

УДК 621.319

*Н. М. Олиферович, Д. А. Гринюк, И. О. Орбей, И. Г. Сухорукова***ДИНАМИКА РАДИАЛЬНОЙ ПРОПИТКИ МАТЕРИАЛА ДИСПЕРСНОЙ СРЕДОЙ**

Исследованы процессы капиллярного впитывания жидкости материалом. Предложена конструкция устройства, предназначенного для оценки физико-химического состояния материала по динамике его пропитки. С учетом конструкции устройства и особенностей движения жидкости в капиллярной системе исследуемого материала получены дифференциальные уравнения, описывающие динамику его пропитки. Приведены и проанализированы результаты экспериментальных исследований круговой пропитки бумаги различными дисперсными средами. На основе полученных данных построены модельные зависимости, с использованием которых проведена оптимизация конструкции разработанного устройства.

Ключевые слова: смачивание, капиллярное впитывание, дисперсная среда, пористость.

Введение. Изучение смачивания твердых тел жидкостью и растекания жидкости на поверхности такого тела необходимо для интенсификации технологических процессов, реализуемых с использованием высокодисперсных систем, а также для контроля этих процессов [1–3]. Построение эффективных систем управления указанными процессами невозможно без оценки физико-химических характеристик поверхности раздела жидкой и твердой фаз, а также без наличия аппаратуры для определения этих характеристик. Имеется многолетний опыт использования устройств Capillary Suction Time (CST) [4] и аналогичной аппаратуры, разработанной в Белорусском государственном технологическом университете [5] для оптимизации процессов очистки сточных вод. Однако принцип работы этих приборов дискретный, а пропитка материалов природными и технологическими дисперсными средами часто происходит неравномерно из-за нелинейности их свойств. По этой причине, а также по причине разброса параметров различных сред актуальной представляется разработка бесконтактного метода измерения фронта распространения жидкости в материале.

Конструкция и принцип работы прибора для непрерывного измерения характеристик смачивания материала. Прибор состоит из первичного преобразователя, схема которого показана на рис. 1, и универсального электронного блока измерения и индикации. В экспериментах два круглых образца фильтровальной бумаги помещались между обкладками 1 и 2 нижнего конденсатора и обкладками 3 верхнего конденсатора. Исследуемая дисперсная среда или жидкость помещалась в емкость 4. Перед началом измерения бумага верхнего конденсатора разрывалась. На нижней пластине нижнего конденсатора находятся контактные площадки 8 для определения достижения жидкостью границ конденсатора. Эта пластина имеет четыре изолированных сектора 9 и 10, которые позволяют сравнивать скорость движения границы раздела (фронта) жидкость–воздух в различных направлениях. При исследовании пропитки бумаги чистой водой использовался преобразователь без верхнего конденсатора 3, поскольку этот конденсатор необходим для получения дополнительных сведений о водопроницаемости осадка, образующегося в процессе пропитки материала дисперсной средой.

По мере движения фронта смачивания в бумаге между обкладками измерительного конденсатора его емкость C увеличивается. Пересчет этой емкости в геометрический параметр пропитки материала x осуществлялся по формуле

$$x = \sqrt{R_0^2 + (R_f^2 - R_0^2) \frac{C - C_0}{C_f - C_0}} - R_0. \quad (1)$$

Белорусский государственный технологический университет. 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; э-почта: hore_rez@mail.ru. Поступила 12.12.2017.

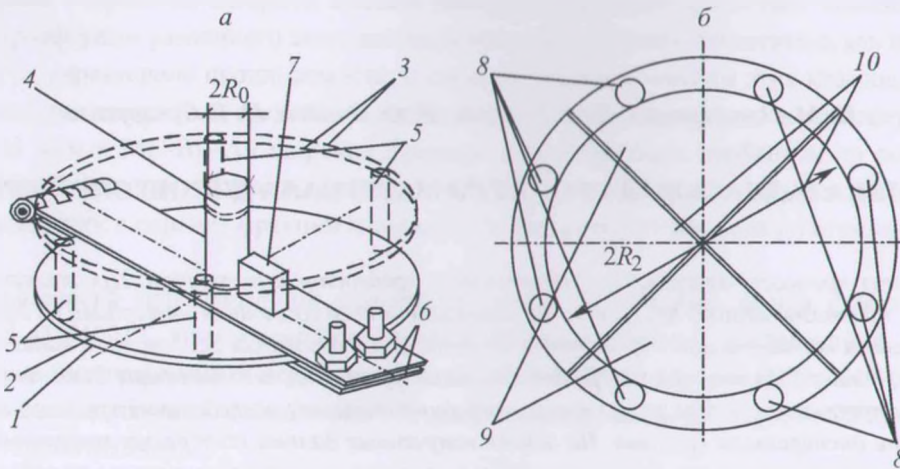


Рис. 1. Аксонометрия первичного преобразователя (а) и вид нижней пластины его нижнего конденсатора (б): 1, 2 — нижняя и верхняя пластины нижнего конденсатора; 3 — пара пластин верхнего конденсатора; 4 — емкость для жидкости; 5 — штанги жесткого крепления верхнего и нижнего конденсаторов; 6 — металлические пластины для сжатия нижнего конденсатора; 7 — датчик перепада давления; 8 — контактные площадки; 9, 10 — отдельные пары обкладок конденсаторов

Начальная емкость измерительного конденсатора C_0 определялась в начале каждого эксперимента как среднее значение 10 измерений. Конечная емкость этого конденсатора C_f определялась по срабатыванию его контактных площадок 8 при исследовании жидкостей с большими скоростями пропитки или, если жидкость не достигала контактных площадок конденсатора, по тренду изменения его емкости, анализ которого позволяет определить начальный момент пропитки материала. Сформированный в первичном преобразователе сигнал о величине емкости C передается на универсальный электронный блок измерения и индикации, построенный на базе микроконтроллера. Время капиллярного впитывания между фиксированными геометрическими координатами и коэффициенты аппроксимации данных могут быть определены для технологических нужд с помощью модельных уравнений. Результаты измерения кинетики пропитки бумаги в процессе каждого измерения подвергались численной обработке и подгонялись под модель свободного движения жидкости в материале, модель движения жидкости в материале с закупоркой его капилляров, или модель аномального движения жидкости в материале. После окончания пропитки бумаги или снижения скорости движения фронта ее пропитки до определенного значения на экран измерительного преобразователя выводился номер модели и ее параметры. Предварительные данные процесса можно получить и по запросу. Пересчет емкости измерительного конденсатора C в геометрический параметр пропитки бумаги осуществляется по формуле (1). Круговая форма измерительного конденсатора увеличивает фронтальную границу раздела фаз, что приводит к усилению влияния поверхностных сил на динамику движения жидкости в материале. Гидростатическое давление, действующее на верхний конденсатор, является незначительным, поэтому движение границы раздела в материале между его обкладками будет определяться в основном капиллярным давлением и его динамической составляющей. Для нижнего конденсатора гидростатическое давление является значительным [6–8]. В случае использования закрытой кюветы с жидкостью отрицательное давление может существенно тормозить движение жидкости по капиллярам материала, а в некоторых случаях может произойти остановка этого движения. Датчик перепада давления 7 обеспечивает устойчивость работы системы. Высокая скорость изменения перепада давления в емкости 4 сигнализирует о некорректной сборке первичного преобразователя, т. е. о поверхностном течении жидкости. Этот датчик также позволяет производить коррекцию результатов измерения на толщину материала с учетом изменения свойств многофазной системы вследствие контакта жидкой и твердой фаз.

Модель динамики радиального впитывания. Смачивание бумаги может происходить в кинетическом, инерционном или вязкостном режиме. Из-за малости размеров капилляров в бумаге проявление кинетического режима ее пропитки кратковременно. Структура измерительного прибора предполагает радиальное движение жидкости по порам бумаги под действием силы тяжести столба жидкости в емкости 4 и сил поверхностного натяжения. Бумага, которая помещалась между пластинами измерительного конденсатора, имела толщину h и содержала капилляры радиусом r и высотой r в количестве n на одном метре ее длины, зависящем от пористости бумаги γ . Сила поверхностного натяжения одного капилляра определяется как [2]

$$f_{1,r} = 2\pi r(\sigma_{12} - \sigma_{13}), \quad (2)$$

где σ_{12} и σ_{13} — поверхностные натяжения на межфазных границах твердое тело–газ и твердое тело–жидкость соответственно. Сила поверхностного натяжения бумаги зависит от координаты фронта ее пропитки x и определяется количеством капилляров n , приходящимся на периметр этого фронта:

$$f_1 = 2\pi r(\sigma_{12} - \sigma_{13})2\pi(x + R_0)n h n. \quad (3)$$

Параметр n связан с пористостью материала, определяемой как $\gamma = V_{nn}/V_0$, где $V_{nn} = xyzn^2\pi r^2$ — объем порового пространства материала на фронте распространения жидкости в нем и $V_0 = xyz$ — начальный объем образца материала, смачиваемого жидкостью. С учетом этих определений выражение для пористости материала можно представить в виде $\gamma = n^2\pi r^2$. Тогда

$$n = 1/r\sqrt{\gamma/\pi}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получаем

$$f_1 = A(x + R_0), \quad A = \frac{4\pi h\gamma(\sigma_{12} - \sigma_{13})}{r}. \quad (5)$$

Сила тяжести определяет давление жидкости $\rho g z$ в емкости 4 (рис. 2), действующее на кольцо бумаги радиусом R_0 и высотой h с числом капилляров $n_1 = nR_0nh$. Суммарная площадь этих капилляров равна $S = n_1\pi r^2 = R_0h\gamma$. Тогда сила, с которой столб жидкости действует на участок бумаги площадью S , будет равна

$$f_2 = PS = \rho g z R_0 h. \quad (6)$$

При достижении фронтом движения жидкости координаты x высота жидкости в цилиндре уменьшится на Δz . Исходя из закона сохранения массы, запишем

$$\pi(x + R_0)^2 h \gamma - \pi R_0^2 h \gamma = \pi R^2 \Delta z. \quad (7)$$

Выразив Δz из уравнения (7), получим

$$z = z_0 - h\gamma \frac{x^2 + 2xR_0}{R^2}. \quad (8)$$

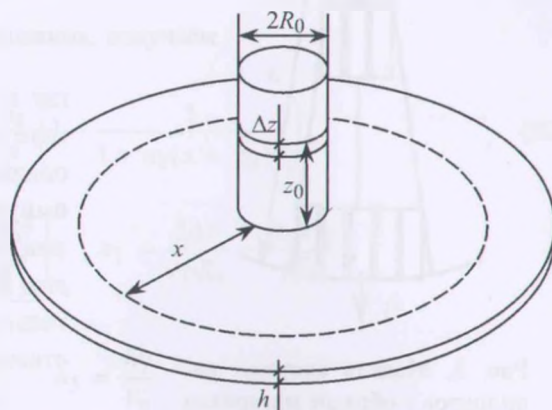


Рис. 2. Модель движения фронта смачивания образца материала

Окончательно выражение для силы тяжести, действующей на бумагу, примет вид

$$f_2 = G \left(z_0 - h\gamma \frac{R_0^2}{R^2} - \frac{x^2 + 2xR_0}{R^2} h\gamma \right), \quad G = \rho gh\gamma R_0. \quad (9)$$

При расчете динамики впитывания жидкости из емкости 4 бумагой для учета движения жидкости в капиллярах бумаги принималось условие о квазистационарном течении жидкости на больших временах с использованием формулы Пуазейля:

$$f_3 = -8\pi\eta\dot{x}. \quad (10)$$

Система капилляров в бумаге строилась по схеме, приведенной на рис. 3. Предполагалось, что все капилляры одинаковые и имеют длину x_0 и сечение площадью сечения S_r . В точке x находится $n_2 = x/x_0$ капилляров. Такое же количество капилляров находится в их прифронтном ряду. В соответствии с законом сохранения массы запишем $n_2 S_r \dot{x}_1 = S_r \dot{x}_n$. Скорость жидкости в точке \dot{x}_1 в n_2 раз меньше скорости жидкости в точке \dot{x}_n . В то же время, исходя из формулы Пуазейля для одиночного капилляра, имеем

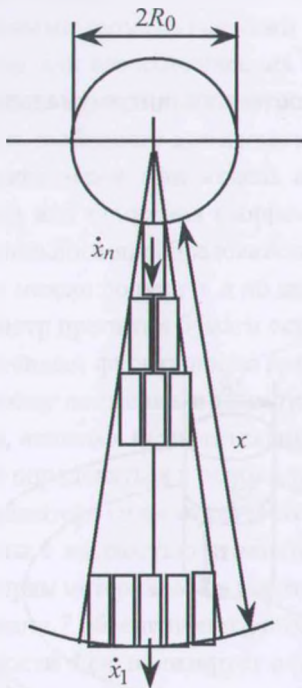
$$f_{3,r} = -8\pi\eta x_0 \dot{x}. \quad (11)$$

Согласно выбранной модели пористой структуры материала (рис. 3), вклад начального ряда капилляров в вязкое течение жидкости в бумаге будет равен сумме вкладов капилляров на фронте этого течения:

$$f_{3,r,n} = -8\pi\eta x_0 \dot{x}_n = -8\pi\eta x_0 n_2 \dot{x}, \quad f_{3,r,1} = \sum_n -8\pi\eta x_0 \dot{x} = -8\pi\eta x_0 n_2 \dot{x}.$$

Просуммировав вклады каждого ряда капилляров в силу пуазейлевского сопротивления вязкому течению жидкости в образце материала, получаем

$$f_{3,r} = -8\pi\eta x \dot{x}. \quad (12)$$



Сила пуазейлевского сопротивления вязкому течению жидкости по всей окружности фронта пропитки материала определяется количеством его капилляров n_3 , непосредственно связанных с емкостью жидкости, вертикально установленной на материале:

$$f_3 = n_3 f_{3,r} = -Dx\dot{x}, \quad D = \frac{16\pi\eta h R_0 \gamma}{r^2}. \quad (13)$$

Равнодействующая сил поверхностного натяжения f_1 , гидростатического давления f_2 и пуазейлевского сопротивления вязкому течению f_3 равна

$$f = f_1 + f_2 + f_3 = \frac{d}{dt} (m\dot{x}) = \frac{dm}{dt} \dot{x} + m\ddot{x}, \quad (14)$$

где $m = \rho h S$. Но поскольку скорость движения жидкости в бумаге уменьшается с удалением от центра цилиндра пропорционально его радиусу, то, исходя из закона сохранения момента импульса и выполнив те же преобразования, что и при нахождении пуазейлевского сопротивления движению жидкости, приходим к заключению, что необходимо учитывать массу жидкости только в тех капиллярах, которые соприкасаются непосредственно с вертикально установленным цилиндром, т. е.

$$m = Fx, \quad F = 2\gamma\rho h\pi R_0. \quad (15)$$

Рис. 3. Модель системы капилляров в образце материала

Тогда приращение массы жидкой фазы в тестируемой бумаге со временем будет равно

$$dm/dt = F\dot{x}. \quad (16)$$

Подставив выражения (5), (9), (13), (15) и (16) в уравнение (14), получим выражение, описывающее динамику координаты фронта радиального движения жидкости в материале:

$$\ddot{x} = \frac{A}{F} + \frac{A}{F} \frac{R_0}{x} + \frac{G}{xF} \left(z_0 - h\gamma \frac{R_0^2}{R^2} \right) - \frac{h\gamma Gx}{FR^2} - \frac{2h\gamma GR_0}{FR^2} - \frac{D}{F} \dot{x} - \frac{\dot{x}^2}{x}. \quad (17)$$

Подставив ранее полученные выражения для A , G , D и F в (17), приведем это уравнение к виду, удобному для численного решения:

$$\ddot{x} = -a_0\dot{x} - \frac{\dot{x}^2}{x} + \frac{1}{x} a_1 + a_2 - a_3x, \quad (18)$$

$$a_0 = \frac{8\eta}{\rho r^2}, \quad a_1 = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho} + \frac{g}{2\pi} \left(z_0 - h\gamma \frac{R_0^2}{R^2} \right), \quad a_2 = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho R_0} - \frac{h\gamma g R_0}{\pi R^2}, \quad a_3 = \frac{h\gamma g}{2\pi R^2}.$$

В случае, если емкость с жидкостью закрыта, давление столба жидкости будет иметь две составляющие:

$$f'_2 = PS = (P_h + \Delta P_\gamma) R_0 \gamma h. \quad (19)$$

Поскольку температуру дисперсной среды можно считать постоянной, приращение объема жидкой фазы в бумаге будет составлять $P_0 V_0 = P_1 V_1$. Отсюда находим

$$P_1 = \frac{P_0 V_0}{V_0 + \pi h \gamma (x + R_0)^2},$$

$$f'_2 = \left(\rho g z - P_0 + \frac{P_0 V_0}{V_0 + h \gamma (x + R_0)^2} \right) R_0 \gamma h. \quad (20)$$

Тогда окончательное выражение для силы тяжести столба жидкости примет вид

$$f'_2 = \left(z_0 - h\gamma \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 - 2xh\gamma \frac{R_0}{R^2} - x^2 \frac{h\gamma}{R^2} - \frac{P_0}{\rho g} + \frac{P_0 V_0}{\rho g (V_0 + h\gamma (x + R_0)^2)} \right) G. \quad (21)$$

Подставив (21) в уравнение (14) и выполнив преобразования, получаем

$$\ddot{x} = -a_0\dot{x} - \frac{\dot{x}^2}{x} + \frac{1}{x} a_1 + a_2 - a_3x - \frac{a_4}{x} \left(1 - \frac{1}{1 + a_5(x + R_0)^2} \right), \quad (22)$$

$$a_0 = \frac{8\eta}{\rho r^2}, \quad a_1 = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho} + \frac{g}{2\pi} \left(z_0 - h\gamma \frac{R_0^2}{R^2} \right), \quad a_2 = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho R_0} - \frac{R_0 h \gamma g}{R^2 \pi},$$

$$a_3 = \frac{h\gamma g}{2\pi R^2}, \quad a_4 = \frac{P_0}{2\pi \rho}, \quad a_5 = \frac{h\gamma}{V_0}.$$

Решение нелинейных дифференциальных уравнений (18) и (22) позволяет получить зависимость положения фронта распространения жидкости в бумаге от времени:

$$x(t) = \sqrt{\frac{2a_1}{a_0} \left(\frac{a_2\sqrt{2}}{\sqrt{a_0a_1}} f(t) + t + \frac{\exp(-a_0t) - 1}{a_0} \right)}, \quad (23)$$

где $f(t)$ — решение системы уравнений

$$\frac{f(t)'' + a_0 f(t)' + \frac{a_3}{a_2} \sqrt{2a_1 a_0} g(t) - a_0 \sqrt{g(t)}}{\sqrt{g(t)}} - \frac{a_2}{a_0} = 0, \quad g(t) = \frac{a_2\sqrt{2}}{\sqrt{a_0a_1}} f(t) + t + \frac{\exp(-a_0t) - 1}{a_0}.$$

Подстановка (23) в (18) позволяет сопоставить круговое растекание жидкости в материале продольному движению жидкости по капиллярам [2]:

$$l(t) = \sqrt{\frac{2b}{a} \left(t + \frac{\exp(-at) - 1}{a} \right)}, \quad a = \frac{8\eta}{\rho r^2}, \quad b = \frac{2\Delta\sigma}{r\rho}. \quad (24)$$

Результаты экспериментов. На базе описанного выше прибора был проведен ряд экспериментальных исследований динамики круговой пропитки тестовой бумаги различными жидкостями. Во всех опытах между обкладками нижнего конденсатора 1 и 2 (рис. 1) помещалась фильтровальная бумага с порами радиусом 3–5 мкм. Для исключения влияния температуры и влажности на результаты измерений эксперименты проводились при одинаковых параметрах окружающей среды (температуре 20°C и влажности 54%). Жидкость помещалась в открытую кювету и, следовательно, имела сообщение с атмосферой на протяжении всего эксперимента. Перед началом эксперимента осуществлялся контроль горизонтальности установки первичного преобразователя. Для обеспечения повторяемости результатов эксперименты проводились в термостабильных условиях. В экспериментах использовались вода, промышленно выпускаемый "Оксидат торфа плюс", представляющий собой 5% раствор для ванн и аппликаций, состоящий из метилизотиазолинона, экстракта хвои, отдушки косметической и лимонной кислоты, каолинито-гидрослюдистая глина веселовская марки "Керамик-Веско" (Украина) с примесью кварца и с включениями рутила, анатаза, ильменита и циркона низкотемпературного спекания (500–600°C) и подсолнечное масло "Золотая семечка", рафинированное дезодорированное по ГОСТ РФ 52465-2005.

Результаты измерений аппроксимировались модельными зависимостями

$$C(t) = k_1 \left(\frac{1 - \exp(-k_2 t)}{k_3} + t \right)^{0.25}, \quad (25)$$

$$C(t) = k_1 \left(\frac{1 - \exp(-k_2 t)}{k_3} + t \right)^{k_4}, \quad (25a)$$

$$C(t) = k_1 (1 - \exp(-k_2 t^{0.5})), \quad (26)$$

$$C(t) = k_1 (1 - \exp(-k_2 t^{k_3})), \quad (26a)$$

$$C(t) = k_1 \left(t + k_2 \frac{t^{0.25}}{t^{0.25} + 1} \right)^{k_3}, \quad (27)$$

$$C(t) = k_1 \left(t + k_2 \frac{t^{0.25}}{t^{0.25} + k_4} \right)^{k_3}. \quad (27a)$$

Поиск коэффициентов в формулах (25а), (26а) и (27а) осуществлялся на персональном компьютере, а коэффициенты в остальных формулах определялись непосредственно на приборе. Результаты измерения емкости измерительного конденсатора и координаты фронта движения жидкости в бумаге в процессе ее пропитки представлены на рис. 4–7 (на графиках показаны не все зафиксированные контроллером точки). Частота точек выбиралась, исходя из возможности адекватного одновременного восприятия экспериментальных точек и модельных кривых. Эксперименты показали, что геометрические параметры, в частности, начальный радиус пропитки и начальная высота столба жидкости оказывают влияние на кривые изменения емкости измерительного конденсатора и координаты фронта движения жидкости в бумаге в процессе ее пропитки (рис. 4, 5), что и следует из уравнений (18) и (22). Следует отметить, что даже по достижении жидкостью границ первичного конденсатора изменение его емкости продолжается, т. е. имеет место изменение геометрии пор бумаги в процессе ее пропитки. Во всех эксперимента измерения прекращались при достижении фронтом пропитки какой-либо границы на периферии тестируемой бумаги. После этого жидкость удалялась, производились замеры размеров овала максимального распространения жидкой фазы по тестовой бумаге и вычислялся эквивалентный радиус пропитки для пересчета емкости измерительного конденсатора в движение фронта пропитки.

При исследовании суспензий глины (рис. 6) наблюдались определенные особенности. На дне емкости 4 образовывался осадок, но вода продвигалась по порам более интенсивно, чем в опытах с водопроводной водой. Это связано с процессом дистилляции воды, что видно по величине емкости измерительного конденсатора и изменению угла смачивания бумаги. Экстракт "Оксидат торфа плюс" не достигал, благодаря наличию в нем частиц размером, меньшим размеров пор бумаги, границ конденсатора, поэтому после окончания интенсивного изменения его емкости эксперимент прекращался (рис. 7). Максимальные значения диаметров овала пропитки для "Оксидата торфа плюс" были 6.52 и 4.64 см, а для суспензии глины — 9.32 и 8.07 см. Вид модельных кривых (25)–(27а) соответствует решению уравнения для динамики капиллярного впитывания жидкости материалом (23). Несовпадения в первую очередь обусловлены не идеальностью "поведения" капилляров фильтровальной бумаги. При контакте фильтровальной бумаги с жидкостью происходит постепенное нарушение геометрии капилляров и вязкости жидкости из-за их физико-химического взаимодействия. Более полная картина динамики пропитки может быть получена с использованием измерительного конденсатора, имеющего порог зависимости своей емкости от движения фронта пропитки, как это было предложено в [9].

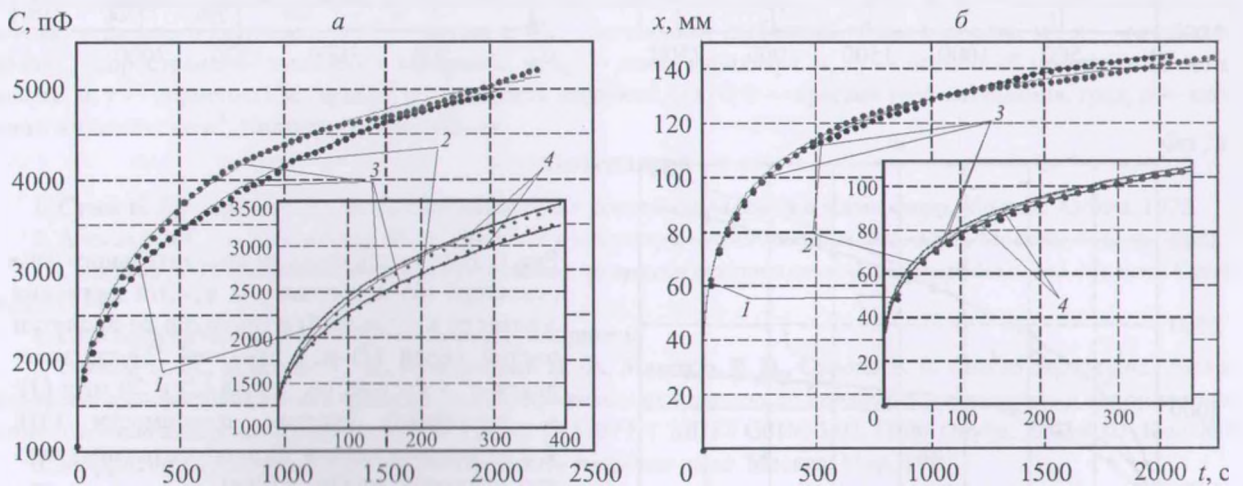


Рис. 4. Изменение емкости измерительного конденсатора (а) и координаты фронта движения жидкости в бумаге (б) в процессе ее пропитки чистой водой при $R_0 = 8.75$ (1) и 12.6 мм (2); 3, 4 — аппроксимация экспериментальных данных уравнениями (25) и (25а)

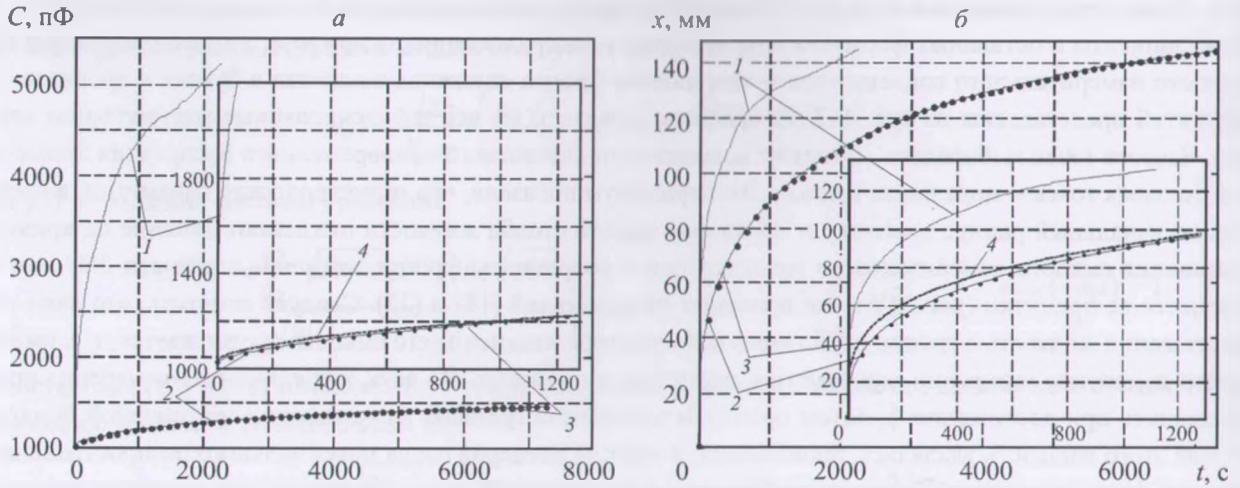


Рис. 5. Изменение емкости измерительного конденсатора (а) и координаты фронта движения жидкости в бумаге (б) в процессе ее пропитки чистой водой (1) и растительным маслом (2); 3, 4 — аппроксимация экспериментальных данных уравнениями (26) и (26а)

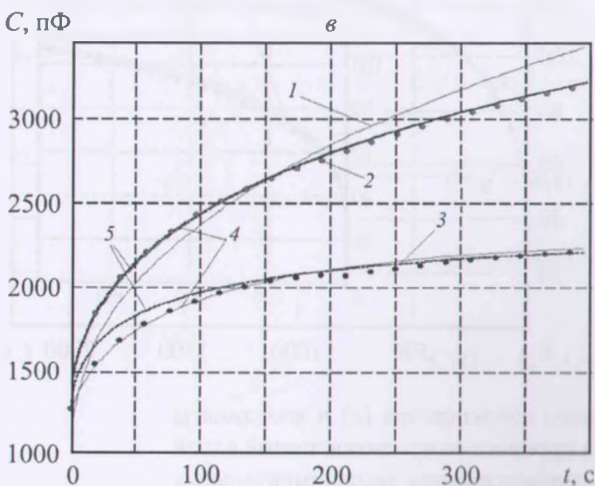
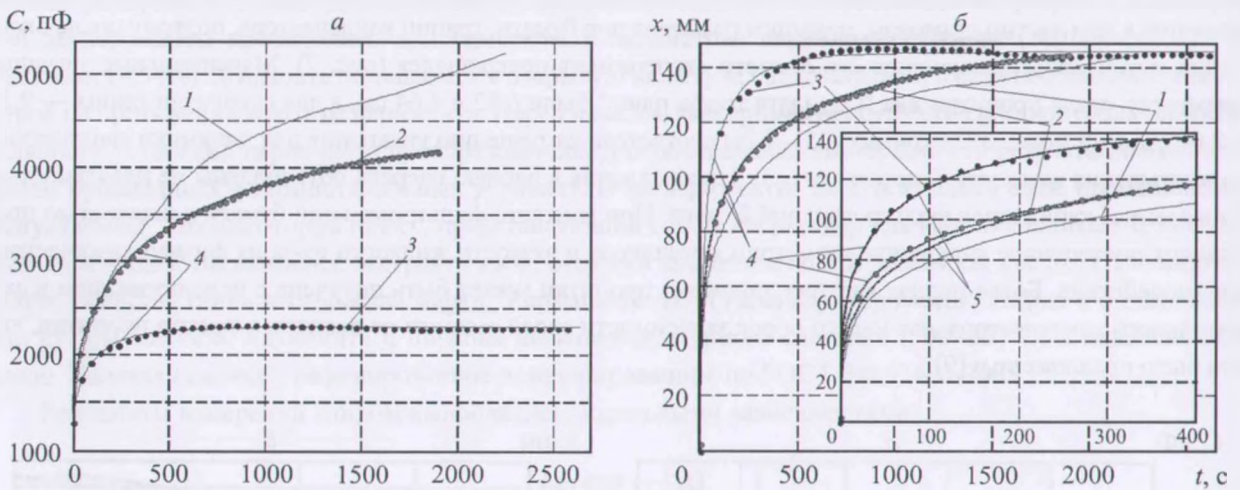


Рис. 6. Изменение емкости измерительного конденсатора (а) и координаты фронта движения жидкости в бумаге (б) в процессе ее пропитки чистой водой (1) и суспензией "Глина веселовская" в количестве 5 мг/л (2) и 20 мг/л (3); в) начальный участок зависимости $C(t)$; 4, 5 — аппроксимация экспериментальных данных уравнениями (26) и (26а)

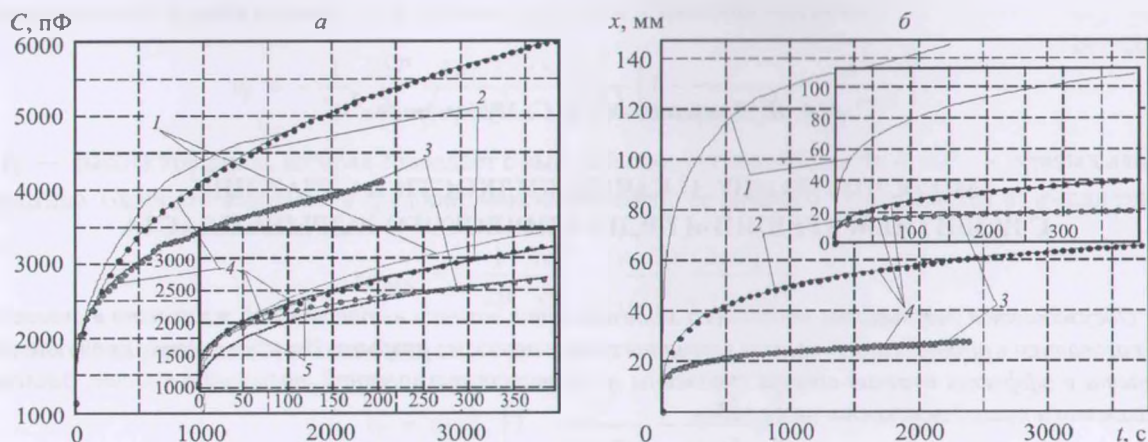


Рис. 7. Изменение емкости измерительного конденсатора (а) и координаты фронта движения жидкости в бумаге (б) в процессе ее пропитки чистой водой (1) и экстрактом "Оксидат торфа плюс", разбавленным в соотношении 1:10 (2); 3, 4 — аппроксимация экспериментальных данных уравнениями (27) и (27а)

Закключение. Разработан метод непрерывного измерения времени капиллярного впитывания жидкости материалом с использованием емкостного преобразователя, который, в сравнении с существующими дискретными методами, позволяет учитывать нелинейность процесса пропитки материалов дисперсными средами. Для интерпретации показаний первичного преобразователя получена математическая модель, которая отображает зависимость площади смоченной поверхности материала от времени радиального движения жидкости в нем. Проведены испытания устройства на некоторых модельных растворах, на основании которых получены зависимости, моделирующие результаты измерения времени капиллярного впитывания жидкости в материал.

Обозначения

C , C_0 и C_f — текущая, начальная и конечная емкости измерительного конденсатора, Ф; f_1 , f_2 и f_3 — силы поверхностного натяжения, действия столба жидкости на материал и пуазейлевского сопротивления течению жидкости в нем, Н; g — ускорение свободного падения, m/c^2 ; h — толщина тестируемого материала, м; m — масса жидкости в капиллярах материала, кг; P_0 — начальное давление в кювете с жидкостью, Па; r — радиус капилляра, м; R_0 и R_f — радиус кюветы (начальный радиус пропитки) и конечный радиус пропитки, м; S_r — площадь поперечного сечения отдельного капилляра, m^2 ; t — время, с; V_0 — начальный свободный объем в кювете, m^3 ; x — координата фронта распространения жидкости в материале, м; x_0 — длина капилляра, м; z_0 — начальный уровень жидкости в кювете, м; γ — пористость материала; η — вязкость жидкости, Па · с; θ — краевой угол смачивания, град; ρ — плотность жидкости, kg/m^3 . Индексы: f — конечный.

Литература

1. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. *Физико-химические основы смачивания и растекания*. Москва: Химия, 1976.
2. Аксельруд Г. А., Альтшулер М. А. *Введение в капиллярно-химическую технологию*. Москва: Химия, 1983.
3. Смирнов Д. Н. *Автоматическое регулирование процессов очистки сточных и природных вод*. Москва: Стройиздат, 1974.
4. *CST Equipment*; http://www.tritonel.com/cst_equipment/.
5. Оробей И. О., Жарский С. Е., Кузьмицкий И. Ф., Марцұл В. Н., Сарока В. В. *Способ определения распространения границы смачивания и краевого угла внутри капилляров пористого материала, устройство и автоматизированная система измерения его реализующие*. Патент № 8807 ВУ. МПК7 G01N13/02, 13/00. Оpubл. 30.03.2005. Бюл. № 2.
6. Моррисон С. *Химическая физика поверхности твердого тела*. Москва: Мир, 1980.
7. Абрамзон А. А., Гаевый Г. М. *Поверхностно-активные вещества*. Справочник. Ленинград: Химия, 1979.
8. Богданова Ю. В., Должикова В. Д., Сумм Б. Д. Влияние химической природы компонентов на смачивающее действие растворов смесей поверхностно-активных веществ. *Вестн. Московского ун-та. Сер. Химия*. 2004. Т. 45, № 3. С. 186–194.
9. Oliberovich N., Hryniuk D., and Orobei I. Measuring the speed of capillary soaking with adaptation regarding coordinates. *Proc. Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences*. 2015. Pp. 1–4; doi: 10.1109/eStream.2015.7119495.