

УДК 621.319

Н. М. Богослав, ассистент (БГТУ);
Д. А. Гринюк, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
И. О. Оробей, кандидат технических наук, доцент (БГТУ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КРУГОВОЙ ПРОПИТКИ

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований динамики круговой пропитки тестовой бумаги различными типами жидких сред. При проведении опытов было использовано устройство, которое по динамике изменения емкости конденсатора позволяет определять время капиллярного впитывания тестовой бумагой. Особенностью данного прибора является непрерывный контроль за движением границы раздела фаз жидкое/твердое. На основании полученных экспериментальных данных была проведена аппроксимация и определены ряды модельных зависимостей. Проведенный анализ выявил основные внешние факторы, которые оказывают влияние на ход протекания пропитки. Результаты данного исследования могут быть использованы для повышения точности оценки физико-химических характеристик поверхности раздела фаз и оптимизации ряда технологических процессов.

In the article the results of experimental research of the dynamics of circular impregnation of test paper by different types of liquid medium are considered. The device which is based on detection of the capillary suction time of test paper by means of gauging the dynamics of capacitance change, was used during making the experiments. A main feature of this device is continuous inspection of movement of the interface liquid/solid. On the basis of the obtained experimental data was performed approximation and defined series of model dependence. The analysis revealed the major external factors that have an impact on the course of the flow capillary suction. The results of this research can be used to improve the accuracy of evaluation of physical and chemical characteristics of the interface and optimization of technological processes.

Введение. Процесс смачивания определяется гидрофильным (гидрофобным) взаимодействием жидкой и твердой фаз. От эффективности взаимодействия фаз зависит ход протекания процессов, в которых твердая фаза имеет развитую поверхность. В частности, угол смачивания во многом определяет протекание фильтрации, флотации, коагуляции, нанесение покрытий, пропитку и т. д. Построение эффективных систем управления такими процессами невозможно без оценки физико-химических характеристик поверхности раздела фаз и, следовательно, без аппаратуры для определения этих характеристик. Имеется многолетний опыт использования устройств Capillary Suction Time (CST) [1] и подобной разработки БГТУ [2] для оптимизации процессов очистки сточных вод и нефтедобычи, в частности, при механическом обезвоживании плотных глинистых суспензий и осадков промывных фильтров при очистке воды; обработке активных илов; для установки параметров работы фильтров и центрифуг; при повышении производительности сепарации механического преректификационного процесса; при определении подходящего электролита и полимера для снижения проницаемости вокруг ствола скважины нефтедобычи и множество других применений при обработке минералов

в угольной и горнодобывающей промышленности, при производстве бумаги, сахара, в металлургии. Однако приборы CST [1, 2] имеют существенные недостатки, обусловленные дискретным принципом работы. Пропитка материалов природными и технологическими дисперсными средами часто происходит неравномерно ввиду нелинейных свойств. Целью исследований являлось экспериментальное исследование устройства с непрерывным наблюдением за движением границы раздела фаз жидкое/твердое.

Основная часть. Жидкости, которые пропитывают бумагу, изменяют общую диэлектрическую проницаемость многофазной системы. Прибор, который был использован при проведении опытов, состоит из двух частей: различных вариантов первичного преобразователя и универсального электронного блока измерения и индикации. Выбор конструкции определялся областью применения прибора. Для исследования осадков, которые характеризуются малой скоростью пропитки, использовалась конструкция, приведенная на рис. 1. Два круглых образца фильтровальной бумаги помещаются между обкладками конденсатора 1 и 2. Медные металлические поверхности отделены от бумаги тонким слоем пластичного диэлектрика. Осадок помещался в емкость 3.

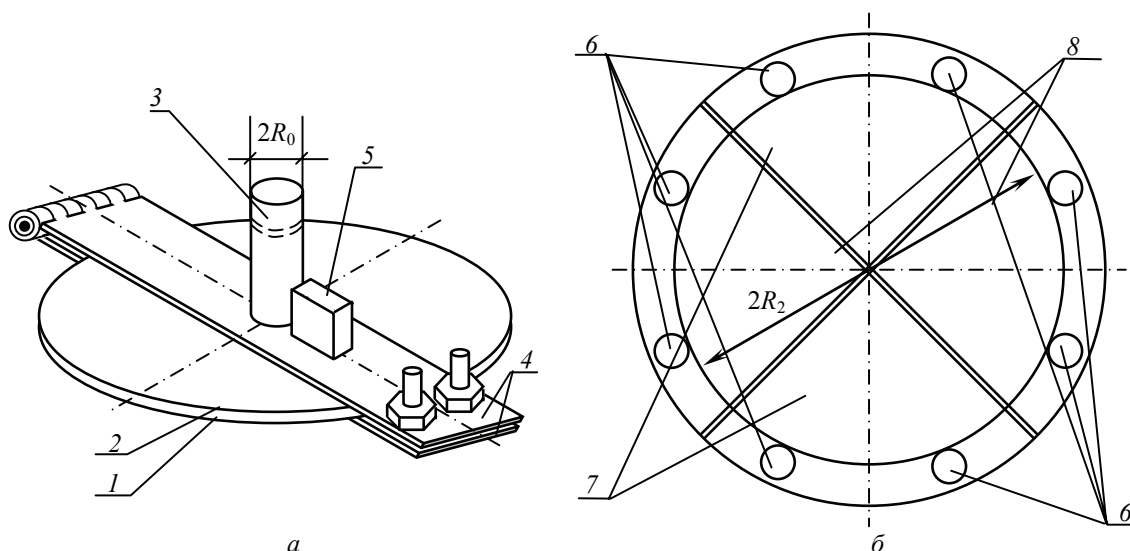


Рис. 1. Конструкция первичного преобразователя:

- а* – аксонометрия первичного преобразователя; *б* – вид нижней пластины нижнего конденсатора для оценки различий движения по горизонтали: 1 – нижняя обкладка нижнего конденсатора; 2 – верхняя обкладка нижнего конденсатора; 3 – емкость для жидкости или осадков; 4 – металлические пластины для сжатия нижнего конденсатора; 5 – датчик перепада давления; 6 – контактные площадки для определения достижения жидкостью крайнего положения по направлениям; 7, 8 – отдельные пары обкладок конденсаторов для определения различий пропитки по направлениям

Соосность и исключение поверхностного течения жидкости обеспечиваются сжатием обкладок пластинами 4, на которых закрепляется датчик перепада давления 5. На нижней поверхности располагаются контактные площадки 6 для определения достижения жидкостью границ измерительного конденсатора. Самая нижняя пластина конденсатора 1 имеет четыре изолированных сектора 7 и 8 (рис. 1, б), которые позволяют сравнить скорость распространения по направлениям. При исследовании свойств бумаги и чистых жидкостей достаточно использовать один емкостной преобразователь. Однако в случае необходимости получения дополнительной информации о водопроницаемости образующих осадков, разделение которых происходит непосредственно в процессе измерения, необходимо в конструкции прибора предусматривать установку верхнего дополнительного конденсатора.

Сформированный в первичном преобразователе сигнал о величине емкости C_A передается на универсальный электронный блок измерения и индикации. Блок состоит из резонансного контура, который позволяет генерировать импульсы, частота которых изменяется по мере увеличения параметров исследуемой емкости. Данное изменение регистрируется прямым методом с помощью контроллера. Программное обеспечение для устройства разработано на языке СИ. Результаты измерений и служебная информация отображаются на индикаторе.

Переключение режимов и просмотр истории проведенных измерений осуществляется с помощью клавиатуры. В режиме Real-Time по протоколу Modbus RTU возможно передавать число импульсов за установленное время.

Для технологических нужд программа прибора может выдавать время капиллярного впитывания между фиксированными геометрическими координатами и коэффициенты аппроксимации данных с помощью модельных уравнений. Результаты кинетики пропитки бумаги в процессе каждого измерения подвергаются численной обработке и проверяются на соответствие одной из моделей движения фронта. После окончания пропитки или снижения скорости распространения фронта намочения до определенного значения на экран выводится номер модели и ее параметры. Для пересчета измеряемой емкости C_A в геометрический параметр пропитки бумаги использовалась формула

$$x = \sqrt{R_1^2 + (R_2^2 - R_1^2) \frac{C_A - C_0}{C_{end} - C_0}} - R_1, \quad (1)$$

где R_1 – начальный радиус пропитки, R_2 – максимальный радиус кюветы, C_A – текущая емкость измерительного конденсатора, C_0 – начальная емкость измерительного конденсатора, C_{end} – конечная емкость конденсатора.

Начальное значение емкости C_0 определяется как среднее значение 10 измерений перед помещением пробы в прибор. Конечное значе-

ние емкости C_{end} определяется по срабатыванию контактных площадок b (рис. 1) при исследовании жидкостей с большими скоростями пропитки или по анализу тренда изменения емкости, если жидкость не достигает контактных площадок. Анализ трендов позволяет определять и начальный момент пропитки.

В интерпретации результатов измерений существуют некоторые трудности, обусловленные разнообразием и сложностью структуры реальных пористых материалов. Для описания процесса пропитки используют различные модели пористого тела, приближенные к структуре порового пространства реальных объектов. При проведении данных экспериментов была использована модель, которая была получена из уравнения динамики:

$$f_1 + f_2 + f_3 = \frac{d}{dt}(m\dot{x}), \quad (2)$$

где f_1 – вклад силы поверхностного натяжения:

$$f_1 = 4\pi(\sigma_{12} - \sigma_{13})(x + R_0)h \frac{\gamma}{r}; \quad (3)$$

f_2 – вклад силы, которая создается давлением столба жидкости в открытой части кюветы:

$$f_2 = \rho g R_0 h \gamma \left(z_0 - \frac{(x + R_0)^2}{R_0^2} h \gamma \right); \quad (4)$$

f_3 – вклад пуазейлевского сопротивления течению жидкости по капиллярам:

$$f_3 = -8\pi\eta\dot{x}\frac{2hR_0\gamma}{r^2}, \quad (5)$$

где m – масса жидкости в капиллярах; σ_{12} – межфазное натяжение «твердое тело – газ»; σ_{13} – межфазное натяжение «твердое тело – жидкость»; x – координата распространения фронта; R_0 – радиус кюветы; h – толщина тестовой бумаги; γ – пористость тестовой бумаги; r – радиус капилляра; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; z_0 – начальный уровень среды в кювете.

Для обеспечения повторяемости результатов были использованы модельные растворы при термостабильных условиях. Для оптимизации конструкции и программного обеспечения прибора были использованы среды: вода; промышленно выпускаемый «Оксидат торфа плюс» и «Оксидат торфа плюс», разбавленный в соотношении 1:10; суспензии глины с количеством сухого вещества 5, 10, 15 и 20 г/литр и подсолнечное масло.

Информация об использованных средах.

1. Глина Веселовская марки «Керамик-Веско» (Украина). По минералогическому составу это каолинито-гидрослюдистые глины

с примесью кварца, с включениями рутила, анатаза, ильменита, циркона и других; огнеупорная, светложгущаяся, спекающаяся, низкотемпературного спекания. Интервал спекания составляет 500–600°C. Химический состав: SiO_2 – 52,6%, Al_2O_3 – 32,85%; TiO_2 – 1,2%, Fe_2O_3 – 0,79%; CaO – 1,24%, MgO – 0,17%, Na_2O – 0,30%, K_2O – 0,44%. Потери при прокаливании 10,41%.

2. Экстракт для ванн «Оксидат торфа плюс» – 5% раствор для ванн и аппликаций. Состав: «Оксидат торфа плюс», метилизотиазолинон, экстракт хвои, отдушка косметическая, лимонная кислота. Химический состав: 16 аминокислот, из них 9 незаменимых, – 1,2%, гуминовые кислоты – 68%, фульвовые кислоты – 15%, белковые вещества – 9,3–11,8%, моно- и полисахариды – 6–8,2%, макро- и микроэлементы (Fe, I, Co, Cu, Ca, Mg, K, Mn, Na, S, Se, P, Zn и др.) – 1,1%. В «Оксидате торфа плюс» могут присутствовать нафтенновые кислоты, фенолы, хиноны, производные витаминны В3, В4, В6, D, PP.

3. Масло растительное – масло «Золотая Семечка» подсолнечное рафинированное дезодорированное по ГОСТ РФ 52465-2005.

В качестве тестовой бумаги во всех опытах между обкладками конденсатора помещалась фильтровальная бумага с радиусом пор 3–5 микронов. Для исключения влияния температуры и влажности на результаты измерений опыты проводились при одинаковых параметрах окружающей среды. Проба помещалась в открытую кювету и, следовательно, имела сообщение с атмосферой на протяжении всего эксперимента. Перед началом опыта проводился контроль горизонтальной установки первичного преобразователя (для исключения неравномерного влияния силы тяжести на границе распространения фронта смачивания).

Результаты измерений аппроксимировались рядом модельных зависимостей:

$$C(t) = k_1 \left(\frac{1 - \exp(-k_2 t)}{k_3} + t \right)^{0,25}; \quad (6)$$

$$C(t) = k_1 \left(\frac{1 - \exp(-k_2 t)}{k_3} + t \right)^{k_4}; \quad (6a)$$

$$C(t) = k_1 \left(1 - \exp(-k_2 t^{0,5}) \right); \quad (7)$$

$$C(t) = k_1 \left(1 - \exp(-k_2 t^{k_3}) \right); \quad (7a)$$

$$C(t) = k_1 \left(t + k_2 \frac{t^{0,25}}{t^{0,25} + 1} \right)^{k_3}; \quad (8)$$

$$C(t) = k_1 \left(t + k_2 \frac{t^{0,25}}{t^{0,25} + k_4} \right)^{k_3}. \quad (8a)$$

Поиск коэффициентов моделей для формул (6а), (7а) и (8а) производился на персональном компьютере, в остальных случаях коэффициенты получались непосредственно в приборе. Результаты изменения емкости и пересчитанной по формуле (1) координаты фронта пропитки для некоторых экспериментов представлены на рис. 2–6 (на графиках представлены не все зафиксированные контроллером точки). Частота точек выбиралась исходя из возможности адекватного одновременного восприятия экспериментальных точек и модельных кривых.

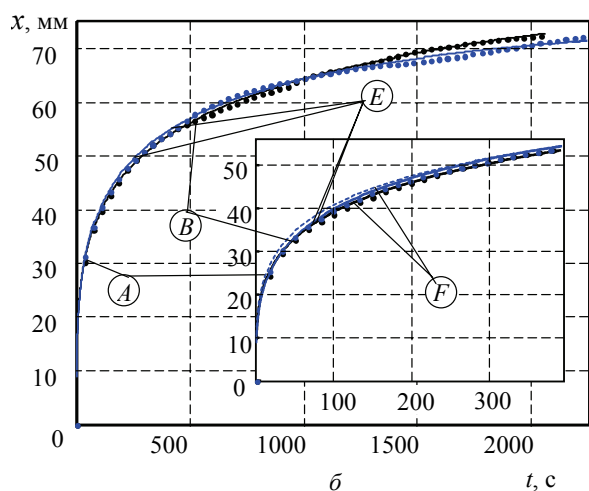
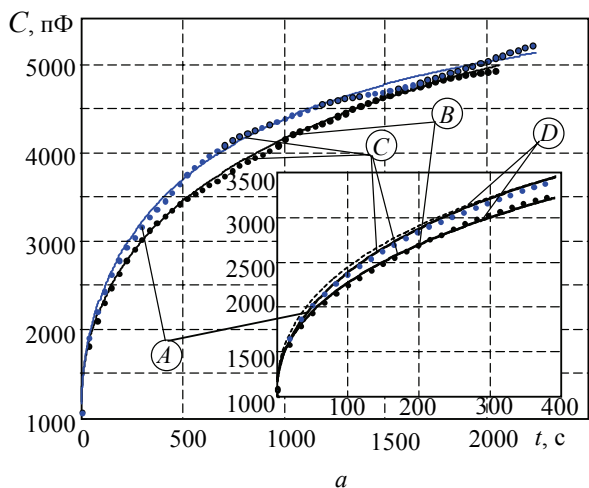


Рис. 2. Изменение емкости (а) и координаты фронта (б) во времени при пропитке фильтровальной бумаги чистой водой при $R_0 = 8,75$ (А) и $12,6$ (В) мм и результат аппроксимации (С) экспериментальных данных уравнением (8) и (D) – уравнением (8а), (E) – уравнением (7), (F) – уравнением (7а)

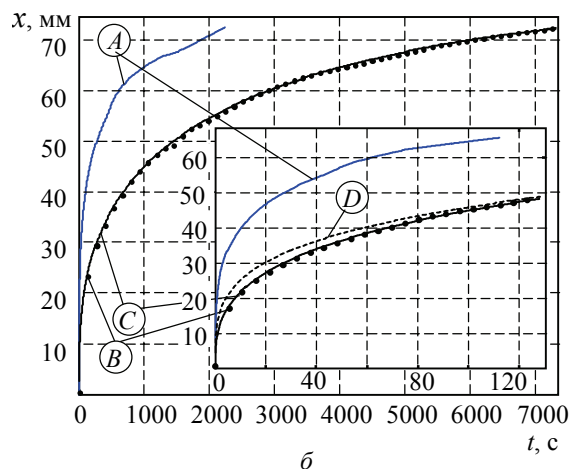
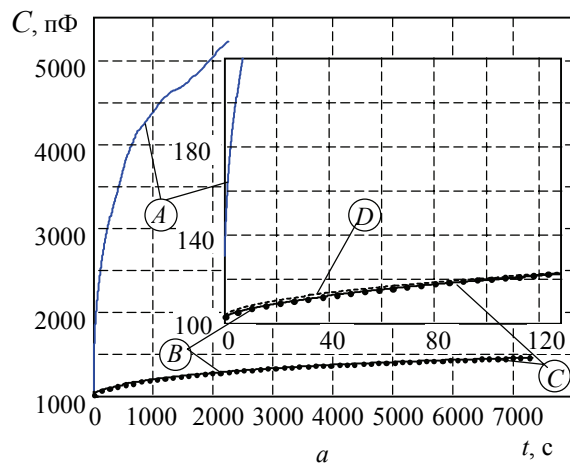


Рис. 3. Изменение емкости (а) и координаты (б) фронта пропитки для чистой воды (А) и растительного масла (В) мм и результат аппроксимации экспериментальных для масла данными уравнением (8) и (D) – уравнением (8а)

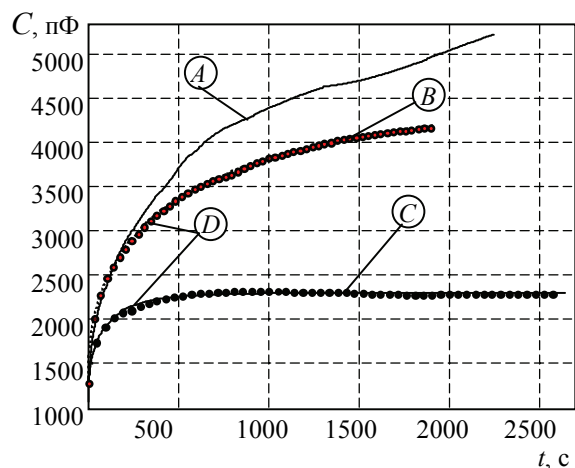


Рис. 4. Изменение емкости фронта пропитки для чистой воды при (А), суспензии «Глина Веселовская» с количеством вещества 5 мг/л (В) и 20 мг/л (С) и результат аппроксимации экспериментальных данных (D) уравнением (8) и (E) – уравнением (8а)

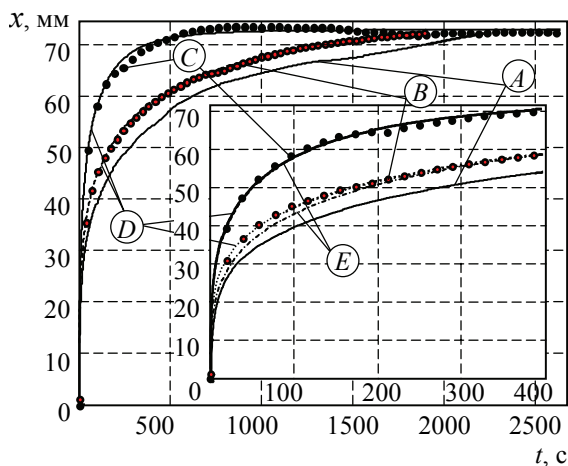


Рис. 5. Изменение координаты фронта пропитки для чистой воды при (A), суспензии «Глина Веселовская» с количеством вещества 5 мг/л (B) и 20 мг/л (C) и результат аппроксимации экспериментальных данных (D) уравнением (8) и (E) – уравнением (8a)

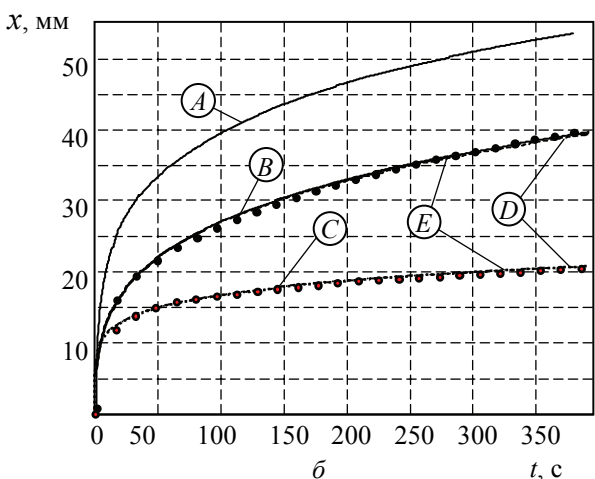
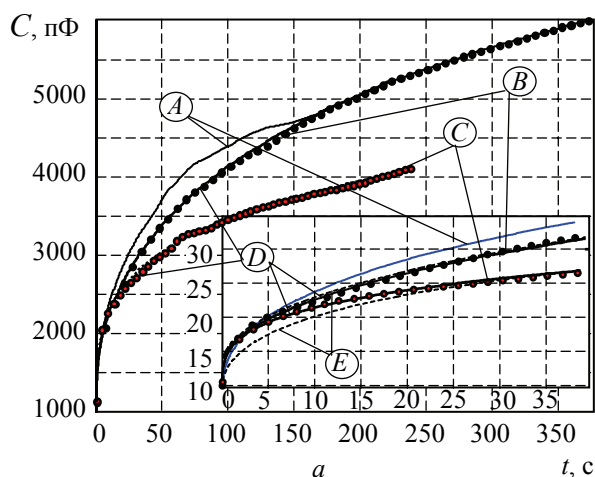


Рис. 6. Изменение емкости (a) и координаты фронта (б) при пропитке чистой водой при (A), «Оксида торфа плюс» (C) и его разбавленный вариант 1:10 (D) и результат аппроксимации экспериментальных данных (D) уравнением (9) и (E) – уравнением (9a)

Эксперименты показали, что геометрические параметры, в частности, начальный радиус пропитки, начальная высота жидкости оказывают влияние на кривые (рис. 2). Следует отметить, что даже по достижении жидкостью границ первичного конденсатора изменение емкости продолжается, т. е. наблюдаются процессы ионного обмена изменения геометрии пор в процессе пропитки. Во всех опытах процесс измерения прекращался при формировании сигнала о достижении фронтом пропитки какой-либо границы на периферии. После этого жидкость удалялась, производились замеры размеров овала и вычислялся эквивалентный радиус для пересчета значений емкости в движение фронта пропитки. Наиболее интересные результаты касаются исследований суспензий глины (рис. 4, 5). В этом случае происходило образование осадка на границе начала движения по порам, но эта вода продвигалась по порам более интенсивно, чем водопроводная. Это связано с процессом дистилляции воды, что видно по величине емкости и изменению угла смачивания. Раствор суспензии «Оксидат торфа плюс» благодаря наличию в растворе частиц с размерами меньшими, чем размер пор бумаги, не достигал границ конденсатора, поэтому после окончания интенсивного изменения емкости опыт прекращался (рис. 6). Максимальное значение диаметров овала пропитки для «Оксидат торфа плюс» были 6,52 см и 4,64 см, а для разбавленной суспензии 9,32 см и 8,07 см соответственно.

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что по мере распространения фронта смачивания фильтровальной бумаги емкость преобразователя (на одну обкладку) изменяется в значительном диапазоне (50–1500 пФ). Также в результате опытов было установлено, что температура окружающей среды, начальный радиус пропитки, начальная высота столба жидкости оказывают существенное влияние на скорость капиллярного впитывания.

Литература

1. CST Equipment [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tritonel.com/>. – Дата доступа: 25.02.2013.
2. Способ определения распространения границы смачивания и краевого угла внутри капилляров пористого материала, устройство и автоматизированная система измерения, его реализующие // И. О. Оробей [и др.]; Патент 1 С1 ВУ, МПК7 G01N13/02, 13/00. №8807 заявл. 17.09.2003; опублик.: 30.03.2005. – С. 16: 7 л. ил. // Афiцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2005. – № 2. – 11 с.

Поступила 01.03.2013