

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ. ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

doi: 10.51639/2713-0576\_2023\_3\_2\_82

УДК 676.024.741

ГРНТИ 61.55.99

ВАК 05.21.03

**Комбинирование уравнений различного вида для создания математической модели процесса проклейки бумажной массы**

\* Хмызов И. А., Флейшер В. Л., Ловенецкая Е. И., Гиндуш А. Л.

*Белорусский государственный технологический университет  
Республика Беларусь, г. Минск, ул. Свердлова 13а*email: \* [khmyzov@belstu.by](mailto:khmyzov@belstu.by), [v\\_fleisher@list.ru](mailto:v_fleisher@list.ru), [lovinetskaya@belstu.by](mailto:lovinetskaya@belstu.by),  
[anastasia.zayceva.97@mail.ru](mailto:anastasia.zayceva.97@mail.ru)

В работе исследовалось влияние процесса проклейки бумажной массы с применением клеевой канифольной композиции ТМАС-3Н на показатель впитываемости при одностороннем смачивании. При проведении исследований варьировали значения содержания эмульсии ТМАС-3Н в бумажных массах в интервале 0,2...2,0 % от абсолютно сухого волокна и степени помола волокнистой суспензии в интервале значений 25...70 °ШР. В качестве волокнистого полуфабриката использовали целлюлозу сульфатную хвойную беленую. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что для получения адекватного математического описания процесса не могут быть использованы только традиционно применяемые при планировании эксперимента полиномы, необходимо комбинирование двух видов уравнений – полиномиального и логистического. Получены аналитические зависимости, описывающие исследуемый процесс, приведена их графическая интерпретация.

*Ключевые слова:* проклейка бумажной массы, канифольная композиция, уравнения регрессии, математическое описание процесса.

**Теория и методы исследования**

В работе исследовалось влияние процесса проклейки бумажной массы с применением клеевой канифольной композиции ТМАС-3Н на показатель впитываемости при одностороннем смачивании (далее – впитываемость). Целью исследований являлось получение аналитических зависимостей, описывающих процесс проклейки, для последующего решения компромиссной задачи оптимизации и определения наилучшего сочетания факторов, обеспечивающего высокую прочность бумаги при наименьшем возможном значении впитывания. При проведении исследований варьировали значения содержания эмульсии ТМАС-3Н в бумажных массах в интервале 0,2...2,0 % от абсолютно сухого волокна (далее – а. с. в.) и степени помола волокнистой суспензии в интервале значений 25...70 °ШР.

Методика получения образцов бумаги (элементарных слоев картона) заключалась в следующем. В качестве волокнистого полуфабриката использовали целлюлозу сульфатную беленую хвойную (далее ЦСБХ, ГОСТ 9571–89) [1]. Ее подвергали роспуску на дезинтеграторе БМ-3, а затем размолу на ролле в соответствии с ISO 5264/1 до образования

волокнистой суспензии со степенью помола 25, 40 и 70°ШР. Степень помола определяли по ГОСТ 14363.4–89 на приборе СР–2Т. Для получения однородного состава по длине волокна волокнистую суспензию подвергали фракционированию на установке «Messer Buche» («Bauer McNett», Великобритания) с фильтрующими сетками сечением 200, 100, 50 и 20 меш, что соответствует 1,19, 0,59, 0,29 и 0,14 мм. В отобранные бумажные массы вводили канифольную эмульсию ТМАС-3Н, полученную разведением товарного продукта водой до рабочей концентрации 2 %. Количество эмульсии ТМАС-3Н, вводимое в бумажные массы, составляло от 0,2 до 2,0 % от а. с. в. Для равномерного распределения частиц дисперсной фазы эмульсии ТМАС-3Н в межволоконном пространстве, волокнистые суспензии перемешивали в течение 5 мин. Затем для осаждения проклеивающих комплексов на волокнах в бумажные массы вводили 10 %-ный раствор электролита (полиоксихлорида алюминия) до рН бумажной массы 6,5...7,2. Образцы бумаги (элементарные слои картона) с массой 1 м<sup>2</sup> равного 80 г изготавливали на листоотливном аппарате «Rapid-Ketten» («Ernst Naage», Германия). Температура сушки образцов бумаги составляла 100...105 °С. Дальнейшую термообработку проводили на скоростной сушилке «LABTECH SD24E» («Labtech Instruments Inc», Канада) при температуре 120 °С. Гидрофобность образцов бумаги определяли по методу Кобба (ISO 535–91).

Используемая в исследовании клеевая канифольная композиция ТМАС-3Н представляет собой пастообразный продукт с содержанием свободных смоляных кислот 42 % и сухих веществ 55–65%, полученный частичным омылением гидроксидом натрия смеси модифицированной моноэтаноламином смоляных кислот таловой канифоли и малеинизированной канифоли, с последующей стабилизацией казеинатом аммония.

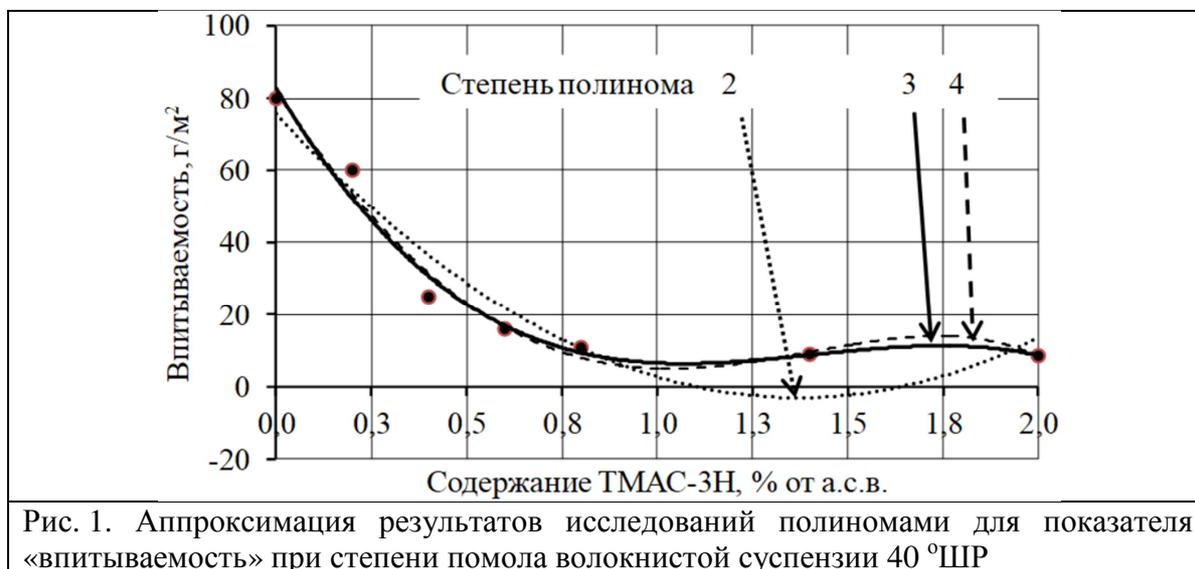
Особенностью клеевой канифольной композиции ТМАС-3Н по сравнению с традиционно используемыми проклеивающими веществами на канифольной основе является наличие в ее структуре амидов смоляных кислот, полученных модифицированием таловой канифоли моноэтаноламином. Впервые использованные амиды смоляных кислот обеспечили клеевой канифольной композиции следующие достоинства: высокое содержание свободных смоляных кислот (40 % и более); проведение процесса проклейки бумажных масс в нейтральной среде (рН 6,5...7,2), что значительно сократила (в 3...4 раза) расход необходимого электролита для осаждения проклеивающих комплексов на волокнах; снижен размер проклеивающих комплексов 3,3...3,8 раза, что позволяет сохранить первоначальную прочность исходных волокнистых полуфабрикатов; универсальный характер гидрофобизирующего действия, который заключается в высокой эффективности как на первичные (целлюлозные), так и вторичные (макулатурные) волокнистые полуфабрикаты.

## Полученные результаты и их обсуждение

В ходе анализа экспериментальных данных было установлено, что применительно к исследуемому объекту традиционно применяемые при обработке планов эксперимента полиномиальные уравнения регрессии не позволяют получить достоверные, соответствующие реальному протеканию процесса, математические зависимости впитываемости от содержания проклеивающей эмульсии ТМАС-3Н в бумажных массах – рис. 1.

Очевидное несоответствие полиномов характеру изменений показателя заключается в том, что при содержании ТМАС-3Н 0...0,4 % от а. с. в. по данным эксперимента происходит вначале плавное, а затем интенсивное снижение значений впитываемости, что полиномами не отражается, а при содержании ТМАС-3Н в интервале значений 1,5...2,0 % от а. с. в. полиномы третьей и четвертой степени показывают наличие несуществующих локальных максимумов.

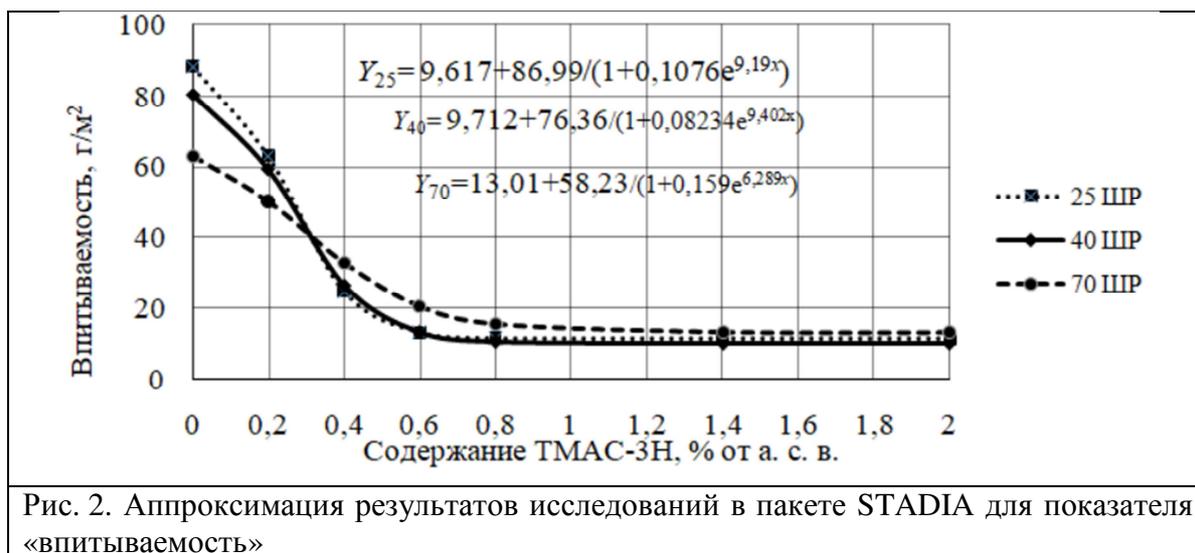
Полином второй степени в интервале значений содержания ТМАС-3Н 1,3...1,5 % показывает отрицательные значения впитываемости. Мы получили бы аналогичный результат (отрицательные значения) если бы, следуя методике планирования эксперимента, варьировали значения фактора на трех уровнях и использовали бы для аппроксимации полином второй степени.



В нашем исследовании с применением пакета STADIA [2] для показателя «впитываемость» в зависимости от содержания проклеивающей эмульсии ТМАС-3Н были получены адекватные логистические зависимости, имеющие общий вид:

$$Y = b_0 + \frac{b_1}{1 + b_2 e^{b_3 x}} \quad (1)$$

Они достоверно и точно отражают влияние содержания эмульсии ТМАС-3Н на впитываемость (рис. 2).



Сопоставительный анализ расчётных значений  $Y_p$ , полученных по логистическим уравнениям регрессии, и экспериментальных значений  $Y_e$  показывает, что они практически совпадают (таблица 1). При этом характер и тенденции изменения расчётных и экспериментальных значений впитываемости на всём интервале изменения содержания ТМАС-3Н хорошо согласуются.

Таблица 1

Сопоставительный анализ экспериментальных и расчётных значений впитываемости

Содержание ТМАС-Н, % от а.с. в.	Впитываемость, г/м <sup>2</sup> , при степени помола, °ШР					
	25		40		70	
	Y <sub>э</sub>	Y <sub>р</sub>	Y <sub>э</sub>	Y <sub>р</sub>	Y <sub>э</sub>	Y <sub>р</sub>
0	88,0	88,1	80,0	80,3	62,5	62,7
0,2	63,1	63,1	60,0	59,3	51,0	50,3
0,4	24,0	24,6	25,0	26,5	32,0	32,6
0,6	14,0	13,0	16,0	13,0	20,0	20,3
0,8	12,4	11,4	10,9	10,4	17,0	15,2
1,4	10,5	11,2	9,0	10,1	13,0	13,1
2,0	10,0	11,2	8,6	10,0	12,0	13,0

Рассматриваемое влияние параметров проклейки на впитываемость образцов бумаги может быть представлено в координатах «впитываемость» как функция значений показателя «степень помола» при фиксированных значениях содержания эмульсии ТМАС-3Н – рис. 3. При рассмотрении в представленных координатах результаты исследований могут быть описаны полиномами второй степени.

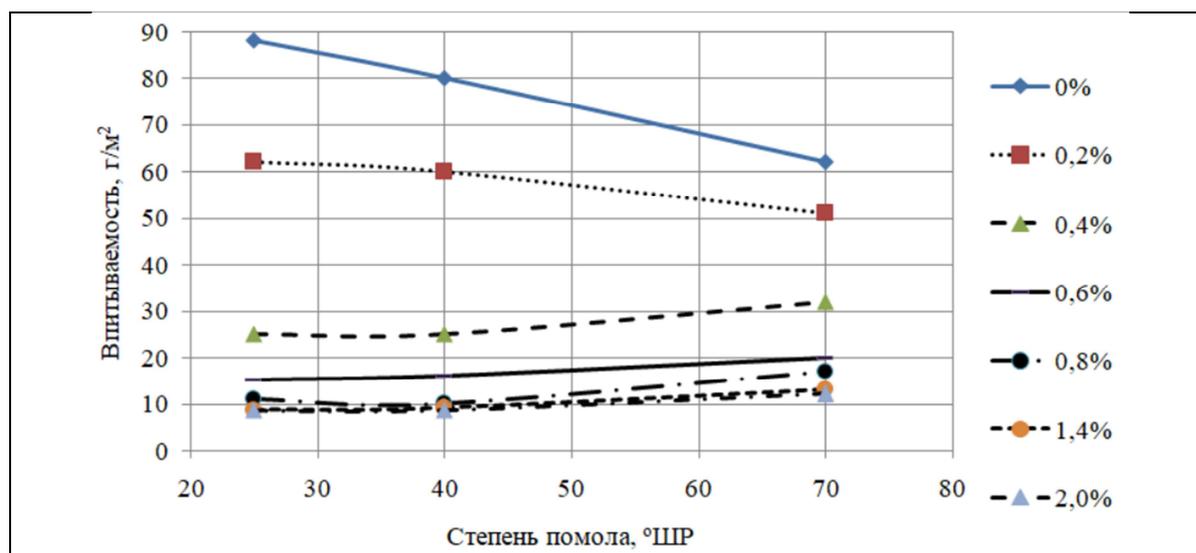


Рис. 3. Влияние степени помола на впитываемость образцов бумаги при фиксированных значениях содержания эмульсии ТМАС-3Н в бумажных массах

Из полученных ранее уравнений регрессии следует, что полное математическое описание объекта исследования в нашем примере, позволяющее оценить значение показателя впитываемость при различных степенях помола и содержаниях эмульсии ТМАС-3Н, должно одновременно состоять из комбинации двух видов уравнений – логистического и полиномиального.

Для решения задачи комбинирования двух видов уравнений на основании информации, изложенной в [3, стр. 300–302], нами было выдвинуто следующее предположение: если при постоянном содержании эмульсии ТМАС-3Н характер изменения впитываемости от степени помола имеет полиномиальный характер, то по полиномиальному закону будут изменяться и коэффициенты логистического уравнения, описывающего зависимость впитываемости от содержания эмульсии ТМАС-3Н в бумажных массах. Иными словами, зная коэффициенты логистических уравнений, приведённых на рис. 2, полученных при рассмотренных степенях помола 25, 40 и 70 °ШР, можно рассчитать коэффициенты соответствующих логистических

уравнений при любой степени помола в интервале значений 25...70 °ШР. Математическая модель исследуемого объекта будет задаваться системой уравнений

$$\begin{cases} Y = b_0 + \frac{b_1}{1+b_2 e^{b_3 x_1}} \\ b_i = k_{i0} + k_{i1} x_2 + k_{i2} x_2^2 \end{cases} \quad (2)$$

где  $Y$  – впитываемость, г/м<sup>2</sup>;

$x_1$  – содержание эмульсии ТМАС-3Н, % от а. с. в.;

$x_2$  – степень помола, °ШР.

Расчёт коэффициентов логистического уравнения

$$b_i = k_{i0} + k_{i1} x + k_{i2} x^2$$

проводили в электронных таблицах Excel. Значения коэффициентов  $b_0$ – $b_3$  логистического уравнения (1) для промежуточных значений степеней помола, не реализованных при проведении эксперимента, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты логистических уравнений регрессии для впитываемости

Степень помола, °ШР	Значения коэффициентов			
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
30	9,53	83,33	0,094	9,39
35	9,57	79,79	0,086	9,46
45	9,97	73,05	0,083	9,21
50	10,35	69,85	0,089	8,89
55	10,84	66,77	0,099	8,44
60	11,45	63,81	0,115	7,85
65	12,17	60,96	0,134	7,14

На основании полученной комбинированной модели процесса (2) была рассчитана матрица (70 значений) и построена двумерная диаграмма, отражающая влияние содержания эмульсии ТМАС-3Н в бумажных массах и степени помола волокнистых суспензий на впитываемость образцов бумаги (рис. 4).

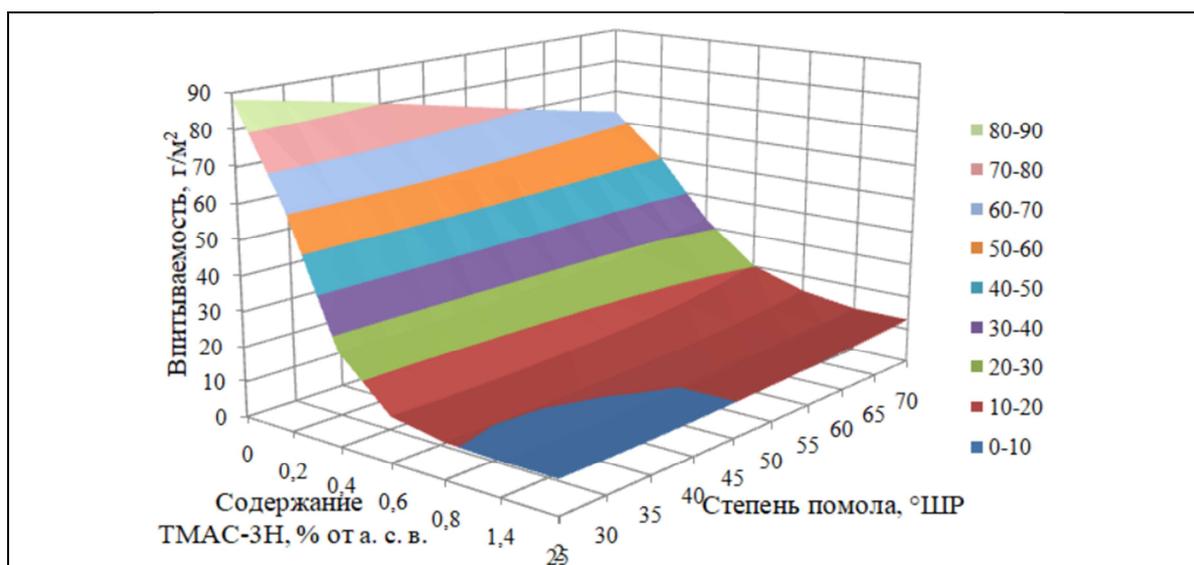


Рис. 4. Графическая интерпретация математической модели зависимости впитываемости образцов бумаги от содержания ТМАС-3Н степени помола

Сопоставительный анализ расчётных и эмпирических значений показателя «впитываемость» показывает, что комбинируя два вида уравнений удалось создать математическую модель,

практически точно численно соответствующую результатам экспериментальных данных и, главное, достоверно отражающую характер изменения значений показателя «впитываемость» от исследуемых факторов, чего в данном исследовании невозможно достичь применяя традиционную методику обработки экспериментальных данных путём получения полиномиальных зависимостей показателя качества от исследуемых факторов.

### Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

### Список литературы

1. Флейшер В. Л., Черная Н. В., Шашок Ж. С. Особенности применения эмульсий димеровалкилкетенов и модифицированных смоляных кислот в целлюлозных и макулатурных суспензиях для получения высококачественных видов бумаги и картона // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя хімічных навук. – 2022. – Т. 58. – № 2. – С. 237–250.
2. Кулаичев А. П. «Методы и средства комплексного статистического анализа данных», 512 с., ил., 5-е изд., перераб. и доп. ИНФРА-М, 2017
3. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1985.- 327 с.: ил

### Combination of common types to create a mathematical model of the sizing process paper pulp

I. A. Khmyzov, V. L. Fleisher, E. I. Lovenetskaya, A. L. Hindush

*Belarusian State Technological University  
Republic of Belarus, Minsk, Sverdlova street 13a*

The paper investigated the effect of the process of sizing paper pulp using the adhesive rosin composition ТМАС-3Н on the absorbency index during unilateral wetting. During the studies, the values of the ТМАС-3Н emulsion content in the paper masses varied in the range of 0,2–2,0 % of the absolutely dry fiber and the degree of grinding of the fibrous suspension in the range of 25–70 °С. As a fibrous semi-finished product, bleached coniferous sulfate cellulose was used. As a result of processing experimental data, it was found that in order to obtain an adequate mathematical description of the process, only the polynomials traditionally used in the planning of the experiment cannot be used, it is necessary to combine two types of equations – polynomial and logistic. Analytical dependencies describing the process under study are obtained, and their graphical interpretation is given logistic. Analytical dependencies describing the process under study are obtained, and their graphical interpretation is given.

*Keywords:* paper pulp sizing. rosin composition, regression equations, mathematical description of the process