

ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ / TECHNOLOGIES AND MEANS OF MAINTENANCE IN AGRICULTURE

УДК 532.64.08:54-11

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.295-305



Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ

**Н. В. Бышов¹, И. А. Успенский¹, В. В. Алексеев²,
И. В. Фадеев^{3*}**

¹ФГБОУ ВО «Рязанский государственный
агротехнологический университет имени П. А. Костычева»
(г. Рязань, Россия)

²Чебоксарский кооперативный институт (филиал)
АНОО ВО «Российский университет кооперации»
(г. Чебоксары, Россия)

³ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический
университет имени И. Я. Яковлева» (г. Чебоксары, Россия)

*ivan-fadeev-2012@mail.ru

Введение. Протекание технологических процессов отмывания загрязнений во многом определяется природой очищаемой поверхности, загрязнения и среды, в которой проводится очистка. Эффективность процесса зависит от контакта моющего средства с обмываемой поверхностью. Характеристикой смачивания служит контактный угол, являющийся мерой относительного притяжения жидкости к твердому телу и к самой себе. Физико-химическая активность моющей среды определяет затраты, а следовательно, и оптимальные параметры моечного процесса. Кроме того, она влияет на повышение коррозионной стойкости обмываемых деталей. Поэтому актуальным является определение функциональной зависимости контактного угла смачивания от концентраций различных комбинаций поверхностно-активных веществ.

Материалы и методы. Определение контактного угла смачивания основывается на статистической обработке фотографии капли раствора моющего средства на горизонтальной поверхности специально созданной программой, позволяющей получить массив данных для описания формы капли, по которой рассчитывается контактный угол смачивания. Проведены измерения значений контактного угла смачивания при изменении концентраций таких синтетических моющих средств, как Лабомид-203, МС-8, МЛ-51. Получены мультипликативные степенные функции, связывающие величину угла смачивания с концентрациями поверхностно-активных веществ.

© Бышов Н. В., Успенский И. А., Алексеев В. В., Фадеев И. В., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Результаты исследования. Исследования показали, что увеличение средних значений концентраций монобората калия и Лабомид-203 в растворе на 1 % приводит к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,54 %; монобората калия и МС-8 – на 0,78 %; а монобората калия и МЛ-51 – на 0,48 %, т. е. функция показывает убывающую отдачу от увеличения средних значений концентраций монобората калия и синтетических моющих средств.

Обсуждение и заключение. Во всех рассмотренных случаях установлена убывающая отдача величины контактного угла смачивания от увеличения концентрации поверхностно-активных веществ независимо от комбинации компонентов моющего раствора, т. е. исследуемые концентрации поверхностно-активных веществ превысили то граничное значение, когда они давали возрастающую отдачу от увеличения их содержания в моющем растворе. Таким образом, можно сделать вывод, что для рассмотренных комбинаций процентное содержание поверхностно-активных веществ избыточно.

Ключевые слова: контактный угол смачивания, поверхностно-активное вещество, математическая модель, мультипликативная степенная функция

Для цитирования: Изменение контактных углов смачивания при добавлении в моющие растворы поверхностно-активных веществ / Н. В. Бышов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 295–305. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>

Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions

N. V. Byshov¹, I. A. Uspensky¹, V. V. Alekseev², I. V. Fadeev³

¹Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russia)

²Cheboksary Cooperative Institute (branch)

of Russian University of Cooperation (Cheboksary, Russia)

³Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (Cheboksary, Russia)

*ivan-fadeev-2012@mail.ru

Introduction. The technological processes of the washing contaminations are largely determined by the nature of the surface being cleaned, the contamination type and the environment, in which the cleaning is carried out. The efficiency of the process depends on the contact of the detergent with the surface being washed. The wetting characteristic is a contact angle, which is a measure of the relative attraction of a liquid to a solid and to liquid itself. The physico-chemical activity of the washing medium determines the costs and, consequently, the optimal parameters of the washing process. In addition, it affects the increase in corrosion resistance. Therefore, it is relevant to determine the functional dependence of the contact wetting angle on the concentration of various combinations of surfactants.

Materials and Methods. The determination of the contact wetting angle is based on the statistical processing of a photograph of a detergent drop on a horizontal surface by a specially created program that allows obtaining an array of data to describe the shape of a drop from which the contact wetting angle is calculated. The values of the contact wetting angle were measured when varying concentrations of such synthetic detergents as Labomid-203, MS-8, ML-51, etc. Multiplicative power functions connecting the magnitude of the contact wetting angle with surfactant concentrations were obtained.

Results. The studies has shown that an increase in the concentration of potassium monoborate with Labomid-203 by 1 % leads to a decrease in the contact wetting angle by 0.54 %; potassium monoborate with MS-8 by 0.78 %; and potassium monoborate with ML-51 by 0.48 %, the function shows a decreasing return to an increase in concentration.

Discussion and Conclusion. In all the considered cases, a decreasing return of the magnitude of the contact wetting angle to an increase in the concentration of surfactants was established, regardless of which combination of substances was used. That is, the investigated concentrations of surfactants exceeded the limit value when they gave an increasing return to the increase in their content in the washing solution. Thus, it can be concluded that for the considered combinations the percentage of surfactant is redundant.

Keywords: contact wetting angle, surface-active substance, mathematical model, multiplicative power function

For citation: Byshov N.V., Uspensky I.A., Alekseev V.V., Fadeev I.V. Changing the Contact Wetting Angles when Adding Surface-Active Substances to Washing Solutions. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):295-305. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.295-305>

Введение

В основе комплекса параллельно-последовательных физико-химических и физико-механических процессов, объединенных в многоэтапном технологическом процессе отмыывания загрязнений, лежат явления смачивания, адсорбции, диспергирования-эмульгирования, стабилизации и гетерокоагуляции дисперсий, пептизации, адгезии, набухания, растворения, солубилизации и пенообразования. Наиболее важная роль в протекании процессов отводится природе очищаемой поверхности; загрязнениям; среде, в которой проводится очистка; моющим средствам; способам и интенсивности механического воздействия. Начальная фаза процесса отмыывания загрязнений заключается в смачивании или вытеснении жидкой фазой другой фазы (твердого или жидкого тела). Эффективность процесса напрямую зависит от контакта моющего средства с обмываемой поверхностью. В начале смачивания частицы гидрофильных загрязнений намокают, увеличиваются в объеме и начинают разрушаться. При полном смачивании они растекаются равномерным слоем по поверхности и удаляются струей воды или механическим способом. Для смачивания и удаления гидрофобных частиц (частиц нагара, масел, смол, песка и т. п.) моющая жидкость должна содержать поверхностно-активные вещества (ПАВ). Общеизвестно, что мерой смачивания обычно служит контактный угол θ , поскольку он является мерой относи-

тельного притяжения жидкости к твердому телу и к самой себе [1]. Чем активнее моющая среда в физико-химическом плане, тем меньше затрат механической энергии требуется для удаления загрязнения, а чем среда пассивнее, тем больше нужно затрат [2]. Поэтому оптимальные параметры моечного процесса выбирают на основе технологических и экономических соображений. Одновременно необходимо отметить еще один немаловажный показатель моющего раствора: способность формировать на очищаемой поверхности защитную пленку, и как следствие, повышать коррозионную стойкость обмываемой поверхности без дополнительной консервационной обработки. Итак, поскольку смачиваемость является одним из показателей физико-химических свойств моющих растворов, важно иметь сведения о влиянии ПАВ на величину контактного угла.

Целью исследования является определение функциональной зависимости контактного угла смачивания от концентраций различных комбинаций ПАВ. Для реализации цели исследования авторами разработана методика экспрессного определения контактного угла смачивания и программное обеспечение, автоматизирующее процесс и ускоряющее обработку информации.

Обзор литературы

Процедура определения контактного угла смачивания имеет ряд особенностей [3], без учета которых точность его определения довольно низка (ошибки от 1 до 5 градусов), а учет влияния ПАВ

оказывается затрудненным из-за того, что отклонения в величине контактного угла имеют тот же порядок, что и ошибки измерения. Более того, существенный разброс значений появляется из-за явления гистерезиса контактного угла, связанного с разными значениями угла при натекании (росте капли) и оттекании (уменьшении капли) [4–8]. Размер капли также может оказать влияние на результаты измерений, поэтому необходимо использовать рекомендации по выбору их размера из определенного диапазона.

А. Мармуром [9] разработана обобщенная методика определения контактных углов смачивания: даны рекомендации по кратности проведения экспериментов, объему капли, скорости увеличения и уменьшения объема капли. Для определения угла смачивания применяется микроскоп, который использует каплю жидкости в качестве чувствительного элемента.

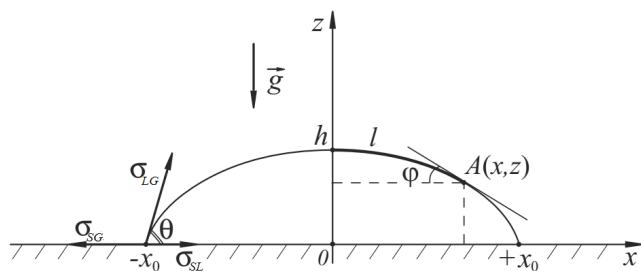
Учет возникающих сложностей при измерениях приводит к тому, что процедура измерения контактного угла может потребовать нескольких часов [Там же], однако в связи с непрекращающимися физико-химическими процессами в моющей жидкости ее свойства за это время могут изменяться, что способно повлиять на точность измерений.

Поскольку при простом измерении контактного угла возникает множе-

ство нюансов, мешающих быстрому и точному его определению, были рассмотрены методы установления геометрической формы капель и их аналитического описания [10–16]. Основной данных методов является минимизация поверхностной энергии поверхностей раздела фаз. В работе С. И. Матюхина и К. Ю. Фроленкова [17] приведен обзор основных методов расчета равновесной формы капель, расположенных на твердой горизонтальной поверхности в гравитационном поле: приближенные методы описания формы капель, вариационные методы и т. д. Численное решение уравнения Лапласа позволяет получить выражения для формы капли, которые содержат только геометрические параметры (геометрия капли определяется силами поверхностного натяжения и силой тяжести). Классический вид формы капли на горизонтальной поверхности показан на рис. 1 [Там же].

Еще Юнгом была показана связь краевого угла с соотношением между удельными поверхностными энергиями раздела разных фаз. Согласно вышеназванной работе [Там же], равновесная форма осесимметричных капель может описываться дифференциальным уравнением следующего вида:

$$\frac{z''}{(1+z'^2)^{3/2}} + \frac{z'}{x(1+z'^2)^{1/2}} = 2b + cz, \quad (1)$$



Р и с. 1. Классический вид формы капли на горизонтальной поверхности: σ_{LG} – коэффициент поверхностного натяжения жидкости; σ_{SG} – удельная поверхностная энергия раздела твердой и газообразной фазы; σ_{SL} – удельная поверхностная энергия раздела твердой и жидкой фазы

Fig. 1. The classic type of a drop shape on a horizontal surface: σ_{LG} is the coefficient of liquid surface tension; σ_{SG} is the specific surface energy of the solid and gaseous phase; σ_{SL} is the specific surface energy of the solid and liquid phase

где x и z – координаты, b и c – коэффициенты.

В качестве граничных условий уравнения (1) выступают краевой угол и объем капли. Производная $z'(x_0)$ есть тангенс угла наклона, а следовательно, и искомый контактный угол. Таким образом, появляется возможность достаточно быстро определять форму огибающей для поверхности капли $z(x)$, и уравнение (1) можно использовать в экспрессном методе определения контактного угла смачивания.

Итак, анализ литературных источников показал, что для повышения точности измерений и скорости вычислений контактного угла смачивания необходимо объединить достоинства чисто экспериментальных методов с теоретическим описанием кривой поверхности капли и использовать вычислительные мощности современных устройств и программных средств.

Материалы и методы

Определение контактного угла смачивания в данной статье основывается на статистической обработке фотографии капли моющего раствора на горизонтальной поверхности специально созданной программой. Программа позволяет получить достаточно большой массив данных для описания $z(x)$. Данные поступают от попиксельно обрабатываемой фотографии путем сравнения цветов фона, капли и поверхности. Такой подход дает возможность получать достаточно высокую точность определения граничных координат поверхностей раздела фаз, поскольку ошибка колеблется в пределах 2–3 пикселей с промежуточными переходными цветами. Далее массив данных передается системе компьютерной алгебры wxMaxima, в которой, согласно дифференциальному уравнению, подбираются числовые параметры формы капли $z(x)$ и затем вычисляется производная $z'(x_0)$. Поскольку процесс фотографирования и обработки данных не требует больших затрат времени, в целях повы-

шения статистической надежности для каждого варианта комбинаций ПАВ и их концентраций были вычислены контактные углы в двадцатикратной повторности, средние значения которых приведены в таблице.

В настоящее время для повышения моечного эффекта используются такие синтетические моющие средства (СМС), как Лабомид-203, МС-8, МЛ-51 и др. Они представляют собой смесь ПАВ с электролитами – натриевыми солями угольной, фосфорной и кремовой кислот. Моющее действие (процесс удаления загрязнения с поверхности твердых тел с переводом его в состояние раствора или устойчивой дисперсии) растворов СМС, применяемых для очистки поверхностей, определяется комплексом их свойств.

Для изучения связи между углом смачивания Y и концентрациями X_1 (МБК), X_2 (Лабомид-203), X_3 (МС-8) и X_4 (МЛ-51) воспользуемся нелинейным множественно-регрессионным анализом, который позволяет:

- построить нелинейную модель с большим числом факторов;
- определить и сравнить степени влияния различных факторов в отдельности на моделируемый показатель;
- выделить непосредственное влияние факторов на результативный признак и косвенное влияние фактора (через другие факторы) на результат;
- выявить существенность влияния отдельного фактора (или группы факторов) на результативный признак на фоне других факторов и т. д.

Наиболее подходящей в данном случае является мультипликативная степенная функция, впервые примененная в 1929 году Ч. Коббом и П. Дугласом:

$$Y = AX_1^\alpha X_2^\beta X_3^\gamma X_4^\delta, \quad (2)$$

где Y – угол смачивания, град.; X_i – концентрации ПАВ, %; $A, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ – неизвестные параметры.

Функция (2) однородна со степенью однородности $p = \alpha + \beta + \gamma + \delta$:

Таблица
Table

Зависимость угла смачивания от концентраций СМС и МБК в моющем растворе
 при температуре 85–90 °С
 The dependence of the wetting angle from concentrations of SD and MBP in the washing
 solution at a temperature of 85–90 °С

Концентрация МБК, % / Concentration MBP, %	Концентрация СМС, % / Concentration of SD, %																	
	Лабомид-203 / Labomid-203				МС-8 / MS-8				МЛ-51 / ML-51									
	1,0		2,0		3,0		1,0		2,0		3,0		1,0		2,0		3,0	
0,1	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees	Смачиваемость, с / Wettability, c	Угол смачивания, град. / Wetting angle, degrees
0,2	14	64 ± 2,5	17	55 ± 2,2	28	46 ± 1,8	23	46 ± 1,8	30	37 ± 1,5	10	70 ± 2,8	13	61 ± 2,4	28	48 ± 1,8	28	46 ± 1,7
0,3	15	60 ± 2,4	19	52 ± 2,1	29	44 ± 1,6	25	42 ± 1,6	32	33 ± 1,4	10	66 ± 2,6	16	57 ± 2,3	28	46 ± 1,7	29	46 ± 1,7
0,4	16	59 ± 2,3	21	49 ± 1,9	30	38 ± 1,6	26	39 ± 1,5	34	27 ± 1,1	11	64 ± 2,5	19	54 ± 2,2	29	45 ± 1,6	29	45 ± 1,6
0,5	16	55 ± 2,2	22	47 ± 1,8	31	34 ± 1,4	28	34 ± 1,4	36	24 ± 1,0	13	63 ± 2,5	21	52 ± 2,0	29	45 ± 1,6	30	37 ± 1,4
0,6	17	54 ± 2,1	24	44 ± 1,7	32	33 ± 1,4	30	30 ± 1,3	38	21 ± 0,8	14	57 ± 2,3	21	47 ± 1,8	30	37 ± 1,4	30	37 ± 1,4
	17	51 ± 2,0	25	42 ± 1,6	32	31 ± 1,3	31	28 ± 1,1	38	20 ± 0,8	15	57 ± 2,3	22	45 ± 1,7	30	37 ± 1,4	30	37 ± 1,4

– при $p = 1$ имеется линейная однородность, т. е. постоянная эффективность при увеличении средних значений концентраций;

– при $p > 1$ имеется рост эффективности, т. е. с увеличением средних значений факторов в t раз угол смачивания меняется в t^p раз;

– при $p < 1$ наблюдается падение эффективности.

Параметры α , β , γ , δ показывают процентное изменение угла смачивания, вызванное изменением концентрации соответствующего ПАВ на 1 % при неизменных значениях концентраций других ПАВ. Если в общем случае они зависят от X_p , то для рассматриваемой функции (2) они постоянны.

Функция (2) может быть оценена с помощью нелинейной регрессии, реализующейся в большинстве офисных пакетов прикладных программ (MS Excel, LibreOffice Calc и др.).

Результаты исследования

Исследования влияния концентраций МБК и СМС на изменение контактного угла смачивания проводились в следующих комбинациях: МБК и Лабомид-203, МБК и МС-8, МБК и МЛ-51. Статистическая обработка дает следующие результаты.

С коэффициентом детерминации $R^2 = 0,91$ определена зависимость

$$Y = 70,23428 X_1^{-0,1681} X_2^{-0,372253}. \quad (3)$$

Из выражения (3) следует, что увеличение среднего значения X_1 на 1 % приведет к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,1681 %, а увеличение среднего значения X_2 на 1 % – к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,37225 %, т. е. увеличение концентрации Лабомид-203 оказывается более выгодным. Однако, так как $|-0,372253 - 0,1681| = 0,54035 < 1$, получаем убывающую отдачу от увеличения концентрации ПАВ.

Аналогично с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ определена зависимость

$$Y = 64,8027 X_1^{-0,28602} X_3^{-0,49342}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что увеличение среднего значения X_1 на 1 % приведет к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,28602 %, а увеличение среднего значения X_3 на 1 % – к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,4934 %, т. е. увеличение концентрации МС-8 оказывается более выгодным. В данном случае $|-0,49342 - 0,28602| = 0,77944 < 1$, т. е. функция также показывает убывающую отдачу от увеличения концентрации ПАВ.

С коэффициентом детерминации $R^2 = 0,92$ определена зависимость

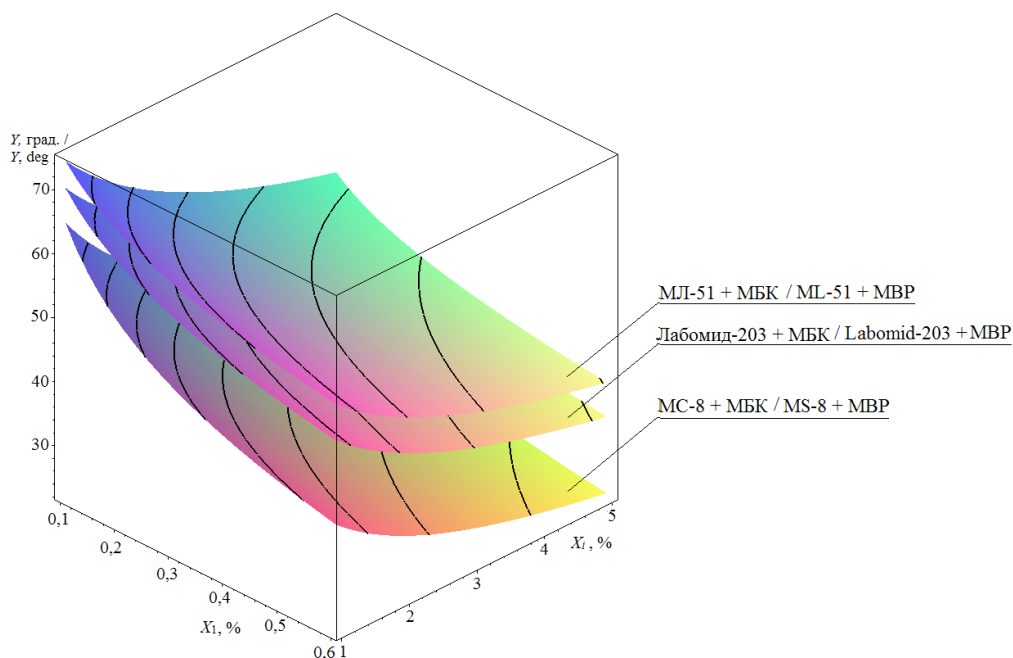
$$Y = 74,4352 X_1^{-0,14296} X_4^{-0,33504}. \quad (5)$$

Получается, что увеличение среднего значения X_1 на 1 % приведет к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,14296 %, а увеличение среднего значения X_4 на 1 % – к уменьшению среднего значения угла смачивания на 0,33504 %, т. е. увеличение концентрации МЛ-51 оказывается более выгодным. Поскольку $|-0,33504 - 0,14296| = 0,478 < 1$, то функция показывает убывающую отдачу от увеличения концентрации ПАВ.

На рис. 2 показаны функции изменения контактного угла смачивания для перечисленных трех случаев.

Обсуждение и заключение

Во всех рассмотренных случаях получаем убывающую отдачу величины контактного угла смачивания от увеличения концентрации ПАВ независимо от того, какую комбинацию компонентов использовали. Данный факт говорит о том, что концентрации ПАВ превысили то граничное значение, когда они давали возрастающую



Р и с. 2. Изменение контактного угла смачивания
 F i g. 2. The change of contact wetting angle

отдачу от увеличения их содержания в моющем растворе. Таким образом, можно сделать вывод, что для рассмотренных комбинаций процентное содержание ПАВ избыточно. Кроме того, стало ясно, что влияние МБК наиболее эффективно в паре с МС-8, поскольку в результате дает наибольшее из всех случаев уменьшение угла смачивания (0,28602 %) и, как следствие, наиболь-

шее (0,77944 %) совместное влияние из всех рассмотренных комбинаций ПАВ.

Полученные результаты позволяют на стадии проектирования технологического процесса мойки для различных вариантов комбинированного использования ПАВ рассчитать и оптимизировать их процентное содержание, определяющее качество процесса мойки и его производительность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Beatty S. M., Smith J. E. Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils // Journal of Hydrology. 2010. Vol. 391, issues 1-2. P. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007>
2. Goebel M.-O., Woche S. K., Bachmann J. Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid-liquid interfacial properties // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 442-443. P. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.039>
3. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids / J. Shang [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. 2008. Vol. 328, issue 2. P. 299–307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.039>

4. **Marmur A.** A guide to the equilibrium contact angles maze // Contact Angle, Wettability and Adhesion. 2009. Vol. 6. P. 3–18.
5. **Drelich J.** Guidelines to measurements of reproducible contact angles using a sessile-drop technique // Surface Innovations. 2013. Vol. 1, issue 4. P. 248–254. DOI: <https://doi.org/10.1680/si.13.00010>
6. **Volpe C. D., Siboni S.** The Wilhelmy method: a critical and practical review // Surface Innovations. 2018. Vol. 6, issue 3. P. 120–132. DOI: <https://doi.org/10.1680/jsuin.17.00059>
7. Reliable measurement of the receding contact angle / J. T. Korhonen [et al.] // Langmuir. 2013. Vol. 29, issue 12. P. 3858–3863. DOI: <https://doi.org/10.1021/la400009m>
8. Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces – Toward the understanding and control of wettability for different applications / K. Grundke [et al.] // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 222. P. 350–376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.012>
9. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements / T. Huhtamäki [et al.] // Nature Protocols. 2018. Vol. 13, issue 7. P. 1521–1538. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
10. Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops / A. F. Stalder [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2010. Vol. 364, issues 1-3. P. 72–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.040>
11. **Sumesh P. T., Govindarajan R.** The possible equilibrium shapes of static pendant drops // The Journal of Chemical Physics. 2010. Vol. 133, issue 14. P. 144707. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3494041>
12. Measurement of lateral adhesion forces at the interface between a liquid drop and a substrate / R. Tadmor [et al.] // Physical Review Letters. 2009. Vol. 103, issue 26. P. 266101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.266101>
13. **Srinivasan S., McKinley G. H., Cohen R. E.** Assessing the accuracy of contact angle measurements for sessile drops on liquid-repellent surfaces // Langmuir. 2011. Vol. 27, issue 22. P. 13582–13589. DOI: <https://doi.org/10.1021/la2031208>
14. **Whyman G., Bormashenko E.** Oblate spheroid model for calculation of the shape and contact angles of heavy droplets // Journal of Colloid and Interface Science. 2009. Vol. 331, issue 1. P. 174–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.11.040>
15. **Lubarda V. A., Talke K. A.** Analysis of the equilibrium droplet shape based on an ellipsoidal droplet model // Langmuir. 2011. Vol. 27, issue 17. P. 10705–10713. DOI: <https://doi.org/10.1021/la202077w>
16. Drop retention force as a function of drop size / P. S. Yadav [et al.] // Langmuir. 2012. Vol. 24, issue 7. P. 3181–3184. DOI: <https://doi.org/10.1021/la702473y>
17. **Матюхин С. И., Фроленков К. Ю.** Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15, № 3. С. 292–304. URL: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_15_3_2013_012.pdf

Поступила 24.01.2019; принята к публикации 18.03.2019; опубликована онлайн 28.06.2019

Об авторах:

Бышов Николай Владимирович, ректор, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: B-8363-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4619-6446>, byshov@rgatu.ru

Успенский Иван Алексеевич, заведующий, кафедра технической эксплуатации транспорта, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Алексеев Виктор Васильевич, профессор, кафедра информационных технологий и математики, Чебоксарский кооперативный институт (филиал) АНОО ВО «Российский университет кооперации» (428025, Россия, г. Чебоксары, пр. М. Горького, д. 24), доктор технических наук, ResearcherID: F-7784-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, av77@list.ru

Фадеев Иван Васильевич, заведующий, кафедра машиноведения, ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет имени И. Я. Яковлева» (428000, Россия, г. Чебоксары, ул. К. Маркса, д. 38), кандидат технических наук, доцент, ResearcherID: B-8856-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Бышов – научное руководство, постановка задачи исследования; И. А. Успенский – коррекция математической модели и проведение вычислений; В. В. Алексеев – разработка математической модели и редактирование; И. В. Фадеев – анализ литературных данных, разработка методик и проведение экспериментальных исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Beatty S.M., Smith J.E. Fractional wettability and contact angle dynamics in burned water repellent soils. *Journal of Hydrology*. 2010; 391(1-2):97-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.007>
2. Goebel M.O., Woche S.K., Bachmann J. Quantitative analysis of liquid penetration kinetics and slaking of aggregates as related to solid-liquid interfacial properties. *Journal of Hydrology*. 2012; 442-443:63-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.039>
3. Shang J., Flury M., Harsh J.B., Zollars R.L. Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008; 328(2):299-307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.09.039>
4. Marmur A. A guide to the equilibrium contact angles maze in contact angle. *Wettability and Adhesion*. 2009; 6:3-18.
5. Drelich J. Guidelines to Measurements of Reproducible Contact Angles Using a Sessile-Drop Technique. *Surface Innovations*. 2013; 1(4):248-254. DOI: <https://doi.org/10.1680/si.13.00010>
6. Volpe C.D., Siboni S. The Wilhelmy method: A critical and practical review. *Surface Innovations*. 2018; 6(3):120-132. DOI: <https://doi.org/10.1680/jsuin.17.00059>
7. Korhonen J.T., Huhtamäki T., Ikkala O., Ras R.H.A. Reliable measurement of the receding contact angle. *Langmuir*. 2013; 29(12):3858-3863. DOI: <https://doi.org/10.1021/la400009m>
8. Grundke K., Pöschel K., Synytska A., Frenzel R., Drechsler A., Nitschke M., et al. Experimental studies of contact angle hysteresis phenomena on polymer surfaces – Toward the understanding and control of wettability for different applications. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015; 222:350-376. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.10.012>
9. Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J. T., Ras R. H. A. Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. *Nature Protocols*. 2018; 13(7):1521-1538. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z>
10. Stalder A.F., Melchior T., Müller M., Sage D., Bluc T., Unserd M. Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010; 364(1-3):72-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.04.040>
11. Sumesh P. T., Govindarajan R. The possible equilibrium shapes of static pendant drops. *The Journal of Chemical Physics*. 2010; 133(14):144707. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3494041>
12. Tadmor R., Bahadur P., Leh A., N'guessan H.E., Jaini R., Dang L. Measurement of lateral adhesion forces at the interface between a liquid drop and a substrate. *Physical Review Letters*. 2009; 103(26):266101. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.266101>
13. Srinivasan S., McKinley G.H., Cohen R.E. Assessing the accuracy of contact angle measurements for sessile drops on liquid-repellent surfaces. *Langmuir*. 2011; 27(22):13582-13589. DOI: <https://doi.org/10.1021/la2031208>

14. Whyman G., Bormashenko E. Oblate spheroid model for calculation of the shape and contact angles of heavy droplets. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009; 331(1):174-177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.11.040>
15. Lubarda V.A., Talke K.A. Analysis of the equilibrium droplet shape based on an ellipsoidal droplet model. *Langmuir*. 2011; 27(17):10705-10713. DOI: <https://doi.org/10.1021/la202077w>
16. Yadav P.S., Bahadur P., Tadmor R., Chaurasia K., Leh A. Drop retention force as a function of drop size. *Langmuir*. 2012; 24(7):3181-3184. DOI: <https://doi.org/10.1021/la702473y>
17. Matyukhin S.I., Frolenkov K.Yu. Shape of liquid drops on solid horizontal surface. *Condensed Matter and Interphases*. 2013; 15(3):292-304. DOI: http://www.kcmf.vsu.ru/resources/t_15_3_2013_012.pdf (In Russ.)

Received 24.01.2019; revised 18.03.2019; published online 28.06.2019

About authors:

Nikolay V. Byshov, Rector, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: B-8363-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4619-6446>, byshov@rgatu.ru

Ivan A. Uspensky, Head, Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, ivan.uspensckij@yandex.ru

Victor V. Alekseev, Professor, Chair of Information Technologies and Mathematics, Cheboksary Co-operative Institute (branch) of Russian University of Cooperation (24 Prospekt Gorkogo, Cheboksary 428025, Russia), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2780-1727>, ResearcherID: F-7784-2019, av77@list.ru

Ivan V. Fadeev, Head, Chair of Mechanical Engineering, Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University (38 K. Marksa St., Cheboksary 428000, Russia), Ph. D (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-1812>, ResearcherID: B-8856-2019, ivan-fadeev-2012@mail.ru

Contribution of the authors:

N. V. Byshov – scientific supervision, the formulation of the research problem; I. A. Uspensky – the correction of a mathematical model and computation; V. V. Alekseev – the development of a mathematical model and edition; I. V. Fadeev – reviewing and analyzing the literature, developing the methods and conducting experimental studies.

All authors have read and approved the final version of the paper.