

## АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

К.т.н. Ярмаркин М.К.<sup>1</sup> (ФГОУ ДПО «ПЭИПК»)

**АННОТАЦИЯ.** Предложено описывать сложное явление взаимодействия воды с поверхностью твёрдого тела на основе анализа сцепления, или подвижности частиц воды. Задачей выполненной работы являлась разработка метода объективного описания этого взаимодействия, доступного для использования без сложного и дорогостоящего оборудования и позволяющего делать количественное сопоставление различных материалов быстро и с минимальными затратами.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** угол смачивания, гидрофобность поверхности, полимерные изоляторы, удерживающая сила, коэффициент трения, стартовый угол.

Полимерные изоляторы высокого напряжения обладают по ряду признаков существенными преимуществами перед традиционными керамическими и стеклянными изоляторами. В числе этих признаков одним из наиболее важных является высокая гидрофобность поверхности.

Поведение капель воды на поверхности увлажнённого изолятора зависит от смачиваемости в классическом понимании этого термина, то есть от способности частицы воды растекаться в тонкую плёнку или, напротив, формировать каплю сферической формы. Кроме того, вода на поверхности изолятора может проявлять различную степень подвижности, при различной прочности сцепления с занимаемым участком поверхности. «Идеальный» изолятор обладает поверхностью, на которой капли воды занимают минимальную площадь и, ввиду высокой подвижности, сразу же покидают поверхность, скатываясь с наклонных рёбер. Согласно молекулярной теории, гидрофобность и степень сцепления с поверхностью связаны обратной пропорциональностью, то есть чем выше гидрофобность, тем хуже сцепление, тем более подвижно должна вести себя капля на поверхности. Гидрофобность принято характеризовать краевым углом смачивания, степень сцепления – энергией адгезии, а связь между ними – классическим уравнением Дюпре [1].

В статье предложено описывать сложное явление взаимодействия воды с поверхностью твёрдого тела на основе анализа сцепления или подвижности частиц воды. Задачей выполненной работы являлась разработка метода объективного описания этого взаимодействия, доступного для использования без сложного и дорогостоящего оборудования и позволяющего делать количественное сопоставление раз-

личных материалов быстро и с минимальными затратами.

### Основы метода стекающих капель

В качестве основы метода количественного описания того, что происходит с каплей воды на поверхности изолятора, предлагается использовать эффект стекания капель влаги, помещённых на наклонную поверхность (рис. 1). Капля фиксирована на поверхности твёрдого тела некоторыми силами, препятствующими не только перемещению всей капли в целом, но и смещению любого участка границы капли. При изменении угла наклона поверхности к линии горизонта  $\alpha$  капля до определённого момента остаётся неподвижной, а затем начинает перемещаться, причём угол наклона, соответствующий началу перемещения  $\alpha_0$  (стартовый угол) легко измерить в ходе испытаний. Предлагаемый метод стекающих капель заключается в измерении и анализе зависимости стартового угла  $\alpha_0$  от веса капли  $P$ .

На рис.1 указан угол наклона  $\alpha$ , вес капли  $P$ , действующий в вертикальном направлении, а также составляющая веса  $P_t = P \cdot \sin(\alpha)$ ,

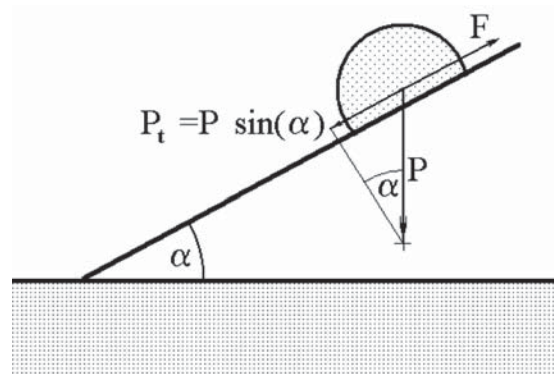


Рис. 1. Капля на наклонной плоскости.  
P – вес капли, F – удерживающая сила

<sup>1</sup> 196135, г. Санкт-Петербург, Авиационная ул., 23

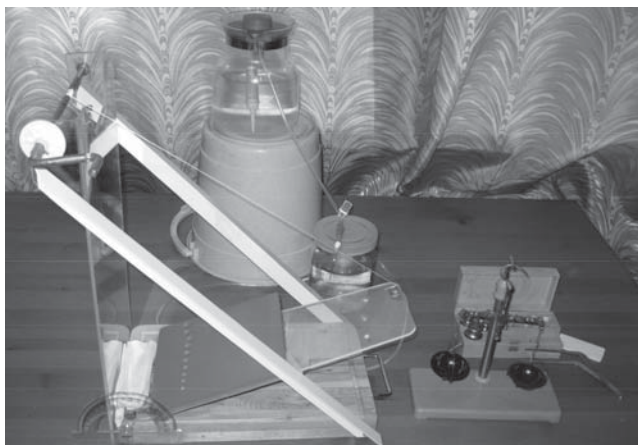


Рис. 2. Устройство для измерения начального угла с образцом кремнийорганической резины, установленным для испытаний. Видны приготовленные для измерения начального угла капли воды различной массы

направленная вдоль наклонной плоскости и стремящаяся переместить каплю. Сила, удерживающая каплю на поверхности, обозначена  $F$ ; её направление противоположно действию движущей силы  $P_t$ .

Важно отметить, что в данной процедуре определяется способность капли к перемещению на наклонной поверхности также, как это происходит на реальной наклонной поверхности рёбер изоляторов. Это позволяет ожидать, что предлагаемый метод окажется более информативным для описания способности капель к перемещению и растеканию, чем измерение угла смачивания. Поскольку результатом предлагаемой процедуры являются измерения начального угла, метод стекающих капель даёт основу для количественного сопоставления различных материалов по степени гидрофобности.

### Экспериментальная установка и методика измерений

На рис. 1 изображена схема измерений начального угла  $\alpha_0$ , а на рис. 2 показана фотография простейшего устройства для выполнения таких измерений. Устройство представляет собой жёсткую плиту-основание, на которой с помощью шарнира укреплена наклоняемая плоскость. На наклоняемой плите фиксирован плоский образец исследуемого материала с помещёнными на его поверхности каплями различного размера и массы.

Устройство снабжено шкалой-транспортом для измерения угла наклона с погрешностью не более  $\pm 0,5^\circ$ . Перед началом работы наклоняемая плоскость горизонтируется,

при этом показания шкалы соответствуют началу отсчёта угла. Показания транспортера дублируются вертикальной линейной шкалой, позволяющей вычислить угол наклона с помощью известных формул тригонометрии.

Для получения зависимости начального угла  $\alpha_0$  от массы капли  $m$  целесообразно делать серию измерений за один подъём плоскости. Для этого на испытуемом образце наносят горизонтальный ряд капель различной массы.

При старте каждой капли из установленного ряда угол наклона фиксируется. Полученные значения усредняются не менее чем по пяти измерениям.

### Результаты экспериментов

Поскольку предлагаемая методика предназначена в первую очередь для анализа свойств материалов защитного покрытия полимерных изоляторов, для исследований были использованы образцы кремнийорганической резины, предназначенной для изготовления покрытий изоляторов наружной установки.

В результате испытаний получена зависимость начального угла  $\alpha_0$  от массы капли  $m$ , показанная на рис. 3.

Кремнийорганическая резина и стекло представляют крайние случаи плохого и хорошего смачивания, как это видно по сопоставлению краевых углов смачивания на рис. 4.

### Обсуждение полученных результатов

Представленные на рис. 3 зависимости  $\alpha_0(m)$  показывают, что с уменьшением массы капли начальный угол монотонно увеличивается.

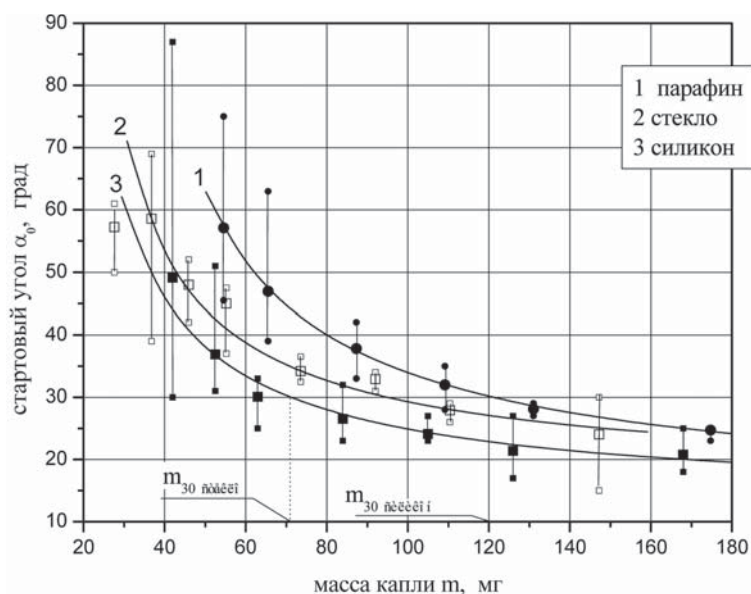


Рис. 3. Графики зависимости начального угла от массы капли на поверхности кремнийорганической резины, стекла и мягкого парафина. Указаны минимальные и максимальные значения, измеренные в эксперименте

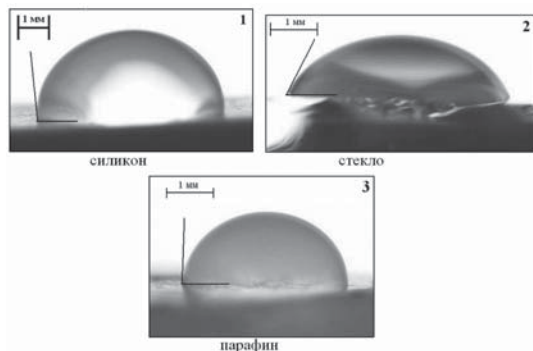


Рис. 4. Капли воды на поверхности кремнийорганической резины, стекла и мягкого парафина

По данным рис. 3 и аналогичных ему зависимостей можно с уверенностью установить, что степень сцепления капли воды с поверхностью увеличивается с увеличением краевого угла смачивания и степени гидрофобности. На силиконовой поверхности при большом угле смачивания стартовый угол  $\alpha_0$  всегда больше, чем на поверхности стекла. Действие силы, удерживающей каплю от стекания по наклонной плоскости и от срыва с вертикальной плоскости, сходно с действием силы трения, препятствующей любому перемещению капли по поверхности.

Зависимости стартового угла от массы капли являются объективными свойствами исследуемой поверхности и при заданных условиях проведения эксперимента характеризуют свойства поверхности к формированию подвижных, легко перемещаемых капель воды. Как видно на рис. 3 и сходных с ним, высокая гидрофобность и большой краевой угол смачивания силикона связаны с большим стартовым углом при заданной массе капли. Изменение стартового угла при изменении степени гидрофобности достаточно велико для достоверной сортировки материалов. В том случае, если масса капли  $m$  близка к критической массе  $m_{90}$ , различие стартовых углов смачивания  $\alpha_0$  для кремнийорганической резины и для стекла может достигать 50% и более. При больших массах капли это различие уменьшается, однако сохраняет значимый уровень 15 – 20%.

Результаты измерений стартового угла позволяют вычислить удерживающую силу  $F$  (рис. 1). В момент старта при неустойчивом равновесии капли на наклонной плоскости выполняется условие равенства силы  $P \cdot \sin(\alpha_0)$ , стремящейся переместить каплю вниз и удерживающей силы  $F$ :

$$P \cdot \sin(\alpha_0) = F.$$

Это позволяет на основании описанных выше экспериментальных данных несложным пересчётом получить зависимости удерживающей силы, показанные на рис. 5. Как видно, удерживающая сила возрастает с увеличе-

нием массы капли, причём полученная зависимость хорошо аппроксимируется линейной функцией вида

$$F = A m + F_0, \quad (1)$$

где  $A$  и  $F_0$  – коэффициенты, зависящие от рода поверхности.

Видно, что погрешности линейной аппроксимации зависимостей рис. 5 значительно меньше разброса результатов измерений.

В момент старта капли выполняется уравнение

$$P \cdot \sin(\alpha_0) = A m + F_0. \quad (2)$$

Зависимости 1, 2, 3 на рис. 3, показанные сплошными линиями, получены в результате обратного преобразования формулы (2) к виду

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{A m + F_0}{m g}\right).$$

В [3] удерживающая сила, направленная тангенциально к поверхности, названа силой статического трения. Действительно, наличие в формуле (1) слагаемого, прямо пропорционального массе капли или её весу, придаёт действию удерживающей силы сходство с действием силы трения. При значении коэффициента трения покоя  $k$  сила трения тела с массой  $m$ , расположенного на наклонной плоскости как показано на рис. 1, равна  $F = k \cdot m g \cos(\alpha_0)$ , то есть прямо пропорциональна массе тела.

Наличие в формуле (1) постоянного, не зависящего от массы, слагаемого  $F_0$  сходно с действием силы трения покоя и указывает на действие сил адгезии.

В качестве возможной причины наблюдаемого высокого сцепления капель с поверхностью гидрофобных покрытий можно указать на деформацию капли при перемещении по наклонной плоскости.

## Выводы

1. Для оценки способности поверхности твёрдого тела к образованию подвижных, легко перемещаемых капель воды предложено использовать измерения стартового угла  $\alpha_0$  в зависимости от массы капли.

2. Наиболее удобной количественной характеристикой результатов измерений стартового угла является параметр  $m_\alpha$  при  $10^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ , например  $m_{30}$ .

3. При плохом смачивании на поверхности силиконовой резины сила, удерживающая каплю воды от перемещения, больше, чем при хорошем смачивании на поверхности стекла.

4. Оптимизация свойств поверхности должна

быть направлена на реализацию максимальной гидрофобности и минимальной силы сцепления. Целесообразно исследовать возможность применения поверхностей с заданной шероховатостью, а также разработать рецептуру «скользящей» резины, обладающей низким сцеплением с капельной влагой и повышенной способностью к самоочистке.

5. Метод стекающих капель позволяет контролировать изменения, возникающие при смене материала поверхности, при насыщении поверхности влагой, при изменении состава смачивающей жидкости, при электродуговой обработке поверхности, изменении её шероховатости и т. п.

## Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики, том 1, Гос. Из-во технико-теоретической литературы, М., 1953.
2. ГОСТ Р 52082-2003 Изоляторы полимерные опорные наружной установки на напряжение 6 – 220 кВ. Общие технические условия.
3. Фукс Г.И., Клычников В.М., Цыганков Е.В. ДАН СССР 1959, том.65, N 3, с.307 – 310.
4. Абрамзон А.А. Возьмём за образец лист лотоса. Химия и жизнь №11, 1982, с.38 – 40.
5. ГОСТ 27474-87. Материалы электроизоляционные. Методы испытания на сопротивление образованию токопроводящих мостиков и эрозии в жестких условиях окружающей среды.

