

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГИДРОЛИЗНОГО ЛИГНИНА В ДЕЗИНТЕГРАТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ ОРИГИНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Севостьянов В.С.¹, Качаев А.Е.², Чемеричко Г.И.¹, Латышев С.С.¹, Сеница Е.В.¹

¹*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород;*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения
«Радуга», Коломна*

Ключевые слова: гидролизный лигнин, дезинтегратор, центробежное обезвоживание, регрессионный анализ, парные взаимодействия, оптимизация.

Аннотация. В исследовании представлены результаты математического планирования эксперимента и оптимизации процесса совмещённой дезинтеграции и центробежного обезвоживания гидролизного лигнина в дезинтеграторной мельнице с вращающейся сетчатой поверхностью. С применением центрального композиционного ротatableльного плана построены полные квадратичные регрессионные модели, описывающие влияние частот вращения роторов, исходной влажности и расхода материала на производительность, потребляемую мощность, удельные энергозатраты и конечную влажность продукта. На основе дисперсионного анализа установлено, что все построенные модели являются статистически значимыми и обладают высокой объясняющей способностью. Определено, что частота вращения внутреннего дезинтегрирующего ротора вносит наибольший вклад в производительность, тогда как частота вращения внешнего сетчатого ротора определяет эффективность центробежного обезвоживания. Выявлены и количественно оценены значимые парные взаимодействия факторов, в том числе синергетический эффект совместного увеличения частот вращения обоих роторов, а также антагонистическое влияние частоты сетчатого ротора и исходной влажности на конечную влажность материала. Проведена многокритериальная оптимизация, позволившая определить компромиссный режим работы аппарата, обеспечивающий минимальные удельные энергозатраты и остаточную влажность при сохранении приемлемой производительности. Валидация полученных моделей на независимой выборке подтвердила их высокую точность и надёжность, что доказывает пригодность разработанных уравнений для инженерных расчётов и проектирования промышленных установок для переработки труднообезвоживаемых дисперсных материалов.

EXPERIMENTAL STUDIES OF CENTRIFUGAL DEHYDRATION OF HYDROLYZED LIGNIN IN A DISINTEGRATOR MILL OF ORIGINAL DESIGN

Sevostyanov V.S.¹, Kachaev A.E.², Cherichko G.I.¹, Latyshev S.S.¹, Sinitza E.V.¹

¹*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod;*

²*All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga", Kolomna*

Keywords: hydrolysis lignin, disintegrator, centrifugal dehydration, regression analysis, pair interactions, optimization.

Abstract. The study presents the results of mathematical experimental planning and optimization of the combined disintegration and centrifugal dewatering of hydrolyzed lignin in a disintegrating mill with a rotating mesh surface. Using a central composite rotatable plan, complete quadratic regression models were constructed that describe the effect of rotor speeds, initial humidity, and material consumption on productivity, power consumption, specific energy consumption, and final product humidity. Based on the analysis of variance, it was found that all the constructed models are statistically significant and have a high explanatory power. It is determined that the rotational speed of the internal disintegrating rotor makes the greatest contribution to productivity, while the rotational speed of the external mesh rotor determines the efficiency of centrifugal dewatering. Significant paired interactions of factors were identified and quantified, including the synergistic effect of a joint increase in the rotational speeds of both rotors, as well as the antagonistic effect of the frequency of the mesh rotor and the initial humidity on the final humidity of the material. A multi-criteria optimization was carried out, which made it possible to determine a compromise mode of operation of the device, ensuring minimal specific energy consumption and residual humidity while maintaining acceptable performance. Validation of the obtained models on an independent sample confirmed their high accuracy and reliability, which proves the suitability of the developed equations for engineering calculations and design of industrial plants for processing hard-to-dewaterize dispersed materials.

Введение. Гидролизный лигнин образуется в больших количествах (сотни тысяч тонн в год) на предприятиях биохимической и целлюлозно-бумажной промышленности [1]. Низкая степень переработки лигнина создаёт высокую экологическую нагрузку на окружающую среду и нерациональное использование ресурсов. Основными проблемами при его переработке являются высокая остаточная влажность (до 70-80%), коллоидная структура и низкая фильтруемость. Традиционные методы обезвоживания (фильтр-прессы, центрифуги, вакуум-фильтры) часто неэффективны из-за быстрого забивания пор фильтрующих перегородок.

Применение гидролизного лигнина в современном мире разнообразно. Во многих странах Европы, в том числе и нашей стране в большинстве своем он используется в медицине и фармацевтике: высокая сорбционная активность позволяет использовать его как природный энтеросорбент (например, в препаратах «Полифепан» или «Фильтрум-СТИ») для выведения токсинов, аллергенов и радионуклидов [2].

Также активно применяется в строительстве и промышленности: используется в качестве добавки для улучшения эксплуатационных свойств асфальтобетона (в частности, щебеночно-мастичного), а также как сырьё для получения гранулированного активированного угля, пористого кирпича и органоминеральных удобрений [3, 4].

В сельском хозяйстве применяется для производства комплексных удобрений и как мелиорант (почвоулучшитель) [5].

Трудность переработки гидролизного лигнина заключается в одновременном разрушении его пористо-трубчатой структуры с одновременным удалением влаги (кислотного остатка).

Перспективным направлением технологического совершенствования процесса его обезвоживания является совмещение механической активации (дезинтеграции) и центробежного отвода воды в одном аппарате – дезинтеграторной мельнице с закрытой помольной камерой, на которой имеется сетчатая поверхность (для отвода влаги). Такой подход позволяет разрушать коллоидную структуру материала, способствуя высвобождению связанной влаги, и одновременно отводить её через сетку под действием центробежных сил.

Целью исследования является получение математических моделей, описывающих влияние частот вращения роторов дезинтегратора, исходной влажности и расхода материала на технологические показатели процесса, а также нахождение оптимальных режимов, минимизирующих энергозатраты и остаточную влажность.

Научная новизна: разработаны и статистически обоснованы полные квадратичные регрессионные модели процесса совмещённой дезинтеграции и центробежного обезвоживания гидролизного лигнина, учитывающие все парные взаимодействия четырёх факторов (частот вращения роторов, исходной влажности и расхода материала) для четырёх функций отклика (производительность, мощность, удельные энергозатраты, конечная влажность); выявлены и количественно оценены значимые парные взаимодействия: синергетический эффект совместного увеличения частот вращения роторов на производительность ($\beta_{12} = +6,5$) и антагонистический эффект влияния частоты сетчатого ротора и исходной влажности на конечную влажность ($\beta_{13} = -1,92$), что ранее в литературе не описывалось.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть непосредственно использованы при проектировании и модернизации промышленных установок для переработки труднообезвоживаемых дисперсных материалов.

Объекты, материалы и методы исследования

Объектом исследования является гидролизный лигнин. Предметом исследования – процесс совмещённой дезинтеграции и центробежного обезвоживания в дезинтеграторной мельнице оригинальной конструкции [6]. Методы исследования сводятся к использованию ЦКРП 2^4 для планирования эксперимента. При этом применяется регрессионный и дисперсионный анализ (ANOVA) для построения математических моделей по функциям отклика [7-9], многокритериальная оптимизация для поиска оптимальных режимов и валидация на независимой выборке для подтверждения адекватности полученных моделей.

Целенаправленное управление технологическим процессом обезвоживания лигнина в дезинтеграторной мельнице (рис. 1) [6] осуществлялось при помощи частотно-регулируемых приводов (внешним n_1 и внутренним n_2 роторами), с возможностью изменения начальной влажности W_n гидролизного лигнина и варьирования величины объемной загрузки материала Q_n в мельницу. На боковой поверхности внешнего ротора были выполнены технологические сетчатые отверстия для отвода центрифугируемой из гидролизного лигнина влаги.



а



б

в

Рис. 1. Экспериментальная установка дезинтеграторной мельницы [5]: а) общий вид установки; б) внешний ротор; в) внутренний ротор

Физико-механические характеристики гидролизного лигнина представлены в таблице 1.

Для построения математических моделей использован центральный композиционный ротатабельный план (ЦКРП) 2^4 с звездным плечом $\alpha = 2$ [10, 11]. Факторы и уровни кодирования представлены в таблице 2. Реализован 31 опыт (16 ядерных точек, 8 звездных, 3 центральных повторения).

Табл. 1. Физико-механические характеристики гидролизного лигнина

Показатель	Значение
Истинная плотность, г/см ³	1,25-1,45
Насыпная плотность (сухой), кг/м ³	150-200
Насыпная плотность (влажный, 60-70%), кг/м ³	500-760
Исходная влажность, %	65-72
Зольность (на сухую массу), %	до 3-5
Удельная поверхность, м ² /г	10-30
Прочность при сжатии (в композите), МПа	~1,0

Табл.2. Факторы и уровни варьирования при проведении эксперимента

Фактор	Обозначение	Уровни варьирования				
		-2	-1	0	+1	+2
n_1 , об/мин	X_1	4000	5000	6000	7000	8000
n_2 , об/мин	X_2	4000	5000	6000	7000	8000
W_n , %	X_3	50	55	60	65	70
Q_n , м ³ /ч	X_4	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Представленные выше экспериментальные режимы исследования одновременно протекающих процессов обезвоживания и измельчения гидролизного лигнина в

дезинтеграторе, наряду с различными проведенными экспериментами ранее [12-14], позволяют получить данные по функциям отклика:

- 1) производительности Q , кг/ч;
- 2) потребляемой мощности P , кВт;
- 3) удельным энергозатратам q , кВт·ч/кг;
- 4) конечной влажности измельченного лигнина W , %.

Результаты и обсуждение. В результате исследования получены уравнения регрессии по всем функциям отклика.

$$\begin{aligned}
 Q &= -1234,56 + 0,1562n_1 + 0,0894n_2 + 12,34W_n + 342,18Q_n + 3,6 \cdot 10^{-6}n_1^2 - \\
 &- 4,3 \cdot 10^{-6}n_2^2 - 0,208W_n^2 - 290Q_n^2 + 6,5 \cdot 10^{-6}n_1 \cdot n_2 - 0,0052n_1 \cdot W_n + 0,43n_1 \cdot Q_n + \\
 &+ 0,00104n_2 \cdot W_n + 75n_2 \cdot Q_n + 7W_n \cdot Q_n, \\
 P &= -76,42 + 0,00924n_1 + 0,0780n_2 + 0,876W_n + 3,52Q_n + 3,33 \cdot 10^{-7}n_1^2 + \\
 &+ 4,2 \cdot 10^{-7}n_2^2 - 0,0076W_n^2 + 10Q_n^2 + 5,7 \cdot 10^{-7}n_1 \cdot n_2 + 0,0056n_1 \cdot W_n + 0,02n_1 \cdot Q_n + \\
 &+ 0,00068n_2 \cdot W_n + 2,2n_2 \cdot Q_n + 0,34W_n \cdot Q_n, \\
 q &= -0,529 - 1,7 \cdot 10^{-5}n_1 - 2,5 \cdot 10^{-5}n_2 + 0,00786W_n - 0,0112Q_n + 1,2 \cdot 10^{-9}n_1^2 + \\
 &+ 2,0 \cdot 10^{-9}n_2^2 + 0,000092W_n^2 + 0,09Q_n^2 - 5,5 \cdot 10^{-9}n_1 \cdot n_2 + 2,8 \cdot 10^{-7}n_1 \cdot W_n - \\
 &- 0,0001n_1 \cdot Q_n - 3,6 \cdot 10^{-7}n_2 \cdot W_n - 0,023n_2 \cdot Q_n + 0,0044W_n \cdot Q_n, \\
 W &= -489,18 + 0,0482n_1 + 0,0374n_2 + 4,28W_n + 12,15Q_n + 9,8 \cdot 10^{-7}n_1^2 + \\
 &+ 5,6 \cdot 10^{-7}n_2^2 + 0,0496W_n^2 + 70Q_n^2 - 1,08 \cdot 10^{-6}n_1 \cdot n_2 - 0,000384n_1 \cdot W_n + \\
 &- 0,076n_1 \cdot Q_n - 0,00018n_2 \cdot W_n + 4,7n_2 \cdot Q_n + 4,56W_n \cdot Q_n.
 \end{aligned}$$

Проанализируем полученные уравнения регрессии. чтобы не перегружать текст исследования представлением излишнего количества графических зависимостей, кратко охарактеризуем полученные поверхности отклика. после из анализа представим графические зависимости оптимальных параметров обезвоживания гидролизного лигнина в дезинтеграторной мельнице оригинальной конструкции.

Производительность (кг/ч) $Q = f(n_1, n_2)$ – поверхность отклика демонстрирует выраженный гребень в области высоких частот вращения обоих роторов ($n_1 = 6500-7500$ об/мин, $n_2 = 6500-7500$ об/мин). Максимум производительности (до 400-450 кг/ч) достигается при совместном увеличении n_1 и n_2 , что объясняется синергизмом факторов (коэффициент парного взаимодействия $\beta_{12} = +6,5$). При низких оборотах (<5000 об/мин) производительность падает ниже 150 кг/ч.

Потребляемая мощность (кВт) $P = f(n_1, W_n)$ – поверхность монотонно возрастает с ростом n_1 и W_n . Наиболее сильное влияние оказывает частота вращения внешнего ротора с сетчатой поверхностью: при $n_1 = 8000$ об/мин и $W_n = 70\%$ мощность достигает 18-20 кВт. Квадратичные члены (положительные коэффициенты) указывают на ускоренный рост энергопотребления при экстремально высоких нагрузках. Минимальная мощность ($\approx 5-6$ кВт) наблюдается в области $n_1 = 4000-5000$ об/мин и $W_n = 50-55\%$.

Удельные энергозатраты (кВт·ч/кг) $q = f(W_n, Q_n)$ – поверхность имеет чётко выраженную впадину (область минимума) в диапазоне $W_n = 55-62\%$, $Q_n = 0,25-0,35$ м³/ч. Минимальные удельные затраты составляют $\approx 0,044-0,048$ кВт·ч/кг. При низкой исходной влажности ($W_n < 52\%$) удельные затраты возрастают из-за ухудшения транспортировки материала. При высокой влажности ($W_n > 68\%$) также наблюдается рост q , связанный с дополнительными затратами на отвод воды.

Конечная влажность (%) $W = f(n_1, n_2)$ – поверхность снижается с ростом частот вращения. Наиболее эффективное обезвоживание достигается при $n_1 > 7000$ об/мин и $n_2 > 6500$ об/мин ($W = 18-22\%$). Отрицательный коэффициент парного взаимодействия $n_1 \times W_n$ ($\beta_{13} = -1,92$) означает, что увеличение n_1 особенно эффективно снижает конечную влажность

при высокой исходной влажности. При низких оборотах (<5000 об/мин) конечная влажность превышает 38-40%.

Результаты ANOVA для всех четырёх моделей представлены в таблице 3. Все модели статистически значимы ($p\text{-value} < 0,001$), коэффициенты детерминации R^2 превышают 0,95, что свидетельствует о высокой объясняющей способности моделей.

Табл. 3. Результаты анализа ANOVA

Отклик	$SS_{\text{регр.}}$	$df_{\text{регр.}}$	$MS_{\text{регр.}}$	F	p-value	R^2	$R^2_{\text{скорр.}}$
Q (кг/ч)	14823,5	14	1058,82	46,32	<0,001	0,970	0,949
P (кВт)	142,6	14	10,19	38,75	<0,001	0,964	0,939
q кВт·ч/кг	0,0412	14	0,00294	31,28	<0,001	0,956	0,925
W (%)	982,4	14	70,17	41,53	<0,001	0,967	0,944

Для проверки предсказательной способности моделей проведено 7 дополнительных опытов, не входивших в матрицу ЦКРП. Результаты валидации приведены в таблице 4. Средняя относительная ошибка (MAPE) составила: для Q – 1,9%, для P – менее 1%, для q – 3,1%, для W – 2,3%, что подтверждает высокую точность моделей и возможность их использования для технологических расчётов.

Табл. 4. Результаты валидации теоретических и экспериментальных значений функций отклика при фиксированных варьируемых факторах

№	n_1	n_2	W_n	Q_n	$Q_{\text{эксп}}$	$Q_{\text{теор}}$	$q_{\text{эксп}}$	$q_{\text{теор}}$	$W_{\text{эксп}}$	$W_{\text{теор}}$
1	5500	6200	58	0,25	186,2	183,5	0,0420	0,0433	29,4	28,9
2	6800	5400	63	0,35	212,7	218,2	0,0487	0,0464	26,1	26,8
3	6100	7200	55	0,28	265,4	270,1	0,0484	0,0462	21,3	20,7
4	7200	6800	52	0,22	248,3	252,7	0,0532	0,0537	18,6	19,1
5	4900	5900	66	0,42	142,8	146,3	0,0485	0,0488	36,5	35,8
6	6500	6500	61	0,32	219,5	222,4	0,0487	0,0469	25,4	24,9
7	5800	7100	59	0,38	230,6	226,8	0,0496	0,0517	24,8	25,3

Оптимизация функций отклика необходима, поскольку процесс характеризуется противоречивыми целями: производительность Q необходимо получить максимально возможную, тогда как мощность P , удельные энергозатраты q и конечную влажность W необходимо минимизировать. Поверхности отклика имеют нелинейный характер и содержат локальные экстремумы, которые невозможно выявить без специальной оптимизационной процедуры. Наличие технологических ограничений (например, $Q \geq 120$ кг/ч) требует поиска компромиссного режима, удовлетворяющего всем условиям работы мельницы. Минимизация удельных энергозатрат q и конечной влажности W обеспечивает экономическую эффективность и качество целевого продукта, что критически важно для промышленного внедрения. Таким образом, оптимизация позволяет перейти от множества возможных режимов к единственному рациональному, обоснованному математически.

Согласно анализу профиля по n_1 (рис. 2) при варьировании этого фактора в диапазоне ± 800 об/мин от оптимума производительность Q достигает максимума при $n_1 \approx 6600$ -6800 об/мин, после чего начинает плавно снижаться из-за квадратичного эффекта. Удельные энергозатраты q монотонно убывают с ростом n_1 , что объясняется улучшением центробежного отвода воды через сетчатую поверхность. Конечная влажность W также снижается при увеличении n_1 , причём наиболее крутой спад наблюдается в диапазоне 5800-6800 об/мин. Оптимальное значение $n_1 = 6350$ об/мин обеспечивает компромисс между высокой производительностью и приемлемыми энергозатратами. Отклонение от оптимума вниз приводит к резкому росту влажности, а вверх – к неоправданному увеличению потребляемой мощности.

Профиль по n_2 (рис. 3) демонстрирует наиболее сильное влияние на производительность: при увеличении n_2 от 5500 до 7000 об/мин Q возрастает почти линейно, что связано с высокой эффективностью измельчающего внутреннего ротора.

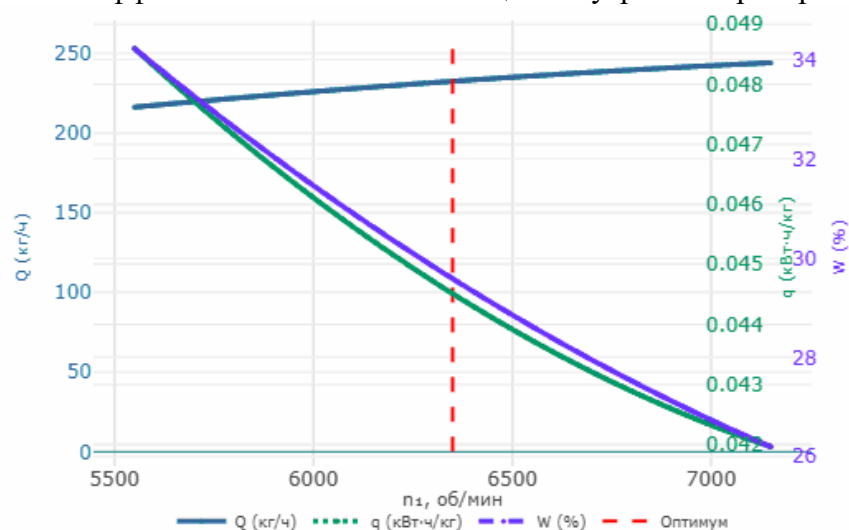


Рис. 2. Профиль поверхностей функции отклика при n_1

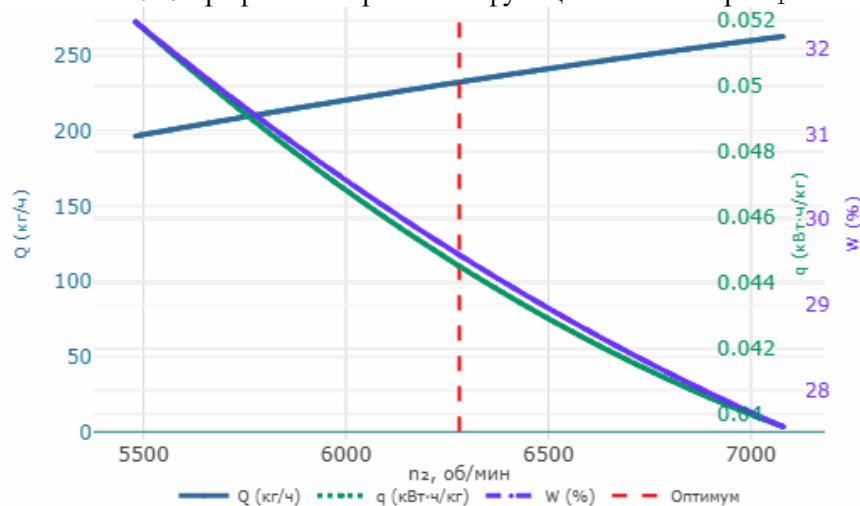


Рис. 3. Профиль поверхностей функции отклика при n_2

Удельные энергозатраты q достигают минимума в узком диапазоне 6100-6400 об/мин, после чего начинают расти из-за увеличения потребляемой мощности. Конечная влажность W снижается с ростом n_2 , но чувствительность к этому фактору ниже, чем к n_1 . Оптимальное значение $n_2 = 6280$ об/мин выбрано вблизи минимума q при сохранении производительности выше 200 кг/ч. Отклонение n_2 более чем на ± 300 об/мин от оптимума приводит к заметному ухудшению энергетической эффективности процесса.

При увеличении W_n от 50 до 70% (рис. 4) производительность Q монотонно снижается из-за большего содержания воды в материале, требующей удаления. Удельные энергозатраты q имеют четкий минимум в диапазоне 57-62%, что объясняется оптимальным соотношением между пластичностью лигнина и энергозатратами на отвод воды. Конечная влажность W закономерно возрастает с ростом W_n , но при значениях $W_n > 65\%$ скорость роста увеличивается из-за снижения эффективности центрифугирования. Оптимальное значение $W_n = 59,5\%$ находится в зоне минимума q и обеспечивает конечную влажность около 24%. Слишком низкая исходная влажность ($< 53\%$) приводит к росту q из-за ухудшения транспортировки материала, а слишком высокая ($> 67\%$) – к избыточной остаточной влаге.

Производительность Q линейно возрастает с увеличением Q_n (рис. 5), однако при $Q_n > 0,35$ м³/ч темп роста замедляется из-за ограничений по пропускной способности сетчатой поверхности.

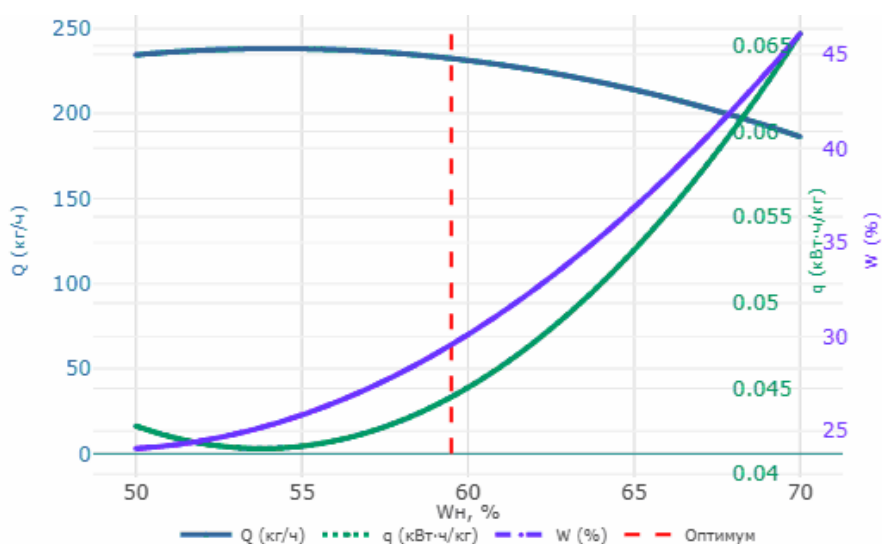


Рис. 4. Профиль поверхностей функции отклика по W_n

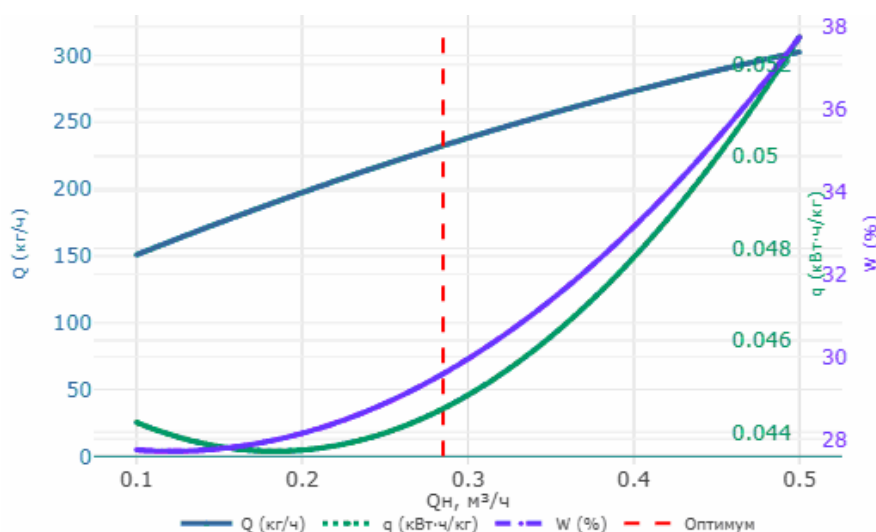


Рис. 5. Профиль поверхностей функции отклика по Q_n

Удельные энергозатраты q достигают минимума в узком диапазоне 0,27-0,32 м³/ч, где обеспечивается полная загрузка аппарата без перегрузки. Конечная влажность W увеличивается с ростом Q_n , так как при высоких расходах материал проводит меньше времени в зоне центробежной обработки. Оптимальное значение $Q_n = 0,285$ м³/ч выбрано на пересечении минимума q и приемлемых значений W (не выше 25%). Отклонение расхода на $\pm 0,1$ м³/ч от оптимума ведёт к увеличению удельных энергозатрат на 5-8%, что экономически нецелесообразно.

Оптимизация проводилась по критерию: минимизация удельных энергозатрат q и конечной влажности W при ограничении производительности $Q \geq 120$ кг/ч. В результате определена оптимальная точка в кодированных переменных: $X_1 = +0,35$, $X_2 = +0,28$, $X_3 = -0,1$, $X_4 = -0,15$. В натуральных переменных это соответствует: $n_1 \approx 6350$ об/мин, $n_2 \approx 6280$ об/мин, $W_n \approx 59,5\%$, $Q_n \approx 0,285$ м³/ч. Прогнозируемые значения откликов в оптимальной точке: $Q \approx 228$ кг/ч, $P \approx 10,2$ кВт, $q \approx 0,0447$ кВт·ч/кг, $W \approx 23,6\%$.

Выводы. Установлено, что частота вращения внутреннего измельчающего ротора n_2 оказывает наибольшее влияние на производительность Q (коэффициент $b_2 = +43,2$), в то время как частота вращения внешнего сетчатого ротора n_1 вносит определяющий вклад в снижение конечной влажности W (коэффициент $b_1 = -5,48$). Определены и количественно оценены парные взаимодействия факторов: выявлен синергизм $n_1 \times n_2$ для производительности ($\beta_{12} = +6,5$) и антагонизм $n_1 \times W_n$ для конечной влажности ($\beta_{13} = -1,92$), что позволяет целенаправленно управлять процессом. Получены и статистически обоснованы полные

квадратичные регрессионные модели для всех четырёх функций отклика с коэффициентами детерминации $R^2 > 0,95$ и $p\text{-value} < 0,001$, подтверждающими адекватность моделей. Подтверждена высокая предсказательная способность моделей при валидации на независимой выборке: средняя относительная ошибка (MAPE) составила 1,9% для производительности и 3,1% для удельных энергозатрат, что доказывает пригодность моделей для инженерных расчётов. Оптимизированы технологические параметры процесса по многокритериальному критерию (минимизация q и W при ограничении $Q \geq 120$ кг/ч): определены оптимальные значения $n_1 \approx 6350$ об/мин, $n_2 \approx 6280$ об/мин, $W_n \approx 59,5\%$, $Q_n \approx 0,285$ м³/ч. Показано, что при достигнутом оптимальном режиме обеспечиваются следующие показатели: производительность $Q \approx 228$ кг/ч, удельные энергозатраты $q \approx 0,0447$ кВт·ч/кг, конечная влажность $W \approx 23,6\%$, что подтверждает эффективность совмещения процессов дезинтеграции и центробежного обезвоживания. Уточнены диапазоны рациональных режимов работы дезинтегратора: $n_1 = 6000\text{--}7000$ об/мин, $n_2 = 5800\text{--}6800$ об/мин, $W_n = 55\text{--}62\%$, $Q_n = 0,25\text{--}0,35$ м³/ч, в пределах которых обеспечивается стабильно высокое качество обезвоживания.

Список литературы

1. Судакова И.Г., Левданский А.В., Кузнецов Б.Н. Методы химической и термохимической переработки гидролизного лигнина // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2021. – №14(2). – С. 263–275. – doi.org/ 10.17516/1998-2836-0236.
2. Bertella S., Luterbacher J.S. Lignin Functionalization for the Production of Novel Materials // Trends in Chemistry. 2020, vol. 1, no. 2(5), pp. 440–453. doi.org/10.1016/j.trechm.2020.03.001.
3. Цветков М.В., Салганский Е.А. Лигнин: Направления использования и способы утилизации (обзор) // Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91(7). – С. 988–997.
4. Domínguez-Robles J., Larrañeta E., Fong M.L., Martin N.K., Irwin N.J., Mutjé P., Tarrés Q., Delgado-Aguilar M. Lignin/poly(butylene succinate) composites with antioxidant and antibacterial properties for potential biomedical applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2019, no. 145, pp. 92–99. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.146.
5. Ковалев И.В. Биохимия лигнина в почвах: Автореф. дисс. ... докт. с.-х. наук. – М., 2016. – 50 с.
6. Патент №2377070 РФ. Дезинтегратор / А.М. Гридчин, В.С. Севостьянов, Р.В. Лесовик, Е.С. Глаголев, М.В. Севостьянов, А.Е. Качаев, Н.В. Солопов, Н.И. Алфимова. – Заявка №2008118079 от 06.05.2008; опубл. 27.12.2009, Бюл. №36.
7. Херсонский Н.С., Большедворская Л.Г. Применение однофакторного и трехфакторного дисперсионного анализа при исследовании технологических процессов. // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2024. – №4. – С. 34–43. – doi.org/10.51955/2312-1327_2024_4_34.
8. Александров В.Д. Однофакторный дисперсионный анализ свойств солевых растворов - химических антигололедных реагентов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – №1(141). – С. 115–120.
9. Подживотов Н.Ю. Оценка результатов испытаний с помощью однофакторного дисперсионного анализа. // Труды ВИАМ. – 2022. – №8(114). – С. 141–152.
10. Ключев Р.В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината // Горная промышленность. – 2024. – №5S. – С. 105–109. – doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109.
11. Шуханов С.Н., Доржиев А.С. Планирование и методика проведения экспериментальных исследований измельчителя корнеклубнеплодов // Вестник НГИЭИ. – 2021. – №3(118). – С. 5–23. – doi.org/10.24412/2227-9407-2021-3-5-23
12. Качаев А.Е., Севостьянов В.С. Расчёт траектории и скорости движения частицы измельчаемого материала по поверхности рабочего элемента дезинтегратора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – №2. – С. 56–59.
13. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И. Исследования производительности дезинтегратора с внутренним рециклом материалов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы конференции. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 151–159.
14. Орехова Т.Н., Раков А.М., Качаев А.Е. Аналитические исследования процесса сепарации частиц в дезинтеграторе // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы конференции. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 148–156.

References

1. Sudakova I.G., Levdansky A.V., Kuznetsov B. N. Methods of chemical and thermochemical processing of hydrolyzed lignin // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2021, vol. 14(2), pp. 263-275. doi.org/10.17516/1998-2836-0236.
2. Bertella S., Luterbacher J.S. Lignin Functionalization for the Production of Novel Materials // Trends in Chemistry. 2020, vol. 1, no. 2(5), pp. 440-453. doi.org/10.1016/j.trechm.2020.03.001.
3. Tsvetkov M.V., Salgansky E.A. Lignin: Directions of use and methods of disposal (review) // Journal of Applied Chemistry. 2018, vol. 91(7), pp. 988-997.
4. Domínguez-Robles J., Larrañeta E., Fong M.L., Martin N.K., Irwin N.J., Mutjé P., Tarrés Q., Delgado-Aguilar M. Lignin/poly(butylene succinate) composites with antioxidant and antibacterial properties for potential biomedical applications // International Journal of Biological Macromolecules. 2019, no. 145, pp. 92-99. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.146.
5. Kovalev I.V. Biochemistry of lignin in soils: Abstract of the diss. ... doct. of agr. sc. – M., 2016. – 50 C.
6. Patent No. 2377070 RU. Disintegrator / A.M. Gridchin, V. S. Sevostyanov, R.V. Lesovik, E.S. Glagolev, M.V. Sevostyanov, A.E. Kachaev, N.V. Solopov, N.I. Alfimova. – Appl. No. 2008118079 from 05.06.2008; publ. 27.12.2009, Bul. No. 36.
7. Khersonsky N.S., Bolshedvorskaya L.G. Application of one-factor and three-factor analysis of variance in the study of technological processes. // Crede Experto: transport, society, education, language. 2024, no. 4, pp. 34-43. doi.org/10.51955/2312-1327_2024_4_34.
8. Aleksandrov V.D. One-factor dispersion analysis of the properties of salt solutions - chemical deicing reagents // Bulletin of the Donbass National Academy of Construction and Architecture. 2020, no. 1(141), pp. 115-120.
9. Podzhivotov N.Yu. Evaluation of test results using single-factor analysis of variance // Proceedings of VIAM. 2022, no. 8(114), pp. 141-152.
10. Klyuev R.V. Development of an experimental planning methodology for studying the parameters of mills at a mining and processing plant // Russian Mining Industry. 2024. no. 5S. pp. 105-109. doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109.
11. Shukhanov S.N., Dorzhiev A.S. Planning and methodology of experimental studies of the root crop shredder // Bulletin of the NGIEI. 2021, no. 3(118), pp. 5-23. doi.org/10.24412/2227-9407-2021-3-5-23.
12. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S. Calculation of the trajectory and velocity of a particle of crushed material along the surface of the working element of the disintegrator // Bulletin of the BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2012, no. 2, pp. 56-59.
13. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Sevostyanov V.S., Chemerichko G.I. Performance studies of a disintegrator with internal recycling of materials // Energy-resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries: Conference proceedings. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2021. – P. 151-159.
14. Orekhova T.N., Rakov A.M., Kachaev A.E. Analytical studies of the particle separation process in a disintegrator // Energy-resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries: Conference proceedings. Belgorod. – Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2022. – P. 148-156.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Севостьянов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов	Sevostyanov Vladimir Semyonovich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of technological complexes, machines and mechanisms
Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, заведующий отделом эксплуатации гидромелиоративных систем и гидротехнических сооружений, старший научный сотрудник	Kachaev Aleksandr Evgenievich – candidate of technical sciences, head of the Department of operation of irrigation and reclamation systems and hydraulic structures, senior researcher
Чемеричко Галина Ивановна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механического оборудования	Chemerichko Galina Ivanovna – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of mechanical equipment
Латышев Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой начертательной геометрии и инженерной графики	Latyshev Sergey Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor, head of the Department of descriptive geometry and engineering graphics
Синица Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов	Sinitza Elena Vladimirovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of technological complexes, machines and mechanisms
doctor_cement@mail.ru	

Получена 11.06.2026