

УДК 629.12:678.512.92

А.В. ГАЙДАЧУК¹, Н.В. ГУРЬЕВ², Е.К. ОСТРОВСКИЙ¹, М.В. СЛИВИНСКИЙ³¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *ННЦ «Институт метеорологии», Харьков*³ *ОАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЗАРЯДОВ В ДИЭЛЕКТРИКАХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ПОЛИМЕРНОЙ БУМАГИ

Рассмотрена физико-математическая модель силового взаимодействия поляризованных зарядов в жидком диэлектрике связующего с заряженной поверхностью полимерной бумаги при изготовлении сотового заполнителя для изделий авиационно-космической техники. Получено интегральное уравнение для электрической силы взаимодействия зарядов. Методом численного интегрирования проведен анализ уравнения для электрической силы. Показано, что величина электростатической силы сравнима с силами поверхностного натяжения жидкость – газ, твёрдое тело – газ, жидкость – твёрдое тело и влияет на площадь поверхности растекания связующего на заряженной поверхности полимерной бумаги.

сотовый заполнитель, полимерная бумага, диэлектрик, электростатическая сила, поверхностное натяжение, полимерное связующее, авиационно-космическая техника

Введение

Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами. Технология изготовления сотового заполнителя (СЗ) из полимерной бумаги предусматривает растяжение «дольки» СЗ, которая подвергается аппретированию в спирто-растворимом полиамиде, а затем после сушки пропитывается в составе связующего (бакелитовый лак + бифос + спирт). Конечный контроль готового изделия обнаруживает неравномерный по толщине слой пропитки на панели сотового заполнителя, что является неблагоприятным фактором, влияющим на качество изделия. Одной из возможных причин такого поведения полимерной бумаги (ПБ) в контакте с составом пропитки может быть образование зарядов статического электричества на ПБ как на технологических участках изготовления панелей, так и непосредственно на участке пропитки и сушки панелей [1].

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. В экспериментах по растеканию жидкой кап-

ли состава пропитки на заряженной и незаряженной горизонтальной поверхности полимерной бумаги [2] было установлено значительное увеличение фактора растекания при наличии статического заряда на ПБ. Причину такого явления следует искать в появлении дополнительной электростатической силы, возникающей при взаимодействии между поляризованными зарядами в жидком диэлектрике со статическим зарядом на поверхности ПБ.

В [3] рассмотрена задача расчета напряженности электрического поля на границе пятна пропитки. Полученное в этой работе интегральное уравнение для горизонтальной составляющей напряженности E_{rk} учитывает только поляризованные заряды в слое жидкого диэлектрика с поверхностной плотностью $-\sigma'$. Эти заряды лежат на плоскости ПБ, учитывая, что сама ПБ заряжена положительно.

В работе [4] показано, что такое рассмотрение является упрощенным и для точного решения необходимо учитывать поле поляризованных зарядов обратного знака с поверхностной плотностью $+\sigma'$ на противоположной верхней поверхности жидкого слоя

пропитки. Математическое моделирование электрического поля поляризованных зарядов с плотностями $\pm\sigma'$ подтвердило справедливость предложенной модели кольцевого макродиполя для расчета напряженности поля, создаваемого поляризованными зарядами вблизи границы слоя жидкого диэлектрика.

Цель работы – получить математическое уравнение для расчета горизонтальной составляющей электрической силы взаимодействия между поляризованными зарядами в жидком диэлектрике состава пропитки с заряженной поверхностью полимерной бумаги; методами численного интегрирования провести компьютерный анализ полученного интегрального уравнения для силы с целью определить ее величину и сравнить с силами поверхностного натяжения, влияющими на фактор растекания состава пропитки на заряженной поверхности ПБ.

Формирование следа капли связующего на незаряженной горизонтальной поверхности ПБ

Рассмотрим механизм взаимодействия жидкой капли при её растекании на горизонтальной поверхности ПБ. При соприкосновении капли жидкости с поверхностью ПБ в каждой точке периметра капли сходятся три пограничные поверхности: твердое тело – газ, жидкость – газ, твердое тело – жидкость, (рис. 1, а).

Следовательно, по периметру окружности действуют три силы поверхностного натяжения, направленные по касательной к поверхностям: \bar{f}_{mg} , $\bar{f}_{жг}$ и $\bar{f}_{тж}$. Каждая сила поверхностного натяжения пропорциональна длине периметра окружности пятна капли ($f \sim \ell$) и равна

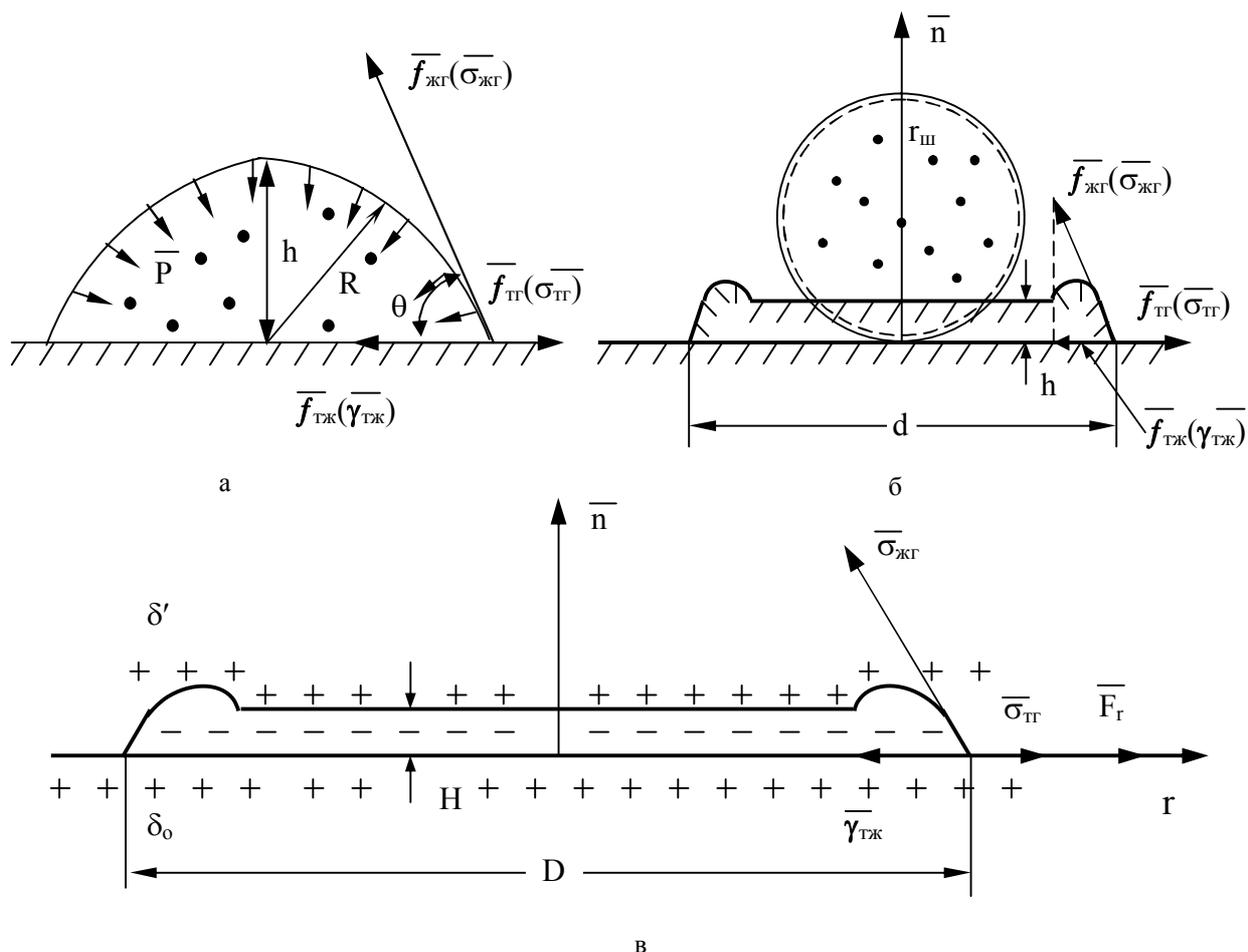


Рис. 1. Форма капли, направление добавочного давления \bar{P} и сил поверхностного натяжения: а – смачивающая жидкость; б – сечение застывшей капли на незаряженной поверхности; в – сечение застывшей капли на заряженной поверхности

$$\bar{f} = \bar{\sigma} \cdot \ell, \quad (1)$$

где $\sigma \left[\frac{H}{M} \right]$ – коэффициент пропорциональности или коэффициент поверхностного натяжения.

По периметру смачивания твердого тела каплей состава пропитки действует три поверхностных натяжения: $\bar{\sigma}_{mz}$ – твердое тело – газ; $\bar{\sigma}_{жз}$ – жидкость – газ; $\bar{\gamma}_{mж}$ – твердое тело – жидкость. В соответствии с уравнением Юнга условие равновесия на плоскости можно записать в виде

$$\sigma_{жз} \cdot \cos\theta = \sigma_{mz} - \gamma_{mж}, \quad (2)$$

где θ – краевой угол смачивания [5]. Значения краевых углов могут быть определены экспериментально.

Если $\gamma_{mж} < \sigma_{mz} - \sigma_{жз} \cdot \cos\theta$, то имеем случай смачивания твердого тела жидкостью, при этом угол $\theta < \frac{\pi}{2}$, т.е. острый.

Любая искривленная поверхность жидкости оказывает добавочное давление на жидкость. В случае выпуклой поверхности это добавочное давление направлено в сторону жидкости и равно

$$P = \frac{2\sigma_{жз}}{R}, \quad (3)$$

где R – радиус кривизны поверхности.

Приведенная на рис. 1, а классическая форма капли при смачивании горизонтальной поверхности твердого тела жидкостью не совсем отвечает реальной форме капли состава пропитки на полимерной бумаге, показанной на рис. 1, б. На этом рисунке показана сферическая капля в момент падения её на незаряженную поверхность ПБ. Под ней показано сечение застывшего следа капли после растекания. Как видно, капля на рис. 1, а имеет максимальную высоту h в центре. Это относится к жидкостям с большим коэффициентом поверхностного натяжения $\sigma = (0,075 \div 0,54) \frac{H}{M}$ (вода, глицерин, ртуть).

В случае жидкостей с малыми коэффициентами поверхностного натяжения $\sigma < 0,05 \frac{H}{M}$ в центре

капли наблюдается провал под действием избыточного давления, определяемого формулой (3). С таким случаем встречаются при растекании капли эфира с $\sigma = 0,017 \frac{H}{M}$. Используемый состав пропитки ПБ содержит 75% этилового спирта и имеет коэффициент поверхностного натяжения, близкий к спирту $\sigma = 0,02 \frac{H}{M}$, что и определяет провал в центре капли с толщиной h (рис. 1, б).

Формирование следа капли связующего на заряженной горизонтальной поверхности ПБ

На заряженной ПБ к уже рассмотренным силам, формирующим пятно капли на незаряженной поверхности, добавляется еще электростатическая сила \bar{F}_{rd} , которая приложена к единице длины периметра пятна и направленная вдоль плоскости (рис. 1, в). Эта сила действует в том же направлении, что $\bar{\sigma}_{mz}$, и к моменту окончательного формирования следа пятна увеличивает его диаметр D больше, чем d (рис. 1, в). За счёт этого уменьшается толщина пленки H в середине пятна ($h > H$).

Остановимся подробнее на природе дополнительной электростатической силы \bar{F}_{rd} . Состав пропитки ПБ – диэлектрик. Все диэлектрики, помещенные во внешнее электрическое поле, поляризуются. В нашем случае внешнее электростатическое поле создает заряженная поверхность полимерной бумаги с поверхностной плотностью заряда $+\sigma_0 \frac{Kл}{M^2}$. Вектор напряженности электрического поля \bar{E}_0 , создаваемый зарядом $+q_0 = +\sigma_0 \cdot S$, перпендикулярен заряженной поверхности. Поляризация жидкого слоя состава пропитки на такой заряженной поверхности приводит к появлению противоположных по знаку связанных зарядов с плотностями $\pm \sigma'$ на противоположных гранях жидкого слоя в пределах пятна пропитки.

Поверхностная плотность зарядов на ПБ $+\sigma_0$ связана с плотностью поляризованных связанных зарядов $\pm\sigma'$ на границах жидкого слоя выражением

$$\sigma' = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \sigma_0, \quad (4)$$

где $\varepsilon = 27$ – диэлектрическая проницаемость спиртового состава пропитки.

Как видно из (4), плотность поляризованных зарядов на границах жидкого слоя приблизительно равна плотности заряда $+\sigma_0$ на поверхности ПБ. Так как заряды на ПБ с поверхностной плотностью $+\sigma_0$ находятся на непроводящей поверхности с большим удельным сопротивлением, они не могут свободно перемещаться по поверхности ПБ под действием собственных сил кулоновского расталкивания, а, следовательно, являются неподвижными.

Поляризованные заряды $+\sigma'$ и $-\sigma'$ жестко связаны с молекулами жидкости. Так как жидкость обладает минимальной сдвиговой прочностью, поляризованные молекулы жидкости имеют степень свободы в направлении от центра следа пятна по радиусу. Под действием дополнительной электрической силы \bar{F}_{rd} увеличивается растекание состава пропитки.

Электрическая сила на границе пятна пропитки

Поляризованные заряды на нижней грани слоя пропитки с плотностью $-\sigma'$, притягиваясь к неподвижному положительному заряду плотностью $+\sigma_0$, расположенному на ПБ за периметром пятна пропитки, заставляют молекулы жидкого слоя двигаться в направлении от центра пятна вдоль r , тем самым увеличивая смачиваемость поверхности ПБ. Противоположный связанный заряд на верхней грани воздух – жидкость с плотностью $+\sigma'$ отталкивается от заряда плотностью $+\sigma_0$. Так как расстояние между поляризованными зарядами $\pm\sigma'$ равно толщине жидкой пленки H , а сила взаимодействия изменяется обратно

пропорционально квадрату расстояния между зарядами, преобладает электрическая сила притяжения между зарядами с плотностями $-\sigma'$ и $+\sigma_0$, определяющая растекание капли состава пропитки.

В выбранной цилиндрической системе координат r, φ, z начало отсчета $r, z = 0$ расположено на плоскости Q , совпадающей с плоскостью полимерной бумаги, в центре окружности пятна растекающейся капли пропитки. Заряженный диск с плотностью поляризованных зарядов $-\sigma'$ расположен на плоскости Q , а симметричный ему заряженный диск с плотностью поляризованных зарядов $+\sigma'$ на плоскости P , параллельной Q и удаленной от нее на расстояние толщины слоя пропитки H (рис. 2).

В рассматриваемой физической модели электрическая сила дискового макродиполя F_{rd} , действующая на единицу длины периметра пятна капли, выражается в размерности $\left(\frac{H}{M}\right)$, подобно силам поверхностного натяжения $\bar{\sigma}_{жг}$, $\bar{\sigma}_{тг}$ и $\bar{\gamma}_{тжс}$.

Расчет силы F_{rd} в некоторой точке 1 на поверхности положительно заряженной ПБ сводится фактически к определению напряженности электрического поля, создаваемого дисковым макродиполем в виде двух заряженных дисков с плечом H . Точка 1 при этом находится за периметром пятна капли на расстоянии $r' = r_0 + a_0$ от центра пятна капли. Тогда полная сила взаимодействия со всеми зарядами на ПБ за периметром капли запишется в виде

$$F_{rd} = \frac{F_r}{2\pi r_0} = \frac{1}{2\pi r_0} \int_{r_0}^{\infty} E_{rd} dq_0, \quad (5)$$

где dq_0 – заряд в пределах бесконечно узкого кольца на полимерной бумаге за периметром пятна капли с поверхностной плотностью заряда $+\sigma_0$; E_{rd} – напряженность электрического поля, создаваемая поляризованными зарядами с плотностью $\pm\sigma'$, расположенными в пятне капли радиусом r_0

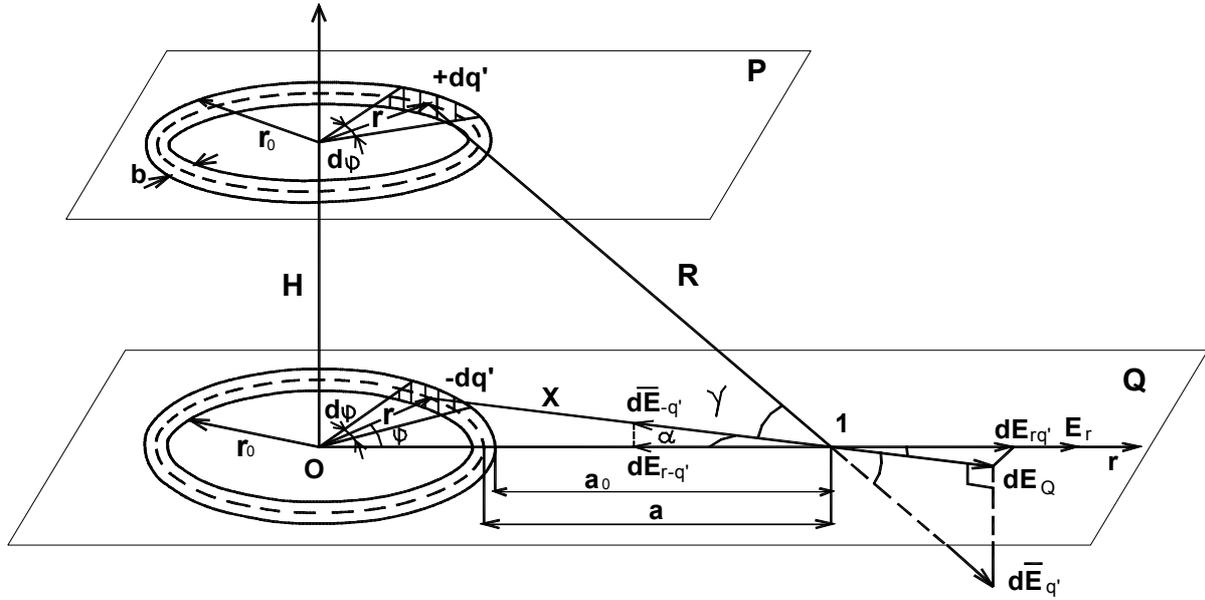


Рис. 2. Схема расчета напряженности электрического поля макродиполя

в точках расположения бесконечно узкого кольца зарядов dq_0 с радиусом r' .

Выражая dq_0 как

$$dq_0 = 2\pi r' dr' \sigma_0, \quad (6)$$

запишем F_{rd} в виде интеграла

$$F_{rd} = \frac{\sigma_0}{r_0} \int_{r'=r_0}^{\infty} E_{rd} r' dr'. \quad (7)$$

При расчетах с помощью уравнения (7) радиус капли r_0 будем считать постоянным. Так как

$$r' = r_0 + a_0, \text{ то } dr' = da_0.$$

Это позволяет переписать интеграл (7) через новую переменную a_0 :

$$F_{rd} = \frac{\sigma_0}{r_0} \int_{a_0=0}^{\infty} E_{rd}(r_0 + a_0) da_0. \quad (8)$$

Как показано в работе [2], электрическое поле поляризованных зарядов за периметром жидкого пятна состава пропитки E_{rd} может быть выражено в виде

$$E_{rd} = \frac{b\sigma' \left(r_0 - \frac{b}{n}\right)}{2\pi\epsilon_0} \int_0^{\pi} \frac{\left[(r_0 + a_0) - \left(r_0 - \frac{b}{n}\right) \cos \varphi \right] \left[X^3 - \left(\frac{16r_m^6}{9r_0^4} + X^2 \right)^{3/2} \right]}{\left(\frac{16r_m^6}{9r_0^4} + X^2 \right)^{3/2} X^3} d\varphi, \quad (9)$$

$$\text{где } X = \left[(r_0 + a_0)^2 + \left(r_0 - \frac{b}{n}\right)^2 - 2\left(r_0 - \frac{b}{n}\right)(r_0 + a_0) \cos \varphi \right]^{1/2}.$$

Для дальнейшего анализа величины электростатической силы F_{rd} важно установить зависимость напряженности поля E_{rd} вблизи границы пятна пропитки от расстояния a_0 .

Результаты проведенного численного интегрирования уравнения (9) в диапазоне $a_0 = 0 \div 10^{-2}$ м при

r_m – радиусе капли до падения $2 \cdot 10^{-3}$ м; r_0 – радиусе пятна растекающейся капли на ПБ $5 \cdot 10^{-3}$ м; b – ширине кольцевого макродиполя $1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $n = 4000$ – числе, корректирующем положение центра эффективного заряда в кольцевом макродиполе, σ' – плотности поляризованных зарядов в растекающейся

ся капле $9,63 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}$, представлены на рис. 3. Как следует из графика зависимости $E_{rd} = f(a_0)$, напряженность электростатического поля быстро спадает при удалении от периметра пятна капли и на расстоянии $a_0 = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м от границы пятна составляет 0,001% от максимального значения при $a_0 = 0$. Это позволяет без потери точности решения ограни-

чить верхний предел интегрирования в уравнении для силы (8) значением $a_0 = 10^{-2}$ м. Задача расчета силы взаимодействия поляризованных зарядов в пределах пятна пропитки с остальными зарядами на ПБ фактически сводится к необходимости нахождения двойного интеграла с переменными φ и a_0 , полученного подстановкой уравнения (9) в уравнение для силы (8).

$$F_{rk} = \frac{\sigma_0 b \cdot \sigma' \left(\pi_0 - \frac{b}{n} \right)}{2\pi \varepsilon_0 r_0} \int_{a_0=0}^{a_0=1 \cdot 10^{-2}} (r_0 + a_0) \cdot da_0 \cdot \int_0^\pi \frac{\left[(r_0 + a_0) - \left(r_0 - \frac{b}{n} \right) \cos \varphi \right] \left[\left(\frac{16 r_u^6}{9 r_0^4} + X^2 \right)^{3/2} - X^3 \right]}{\left[\frac{16 r_u^6}{9 r_0^4} + X^2 \right]^{3/2} X^3} d\varphi, \quad (10)$$

$$\text{где } X = \left[(r_0 + a_0)^2 + \left(r_0 - \frac{b}{n} \right)^2 - 2 \left(r_0 - \frac{b}{n} \right) (r_0 + a_0) \cos \varphi \right]^{1/2}.$$

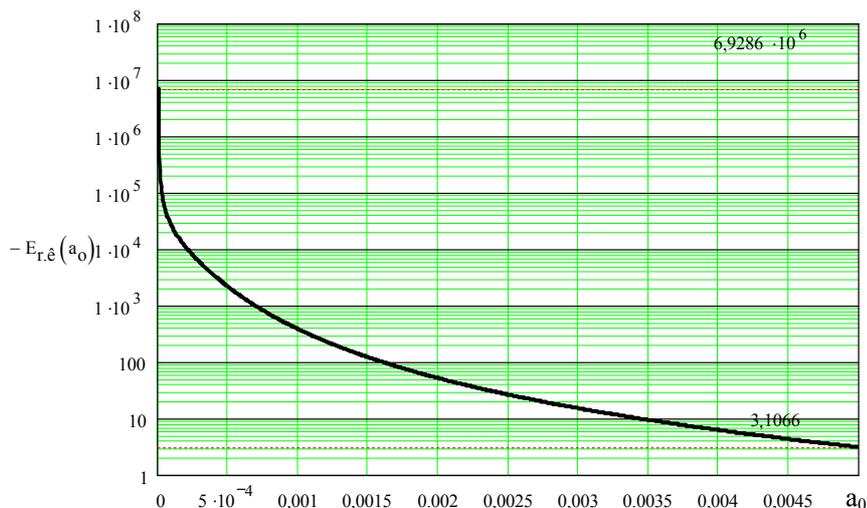


Рис. 3 Зависимость напряженности поля макродиполя от расстояния точки 1 до периметра пятна пропитки: $a_0 = (0 \div 5) \cdot 10^{-3}$ м; $\sigma' = 9,6296 \cdot 10^{-8}$ Кл/м²; $b = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $r_{ш} = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $r_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ м

Остальные параметры в уравнении (10) определены ранее: $r_u = 2 \cdot 10^{-3}$ м; $b = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м; $n = 4000$; $\sigma_0 = 10^{-7}$ Кл/м²; $\sigma' = 9,6296 \cdot 10^{-8}$ Кл/м²; $a_0 = 0 \div 1 \times 10^{-2}$ м; $r_0 = (5 \div 12) \cdot 10^{-3}$ м.

Решение интеграла (10) получено с помощью компьютерной математической программы Mathcad. Уравнение (10) позволяет рассчитать электростатическую силу F_{rk} , действующую на единицу длины

периметра пятна, для конкретно заданного радиуса пятна r_0 . Последовательно находя решения в диапазоне $r_0 = (5 \div 12) \cdot 10^{-3}$ м, получим зависимость электростатической силы на границе пятна пропитки от радиуса пятна r_0 при его растекании в процессе смачивания заряженной ПБ (рис. 4).

Диапазон изменения $r_0 = (5 \div 12) \cdot 10^{-3}$ м на этом графике соответствует экспериментально наблю-

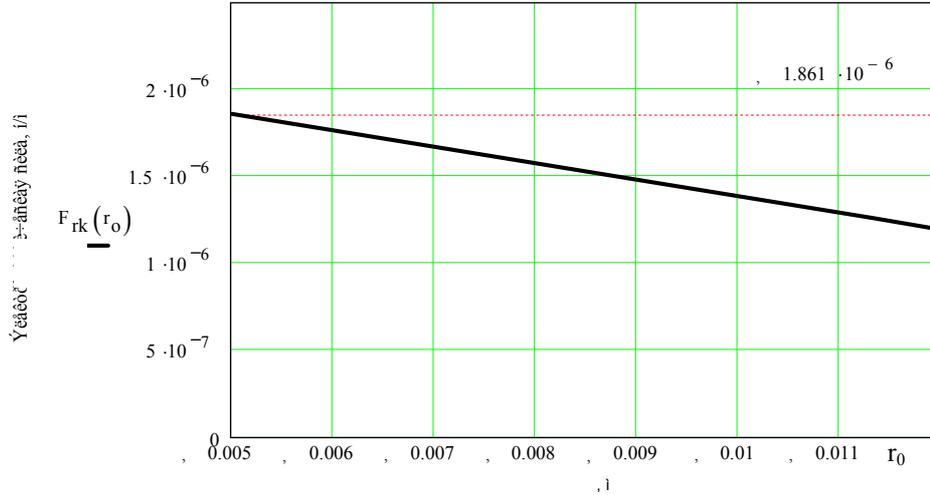


Рис. 4. Электростатическая сила на границе пятна пропитки при его растекании для значений параметров: $\sigma' = 9,6296 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2$; $b = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_{ш} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $\sigma_0 = 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$; $r_0 = (5 \div 12) \cdot 10^{-3} \text{ м}$

даемым значением r_0 при растекании капли на горизонтальной заряженной поверхности ПБ. Ход зависимости $F_{rk} = f(r_0)$ показывает, что электрическая сила, увеличивающая смачивание, максимальна в момент падения капли и незначительно уменьшается к концу растекания пятна пропитки $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ (рис. 4).

Предыдущие расчёты нами выполнены для значения $\sigma_0 = 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$. Значения плотности заряда, реально получаемые при трении ПБ о «сильный»

диэлектрик – резину или полимерную пленку, в экспериментах колебались в зависимости от влажности воздуха в пределах $(2 \div 26) \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$.

Полученные расчетные значения F_{rk} для других плотностей заряда σ_0 можно сравнить со значением коэффициента поверхностного натяжения для этилового спирта как основного компонента состава пропитки. Из справочных данных коэффициент поверхностного натяжения для спирта $\sigma_{ж.з.} = 0,022 \text{ Н/м}$. По данным расчета (рис. 5) элек-

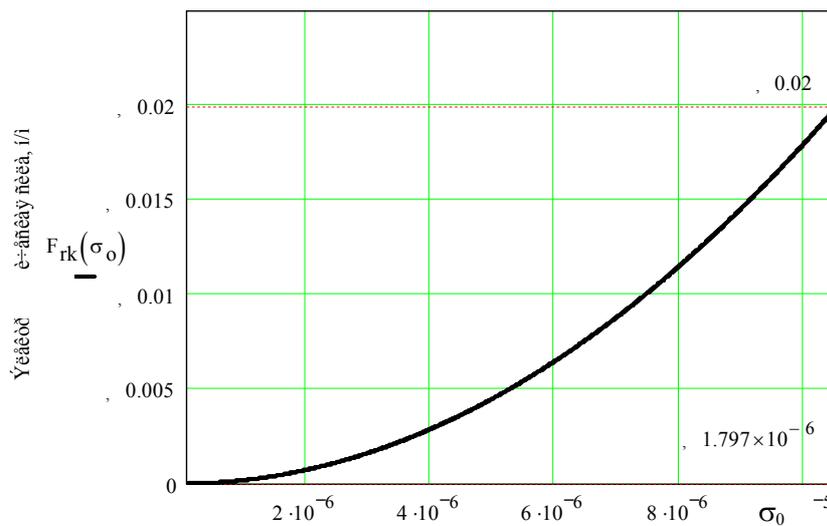


Рис. 5. Зависимость электростатической силы, действующей на единицу длины периметра пятна пропитки, от плотности заряда σ_0 на ПБ: $a_0 = (10^{-8} \div 10^{-2}) \text{ м}$; $\sigma' = 0,9296 \cdot \sigma_0 \text{ Кл/м}^2$; $b = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_{ш} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

тростатическая сила, равная этому значению, может быть получена при плотности заряда на поверхности ПБ $\sigma_0 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Кл/м².

Сопоставление экспериментальных результатов и данных теоретических расчетов электростатической силы позволяет утверждать, что присутствие электростатического заряда на поверхности ПБ увеличивает фактор растекания состава пропитки на заряженной поверхности ПБ, что впервые установлено экспериментально и доказано математическими расчетами.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложена физико-математическая модель расчёта силового взаимодействия статического заряда на поверхности полимерной бумаги с поляризованными зарядами в слое жидкого диэлектрика материала пропитки ПБ.

2. Расчёт электрической силы, действующей на единицу длины периметра контакта жидкого диэлектрика пропитки с заряженной полимерной бумагой, сводится к численному решению двойного интеграла.

3. Впервые выполнены расчёты величины электрической силы на заряженной поверхности ПБ.

4. Показано, что электрическая сила сравнима по величине с силой поверхностного натяжения состава пропитки и увеличивает её растекание по заряженной поверхности ПБ.

Перспективы дальнейших исследований. Предлагаемая физико-математическая модель расчёта электростатической силы, возникающей при контакте жидкого диэлектрика материала пропитки с заряженной поверхностью ПБ, позволяет в дальнейшем учесть влияние электростатических зарядов на толщину формируемого слоя

пропитки, а, следовательно, на прочностные свойства изделий из полимерной бумаги, типа сотового наполнителя.

Литература

1. Гайдачук А.В., Островский Е.К., Сливинский М.В. Накопление электростатического заряда при производстве сотового наполнителя из полимерной бумаги «NOMEX» // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 2 (10). – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – С. 43 – 48.
2. Вамболь А.А., Сливинский М.В. Влияние статической электризации полимерной бумаги на качество сотового наполнителя на ее основе // *Міжнародна науково-технічна конференція „Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2003”*: Тези доповідей. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є. Жуковського „ХАІ”. – 2003. – С. 57.
3. Гайдачук А.В., Сливинский М.В., Островский Е.К., Таран А.А. Электрическое поле заряженного кольца // *Системы обработки інформації*. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 5. – С. 42 – 48.
4. Гайдачук А.В., Сливинский М.В., Островский Е.К., Таран А.А. Математическое моделирование электростатических процессов на границе поляризованного диэлектрика // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2004. – Вып. 37 (2). – С. 7 – 16.
5. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. – М.: Химия, 1974. – 413 с.

Поступила в редакцию 22.05.05

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.