

**МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОСТНОЙ ПЛЕНКИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ВРАЩАЮЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ,
ПОГРУЖЕННЫМ В РАСТВОР ПОЛИМЕРА
В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФОРМИРОВАНИЯ НАНОВОЛОКОН**

**MODEL OF TRANSPORTING FLUID FILM
BY ROTATING CYLINDRICAL ELECTRODE
IMMERSED IN A SOLUTION OF POLYMER IN THE ELECTROPHORESIS UNIT
FOR THE ELECTROFORMATION OF THE NANOFIBERS**

A.P. КОРАБЕЛЬНИКОВ, А.Г. ШУТОВА, М.М. СМІРНОВ, К.А. СЕМЕНОВА
A.R. KORABELNIKOV, A.G. SHUTOVA, M.M. SMIRNOV, K.A. SEMENOVA

(Костромской государственной университет,
Военная академия радиационной, химической и биологической защиты,
Санкт-Петербургский государственный университет)
(Kostroma State University,
Military Academy of Radiation, Chemical and Biological Protection,
Saint-Petersburg State University)
E-mail: prostokar@yandex.ru

Предложена модель транспортирования жидкостной пленки поверхностью цилиндрического вращающегося электрода, погруженного в раствор полимера. Разработана методика определения толщины жидкостной пленки, позволяющая определить рациональные режимы работы установки для электроформирования нановолокон и ее конструктивные параметры.

The model of transportation of liquid film on the surface of the cylindrical rotating electrode are immersed in a polymer solution. A method for determining the liquid film thickness, allowing to define rational modes of operation of the device for electroforming, nanofibers and its parameters.

Ключевые слова: электроформирование нановолокон, электроспиннинг, вращение цилиндра в жидкости.

Keywords: nanofibers elektroforming, electrospinning, the rotation of the cylinder in the liquid.

Одним из важных технологических параметров процесса электроформирования nano- и микроволокон [1] со свободной поверхности полупогруженного в раствор полимера питающего цилиндра [1...4] является толщина пленки раствора на поверхности цилиндра. Этот параметр определяет количество раствора, поступающего в рабочую зону, влияя на интенсивность образования очагов струйного течения раствора [5].

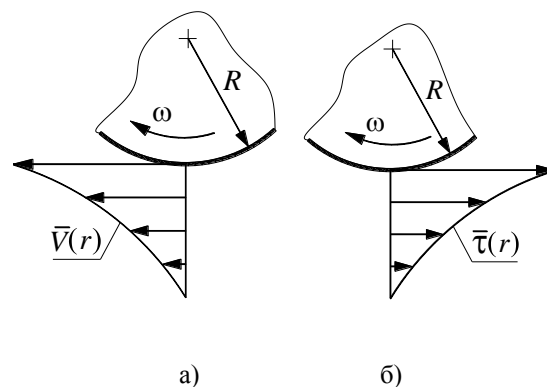


Рис. 1

Для определения толщины пленки раствора полимера на поверхности питающего цилиндра рассмотрим процесс установившегося вращения цилиндра, погруженного в резервуар, заполненный несжимаемой вязкой жидкостью (рис. 1 – распределение скоростей и напряжений в ламинарном слое у поверхности цилиндра). При этом с учетом малых окружных скоростей на поверхности цилиндра [6] для решения поставленной задачи предлагается рассмотреть частные случаи движения жидкости на поверхности цилиндра: движение нижней погруженной части, как вращение в неограниченном объеме жидкости; движение жидкости на переходном участке в зоне забора раствора из резервуара и движение пленки раствора на поверхности цилиндра в рабочей зоне электроформирования волокон.

При вращении цилиндра в вязкой несжимаемой жидкости необходимо учитывать силы сопротивления трения жидкости о поверхность цилиндра, величина которых напрямую зависит от шероховатости поверхности цилиндра. При учете этих сил частицы жидкости на поверхности цилиндра двигаются со скоростью самого цилиндра. В силу вязкости жидкости неровности на поверхности цилиндра увлекают соседние слои жидкости в направлении вращения. При этом скорость каждого последующего слоя снижается.

Рассмотрим движение погруженной части цилиндра (рис. 1), как частное решение задачи о движении несжимаемой вязкой жидкости между двумя коаксиальными, вращающимися вокруг своей оси цилиндрами при отсутствии внешнего цилиндра [8], то есть вращение цилиндра в неограниченном объеме жидкости в цилиндрических осях координат.

Распределение скоростей у поверхности цилиндра при ламинарном движении жидкости имеет вид [8]:

$$V(r) = \frac{\omega R^2}{r}, \quad (1)$$

где r – радиус пограничного слоя, который изменяется в пределах ламинарного течения раствора на поверхности цилиндра в диапазоне $R \geq r \geq (R + \delta)$; δ – толщина пограничного слоя жидкости на поверхности цилиндра; R – радиус цилиндра; ω – угловая скорость вращения цилиндра.

При $r = R \Rightarrow V = \omega R$ – максимальное значение скорости на поверхности вращающегося цилиндра.

При движении цилиндра в резервуаре с раствором скорость затухает до нуля при некотором значении δ . Распределение скоростей в ламинарном слое у поверхности цилиндра показано на рис. 1-а.

Напряжение τ между слоями жидкости при ламинарном течении у поверхности цилиндра согласно [9] определяется с помощью выражения (2) и зависит от свойств раствора, в частности от вязкого сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от концентрации и состава раствора полимера [7]:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dr}, \quad (2)$$

где μ – динамическая вязкость раствора полимера (определяется экспериментально), Па·с.

Подставляем зависимость (1) в (2) и получаем закон распределения касательных напряжений между слоями жидкости в ламинарном слое у поверхности вращающегося цилиндра:

$$\tau(r) = \mu \frac{dV}{dr} = -\frac{\omega R^2 \mu}{r^2}. \quad (3)$$

Знак "-" показывает, что напряжения направлены противоположно скорости вращения цилиндра, то есть оказывают вязкое сопротивление движению жидкости вместе с цилиндром.

Поле распределения напряжений показано на рис. 1-б.

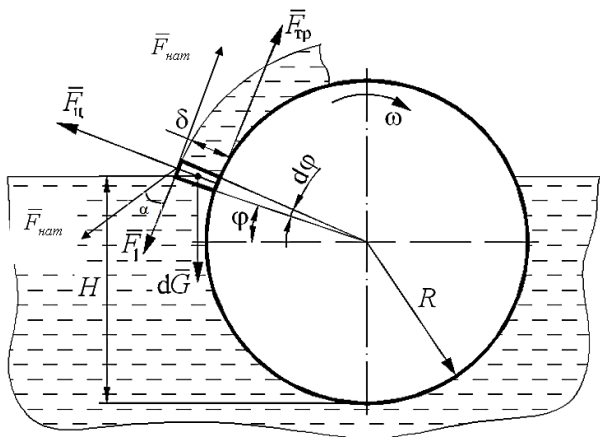


Рис. 2

Рассмотрим равновесие системы сил, действующих на элементарный объем жидкости, на поверхности цилиндра в переходной зоне забора жидкости из резервуара (рис. 2), при котором жидкость продолжает вращаться вместе с цилиндром.

На жидкость на элементарной поверхности цилиндра $dS' = R\ell d\phi$, где ℓ – длина цилиндра, действует некоторая увлекающая сила, равная силе сопротивления трения, которая согласно [9] имеет вид:

$$F_{тр} = C_f dS \rho \frac{V^2}{2}, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости (раствора полимера), кг/м^3 ; C_f – гидравлический коэффициент сопротивления трения, величина которого зависит от числа Рейнольдса и шероховатости поверхности и определяется экспериментально [10].

Существует несколько методик определения гидравлического коэффициента сопротивления. Проведенные нами расчеты показали, что определение этого коэффициента по диаграмме Колбрука – Уайта с учетом эквивалентной шероховатости поверхности [11] дает заниженные результаты и не захватывает диапазон $Re < 1000$. При малых числах Рейнольдса $Re < 2300$ (ламинарный режим движения жидкости) следует использовать зависимость [12]:

$$C_f = \frac{75}{Re},$$

где $Re = \frac{V\rho\ell}{\mu} = \frac{\pi\omega R^2\rho}{\mu}$ – число Рейнольдса для вращающегося цилиндра, погруженного в жидкость.

Сила сопротивления трения создает движение слоя на поверхности цилиндра со скоростью $V = \omega R$. Сила вязкого сопротивления, возникающего при этом между слоями жидкости и направленная по касательной к поверхности цилиндра в сторону, противоположную вращению, может быть определена по формуле:

$$F_1 = \tau dS', \quad (5)$$

где $dS' = r\ell d\phi$ – элементарная площадь каждого слоя жидкости в пределах $R \geq r \geq (R + \delta)$.

Подставляя в (5) зависимость (3), получаем:

$$F_1(r) = -\frac{\omega R^2 \mu \ell}{r} d\phi = -\frac{\omega R \mu}{r} dS. \quad (6)$$

Сила F_1 направлена, как показано на рис. 2, в сторону, обратную вращению цилиндра, препятствует образованию слоя раствора на поверхности и прямо пропорциональна скорости вращения цилиндра и динамической вязкости раствора.

Кроме этого необходимо учитывать действие силы тяжести, которая влечет к стеканию раствора обратно в емкость и равна:

$$dG = \rho g \delta dS, \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения.

При вращении слоя жидкости на элементарный объем массой $dm = \rho dS \delta$ действует центробежная сила, направленная в радиальном направлении:

$$F_{ц} = \rho dS \delta \omega^2 r. \quad (8)$$

Действие этой силы влияет на отрыв жидкостной пленки от поверхности не погруженной части цилиндра при больших

скоростях вращения, что не актуально для рассматриваемого случая.

Также на образование жидкостной пленки оказывают влияние силы поверхностного натяжения $F_{\text{нат}}$ (рис. 1), направленные по касательной к поверхности жидкости с учетом угла смачивания α . Величины угла смачивания и сил поверхностного натяжения определяются экспериментально.

Составив уравнение равновесия сил в проекциях на касательную к поверхности цилиндра (9), можно определить толщину слоя раствора полимера δ , забираемую цилиндром при вращении из емкости, и установить влияние характеристик раствора и скорости вращения цилиндра на ее величину:

$$\sum F = F_{\text{тр}} - G \cos \phi - F_1 + F_{\text{нат}}(1 - \cos \alpha) = 0. \quad (9)$$

Подставим в выражение (9) уравнения для сил (4), (6) и (7), при $r = R + \delta$ получим:

$$\frac{C_f \rho V^2}{2} - \rho g \delta \cos \phi - \frac{\omega R \mu}{(R + \delta)} + F_{\text{нат}}(1 - \cos \alpha) = 0, \quad (10)$$

где $\sin \phi = \frac{|H-R|}{R}$; H – глубина погружения цилиндра в раствор полимера (рис. 1).

Выражение (10) позволяет аналитически оценить количество раствора полимера, забираемое цилиндрическим электродом из емкости в рабочую зону, и показывает, как влияет скорость вращения и диаметр электрода, глубина его погружения и вязкость раствора на этот параметр.

ВЫВОДЫ

1. Разработана модель, описывающая транспортирование жидкостной пленки поверхностью цилиндрического вращающегося электрода, погруженного в емкость с раствором полимера.

2. Разработана методика определения толщины жидкостной пленки на поверхности вращающегося цилиндрического электрода.

1. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г.* Область применения и перспективы развития нановолокнистых материалов // Вестник Костромского гос. технолог. ун-та. – 2014, № 1 (32). С. 48...51.

2. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Потехин В.М.* Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон и исследования его работы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, № 1. С. 127...132.

3. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Смирнов М.М., Семенова К.А.* Создание лабораторного оборудования для получения новых наноструктурных материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 4. С. 235...239.

4. Патент на полезную модель № 133529. Российская Федерация. Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон /Корабельников А.Р. заявитель и патентообладатель Корабельников А.Р. (RU) № 2013116218.; заявлено 09.04.2013; решение о выдаче патента 17.05.2013.

5. *Корабельников А.Р.* Анализ этапов процесса формирования нановолокон. Этап образования очагов струйного течения раствора // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014, №5. С. 120...124.

6. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Потехин В.М.* Исследования влияния формы электрода на процесс получения нановолокон в устройстве для электроформирования // Вестник Костромского гос. технолог. ун-та. – 2013, № 1 (30). С. 52...54.

7. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Смирнов М.М., Семенова К.А.* Влияние концентрации раствора полимера на размер и морфологию волокон, получаемых методом электроформирования // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 5. С. 109...112.

8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. – В 10 т. Т.VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988.

9. *Альтиуль А.Д., Киселев П.Г.* Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). – М.: Стройиздат, 1975.

10. *Путилов К.А.* Курс физики. – Том I. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика. – М.: ГИ ФМЛ, 1963.

11. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. – Л.: Энергия, 1975.

12. *Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др.* Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982.

REFERENCES

1. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G. Oblast' primeneniya i perspektivy razvitiya nanovoloknistyh materialov // Vestnik Kostromskogo gos. tehnolog. unta. – 2014, № 1 (32). S. 48...51.

2. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G., Potehin V.M. Ustrojstvo dlja poluchenija polimernyh nано- i mikrovolokon i issledovaniya ego raboty // Izv. vuzov.

Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2013, № 1. С. 127...132.

3. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G., Smirnov M.M., Semenova K.A. Sozdanie laboratornogo oborudovanija dlja poluchenija novyh nanostrukturnyh materialov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, № 4. S. 235...239.

4. Patent na poleznuju model' № 133529. Rossijskaja Federacija. Ustrojstvo dlja poluchenija polimernih nano- i mikrovolokon /Korabel'nikov A.R. zajavitel' i patentoobladatel' Korabel'nikov A.R. (RU) № 2013116218.; zajavleno 09.04.2013; reshenie o vydache patenta 17.05.2013.

5. Korabel'nikov A.R. Analiz jetapov processa formirovanija nanovolokon. Jetap obrazovanija ocha-gov strujnogo techenija rastvora // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2014, №5. S.120...124.

6. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G., Potehin V.M. Issledovanija vlijanija formy jelektroda na process poluchenija nanovolokon v ustrojstve dlja jelektroformirovanija. // Vestnik Kostromskogo gos. tehnolog. un-ta. – 2013, № 1 (30). S. 52...54.

7. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G., Smirnov M.M., Semenova K.A. Vlijanie koncentracii rastvora polimera na razmer i morfologiju volokon, poluchaemyh metodom jelektroformirovanija // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, № 5. С. 109...112.

8. Landau L.D., Lifshic E.M. Teoreticheskaja fizika. – V 10 t. T.VI. Gidrodinamika. – M.: Nauka, 1988.

9. Al'tshul' A.D., Kiselev P.G. Gidravlika i ajerodinamika (Osnovy mehaniki zhidkosti). – M.: Strojizdat, 1975.

10. Putilov K.A. Kurs fiziki. – Tom I. Mehanika. Akustika. Molekuljarnaja fizika. Termodinamika. – M.: GI FML, 1963.

11. Chugaev R.R. Gidravlika. – L.: Jenergija, 1975.

12. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. i dr. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. – 2-e izd., pererab. – M.: Mashinostroenie, 1982.

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин КГУ. Поступила 19.05.16.