

УДК 677.027.04

DOI 10.47367/0021-3497\_2024\_4\_178

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ  
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКА**

**MATHEMATICAL MODELS OF THE IMPREGNATION PROCESS  
OF TEXTILE MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF ULTRASOUND**

*A.S. МАРУШАК*  
A.S. MARUSCHCHAK

(Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь)

(Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus)

E-mail: alexeymarushak@mail.ru

*Объект исследования – процесс пропитки нетканого полиэфирного материала при воздействии ультразвука. Целью работы является определение основных закономерностей и получение математических моделей процесса пропитки текстильных материалов в операциях заключительной отделки.*

*Автором проведены экспериментальные исследования и установлены зависимости параметров текстильных материалов и полимерной композиции от режимных параметров процесса пропитки.*

*Результаты работы позволяют прогнозировать изменение физико-механических характеристик аппретирующего состава и обрабатываемого нетканого материала в процессе заключительной отделки в условиях УЗ-обработки, оптимизировать технологические параметры процесса пропитки.*

*The object of the study is the process of impregnation of non-woven polyester material under the influence of ultrasound. The purpose of the work is to determine the basic patterns and obtain mathematical models of the impregnation process of textile materials in the final finishing operations.*

*The author conducted experimental studies and established the dependences of the parameters of textile materials and polymer composition on the operating parameters of the impregnation process.*

*The results of the work make it possible to predict changes in the physical and mechanical characteristics of the dressing composition and the processed non-woven material during the final finishing in the conditions of ultrasonic processing, to optimize the technological parameters of the impregnation process.*

**Ключевые слова:** пропитка нетканых материалов, поверхностное натяжение, вязкость, краевой угол смачивания, эффективный радиус капилляров, ультразвуковая пропитка, интенсификация пропитки.

**Keywords:** impregnation of nonwovens, surface tension, viscosity, wetting edge angle, effective radius of capillaries, ultrasonic impregnation, impregnation intensification.

### *Введение*

Известно [1], что для улучшения потребительских и придания специфических свойств текстильным материалам в зависимости от их назначения проводят обработку различными пропитывающими составами на операциях заключительной отделки.

Основными способами улучшения качества пропитывания текстильных материалов являются повышение гидрофильности текстильного материала, смачивающей способности пропиточного раствора, фильтрация раствора через материал, удаление воздуха из капилляров и пор материала перед пропиткой [2].

Дополнительным способом повышения качества и интенсификации процессов отделки текстильных материалов является использование различных подводов энергии. Традиционно используется конвективный способ подвода тепла, однако существуют определенные трудности, связанные с сушкой и термофиксацией, так как полимерные вещества обычно мигрируют к поверхности материала, неравномерно распределяясь по толщине и локализуясь на поверхности волокнистого материала. В результате этого качество отделки материала находится на невысоком уровне [3].

Современные способы подачи тепла, такие как инфракрасное излучение, электромагнитные волны сверхвысокочастотного диапазона, акустическое воздействие ультразвукового диапазона и др., интенсифицируют процессы обработки текстильных материалов. Анализ различных вариантов интенсификации процесса свидетельствует о возможности использования для этого ультразвуковых колебаний [6, 7].

Ультразвуковая пропитка основана на звукокапиллярном эффекте. Звукокапиллярный эффект обнаружен в 70-х годах XX века.

Согласно [4] звукокапиллярный эффект – аномально высокое поднятие жидкости в капиллярах при кавитации.

Под капиллярами понимаются непосредственно волокна материала, а поры – воздушные промежутки между волокнами.

Наиболее распространено предположение о повышении среднего давления у устья капилляра. При кавитации в отрицательный полупериод акустической волны жидкость разрывается при давлении, близком к атмосферному (порог кавитации). Между тем захлопывание кавитационных пузырьков в стадии положительного полупериода сопровождается импульсами давления весьма большой величины. Поэтому среднее за период давление в жидкости оказывается выше атмосферного, что и вызывает ее подъем в капилляре. Если бы это было только так, то уровень подъема жидкости в капилляре не зависел бы от угла его наклона. Однако уровень подъема жидкости увеличивается в несколько раз, когда капилляр перпендикулярен к плоскости излучателя. Это свидетельствует о том, что на подъем жидкости в основном влияют направленные постоянные потоки, которые всегда сопровождают кавитацию, так как в них преобразуется акустическая энергия, затраченная на образование самой кавитации [5].

Текстильные материалы представляют собой анизотропную пористую структуру, которая заполняется жидкостью и газами, содержит капилляры и поры различного радиуса. Такую волокнистую систему нельзя рассматривать как простую сумму линейных капилляров с одинаковым поперечным сечением. Капилляры в волокнистых системах существенно отличаются от цилиндрических трубок, за которые их обычно принимают при выводе основных законов элементарной теории поднятия жидкости в ка-

пиллярах. Таким образом, в процессе импрегнирования существует проблема неоднородности материала, которая возникает из-за неполного заполнения капиллярно-пористой структуры полимерными составами, когда несмотря на высокую скорость пропитывания материал пропитывается плохо и большая часть капилляров остается незаполненной.

Эффективность процесса пропитывания определяется высотой (капиллярностью) и скоростью капиллярного поднятия полимерной композиции. Высота капиллярного поднятия при ультразвуковой обработке текстильных материалов зависит от условий пропитывания (мощность и продолжительность), капиллярно-структурных свойств волокна и физико-химических свойств полимерной композиции, наличия гидрофобных загрязнений и др.

Особенности пропитывания текстильных материалов в условиях воздействия акустических колебаний ультразвукового диапазона не позволяют использовать строгие соотношения, чтобы с достаточной точностью описать процессы капиллярного проникания полимерной композиции в капиллярно-пористую структуру материала. На практике применяются приближенные методы определения скорости капиллярного проникания, основанные на различных предположениях о характере движения жидкости, среди которых наибольшее распространение получило уравнение Волковой-Госкинса-Уошбурна, выведенное из известного закона вязкости Пуазейля [2]:

$$\frac{h^2}{\tau} = \frac{\sigma_{\text{ПК}} \cos \theta}{2 \eta_{\text{ПК}}} R, \quad (1)$$

где  $h$  – высота подъема полимерной композиции (капиллярность), м;  $\tau$  – продолжительность подъема полимерной композиции, с;  $\sigma_{\text{ПК}}$  – поверхностное натяжение полимерной композиции, Н/м;  $\theta$  – краевой угол, град;  $R$  – радиус капилляра, м;  $\eta_{\text{ПК}}$  – вязкость полимерной композиции, Па·с.

#### Методы

Для экспериментальных исследований использовалась опытно-экспериментальная установка (рис. 1) с максимальной мощностью 300 Вт и рабочими частотами 20...40 кГц. Мощность ультразвукового излучения менялась на ультразвуковом генераторе.



Рис. 1

Для проверки гипотезы интенсификации процесса пропитки при воздействии акустических колебаний ультразвукового диапазона проведен эксперимент №1 при концентрации полимерной композиции 200 г/л. Мощность ультразвука составила 100 Вт. Применяемые частоты 20, 28, 40 кГц. В качестве полимерной композиции для пропитки использована дисперсия поливинилацетата. Свойства препарата представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Показатель	Характеристики показателя
Состав	Дисперсия поливинилацетата в воде с пластификатором и специальными добавками
Внешний вид	Высоковязкая дисперсия белого цвета
рН	Около 4–6
Растворимость	Смешивается с холодной и теплой (до 50 °С) водой в любом соотношении
Рекомендации по хранению	Срок хранения в соответствующих условиях (при температуре от -20 до +70°С) не менее 5 лет
Морозоустойчивость	Выдерживает 4-6 циклов заморозки-разморозки
Устойчивость к стирке и химической чистке	Неустойчив к стирке и химчистке

Для изучения влияния режимов ультразвуковой обработки на процесс пропитки текстильных материалов проведен полный

факторный эксперимент №2. В качестве изменяемых факторов выбраны мощность и частота акустического воздействия (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Уровни проведения эксперимента	Натуральные значения фактора		Кодированные значения фактора	
	X1 (мощность, Вт)	X2 (частота, кГц)	X1 (мощность)	X2 (частота)
Основной уровень фактора	200	28	0	0
Интервал варьирования фактора	100	-	1	1
Верхний уровень фактора	300	40	+1	+1
Нижний уровень фактора	100	20	-1	-1

Исследования проводились при трех значениях концентрации полимерной композиции: 100 г/л, 200 г/л, 300 г/л.

*Результаты и обсуждения*

При обработке данных эксперимента №1 получены графические зависимости (рис. 2) процесса пропитки полиэфирных образцов от режимов ультразвукового воздействия.

После обработки данных эксперимента №2 получена статистически значимая математическая зависимость высоты капиллярного подъема от мощности и частоты ультразвука и концентрации полимерной композиции:

$$h_{вз} = \frac{(0,00003P + 0,1279)(-0,0298C + 16,8298)\tau}{0,2166\tau + 11,5}, \text{ мм.} \quad (2)$$

Регрессионные коэффициенты в зависимости (2) определены методом наименьших квадратов с использованием программного пакета для статистического анализа Statistica. Для проверки адекватности коэффициентов регрессионных функций определен коэффициент детерминации R<sup>2</sup>, который составил 0,952. Можно сделать вывод, что полученная регрессионная зависимость с достаточной точностью описывает рассматриваемый процесс и отклонения расчетных и экспериментальных данных находятся в пределах погрешности проведения эксперимента.

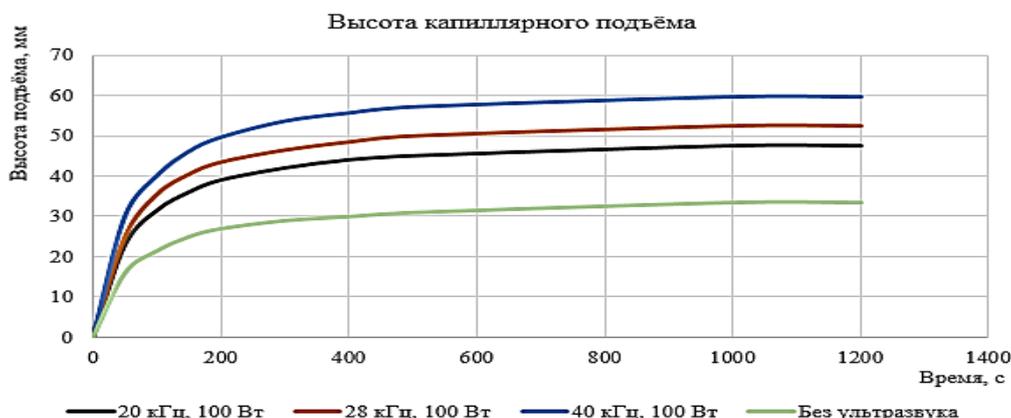


Рис. 2

Анализ графических зависимостей высоты капиллярного подъема полимерной композиции в условиях нагрева с использованием ультразвукового излучения, полученных при постоянной концентрации полимерной композиции (рис. 3), позволяет сделать вывод о том, что при увеличении

частоты ультразвука высота подъема и соответственно эффективность пропитывания увеличиваются.

Полученные закономерности можно объяснить сочетанием капиллярного, гидростатического и кавитационного воздействий в условиях ультразвукового излуче-

ния. Также следует отметить, что применение ультразвукового излучения позволяет получить большую высоту капиллярного подъема полимерного состава.

Сравнивая значения высоты при различных режимах ультразвукового воздействия, можно сделать важное с практической точки зрения предположение о том, что применение акустического воздействия позволяет добиться более качественного результата пропитывания даже при мощно-

стях, в 2,5 раза меньших, чем в условиях традиционного воздействия. Однако для подтверждения данного предположения необходимо провести детальный анализ всех показателей, характеризующих эффективность процесса пропитывания. На рис. 3 представлена зависимость высоты капиллярного подъема ПК от времени при концентрации ПК 200 г/л: 1 – 20 кГц, 2 – 28 кГц, 3 – 40 кГц.

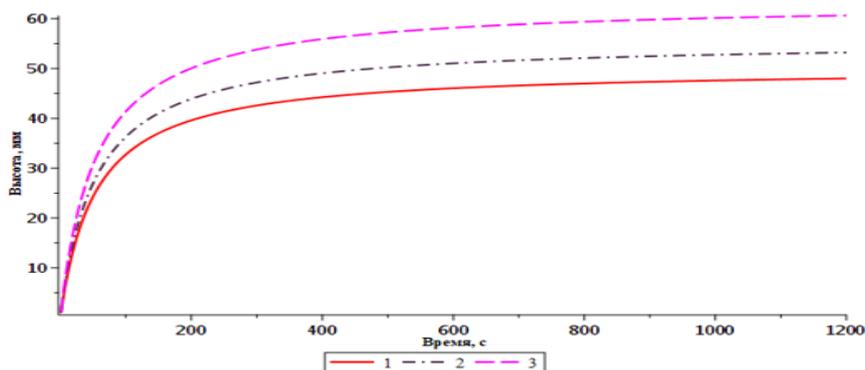


Рис. 3

В результате дифференцирования уравнения (2) по времени получено выражение для определения скорости капиллярного

подъема полимерной композиции в заданный момент времени:

$$v_{yz} = \frac{0,21656T(0,00003P + 0,12796)(-0,02988 \cdot C + 16,82979)}{(0,21656T + 11,50043)^2}, \text{ мм/с} \quad (3)$$

Полученные зависимости скорости пропитывания от режимных параметров обработки соответствуют теории Уошберна, согласно которой скорость движения жидкости в вертикальном цилиндрическом капилляре определяется разностью капиллярного и гидростатического давления. Таким образом, можно предположить, что при пропитывании текстильных материалов в процессе заполнения капиллярно-пористой структуры полимерным составом скорость пропитки стремится к нулю.

Важной характеристикой контактного смачивания является величина краевого угла, т. е. угла между поверхностями жидкости и твердого тела на границе с окружающей средой. Для увеличения полноты смачивания и соответственно краевого угла необходимо, чтобы в процессе обработки происходило

вытеснение адсорбированного воздуха с поверхности текстильного материала и установление равновесного краевого угла [2].

Если молекулы жидкости взаимодействуют с молекулами твердого тела сильнее, чем между собой, то жидкость будет растекаться по поверхности или, как говорят, смачивать ее. Растекание будет происходить до тех пор, пока жидкость не покроет всю поверхность твердого тела или пока слой жидкости не станет мономолекулярным. Такой случай называется полным смачиванием. Он наблюдается при нанесении капли воды на поверхность чистого стекла. Если молекулы жидкости взаимодействуют друг с другом значительно сильнее, чем с молекулами твердого тела, растекания не произойдет. Наоборот, жидкость соберется на поверхности в каплю, которая, если бы

не действовала сила тяжести, должна была бы иметь почти сферическую форму [2].

Определять краевой угол непосредственно на тканях или пучках волокон затруднительно из-за шероховатости их поверхности и быстрого впитывания жидкости в волокнистую систему. Существующие методики не позволяют точно определить краевой угол на поверхности нетканого материала, поэтому в работе использовалась методика определения краевого угла через максимальную высоту капиллярного подъема  $h_{\max}$  для эталонного капилляра известного радиуса  $R_{\text{эт}}$ , выражаемого из уравнения Жюрена [2]:

$$\cos \theta = \frac{h_{\max} R_{\text{эт}} g \rho_{\text{апп}}}{2\sigma_{\text{апп}}}, \quad (4)$$

$$\rho_{\text{апп}} = 0,00165 \cdot 0,999T^3 (-5,1464 \cdot 10^{-7} P + 1467,72) (-0,3574C + 192,46), \quad (5)$$

где коэффициенты определены методом наименьших квадратов.

Для более детального анализа изменения краевого угла в процессе обработки в условиях воздействия акустических коле-

где  $h_{\max}$  – максимальная высота капиллярного подъема, м;  $\sigma_{\text{апп}}$  – поверхностное натяжение ПК, Дж/м<sup>2</sup>;  $\theta$  – краевой угол, рад;  $R_{\text{эт}}$  – радиус эталонного капилляра, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_{\text{апп}}$  – плотность ПК, кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментальные исследования изменения плотности полимерной композиции показали, что плотность является функцией концентрации и температуры и практически не зависит от мощности излучения. С высокой точностью ( $R^2 = 0,99$ ) закономерность изменения плотности полимерной композиции от условий обработки может быть представлена зависимостью:

баний ультразвукового диапазона рассмотрим график, показанный на рис. 4 (зависимость краевого угла от времени при частоте ультразвукового воздействия 28 кГц: 1 – 300 г/л; 2 – 200 г/л; 3 – 100 г/л).

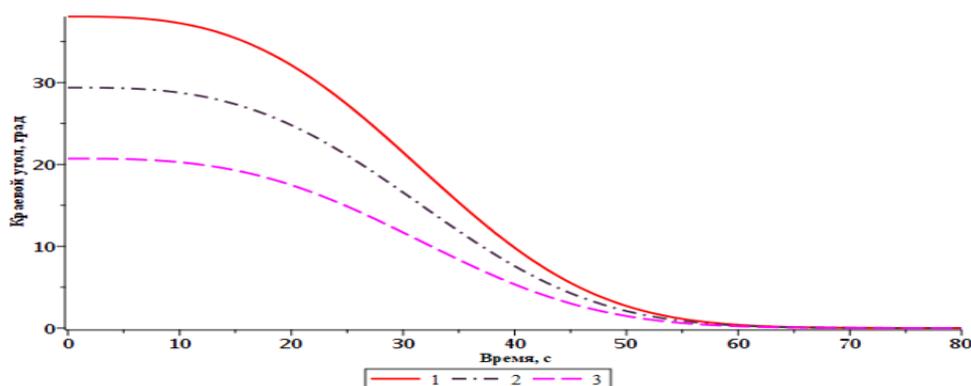


Рис. 4

Характер зависимостей краевого угла смачивания от времени обработки (см. рис. 4) позволяет сделать вывод о полноте смачивания текстильного материала полимерным составом. Изменение краевого угла в процессе обработки от начального до конечного значения называется динамическим гистерезисом смачивания [2].

$$\eta_{\text{вз}} = \frac{0,853 \cdot (-6,5543 \cdot 10^{-12} P + 5,389) (0,005552C + 1,4217)}{T^{0,6298}}. \quad (6)$$

Природа вязкого течения связана с самодиффузией – переносом массы вследствие последовательных актов обмена местами атомов (молекул) в их тепловом движении.

В результате обработки экспериментальных данных получена регрессионная зависимость вязкости:

Коэффициент детерминации  $R^2$  для зависимости (6) составляет 0,99. Анализ полученных зависимостей позволил сделать вывод, что с повышением температуры полимерного состава вязкость уменьшается. Увеличение концентрации состава вызывает увеличение вязкости. Увеличение частоты не вызывает существенных изменений вязкости полимерной композиции для всех исследованных концентраций.

## В Ы В О Д Ы

При пропитывании текстильных материалов в условиях воздействия акустических колебаний ультразвукового диапазона режимные параметры обработки влияют на изменение высоты и скорости подъема жидкости. Увеличение концентрации полимерной композиции приводит к уменьшению максимальной высоты и скорости капиллярного подъема полимерной композиции, а увеличение частоты излучения приводит к увеличению скорости поднятия полимерной композиции.

Установлена связь между параметрами пропитывания и показателями эффективности смачивания: краевым углом смачивания, скоростью пропитывания и др.

Получены математические зависимости изменения показателей эффективности пропитывания от основных параметров обработки (мощности и частоты воздействия ультразвукового излучения, концентрации полимерной композиции), позволяющие определять рациональные режимы процесса пропитывания текстильных материалов.

Установлено, что увеличение мощности излучения приводит к заметному уменьшению краевого угла, с течением времени краевой угол уменьшается и стремится к некоторому постоянному значению. Также увеличение мощности излучения вызывает значительное уменьшение вязкости полимерной композиции для всех исследованных концентраций.

1. *Кричевский Г.Е.* Химическая технология текстильных материалов: учеб. для студентов вузов. В 3 т. Т. 3. М., 2001. 298 с.

2. *Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И., Коган А.Г.* Композиционные текстильные материалы: монография. Витебск: ВГТУ, 2015. 299 с.

3. *Бизюк А.Н., Жерносок С.В., Ясинская Н.Н., Ольшанский В.И.* Исследование пропитки текстильных материалов в поле СВЧ-излучения // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2014. № 1(26). С. 21...28.

4. Ультразвук: маленькая энциклопедия / под ред. И.П. Голяминой. М.: ЕЁ Медиа, 2012. 400 с.

5. *Сирютюк М.Г.* Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 270 с.

6. *Кузнецов В.Б., Корочкина Е.Е., Блинов О.В.* Пропитка суровых тканей и методы ее контроля // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. №1 (53).

7. *Антонова М.В., Парсанов А.С., Красина И.В.* Исследование влияния ультразвуковой обработки на свойства тканей // Костюмология. 2022. Т. 7, № 4.

## R E F E R E N C E S

1. *Krichevsky G.E.* Chemical technology of textile materials: textbook for university students. In 3 vol. Vol. 3. Moscow, 2001. 298 p.

2. *Yasinskaya N.N., Olshansky V.I., Kogan A.G.* Composite textile materials: a monograph. Vitebsk: VGTU, 2015. 299 p.

3. *Bizyuk A.N., Zhernosek S.V., Yasinskaya N.N., Olshansky V.I.* Study of impregnation of tech-stylish materials in the field of microwave radiation // Bulletin of Vitebsk State Technological University. 2014. № 1(26). P. 21...28.

4. Ultrasound: a small encyclopedia / Chap. ed. I.P. Golyamina. Moscow: HER Media. 2012. 400 p.

5. *Siryutyuk M.G.* Acoustic cavitation. Moscow: Nauka, 2008. 270 p.

6. *Kuznetsov V.B., Korochkina E.E., Blinov O.V.* Impregnation of harsh fabrics and methods of its control // Modern high-tech technologies. A regional application. 2018. №1 (53).

7. *Antonova M.V., Parsanov A.S., Krasina I.V.* Investigation of the effect of ultrasonic treatment on the properties of tissues // Kostymologiya. 2022. Vol. 7. No. 4.

Рекомендована кафедрой теплоэнергетики Витебского государственного технологического университета. Поступила 22.04.24.