

Экспериментальное исследование движения масляной пленки по поверхности капилляра при двухфазной фильтрации

А.А. Велижанин

Тюменский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень
e-mail: artem.velizhanin@mail.ru

Аннотация. В процессе экспериментального исследования двухфазного течения в цилиндрических капиллярах при малых числах Рейнольдса были обнаружены эффекты течения, которые необходимо изучить подробнее. При однофазном потоке воды, после вытеснения масла из цилиндрического капилляра, масляная пленка реагирует на скорость потока. Характер течения масляной пленки по стенкам цилиндрического капилляра представлен в виде волн, способных прижиматься к стенкам при увеличении перепада давления, и проникать в поток воды в виде перемычек при уменьшении перепада. Регулировка скорости потока позволяет управлять течением масляной пленки. Анализ описанного эффекта позволяет усовершенствовать методы добычи трудноизвлекаемых запасов углеводорода.

Ключевые слова: микрофлюидика, двухфазное течение, цилиндрический капилляр, масляная пленка, нестационарность течения.

Для цитирования: Велижанин А.А. Экспериментальное исследование движения масляной пленки по поверхности капилляра при двухфазной фильтрации // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art10>

Введение

Поддержание уровня добычи углеводородов в последние годы является важнейшей темой для нефтегазовой отрасли. Только на месторождениях Западной Сибири ежегодное снижение нефтедобычи достигает 5–6 млн т. В связи с этим активно вовлекаются так называемые трудноизвлекаемые запасы углеводородного сырья. Месторождения Западной Сибири интересны тем, что они включают в себя коллекторы любого типа, что дает возможность применения различных методов повышения нефтеотдачи. Для эффективного решения задачи необходимо понимать физику процессов движения флюида в коллекторах и микроканалах.

Простейшей моделью коллектора для экспериментального изучения является цилиндрический капилляр. При движении Ньютоновских жидкостей через цилиндрический капилляр многочисленные экспериментальные данные показывают значительное расхождение с теоретическим решением [1, 2]. Проведено множество экспериментов с различными каналами и типами течения. Все исследователи отмечают отсутствие общего описания процессов, так как на структуру течения влияет множество

факторов, способных кардинально изменить течение [3, 4]. Один из таких факторов (при двухфазном потоке масло-вода) связан с воздействием масляной пленки на ламинарный поток воды через капилляр. Несмотря на то, что экспериментальные данные различных исследователей группируются в области теоретически предсказанных величин, полного совпадения с теорией в большинстве случаев не достигается, более того, разброс данных настолько значителен, что не может быть объяснен ошибками измерений. По мнению авторов обзора [2, 5], в каждом эксперименте есть тот или иной параметр или фактор, который не контролировался или не учитывался. К таким факторам можно отнести: неучтенные свойства жидкости, нелинейность размеров микроканалов и особенности их строения, особенности экспериментальной установки, термальные эффекты и электрокинетические явления [6]. В связи с этим появляются работы, анализирующие влияние какого-либо фактора на структуру течения, проводятся точные измерения характеристик потока с использованием современных средств диагностики. К примеру, в [7, 8] исследуется влияние шероховатости стенки, а в [9] с использованием микро-PIV метода (метод цифровой трассерной визуализации с микронным разрешением) измеряются поля скоростей в изогнутом канале. В данной работе было уделено внимание движению масляной пленки в двухфазном потоке при малых числах Рейнольдса ($Re=0,0017-45$) и точному контролю параметров температуры и перепада давления.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Эксперимент по исследованию двухфазного течения в капилляре проводился на установке с автоматической регистрацией параметров течения (перепад давления, расход и температура) и возможностью фото- и видеосъемки процесса (рис. 1). Капилляр, в котором изучалось течение, установлен горизонтально на массивном основании между двумя сообщающимися сосудами (подающем и приемном). Флюиды подаются в капилляр из сосудов, закрепленных на координатном устройстве, с помощью которого возможно регулировать и фиксировать напор. Принимающий сосуд расположен на весах фирмы AND, модель HR-200 с точностью измерения 0,0001 г. Гидравлическая система установки собрана из трубок диаметром 3,2 мм, изготовленных из полимерного материала. На каждом участке соединительных трубок установлены краны-зажимы, позволяющие перекрывать поток жидкости. Соединение деталей устройства выдерживает избыточное давление 40 кПа. Изменение температуры жидкости и внешней среды фиксирует высокоомный бусинковый терморезистор (типа СТ1-19) на стеклянной ножке,

погруженный в подающий сосуд. Диапазон рабочих температур от -60 до $+300$ °С. Датчик подключен к компьютеру через USB-port.

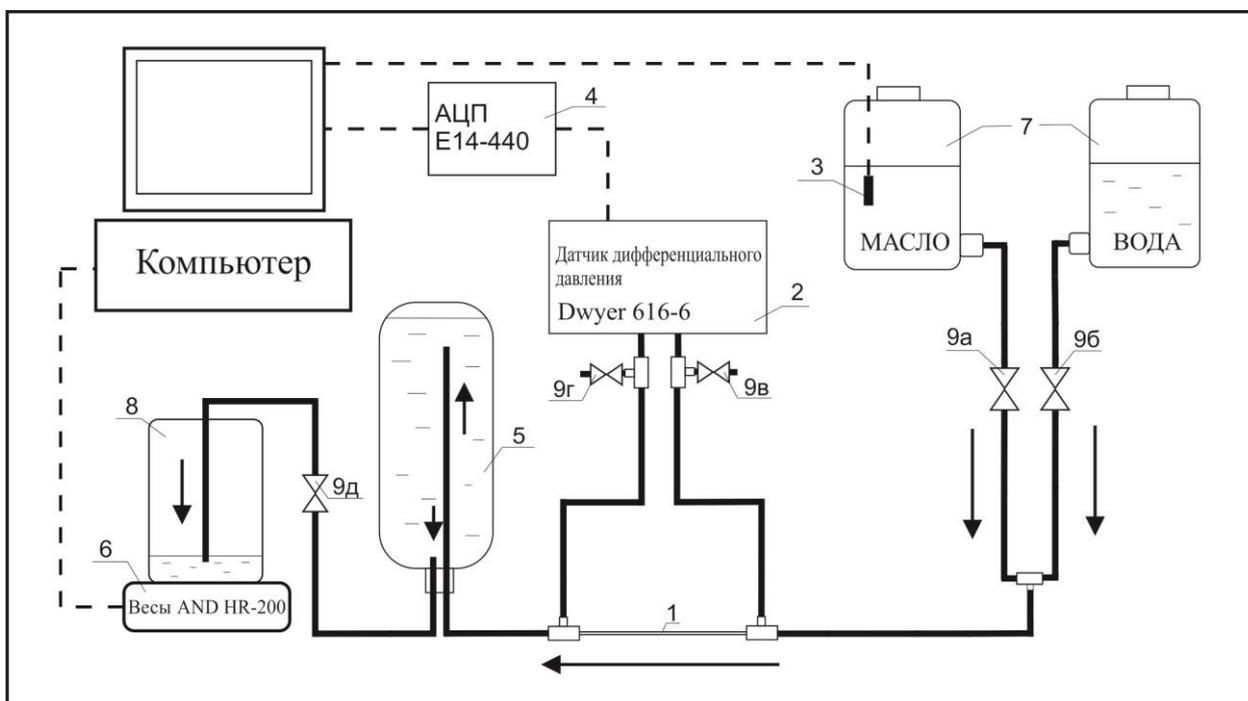


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – капилляр; 2 – дифференциальный датчик давления; 3 – датчик температуры; 4 – аналогово-цифровой преобразователь; 5 – сепаратор; 6 – электронные весы; 7 – подающие сосуды; 8 – принимающий сосуд; 9(а, б, в, г, д) – краны-зажимы

Перепад давления на капилляре измеряется при помощи датчика дифференциального давления фирмы Dwyermodel 616-6 производства США. Датчик имеет заводскую калибровку и позволяет измерять перепады давления в диапазоне 0–100 дюймов водяного столба с точностью $\pm 0,25\%$. К измерительной системе датчик подключается по схеме токовой петли, т.е. в зависимости от перепада давления изменяется сила тока, протекающего между измерительными разъемами через тестовый резистор, на котором измеряется перепад напряжения. Данные через аналогово-цифровой преобразователь фирмы L-card, модель E14-440, передаются на компьютер.

В качестве экспериментальных флюидов использовались дистиллированная вода и минеральное моторное масло LUKOIL STANDARD SAE 10W-40 API SF/CC MINERAL для создания взаимодействия жидкостей разной плотности. Реологические характеристики масла исследовались на ротационном вискозиметре «Реотест 2.1». Определено, что в широком диапазоне скоростей сдвига масло проявляет себя как

Ньютоновская жидкость, а зависимость вязкости от температуры с достаточной точностью интерполируется параболической зависимостью:

$$\mu = 287,9 - 17,6 \cdot (T - 18) + 0,555 \cdot (T - 18)^2, \quad (1)$$

где T – температура в градусах Цельсия. Измерения проводились в диапазоне температур 18–32 °С.

Плотность масла в зависимости от температуры измерялась ареометром АНТ-2, ГОСТ 18481-81, и ее можно с хорошей точностью интерполировать линейной зависимостью:

$$\rho = 0,883 - 0,0006 \cdot T. \quad (2)$$

При проведении серии экспериментов, в целях уменьшения неконтролируемых эффектов, в каждой серии использовался новый капилляр. Для этого в собранной установке реализована возможность замены капилляров без слива рабочих флюидов из всей установки. Капилляр подключается к латунным тройникам при помощи конусообразного пластикового переходника. Капилляр вставляется в узкую часть переходника, а место соединения фиксируется термоусадочной трубкой. Широкая часть переходника накручивается на ответвление латунного тройника, соединяющего капилляр с гидравлической системой установки. Гидродинамическая система (установка) заполняется жидкостью из подающего сосуда под давлением, вытесняя воздух. Для замены капилляра в случаях его повреждения или разгерметизации соединений достаточно закрыть все краны на установке, отсоединить капилляр и установить новый. После этого, открыв краны, удалить воздух из капилляра и системы путем замещения жидкостью из подающего сосуда и оставить систему в таком состоянии минимум на сутки до старта эксперимента для устранения внутренних течений и проверки герметичности соединений.

Экспериментальное исследование процесса вытеснения одной жидкости другой в цилиндрическом капилляре

На собранной установке по изложенным выше методикам изучалось вытеснение из капилляра диаметром 0,7 мм одной жидкости другой (вода–масло; масло–вода). В процессе эксперимента производилась видеосъемка течения внутри капилляра при помощи двух камер. Камеры установлены на точках начала и конца капилляра с возможностью перемещения вдоль его длины для фиксации важных моментов течения.

Во время подготовки эксперимента система заполнялась маслом. На начальном этапе эксперимента реализовывалось однофазное течение масла в капилляре. Далее в гидравлическую систему (установку) подавалась вода, для чего перекрывался масляный кран (кран № 9а, см. рис. 1). Поток масла останавливался, и открывалась подача воды (кран № 9б, см. рис. 1). Переключение вытесняющего флюида приводит к изменению давления. Система выходит из равновесия, но через некоторое время поток стабилизируется. Мениск вытесняющей жидкости входит в капилляр и, двигаясь по нему, вытесняет масло. Затем реализуется однофазный поток воды, проходящей через капилляр. Далее происходит процесс, обратный предыдущему – закрывается подача воды, открывается подача масла. В момент переключения происходит падение давления и формируются масляные «перемычки» из оставшейся на стенках капилляра и трубок масляной пленки. Этот эффект создает сложную картину вытеснения воды, обусловленную отсутствием четкой границы раздела фаз при прохождении капилляра. На завершающем этапе вновь фиксируется однофазное течение масла.

Выделим несколько этапов эксперимента и реализующиеся на этих этапах течения.

Первый этап. Запуск эксперимента. Однофазный поток масла

После того, как все программы для автоматической фиксации данных запущены (давление, масса, температура), открывается кран подающего сосуда с маслом, в котором расположен температурный датчик. При перепадах давления (2,46–2,52 кПа) реализуется однофазное течение масла со средней скоростью потока $U=0,073$ см/с и $Re=0,0027$.

Масло, попадая в сепаратор (№ 5, см. рис. 1), вытесняет из него в принимающий сосуд, установленный на весах (№ 6, см. рис. 1), равный объем воды. Объем жидкости, прошедшей через капилляр, растет (рис. 2, б), а давление остается практически постоянным (рис. 2, а) и лишь при длительных экспериментах уменьшается соответственно изменению уровня жидкости в подающем сосуде. Зависимость расхода жидкости от времени показана на рис. № 2, в: несмотря на практически «гладкое» изменение массы и стабильный перепад давления расход значительно изменяется с течением времени, колеблясь с некой периодичностью (50–100 с) более чем на 30%.

Второй этап. Запуск замещающей жидкости

Перед запуском замещающей жидкости перекрывается кран (№ 9а, см. рис. 1) подающего сосуда с маслом. В этот момент происходит небольшой скачок давления

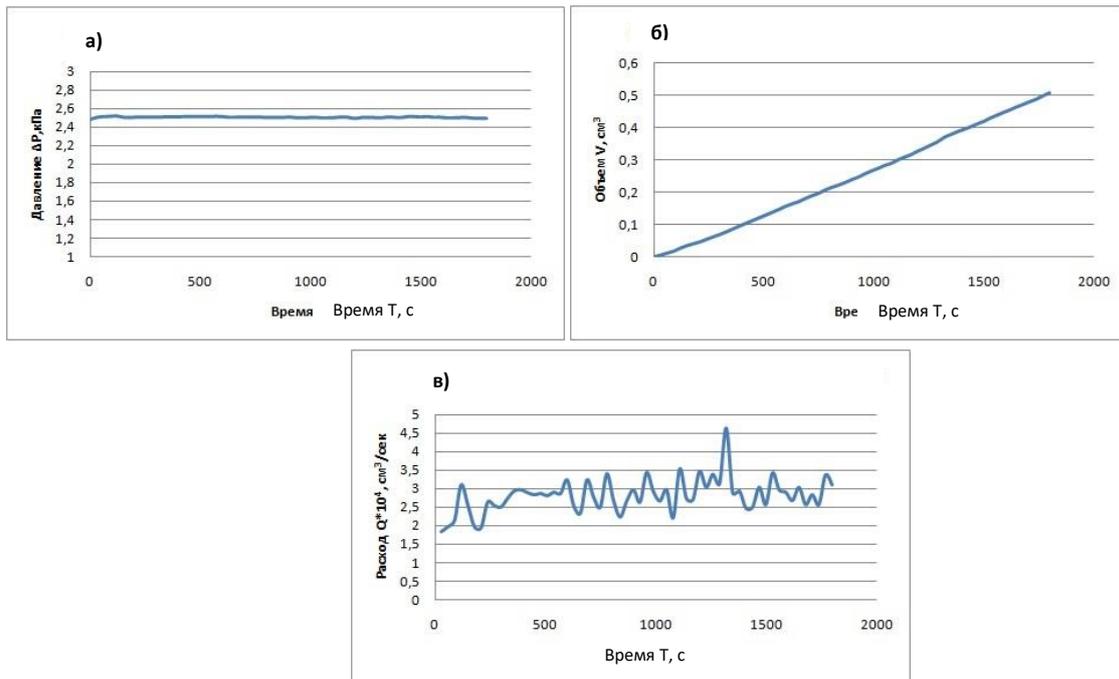


Рис. 2. Зависимости перепада давления на концах капилляра (а), объема прошедшей через капилляр жидкости (б) и расхода жидкости (в) от времени на первом этапе эксперимента

(рис. 3, а), связанный с воздействием крана на трубку системы. Затем следует резкое падение давления до момента открытия крана с запуском течения воды.

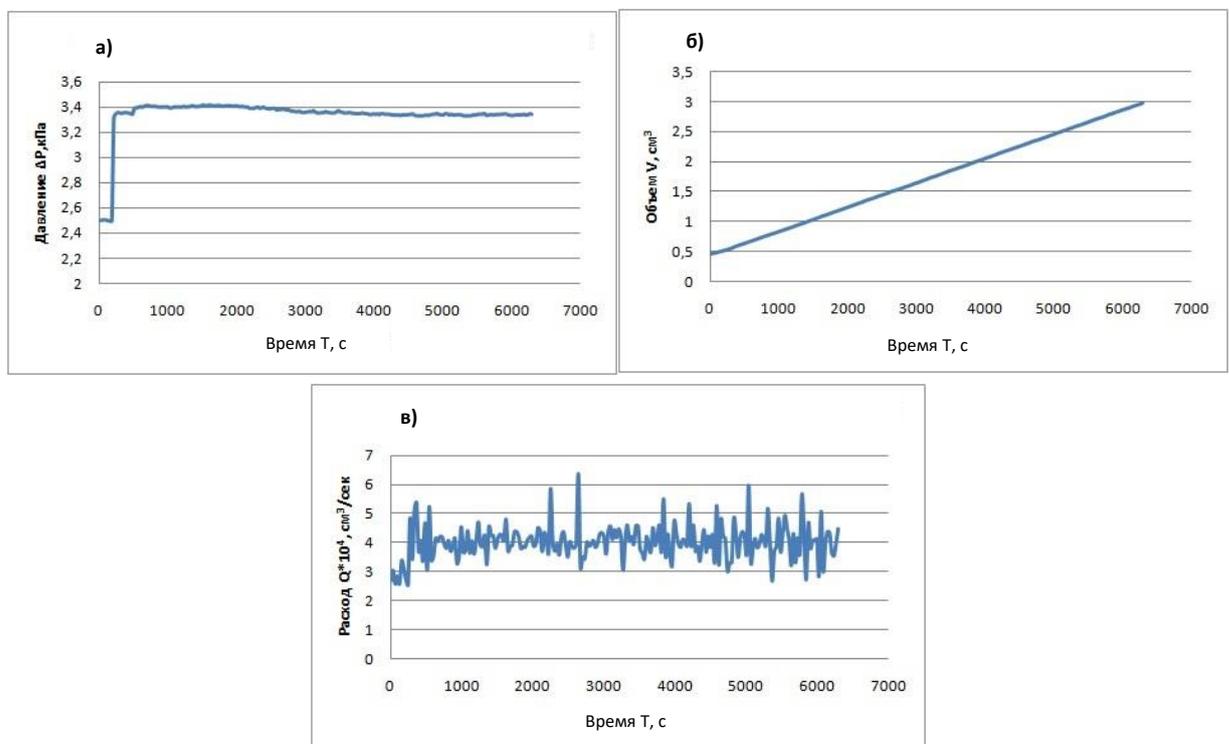


Рис. 3. Зависимости перепада давления на концах капилляра (а), объема прошедшей через капилляр жидкости (б) и расхода жидкости (в) от времени на втором этапе эксперимента

Поэтому переключение между подающими сосудами должно происходить быстро и без лишнего воздействия на экспериментальную установку, но даже это не позволяет исключить данный эффект. После запуска замещающей жидкости (кран № 9б, см. рис. 1), происходит скачок давления до уровня перепада между подающим и принимающим сосудами. Перестроение потока после внешнего воздействия на данном этапе занимает ~500 с. Падение давления при течении воды на отрезке от места соединения двух фаз до капилляра незначительное, так как расстояние данного отрезка составляет около 5 см. Средняя скорость течения $U=0,10$ см/с, $Re=0,004$ при перепадах давления 3,4–3,3 кПа.

Третий этап. Замещение масла водой в капилляре

Попадая в капилляр, вода вытесняет масло как поршень. Граница раздела фаз образует округлый мениск. Движение мениска по капилляру не равномерно, скачкообразно (рис. 4, в), после прохождения половины длины капилляра мениск ускоряется. Форма мениска не изменяется на всем этапе вытеснения (рис. 5). На стенках капилляра остается тонкая масляная пленка. Средняя скорость потока при прохождении первой половины капилляра $U=0,05$ см/с ($P=1,51$ кПа), тогда как средняя скорость потока после прохождения середины капилляра $U=0,084$ см/с ($P=1,5$ кПа). Прохождение первой половины капилляра занимает 400 с, а второй половины – всего 100 с.

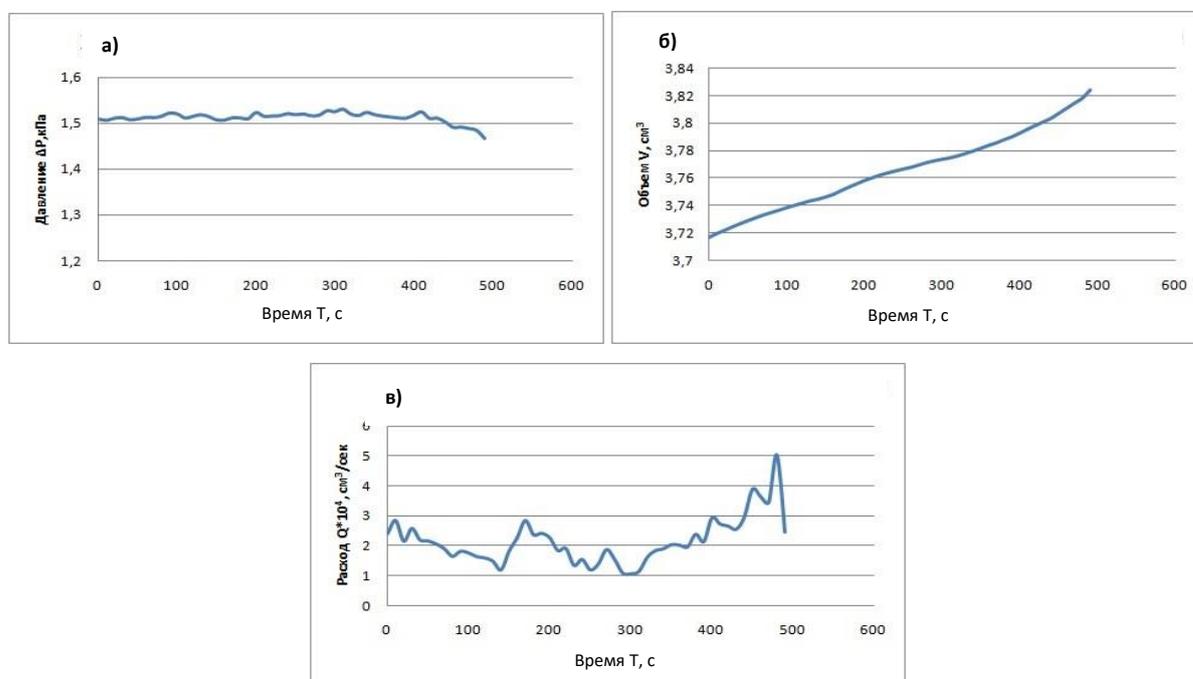


Рис. 4. Зависимости перепада давления на концах капилляра (а), объема прошедшей через капилляр жидкости (б) и расхода жидкости (в) от времени на третьем этапе эксперимента

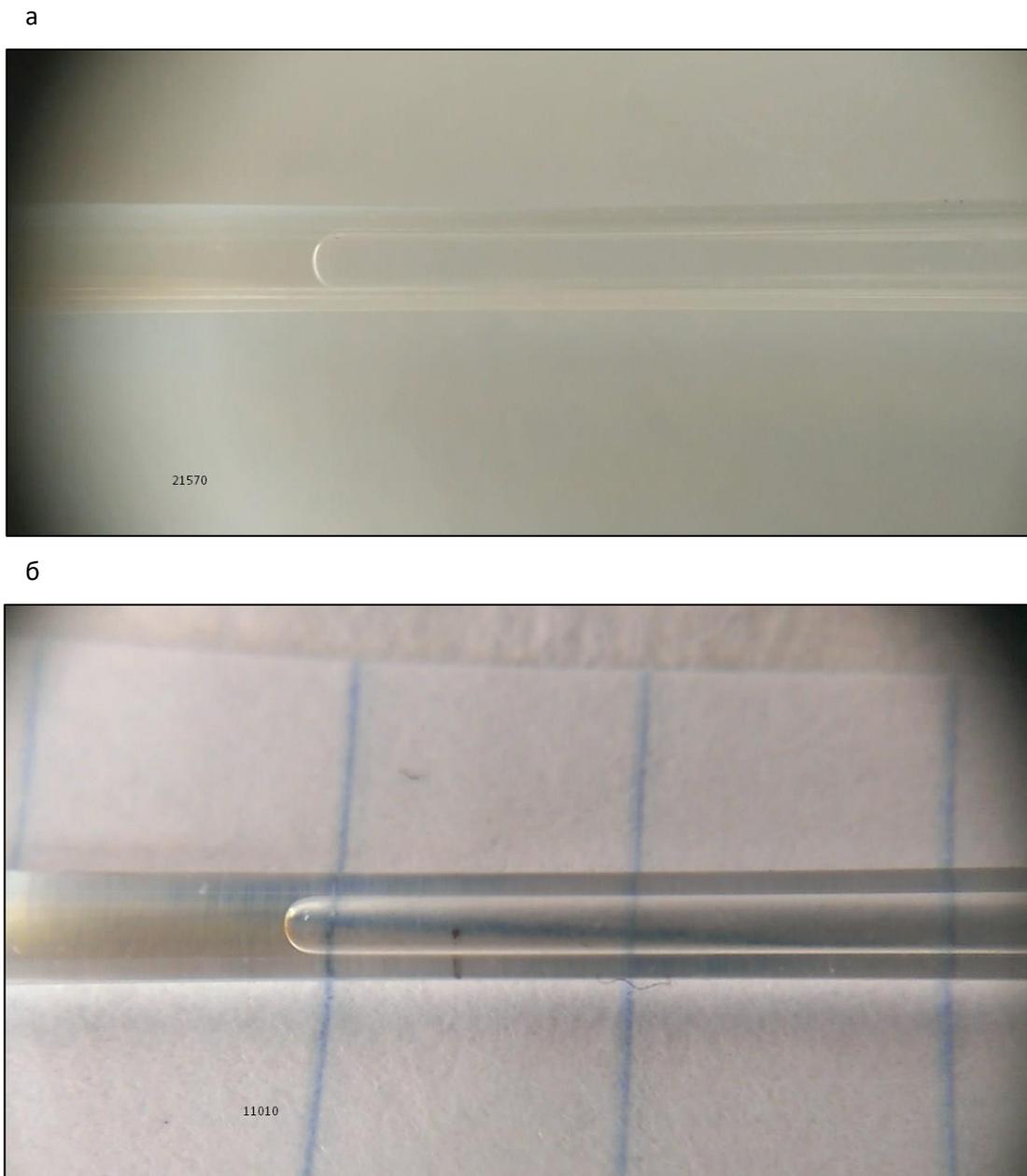


Рис. 5. Вытеснение масла водой на различных участках капилляра: а – 1/3 длины, б – 2/3 длины

Четвертый этап. Однофазное течение воды в капилляре

На момент выхода мениска из капилляра происходит резкое скачкообразное падение давления. Стабилизация давления занимает около 300 с с момента полного вытеснения масла из капилляра (рис. 6, а). При однофазном течении воды через капилляр различимы периодические пульсации давления. В момент выхода мениска из капилляра расход жидкости возрастает в 50 раз (со значения $0,0002 \text{ см}^3/\text{с}$ до $0,01 \text{ см}^3/\text{с}$). Устанавливается режим с ярко выраженной ритмичной пульсацией (рис. 6, б).

Было проведено сравнение данных эксперимента с данными для однофазного течения воды в данном капилляре (рис. 6, б) – обнаружено различие в скорости течения при равном перепаде давления ($P=1,26$ кПа). Для однофазного потока воды в чистом капилляре средняя скорость составила: $U=4,4$ см/с, $Re=31$, а для потока после замещения масла: $U=6,3$ см/с, $Re=44,5$. Данный эффект, вероятно, связан с наличием масляной пленки, которая уменьшает взаимодействие воды со стенками капилляра и увеличивает среднюю скорость течения жидкости на 30%. Взаимодействие воды с масляной пленкой приводит к ее волнообразному течению на стенках капилляра (рис. 7, 8). В редких случаях при больших амплитудах волн масляная пленка способна соединяться, образуя масляные «перемычки», которые продолжают движение в потоке воды. Аналогичный процесс происходит и в трубках системы (рис. 9).

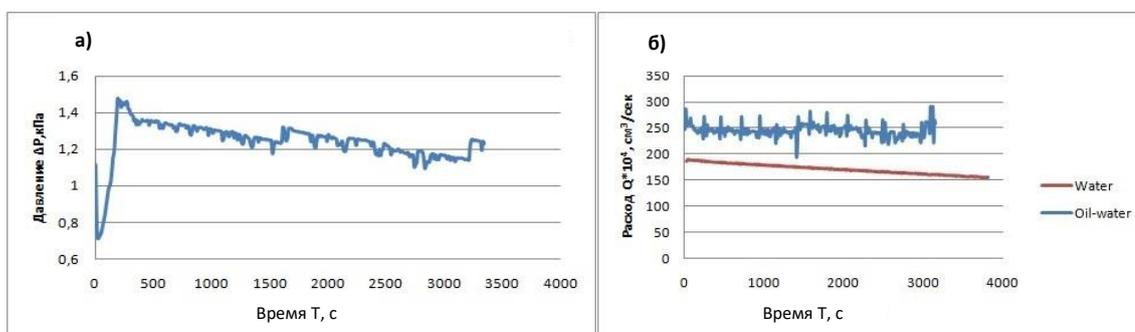


Рис. 6. Зависимости перепада давления на концах капилляра давления (а), сравнение расхода между экспериментом с однофазовыми потоками воды и потоком воды после вытеснения масла (б) от времени на четвертом этапе эксперимента

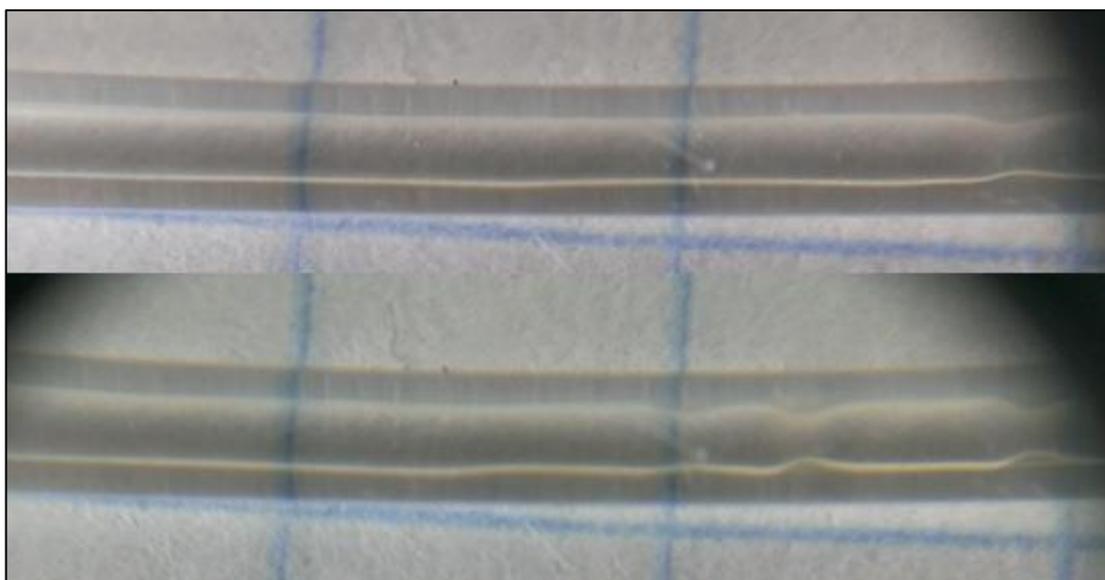


Рис. 7. Образование волн масляной пленки на стенках капилляра

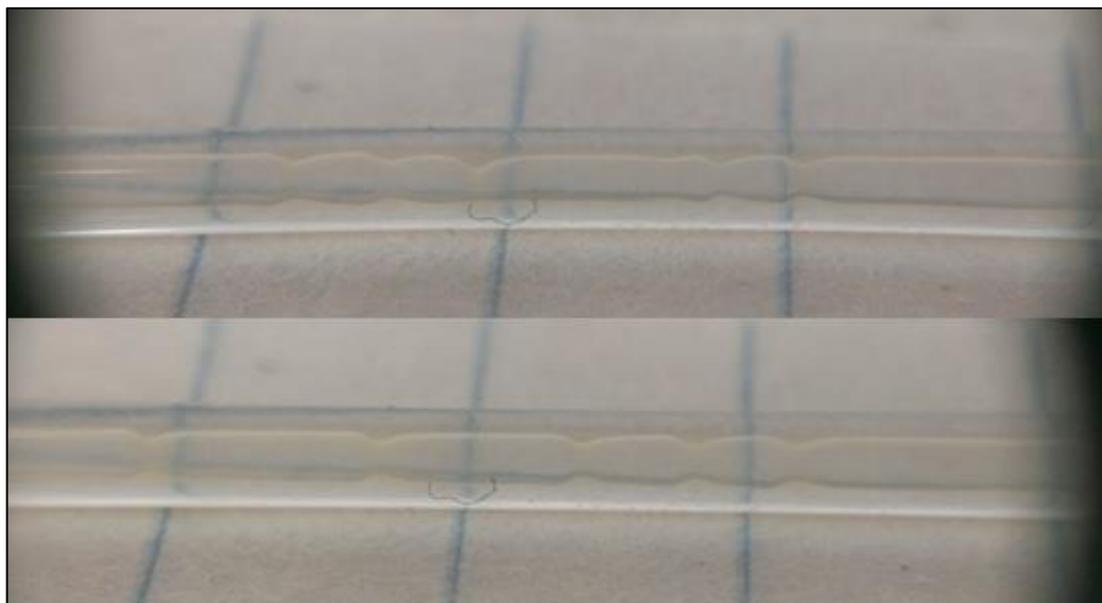


Рис. 8. Волны масляной пленки на стенках капилляра



Рис. 9. Образование масляной перемычки в трубке системы

Заключение

Экспериментально исследовано одно- и двухфазное течение жидкости в цилиндрическом капилляре, особое внимание уделено замещению одной жидкости другой. Показано, что течение жидкости через цилиндрический капилляр при постоянном перепаде давления в условиях выполненных экспериментов никогда не является стационарным.

На этапе однофазного потока воды после замещения масла из капилляра наблюдается взаимодействие ламинарного потока воды с оставшейся на стенках капилляра пленкой масла. При высоких скоростях течения вода прижимает масляную

пленку к стенкам. При более низких – поток пытается протягивать эту пленку вдоль течения, тем самым образуя эффект волны. В некоторых моментах пленка образует перемычки и продолжает движение в потоке воды. Режим двухфазного течения из пленочного становится пузырьковым. Регулировка скорости потока позволяет управлять течением масляной пленки.

Дальнейшее изучение данного эффекта позволит доказать предположение, что даже для промытого пластовой водой нефтегазонасного коллектора возможно дополнительное извлечение углеводорода путем регулировки давления закачки и скорости потока.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00335.

Литература

1. *Papautsky I., Ameal T., Frazier A.B.* A review of laminar single-phase flow in microchannels // 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11–16, New York, NY. 2001. P. 3067–3075.
2. *Sharp K.V., Adrian R.J., Santiago J.G., Molho J.I.* Liquid flows in microchannels // MEMS: Background and Fundamentals, 2005. P. 10–37.
3. *Jyh-tong Teng, Jiann-Cherng Chu, Chao Liu, Tingting Xu, Yih-Fu Lien, Jin-Hung Cheng, Suyi Huang, Shiping Jin, Thanhtrung Dang, Chunping Zhang, Xiangfei Yu, Ming-Tsang Lee, Ralph Greif* Fluid dynamics in microchannels // Fluid Dynamics, Computational Modeling and Applications / Dr. L. Hector Juarez (Ed.). InTech, 2012. P. 403–436.
4. *Ребров Е.В.* Режимы двухфазного течения в микроканалах // Теоретические основы химической технологии. 2010. Т. 44, № 4. С. 371–383.
5. *White F.M.* Fluid Mechanics. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1994.
6. *Чиннов Е.А., Кабов О.А.* Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 5. С. 777–795.
7. *Pelevi N., van der Meer Th. H.* Heat transfer and pressure drop in microchannels with random roughness // International Journal of Thermal Sciences 99. 2016. P. 125–135.
8. *Baomin Dai, Minxia Li, Yitai Ma* Effect of surface roughness on liquid friction and transition characteristics in micro- and mini-channels // Applied Thermal Engineering 67. 2014. P. 283–293.

9. *Dai Z., Zheng Z., Fletcher D.F., Haynes B.S.* Experimental study of transient behaviour of laminar flow in zigzag semi-circular microchannels // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.07.001>

Experimental study of a flow of an oil film on walls of a cylindrical capillary

A.A. Velizhanin

Tyumen Scientific Centre, SB RAS, Tyumen
e-mail: artem.velizhanin@mail.ru

Abstract. During the experimental study of two-phase flows in cylindrical capillaries at small Reynolds numbers, effects of a flow which needed to be studied in more detail were found. At single-phase water flow, after replacement of oil from a cylindrical capillary, the oil film reacts to a flow rate. The nature of a flow of an oil film on walls of a cylindrical capillary is presented in a wave mode, capable to nestle on walls, at increase in a pressure drop and to get into water flow in the form of crossing points, at difference decrease. Adjustment of a flow rate allows to operate a flow of an oil film. The analysis of the described effect allows to improve methods of production of difficult reserves of hydrocarbon.

Keywords: microfluidics, two-phase flow, cylindrical capillary, oil film, non-stationary flow.

Citation: Velizhanin A.A. Experimental study of a flow of an oil film on walls of a cylindrical capillary // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art10> (In Russ.).

References

1. Papautsky I., Ameel T., Frazier A.B. A review of laminar single-phase flow in microchannels // 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11–16, New York, NY. 2001. P. 3067–3075.
2. Sharp K.V., Adrian R.J., Santiago J.G., Molho J.I. Liquid flows in microchannels // MEMS: Background and Fundamentals, 2005. P. 10–37.
3. Jyh-tong Teng, Jiann-Cherng Chu, Chao Liu, Tingting Xu, Yih-Fu Lien, Jin-Hung Cheng, Suyi Huang, Shiping Jin, Thanhtrung Dang, Chunping Zhang, Xiangfei Yu, Ming-Tsang Lee, Ralph Greif Fluid dynamics in microchannels // Fluid Dynamics, Computational Modeling and Applications / Dr. L. Hector Juarez (Ed.). InTech, 2012. P. 403–436.
4. Rebrov E.V. Two-phase flow regimes in microchannels // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2010. Vol. 44, No. 4. P. 355–367.
5. White F.M. Fluid Mechanics. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 1994.
6. Chinnov E.A., Kabov O.A. Two-phase flows in pipes and capillary channels // High Temperature. 2006. Vol. 44, No. 5. P. 773–791.
7. Pelevi N., van der Meer Th. H. Heat transfer and pressure drop in microchannels with random roughness // International Journal of Thermal Sciences 99. 2016. P. 125–135.

8. *Baomin Dai, Minxia Li, Yitai Ma* Effect of surface roughness on liquid friction and transition characteristics in micro- and mini-channels // *Applied Thermal Engineering* 67. 2014. P. 283–293.

9. *Dai Z., Zheng Z., Fletcher D.F., Haynes B.S.* Experimental study of transient behaviour of laminar flow in zigzag semi-circular microchannels // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.07.001>