Артем Александрович ВЕЛИЖАНИН[1]
Олег Анатольевич СИМОНОВ[2]

УДК 532.5, 532.529

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАПИЛЛЯРЕ

[1] аспирант, Институт криосферы Земли
СО РАН (г. Тюмень)
artem.velizhanin@mail.ru

[2] кандидат физико-математических наук, заместитель директора,
Тюменский научный центр СО РАН;
старший научный сотрудник,
Тюменский государственный университет
s_o_a@rambler.ru

Аннотация

Задачи, связанные с движением вязких жидкостей в капиллярах при низких числах Рейнольдса, актуальны вследствие развития нанотехнологий в электронике, медицине и прочих областях человеческой практики. Но результаты многочисленных экспериментальных исследований таких течений свидетельствуют о неудовлетворительном совпадении с их теоретическим описанием. При наличии в потоке второй фазы движение еще более усложняется, что многократно увеличивает трудности теоретического моделирования.

Целью настоящей работы является получение количественных экспериментальных данных об однофазных течениях воды и масла в цилиндрическом капилляре при низких числах Рейнольдса, а также о процессе замещения одной жидкости другой. В экспериментах производились измерения перепада давления и массы прошедшей через капилляр жидкости, выполнялась фото- видео- фиксация движения фронтов вытеснения в широком диапазоне чисел Рейнольдса ($0{,}002 < Re < 500$).

Цитирование: Велижанин А. А. Экспериментальное исследование двухфазного течения жидкостей в цилиндрическом капилляре / А. А. Велижанин, О. А. Симонов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 82-98.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-82-98

© ФГАОУ ВО Тюменский государственный университет

Установлено, что при однофазном течении движение жидкости в условиях проведенного эксперимента никогда не является стационарным, и его основные параметры не совпадают с теоретически предсказанными. Выявлены и описаны характерные этапы течения при замещении одной жидкости другой. Вытеснение масла водой происходит в «поршнеобразном» режиме, граница масло-вода имеет сферическую форму и после ее прохождения на стенках капилляра остается масляная пленка. Описаны особенности поведения пленки при однофазном течении воды. При вытеснении воды маслом режим течения с однозначно выраженной границей не реализуется, в потоке наблюдаются многочисленные капли и перемычки. Отмечено, что наличие масляной пленки на поверхности капилляра приводит к увеличению расхода жидкости через него.

Ключевые слова

Микрофлюидика, однофазное течение, двухфазное течение, цилиндрический капилляр, масляная пленка, нестационарность течения, мениск.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-82-98

Введение

Микрофлюидика — быстроразвивающаяся область современной науки имеет большое значение в связи с миниатюризацией новых систем и технологий.

Микроканалы в настоящее время являются неотъемлемой частью постоянно и повседневно использующихся нами приборов и устройств (процессоры, струйные принтеры и пр.). Тем не менее, несмотря на распространенность течений в микроканалах и огромный интерес исследователей всего мира, кажущуюся простоту и хрестоматийность задачи многие явления остаются не исследованными. Обычно, для анализа таких течений используют уравнения Навье — Стокса, но, как отмечается в [7], для микромасштабов это может быть не применимо. Даже при движении Ньтоновских жидкостей через цилиндрический капилляр многочисленные экспериментальные данные показывают значительное расхождение с теоретическим решением [9; 7, с. 6; 10]. Обычно это связывают с тем, что в микромасштабе реализуются тонкие сдвиговые слои в которых двух- или трех- мерные эффекты при переносе энергии и массы кратно возрастают, кроме этого существенную роль начинает играть неравномерность распределения параметров (таких как температура, плотность, концентрация примесей) в движущейся жидкости. Возрастает и роль явлений, связанных с взаимодействием жидкости и стенки микроканала. Такое взаимодействие приводит к изменению вязкости жидкости вблизи стенки, эффекту проскальзывания, возникновению гидродинамических неоднородностей потока вследствие обтекания пристенных неровностей и пр. Следует отметить, что с уменьшением масштаба течения возрастает роль примесей и включений (капли, пузырьки, пылинки, бактерии и пр.) в движущемся флюиде на структуру течения. При многофазном движении течение еще более усложняется, структуру потока начинают определять особенности, возникающие при учете гравитационных сил, взаимодействии поверхности канала и флюидов, а также на межфазных границах, что может кардинально изменить течение [1].

Необходимо отметить, что изготовление моделей микроканалов и измерение параметров течения требует высокой точности, которую сложно обеспечить даже при настоящем уровне развития техники. Это приводит к отсутствию повторяемости различных серий экспериментов и несовпадению данных по исследованию течений, выполненных различными научными коллективами. В целом отметим, что течения в микромасштабе кардинально отличаются от течений в обычном масштабе, и общепринятые теоретические подходы для описания таких явлений не работают. Во многих случаях нет даже качественной картины, описывающей многофазные течения в микроканалах, в связи с чем, практически все исследователи отмечают необходимость накопления и анализа экспериментального материала [7, с. 8; 9, с. 12-13].

В настоящей статье приводятся результаты течения для капилляров из «пограничной» области между микро- и макромасштабами, они достаточно малы и при движении в них жидкости проявляются микроэффекты, в то же время они изготовлены с достаточной точностью и имеющееся приборное обеспечение позволяет уверенно фиксировать параметры потока.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Для исследования течения жидкости в капиллярах собрана экспериментальная установка с автоматической регистрацией параметров течения (перепад давления, расход и температура) и возможностью фото- видеосъемки процесса. Схематически установка изображена на рис. 1.

Капилляр (d = 0,7 мм, L = 350 мм.), 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. Показания весов фиксировались каждые 30 секунд. Гидравлическая система установки собрана из трубок диаметром 3,2 мм, изготовленными 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 -60 - +300 ^{0}С. Датчик подключен к компьютеру через USB-port. Данные записываются один раз в секунду.

Перепад давления на капилляре измеряется при помощи датчика дифференциального давления фирмы Dwyer модель 616-6 производства США. Датчик имеет заводскую калибровку и позволяет измерять перепады давления в диапазоне 0-100 дюймов водяного столба с точностью ±0,25%. Данные через аналогово-цифровой преобразователь фирмы L-card модель E14-440 передаются на компьютер десять раз за одну секунду.

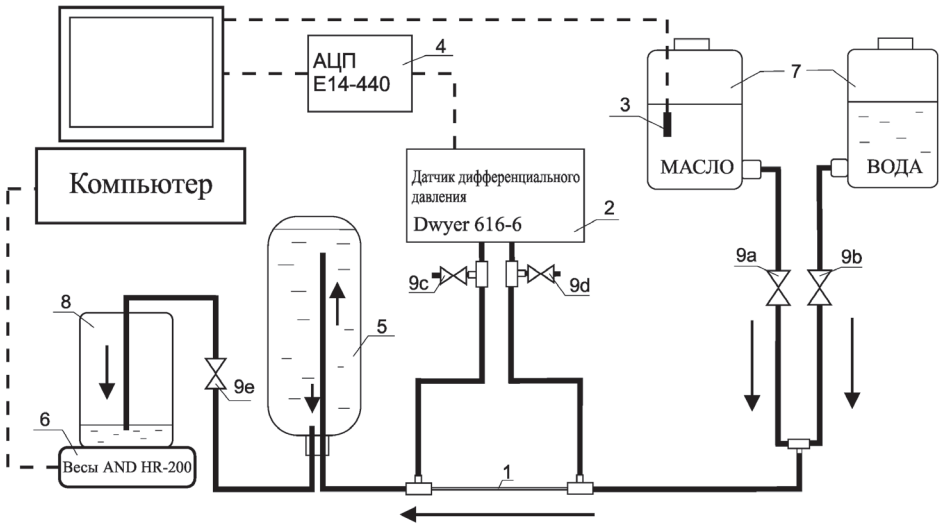

Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — Капилляр; 2 — Дифференциальный датчик давления; 3 — Датчик температуры; 4 — Аналогово-цифровой преобразователь; 5 — Сепаратор; 6 — Электронные весы; 7 — Подающие сосуды; 8 — Принимающий сосуд; 9 (a, b, c, d, e) — Краны-зажимы

Fig. 1. Overview of the apparatus. 1 — Capillary; 2 — Differential pressure sensor; 3 — Temperature sensor; 4 — Analog-to-digital converter; 5 — Separator; 6 — Electronic balance; 7 — Feeding vessels; 8 — Receiving vessel; 9 (a, b, c, d, e) — Clamping cocks

Перед началом эксперимента установка заполняется жидкостью, особое внимание при этом уделяется обеспечению отсутствия пыли, примесей и пузырьков и созданию границы раздела фаз при двухфазном эксперименте. Так как любые перемещения сосудов, а также процесс перекрытия кранов, вызывают незначительное движение жидкости внутри системы необходимо обеспечить состояние покоя системы в течение не менее 3 часов и дождаться стабильности показания весов и датчика давления.

Для автоматизации обработки данных, на языке PYTHON, написана программа, которая считывает полученные текстовые файлы, синхронизует данные измерений по времени, усредняет их, удаляет «шум».

Перепад давления на капилляре рассчитывается по формуле, полученной из паспортных значений датчика давления:

$$\Delta P = (V - V_0) \cdot 3119{,}851, \tag{1}$$

где V — падение напряжения на тестовом резисторе, а V_0 — падение напряжения на тестовом резисторе в отсутствии перепада давления.

Скорость изменения массы (массовый расход) прошедшей через капилляр жидкости определялся следующим образом. Изменение массы от времени ин-

терполировалось кубическими сплайнами на каждом измерительном интервале с использованием стандартных библиотек. Для каждого промежутка времени рассчитывались полиномиальные коэффициенты и записывалось:

$$M(t) = c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t^3. \quad (2)$$

Затем проводилось дифференцирование и вычислялся массовый расход:

$$Q_m = \frac{dM(t)}{dt} = c_1 + 2 \cdot c_2 \cdot t + 3 \cdot c_3 \cdot t^2. \quad (3)$$

Объемный расход рассчитывается как:

$$Q = \frac{Q_m}{\rho}, \quad (4)$$

причем учитывается зависимость плотности флюидов от температуры.

Средняя скорость течения рассчитывается:

$$\bar{v} = \frac{Q}{(\pi \cdot r^2)}, \quad (5)$$

где r — радиус капилляра.

Все полученные данные отправляются в Microsoft Excel, что позволяет производить дальнейшую обработку и представление результатов.

Следуя за [1] для анализа результатов используем безразмерный параметр C*, определенный как:

$$C^* = \frac{(f \cdot Re)_{experimental}}{(f \cdot Re)_{theoretical}}, \quad (6)$$

где f — фактор трения Дарси:

$$f = \frac{2D\Delta P}{\rho L \bar{v}^2}. \quad (7)$$

В этой формуле D — диаметр капилляра, L — длина капилляра, ΔP — перепад давления на капилляре. В формуле (5) применяется число Рейнольдса вычисленное по средней скорости и диаметру капилляра. Подставляя определения, в случае цилиндрического капилляра получим:

$$(f \cdot Re)_{experimental} = \frac{2D^2\Delta P}{\mu L \bar{v}}. \quad (8)$$

В случае цилиндрического капилляра в стационарном случае в эксперименте должно реализовываться течение Пуазейля, для которого $(f \cdot Re)_{theoretical}$=64 и C^* должно равняться 1. Параметр C^* используется исследователями для демонстрации различий реальных течений с теоретически описанными.

Результаты экспериментов и обсуждение

Однофазное течение масла

При перепадах давления (2,46-2,52 кПа) реализуется однофазное течения масла со средней скоростью потока U = 0,073 см/сек и Re = 0,0027.

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

В случае однофазного движения масла зависимость C^* от числа Re, т. е. фактически от средней скорости потока приведена рис. 2(d) и как следует из (7) имеет вид гиперболы. Зависимость C* от времени изображена на рис. 3 для нескольких серий экспериментов. Необходимо отметить, что, несмотря на длительность экспериментов и тщательную их подготовку, реализовавшиеся течения всегда изменяются в зависимости от времени и не являются стационарными. Некие внешние факторы, неконтролируемые в эксперименте приводят к значительным колебаниям измеряемых величин и, как следствие, значительному различию с аналитическим решением.

Рис. 2: a — Зависимость давления от времени; b — Объем прошедшей через капилляр жидкости от времени; c — Зависимость расхода от времени; d — Зависимость нормализованного коэффициента трения от числа Рейнольдса

Fig. 2: a — Dependence between pressure and time; b — Volume of fluid passed through the capillary; c — Dependence between flow rate and time; d — Dependence between normalized friction coefficient and the Reynolds number

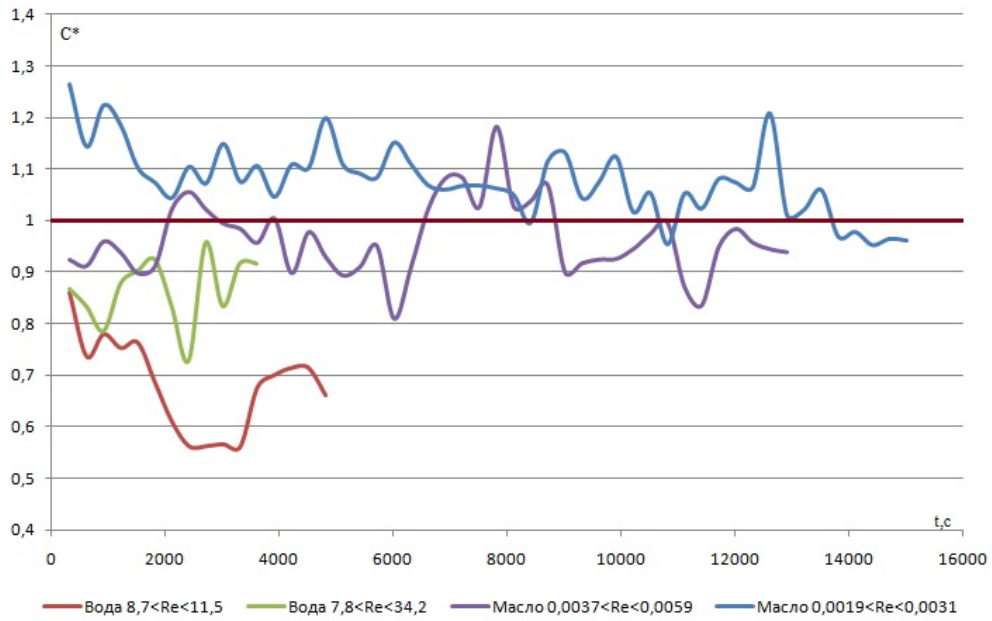

Рис. 3. Зависимость нормализованного коэффициента трения C* от времени эксперимента для разных флюидов

Fig. 3. Dependence between normalized friction factor C* from the experiment time for different fluids

На рис. 4 приведена зависимость C* от числа Рейнольдса для серий экспериментов с однофазным течением масла. Примечательно, что гиперболический вид зависимость сохраняется, при увеличении перепада давления кривые смещаются правее, что соответствует (8), но после того как масло заместило воду данные при меньшем перепаде давления совпадают с данными для однофазного потока при большем перепаде давления. Следовательно, используя (8) может заключить, что эффективный диаметр капилляра увеличивается.

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. 5b), после прохождения половины длины капилляра мениск ускоряется. Форма мениска не изменяется на всем этапе вытеснения (рис. 6). На стенках капилляра остается тонкая масляная пленка. Средняя скорость потока при прохождении первой половины капилляра U = 0,05 см/сек (P = 1,51 кПа), тогда как средняя скорость потока после прохождения середины капилляра U = 0,084 см/сек (P = 1,5кПа). Прохождение первой половины капилляра занимает 400 сек, а второй половины всего 100 сек.

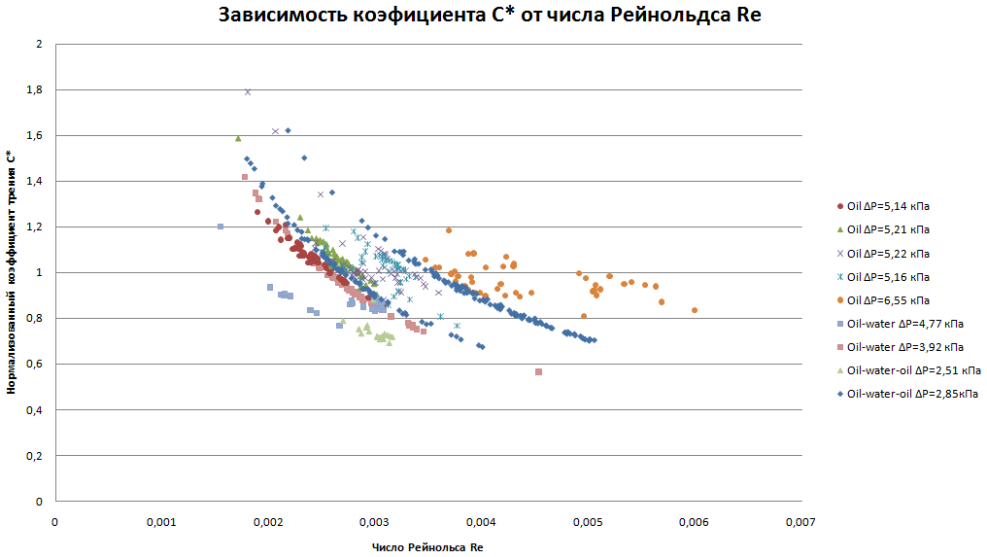

Рис. 4. Зависимость нормализованного коэффициента трения C* от числа Рейнольдса для однофазного течения масла в различных сериях экспериментов

Fig. 4. Dependence between normalized friction factor C* and Reynolds number for single-phase oil flow in various series of experiments

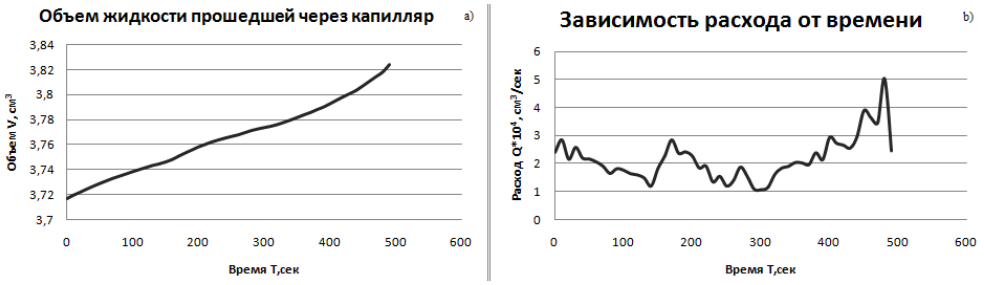

Рис. 5: a — Объем прошедшей через капилляр жидкости от времени; b — Зависимость расхода от времени

Fig. 5: a — Volume of fluid passed through the capillary over time; b — Dependence between flow rate and time

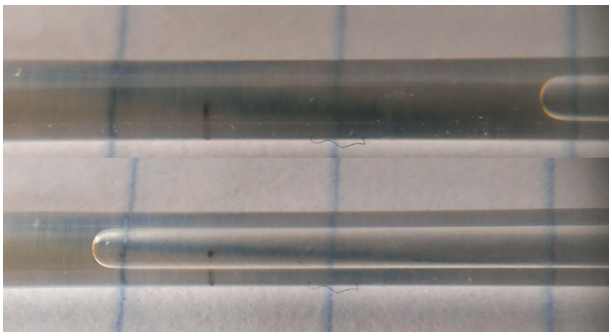

Рис. 6. Вытеснение масла водой

Fig. 6. Displacement of oil by water

Однофазное течение воды в капилляре

На момент выхода мениска из капилляра происходит резкое скачкообразное падение давления. Стабилизация давления занимает около 300 сек. с момента полного вытеснения масла из капилляра (рис. 7a). При однофазном течении воды через капилляр, различимы периодические пульсация давления. В момент выхода мениска из капилляра расход жидкости возрастает в 50 раз (со значения 0,0002 см^3/сек до 0,01см^3/сек). Устанавливается режим с ярко выраженной ритмичной пульсацией (рис. 7b).

Проведено сравнение данных эксперимента с данными для однофазного течения воды в данном капилляре (рис. 7b, d), было 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/сек, Re = 31, а для потока после замещения масла: U = 6,3 см/сек, 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. 8, 9). В ряде случаев при больших амплитудах волн, масляная пленка способна соединяться, образуя масляные «перемычки», которые продолжают движение в потоке воды. Аналогичный процесс происходит и в трубках системы.

Возобновление течения жидкости после его остановки

Для возобновления потока масла, останавливаем течение воды из подающего сосуда. В этот момент происходит падение давления и расхода, поток жидкости существенно замедляется (рис. 10a). В связи с этим, оставшиеся на стенках пленка масла в капилляре и в трубках системы экспериментальной установки собирается в масляные «перемычки». После запуска масла, образуется участок от тройника-соединения подающих сосудов до капилляра, в котором чередуется масло и вода. При прохождении данного участка через капилляр, отсутствует четкое разграничение масляных «перемычек» и воды. Происходит образование множества пузырей воды в масляных промежутках (рис. 11). Помимо одиночных пузырей в потоке, формируются крупные водяные промежутки с регулярной периодической структурой (рис. 12, 13). При прохождении капилляра пузыри воды, независимо от их размера, стараются догнать друг друга в потоке масла, т.к. они не имеют контакта со стенками капилляра. В некоторых случаях, крупные водяные пузыри проталкивают масло вперед, вокруг впереди идущего пузыря (рис. 14). При прохождении данного участка середины капилляра, происходит резкое падение давления, сопровождаемое увеличением скорости потока и расхода жидкости (рис. 10a, b). Данный эффект длится до достижения данного участка конца капилляра. После этого давление резко восстанавливается, а скорость и расход уменьшаются.

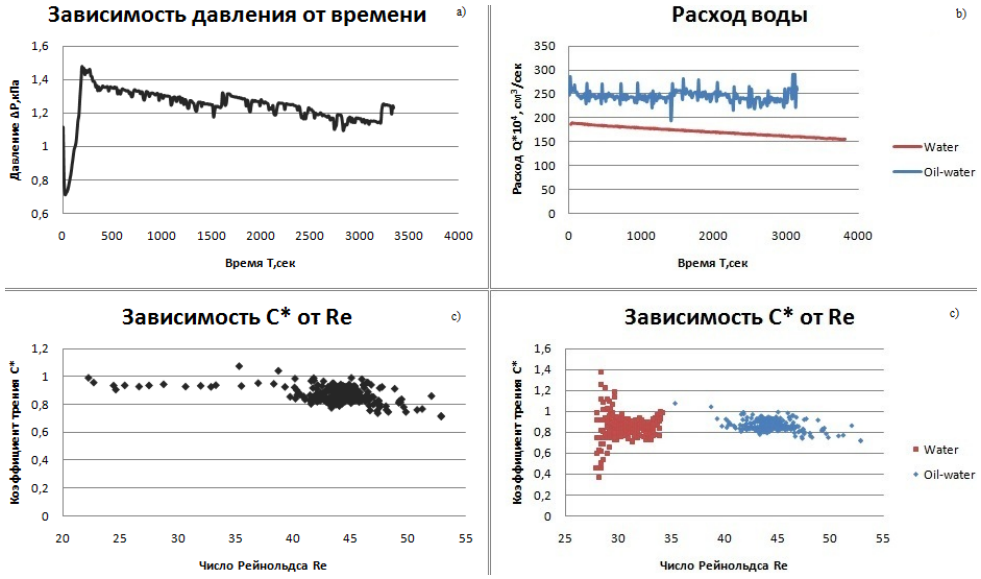

Рис. 7: a — Зависимость давления от времени; b — Сравнение расхода между экспериментом с однофазовыми потоками воды и потоком воды после вытеснения масла; c — Зависимость нормализованного коэффициента трения от числа Рейнольдса; d — Сравнение нормализованного коэффициента трения между экспериментом с однофазовыми потоками воды и потоком воды после вытеснения масла

Fig. 7: a — Dependence between pressure and time; b — Comparison of the flow rate between the experiment with single-phase water flows and with water flow after the oil is displaced; c — Dependence between normalized friction coefficient and Reynolds number; d — Comparison of the normalized friction coefficient between the experiment with single-phase water flows and with water flow after the oil is displaced

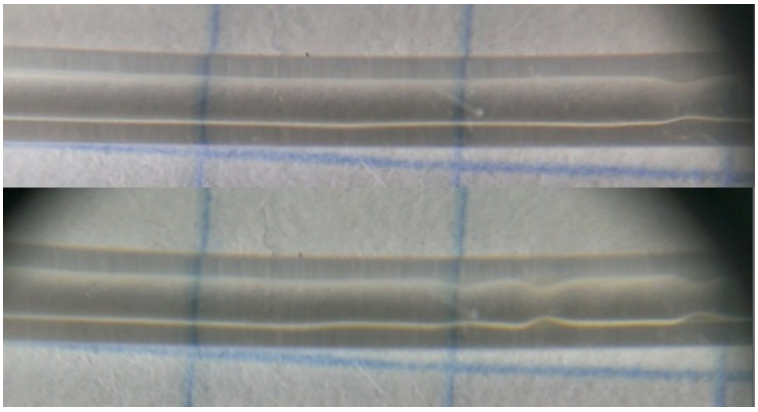

Рис. 8. Образование волн масляной пленки на стенках капилляра

Fig. 8. Formation of oil film waves on the walls of the capillary

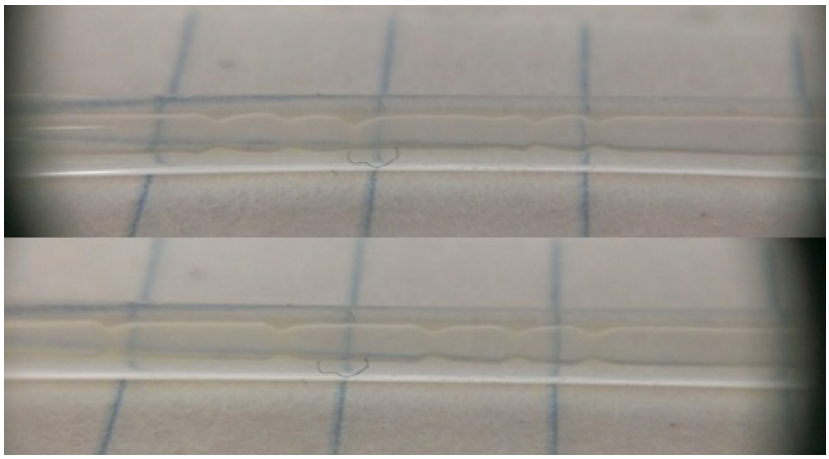

Рис. 9. Волны масляной пленки на стенках капилляра

Fig. 9. Oil film waves on the walls of the capillary

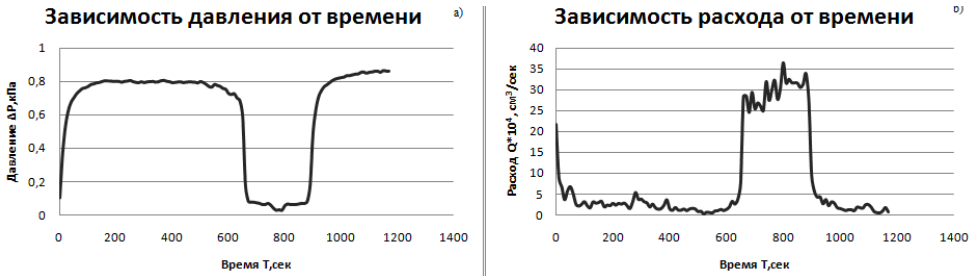

Рис. 10: a — Зависимость давления от времени; b — Зависимость расхода от времени

Fig. 10: a — Dependence between pressure and time; b — Dependence between flow rate and time

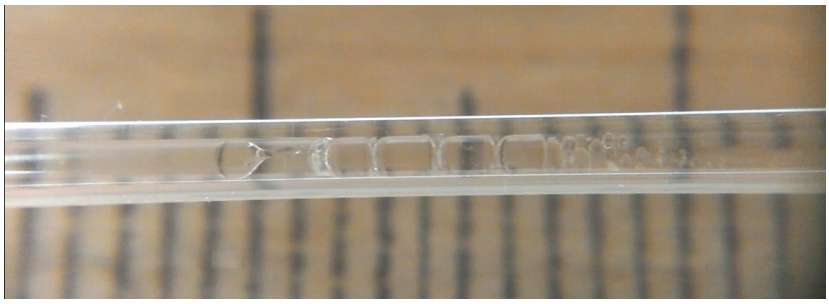

Рис. 11. Пузыри в потоке масла

Fig. 11. Bubbles in the oil flow

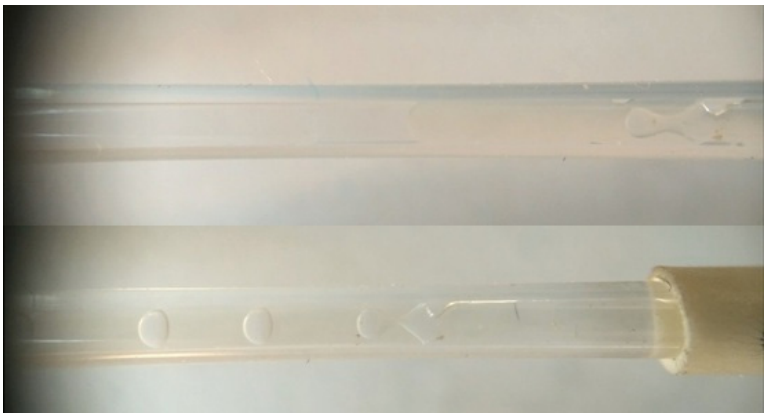

Рис. 12. Формирование водяных пузырей в потоке масла

Fig. 12. Formation of water bubbles in the oil flow

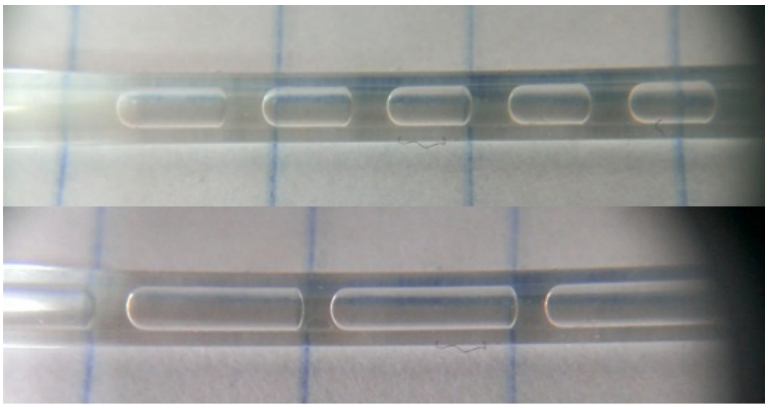

Рис. 13. Пузыри в потоке масла

Fig. 13. Bubbles in the oil flow

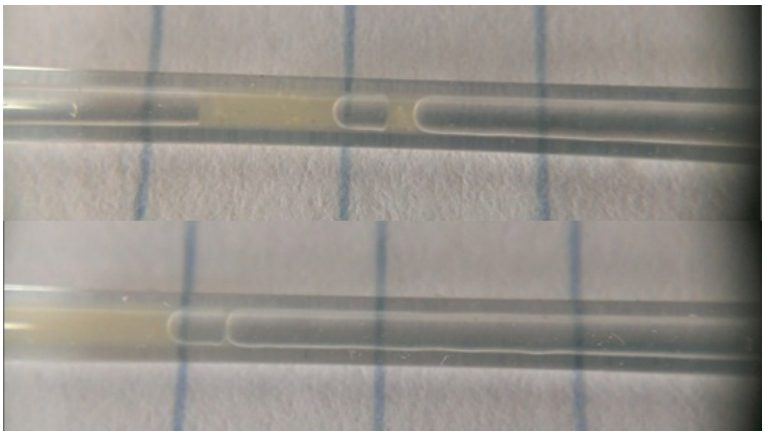

Рис. 14. Продавливание масла вокруг водяного пузыря

Fig. 14. Oil driving around the water bubble

Замещение воды маслом

При входе потока масла в капилляр происходит резкое падение расхода (рис. 15b). Поток масла, проходя через капилляр, вытесняет воду, а также захватывает пузыри, грязь, эмульсию, образовавшиеся на предыдущем этапе (рис. 16). Объединяясь масляной пленкой на стенках капилляра, формируется сплошной поток, полностью заполняющий капилляр. Внутри масляного потока пузыри и частицы эмульсионной пленки, успевшей сформироваться на участках соединения масла с водой, стремятся к мениску, что приводит к его деформации. При этом пузыри не просто прилипают к мениску на границе раздела фаз, а меняют положении относительно друг друга. Тем самым, каждый пузырь старается обогнать впереди идущий (рис. 17). Средний перепад давления на данном участке P = 0,86 кПа, а средняя скорость U = 0,012 см/сек, Re = 0,00042.

Однофазное течение масла в капилляре

Реализуется однофазное течение масла, содержащее микроскопические (еле заметные на видео) пузыри. Сравнение значения нормализованного коэффициента трения со значениями серий экспериментов по однофазному потоку масла (рис. 4) показывает, что масло полностью вытесняет воду из капилляра при обратном замещении.

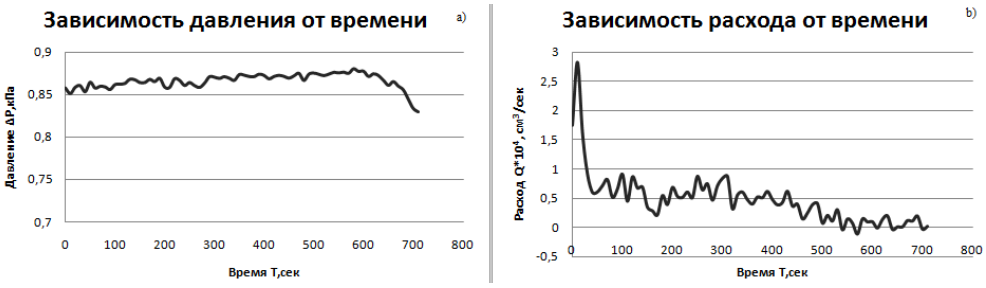

Рис. 15: a — Зависимость давления от времени; b — Зависимость расхода от времени

Fig. 15: a — Dependence between pressure and time; b — Dependence between flow rate and time

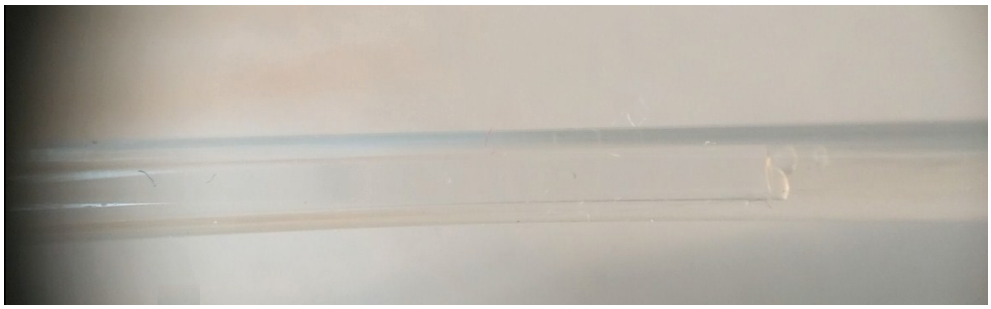

Рис. 16. Пузыри собравшиеся на границе раздела фаз при вытеснении воды маслом

Fig. 16. Bubbles assembled on the phase interface boundary when the water was displaced by oil

Средняя скорость U = 0,015 см/сек., Re = 0,0005 при перепадах давления P = 0,76-0,87 кПа

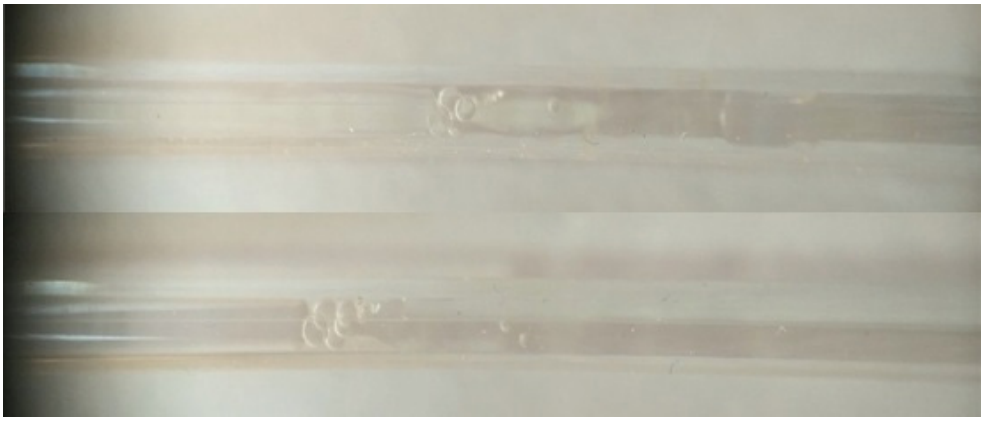

Рис. 17. Водяные пузыри, двигаясь в потоке масла у границы раздела фаз, меняют свое положение относительно друг друга

Fig. 17. Water bubbles, moving in the oil flow near the phase interface, change their location relative to each other

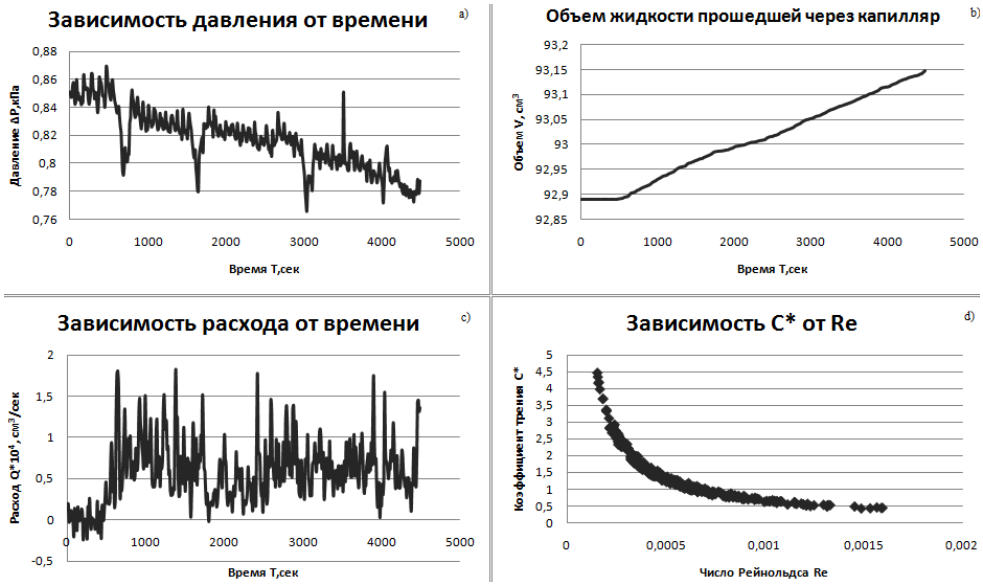

Рис. 18: a — Зависимость давления от времени; b — Объем прошедшей через капилляр жидкости от времени; c — Зависимость расхода от времени; d — Зависимость нормализованного коэффициента трения от числа Рейнольдса

Fig. 18: a — Dependence between pressure and time; b — Volume of fluid passed through the capillary; c — Dependence between flow rate and time; d — Dependence between normalized friction coefficient and the Reynolds number

Заключение

Экспериментально исследовано одно и двухфазное течение жидкости в цилиндрическом капилляре особое внимание уделено замещению одной жидкости другой. Показано, что:

1. Течение жидкости через цилиндрический капилляр при постоянном перепаде давления в условиях выполненных экспериментов никогда не является стационарным.
2. Замещение масла водой происходит в поршнеобразном режиме, граница масло-вода сформирована в виде единственного мениска, после прохождения которого на стенках капилляра остается масляная пленка.
3. При вытеснении воды маслом единственной, ровной границы раздела фаз не образуется, в потоке двигаются многочисленные пузыри и эмульсии. Переход в однофазный режим течения происходит постепенно, по мере прохождения через капилляр всех включений второй фазы.
4. Образование и движение масляных и водных пленок на стенках капилляра приводят к увеличению средней скорости течения через него.
5. Масляная пленка, двигающаяся по стенкам капилляра, при уменьшении скорости потока образует масляные перемычки. Режим двухфазного течения из пленочного становится пузырьковым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребров Е. В. Режимы двухфазного течения в микроканалах / Е. В. Ребров // Теоретические основы химической технологи. 2010. Том 44. № 4. С. 371-383.
2. Baomin D. Effect of Surface Roughness on Liquid Friction and Transition Characteristics in Micro- and Mini-Channels / D. Baomin, L. Minxia, M. Yitai // Applied Thermal Engineering. 2014. No 67. Pp. 283-293.
3. Dai Z. Experimental Study of Transient Behaviour of Laminar Flow in Zigzag Semi-Circular Microchannels / Z. Dai, Z. Zheng, D. F. Fletcher, B. S. Haynes // Experimental Thermal and Fluid Science. 2015. Vol. 68. Pp. 644-651. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.07.001
4. Fluid Mechanics Third Edition / edited by F. M. White. McGraw Hill, New York, 2006.
5. Gunther A. Multiphase Flow / A. Gunther, T. Kreutzer // Micro Process Engineering: A Comprehensive Handbook. 2013. Vol. 1. Pp. 1-40.
6. Hartnett J. P. Heat Transfer to Newtonian and non-Newtonian Fluids in Rectangular Ducts / J. P. Hartnett, M. Kostic // Advances in Heat Transfer. 1989. Vol. 19. Pp. 247-356.
7. Papautsky I. A Review of Laminar Single-Phase Flow in Microchannals / I. Papautsky, T. Ameel, A.B. Frazier // ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 2001. Vol. 2. Pp. 3067-3075.
8. Pelevi N. Heat Transfer and Pressure Drop in Microchannels with Random Roughness / N. Pelevi, Th. H. van der Meer // International Journal of Thermal Sciences. 2016. Vol. 99. Pp. 125-135.
9. Sharp K. V. Liquid Flows in Microchannels / K. V. Sharp, R. J. Adrian, J. G. Santiago, J. I. Molho // MEMS: Background and Fundamentals. 2005. Chapter 10. Pp. 1-45.
10. Teng J. T. Fluid Dynamics in Microchannels / J. T. Teng, J. C. Chu, C. Liu, T. Xu, Y. F. Lien, J. H. Cheng, S. Huang, S. Jin, T. Dang, C. Zhang, X. Yu, M. T. Lee, R. Greif; edited by L. H. Juarez // Fluid Dynamics, Computational Modeling and Applications. 2012. Chapter 17. Pp. 403-437. DOI: 10.5772/28336

Artem A. VELIZHANIN[1]
Oleg A. SIMONOV[2]

EXPERIMENTAL STUDY OF TWO-PHASE FLOW IN A CYLINDRICAL CAPILLARY

[1] Postgraduate Student, Earth Cryosphere Institute
of the Siberian Branch of the RAS (Tyumen)
artem.velizhanin@mail.ru

[2] Cand. Sci. (Phys.-Math.), Deputy Director,
Tyumen Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS;
Senior Research Officer, University of Tyumen
s_o_a@rambler.ru

Abstract

The problems of the flows of viscous liquids in capillaries at low Reynolds numbers are relevant in connection with development of nanotechnologies in electronics engineering, medicine, and other fields of human practice. Yet, the results of numerous experimental studies of such currents demonstrate unsatisfactory correlation to their theoretical description. In the presence of the second phase in the flow, the movement becomes complex, which complicates the theoretical model operation.

This work aims at obtaining the quantitative experimental data a) about single-phase flows of water and oil in a cylindrical capillary at low Reynolds numbers and b) about process of replacement of one liquid by another. During the experiments, the authors measured pressure drop and mass of the liquid (which passed through a capillary), as well as took photo and video of fronts movements of replacement in the wide range of Reynolds numbers ($0.002 < Re < 500$).

The authors have established that in a single-phase flow, the movement of a liquid in the conditions of the experiment never is stationary, and its key parameters do not match the theoretically predicted. The reference stages of the flow at replacement of one liquid by another are revealed and described. Oil replacement by water happens in the "piston' mode, the border oil-water has spherical shape, and after its passing on walls of a capillary there is an oil film. Features of behavior of a film at a single-phase flow of water are described. At water replacement

Citation: Velizhanin A. A., Simonov O. A. 2017. "Experimental Study of Two-Phase Flow in a Cylindrical Capillary". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 4, pp. 82-98.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-82-98

© University of Tyumen

by oil the current mode with unambiguously expressed border is not implemented, in a flow numerous drops and crossing points are observed. It is noted that the existence of an oil film on the surface of a capillary leads to an increase in the rate of flow passing through it.

Keywords

Microfluidics, single-phase flow, two-phase flow, cylindrical capillary, oil film, non-stationary flow, meniscus.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-4-82-98

REFERENCES

1. Rebrov E. V. 2010. "Rezhimi dvuhfaznogo techeniya v mikrokanalah" [The Modes of a Two-Phase Flow in Microchannels]. Teoreticheskie osnovi himicheskoi tehnologii, vol. 44, no 4, pp. 372-383.
2. Baomin D., Minxia L., Yitai M. 2014. "Effect of Surface Roughness on Liquid Friction and Transition Characteristics in Micro- and Mini-Channels". Applied Thermal Engineering, no 67, pp. 283-293.
3. Dai Z., Zheng Z., Fletcher D.F., Haynes B.S. 2015. "Experimental Study of Transient Behaviour of Laminar Flow in Zigzag Semi-circular Microchannels". Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 68, pp. 644-651. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.07.001
4. F. M. White (ed.). 2006. Fluid Mechanics. 3rd edition. New York: McGraw Hill.
5. Gunther A., Kreutzer T. M. 2013. "Multiphase Flow". In: Micro Process Engineering: A Comprehensive Handbook, vol. 1, pp. 1-40.
6. Hartnett J. P., Kostic M. 1989. "Heat Transfer to Newtonian and Non-Newtonian Fluids in Rectangular Ducts". Advances in Heat Transfer, vol. 19, pp. 247-356. DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70214-4
7. Papautsky I., Ameel T., Frazier A.B. 2001. "A Review of Laminar Single-Phase Flow in Microchannals". ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, vol. 2, pp. 3067-3075.
8. Pelevi N., Th.H. van der Meer. 2016. "Heat Transfer and Pressure Drop in Microchannels with Random Roughness". International Journal of Thermal Sciences, vol. 99, pp. 125-135. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2015.08.012
9. Sharp K. V., Adrian R. J., Santiago J. G., Molho J. I. 2005. "Liquid Flows in Microchannels". MEMS: Background and Fundamentals, ch. 10, pp. 1-45.
10. Teng J. T., Chu J. C., Liu C., Xu T., Lien Y. F., Cheng J. H., Huang S., Jin S., Dang T., Zhang C., Yu X., Lee M. T., Greif R.; L. H. Juarez (eds.). 2012. "Fluid Dynamics in Microchannels". Fluid Dynamics, Computational Modeling and Applications, chapter 17, pp. 403-437. DOI: 10.5772/28336