада давления от расхода (**а**) и напряжения сдвига от скорости сдвига (**б**) для эталонных жидкостей

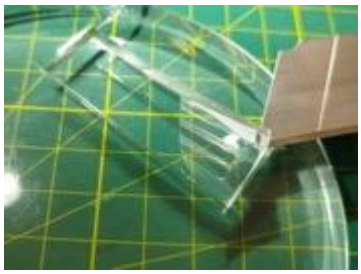
Рис. 4. Зависимости перепада давления от расхода (**а**) и напряжения сдвига от скорости сдвига (**б**) для нефтепромысловых жидкостей

Рис. 5. Зависимость перепада давления в чипе от расхода при течении полиакриламидного раствора

Рис. 6. Зависимости эффективной вязкости (**а**) и напряжения сдвига (**б**) от скорости сдвига для раствора полиакриламида



(а)



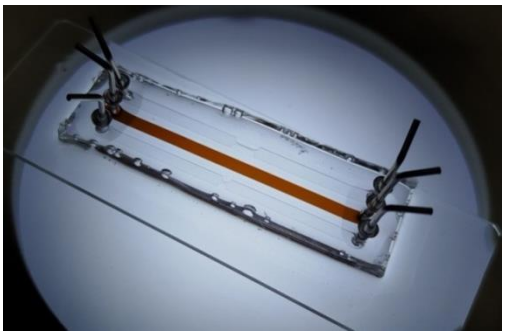
(б)



(в)

Рис. 1.





(а) (б)

Рис. 2.

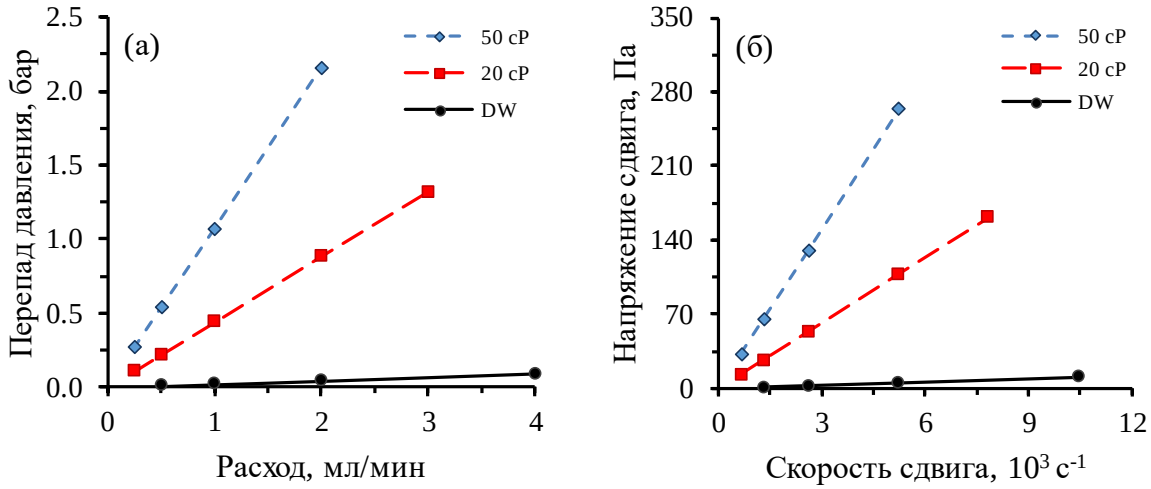

(а)
Перепад давления, бар
Расход, мл/мин
50 cP
20 cP
DW
(б)
Напряжение сдвига, Па
Скорость сдвига, 10^3 c^{-1}
50 cP
20 cP
DW

Рис. 3.

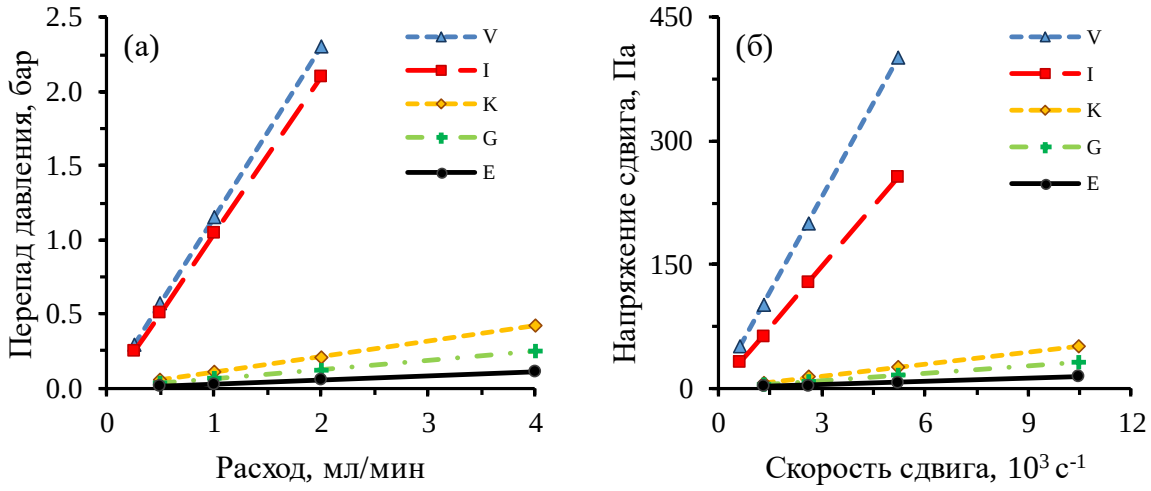

(а)
Перепад давления, бар
Расход, мл/мин
V
I
K
G
E
(б)
Напряжение сдвига, Па
Скорость сдвига, 10³ с⁻¹

Рис. 4.

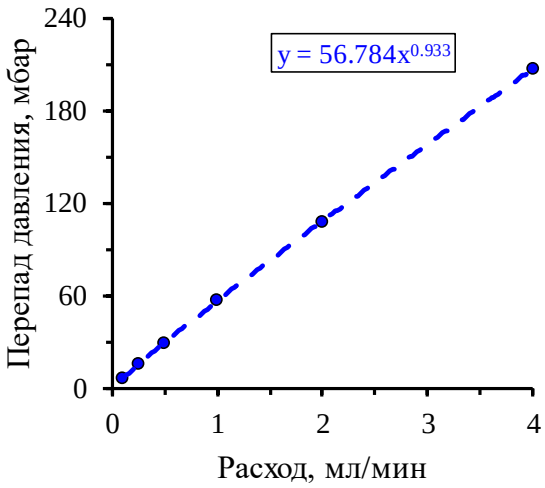

y = 56.784x^0.933
Перепад давления, мбар
240
180
120
60
0
0
1
2
3
4
Расход, мл/мин

Рис. 5.

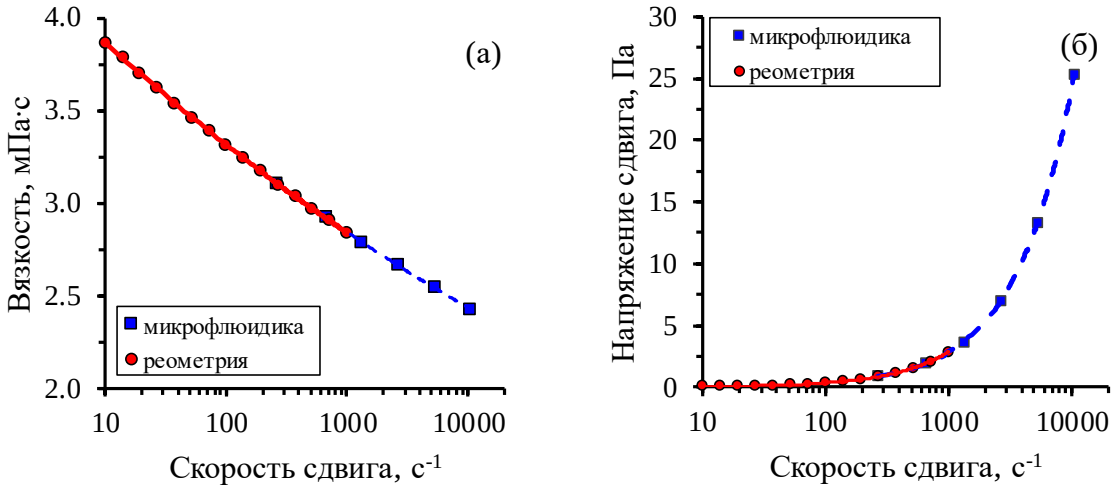

(а)
Вязкость, мПа·с
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
10
100
1000
10000
Скорость сдвига, с-1
микрофлюидика
реометрия
(б)
Напряжение сдвига, Па
30
25
20
15
10
5
0
10
100
1000
10000
Скорость сдвига, с-1
микрофлюидика
реометрия

Рис. 6