DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО ВАЛА ЛИНТЕРНОЙ МАШИНЫ И ПОЛУЧЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ

Абдурасулов А., *PhD,*
Факультет информационных технологий и искусственного интеллекта,
E-mail: ahror19982026@gmail.com,
Наманганский государственный технический университет

Аннотация. *При разработке машин для хлопкоочистительной промышленности особое значение имеют разработка и совершенствование методов расчёта приводов и валов высокопроизводительных машин. В статье рассматривается задача снижения массы вала пильного цилиндра, являющегося основным рабочим органом линтерной машины. Описаны конструктивные особенности облегчённого вала, имеющего внутреннюю полость и продольные пазы на наружной поверхности, предназначенные для установки пильных дисков. Основная идея заключается в снижении вибрации за счёт обеспечения правильного размещения пильных дисков линтера в пазах после проведения технического обслуживания и ремонта, что способствует повышению эффективности работы машины. Предложенный подход позволяет значительно уменьшить массу вала и пильного цилиндра при сохранении их изгибной жёсткости на допустимом уровне. В результате повышаются ресурсосбережение и эксплуатационная надёжность оборудования, обеспечивается требуемое качество продукции, а расход энергии может быть снижен на 18–22 %.*

Annotatsiya*. Paxta tozalash sanoati uchun mashinalar yaratishda unumdorligi yuqori mashinalar yuritma va vallarini xisoblash usullarini yaratish va aniqlashtirish masalallari ayniqsa, muhim hisoblanadi. Maqolada linterning asosiy ishchi organi arrali silindr vali massasini kamaytirish vazifasi ichki o‘yiq va sirtidan bo‘ylama ariqcha arrani tili tushadigan qilib, yenegillashgan valning konstruktiv xususiyatlari belgilangan. Uning mohiyati shundan iboratki, linter arralarini ta’mirlashgandan keyingi ariqchaga qo‘yib foydalansa titrash kam bo‘ladi buni natijasida ish unimi yuqori bo‘ladi. Bu esa val va arrali silindr egilish bikrliklarini uncha kamaytirmagan xolda ularning massasini ancha kamaytirish yo‘li bilan resurstejamkorlik va ishonchlilikni oshirish hamda talab qilingan sifatni energiya sarfini 18-22 foizgacha kamaytirishimiz mumkin.*

Abstract. *In the development of machinery for the cotton-ginning industry, the development and refinement of methods for calculating the drives and shafts of high-performance machines are of particular importance. This article focuses on reducing the mass of the saw cylinder shaft, which is the main working component of a linter machine. The design features of a lightweight shaft incorporating an internal cavity and longitudinal grooves on its outer surface, designed to accommodate the saw blades, are described. The main idea is to reduce vibration by ensuring proper positioning of the linter saw blades in the grooves after maintenance and repair, thereby improving the operational performance of the machine. This approach makes it possible to significantly reduce the mass of the shaft and saw cylinder while maintaining their bending stiffness at an acceptable level. As a result, the resource efficiency and operational reliability of the equipment can be improved, the required product quality can be maintained, and energy consumption can be reduced by 18–22%.*

Ключевые слова: *линтер, пильный цилиндр, вал, валик сырья, прогиб, снижение массы, количество пазов, конструктивные особенности, изгибная жёсткость.*

Kalit so‘zlar: *Linter, arrali silindr, val, xom ashyo valigi, salqilik, massani kamaytirish, ariqcha soni konstruktiv xususiyatlari, egilish bikrligi.*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

Keywords: *Linter, saw cylinder, shaft, raw material roller, deflection, mass reduction, number of grooves, design features, bending stiffness.*

Введение. В настоящее время проводится множество научных исследований, направленных на разработку новых технических средств и технологий переработки хлопкового сырья, а также их внедрение в производство. В Республике реализуются комплексные меры по развитию хлопковой промышленности, модернизации предприятий путём оснащения хлопкоочистительных предприятий и хлопково-текстильных кластеров современной техникой и технологиями, увеличению производства готовой продукции с высокой добавленной стоимостью на основе глубокой переработки хлопкового сырья, а также повышению рентабельности и конкурентоспособности предприятий.

В связи с этим разработка энерго- и ресурсосберегающих машин, обеспечивающих высокое качество работы в процессе линтерования, а также научное обоснование их технологического процесса, параметров и режимов работы остаются актуальными задачами.

Список использованной литературы. Ряд зарубежных учёных, в том числе E. Whitney, S. Z. Hall, T. Elliot, S. E. Hughs, R. N. Rakoff, A. V. Stanley, R. G. Hardin и P. A. Funk, проводили научные исследования по модернизации линтерных машин и их рабочих органов, повышению ресурсосбережения, совершенствованию технологии линтерования семян хлопчатника, улучшению качества получаемого линта и семян, а также совершенствованию процессов линтерования и очистки линта. В результате проведённых исследований были достигнуты положительные результаты.

Учёные Узбекистана также внесли значительный вклад в развитие данного направления. В частности, фундаментальные и прикладные исследования Б. Левковича, Г. И. Мирошниченко, Р. Г. Махкамова, Г. Д. Джабборова, Г. И. Болдинского, В. Г. Гулидова, П. Н. Тютина, А. Джураева, М. Тиллаева, К. Сабирова, Н. М. Сафарова, М. М. Абдувахидова, А. Ш. Мирзаумидова, Ф. Ибрагимова, Ж. Б. Абдурахмонова, К. Собирова и других учёных способствовали развитию науки, техники и технологии хлопкоочистительной промышленности. Их научные труды внесли существенный вклад в совершенствование процессов отделения хлопкового волокна от семян.

Их исследования были направлены на совершенствование процесса разделения хлопкового волокна и семян, повышение эффективности и оптимизацию производственных технологий, что оказало значительное влияние на развитие отрасли. В частности, было проведено большое количество научных исследований, посвящённых пильным цилиндрам.



Рисунок 1. Представлены результаты исследований

Известно, что с целью повышения жёсткости пильного цилиндра и уменьшения его прогибов в прокладках, расположенных между пилами пильного цилиндра, были выполнены различные выемки, что позволило снизить его массу. В результате проведённых исследований были получены положительные результаты.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

Методы и материалы исследования. Эксперименты проводились на валу пильного цилиндра линтерной машины модели 5LP с целью разработки ресурсосберегающей конструкции. На наружной поверхности вала были выполнены шесть продольных пазов, предназначенных для установки пильных дисков. Такое конструктивное решение позволяет после ремонта пил использовать соседний паз для повторной установки пильного диска, что способствует снижению вибрации. Кроме того, для уменьшения массы вала внутри него была выполнена полость.

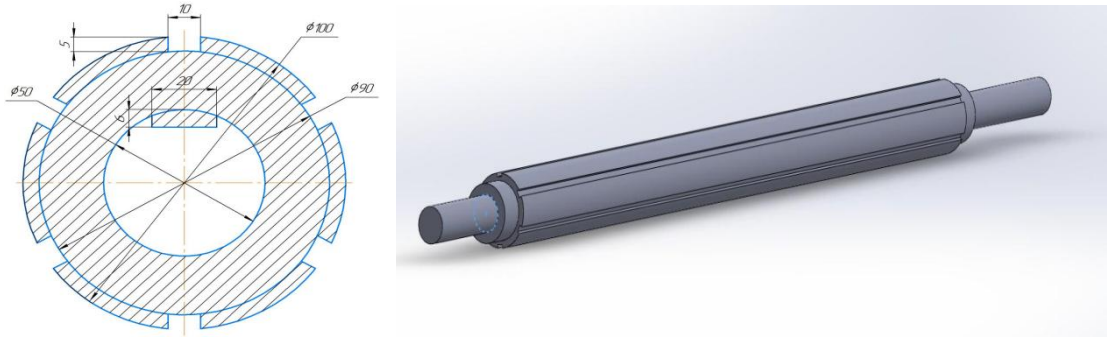

Рисунок 2. Ресурсосберегающая конструкция вала пильного цилиндра

Эксперименты проводились на линтерной машине с 160 пильными дисками. Исследования выполнялись при различных значениях внутреннего диаметра вала пильного цилиндра (45, 50 и 55 мм), а также при различном количестве продольных пазов (5, 6 и 7).

Результаты. В ходе экспериментальных испытаний новой конструкции вала пильного цилиндра линтерной машины модели 5LP, предусматривающей изменение внутреннего диаметра и количества продольных пазов, были получены положительные результаты.

Использование математико-статистических методов при планировании исследований имеет существенные преимущества по сравнению с классическими методами эксперимента. Данный подход позволяет одновременно оценивать влияние нескольких факторов на исследуемый процесс, выявлять взаимосвязи между ними, а также получать математическую модель объекта при относительно небольшом количестве экспериментов. Наиболее важным преимуществом является возможность использования полученной модели в дальнейшем для выбора оптимальных технологических режимов.

Основной целью оптимизации является определение факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на работу вала пильного цилиндра линтерной машины.

В данном исследовании в качестве исследуемых факторов были выбраны внутренний диаметр вала пильного цилиндра (мм), количество продольных пазов (шт.) и частота вращения вала (об/мин). Эти показатели позволяют комплексно оценить энергетические и технологические характеристики процесса линтерования, а также качество получаемой продукции.

Таблица 1

Интервалы изменения входных факторов

№	Наименование и обозначение факторов	Уровни варьирования факторов			Интервал варьирования факторов
		-1	0	+1	
1	X_1 *- Внутренний диаметр вала пильного цилиндра (мм).*	45	50	55	5

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

2	X_2 - Количество пазов, выполненных на поверхности вала пильного цилиндра (шт.).	5	6	7	1
3	X_3 - Частота вращения вала (об/мин). .	650	700	750	50

На основе анализа литературы, существующих научных разработок и практического опыта были выбраны три основных входных параметра, непосредственно влияющих на работу вала пильного цилиндра линтерной машины (таблица 3.1): внутренний диаметр вала пильного цилиндра (45–55 мм), количество продольных пазов (5–7 шт.) и частота вращения вала (650–750 об/мин). Каждый из этих параметров оказывает влияние на энергопотребление линтера и снижение вибрации. Поэтому они были выбраны в качестве основных входных факторов при планировании эксперимента.

В качестве выходного параметра была выбрана амплитуда колебаний вала (Y_1) (мм), поскольку вибрационные характеристики, связанные с изгибом вала, являются одним из основных факторов, влияющих на работу ресурсосберегающего вала.

Таблица 2

Матрица центрального некомпозиционного плана эксперимента

№	Факторы			x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$\overline{y_1}$	$S_u^2\{Y_1\}$
	x_1	x_2	x_3								
1	+	+	0	+	0	0	+	+	0	0,58	0,00196
2	+	-	0	-	0	0	+	+	0	0,41	0,0004
3	-	+	0	-	0	0	+	+	0	0,45	0,0109
4	-	-	0	+	0	0	+	+	0	0,44	0,0009
5	+	0	+	0	+	0	+	0	+	0,48	0,006
6	+	0	-	0	-	0	+	0	+	0,42	0,0025
7	-	0	+	0	-	0	+	0	+	0,48	0,0004
8	-	0	-	0	+	0	+	0	+	0,55	0,0006
9	0	+	+	0	0	+	0	+	+	0,62	0,001
10	0	+	-	0	0	-	0	+	+	0,52	0,015
11	0	-	+	0	0	-	0	+	+	0,56	0,0016
12	0	-	-	0	0	+	0	+	+	0,43	0,036
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,36	0,0001
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,35	0,0002
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,37	0,0002

Данное кодирование позволяет удобно составлять уравнения регрессии и оценивать влияние факторов независимо друг от друга. На основе обработки результатов экспериментов с использованием методов математической статистики были получены регрессионные модели для трёх выходных параметров. Полученные уравнения включают коэффициенты, отражающие линейное, квадратичное и взаимное влияние факторов. Для каждого коэффициента был проведён анализ уровня статистической значимости.

По результатам дисперсионного анализа установлено, что все регрессионные модели являются статистически значимыми при уровне значимости (p<0{,}05). Это подтверждает статистическую значимость построенных моделей. Однако для окончательного

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

подтверждения их адекватности необходимо также оценить соответствие модели экспериментальным данным и проверить критерий адекватности.

$$Y_R = b_0 + \sum_{i=1}^{M} b_i x_i + \sum_{\substack{i=j=1 \\ j \neq 1}}^{n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{M} b_{ii} x_i^2$$

В случае, когда в исследовании участвуют три фактора, данная модель принимает следующий вид:

$$Y_R = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2$$

Для определения квадратичных коэффициентов используется следующее выражение:

$$b_{ii} = g_5 \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 \overline{Y}_u + g_6 \sum_{i=1}^{M} \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 \overline{Y}_u - g_2 \sum_{u=1}^{N} \overline{Y}_u$$

При этом необходимые суммы были рассчитаны заранее:

$$\sum x_1^2 \overline{Y_u} = 0{,}58 + 0{,}41 + 0{,}45 + 0{,}44 + 0{,}48 + 0{,}42 + 0{,}48 + 0{,}55 = 3{,}81$$

$$\sum x_2^2 \overline{Y_u} = 0{,}58 + 0{,}41 + 0{,}45 + 0{,}44 + 0{,}62 + 0{,}52 + 0{,}56 + 0{,}43 = 4{,}01$$

$$\sum x_3^2 \overline{Y_u} = 0{,}48 + 0{,}42 + 0{,}48 + 0{,}55 + 0{,}62 + 0{,}52 + 0{,}56 + 0{,}43 = 4{,}06$$

Сумма выходных показателей:

$$\sum \overline{Y_u} = 0{,}58 + 0{,}41 + 0{,}45 + 0{,}44 + 0{,}48 + 0{,}42 + 0{,}48 + 0{,}55 + 0{,}62 + 0{,}52 + 0.56 + 0.43 + 0.36 + 0.35 + 0.37 = 7.02$$

Квадратичные суммы:

$$\sum_{i=1}^{M} \sum x_i^2 \overline{Y_u} = 3.81 + 4.01 + 4.06 = 11.88$$

На основе этого квадратичные коэффициенты были определены следующим образом:

b_{11}==0,125·3,81+0,0625·11,88-0,166·7,02=0,05
b_{22}=0,125·4,01+0,0625·11,88-0,166·7,02=0,08
b_{33}=0,125·4,06+0,0625·11,88-0,166·7,02=0,08

С учетом определенных коэффициентов регрессии запишем уравнение:

$$Y_1 = 0{,}36 + 0{,}05X_1 - 0{,}04X_2 + 0{,}03X_3 + 0{,}04X_1X_2 + 0{,}03X_1X_3 + 0{,}X_2X_3 + 0{,}05X_1^2 + 0{,}08X_2^2 + 0{,}08X_3^2$$

Для определения значимости линейных, взаимодействующих и квадратичных коэффициентов уравнения регрессии сначала рассчитывается дисперсия выходного параметра — значений \(Y_1\). Средняя дисперсия трёх значений, полученных в центральных точках, определяется следующим образом:

$$S^2\{Y\} = S_m^2\{Y\} = \frac{1}{N_{\text{ц}} - 1} \sum_{u=1}^{N_{\text{ц}}} S^2\{\overline{Y}\}$$

$$S^2\{\overline{Y}\} = \frac{1}{3-1} \cdot 0{,}0005 = 0{,}0025$$

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

Это значение служит основой для расчёта дисперсий коэффициентов регрессии. На этой основе вычислим дисперсии коэффициентов регрессии и среднеквадратические отклонения:

$$S^2\{b_0\} = g_1 S^2\{\overline{Y}\} = 0{,}2 \cdot 0{,}0025 = 0{,}00005$$
$$S^2\{b_i\} = g_3 S^2\{\overline{Y}\} = 0{,}125 \cdot 0{,}0025 = 0{,}000031$$
$$S^2\{b_{ij}\} = g_4 S^2\{\overline{Y}\} = 0{,}25 \cdot 0{,}0025 = 0{,}000063$$
$$S^2\{b_{ii}\} = g_7 S^2\{\overline{Y}\} = 0{,}3125 \cdot 0{,}0025 = 0{,}000078$$

Определим среднеквадратичное отклонение при определении коэффициентов регрессии:

$$S\{b_0\} = 0{,}01, \qquad S\{b_i\} = 0{,}01 \qquad S\{b_{ij}\}=0{,}01 \qquad S\{b_0\}=0{,}01$$

Перепишем уравнение с учетом значимых коэффициентов:

$$Y_1 = 0{,}36 + 0{,}05X_1 - 0{,}04X_2 + 0{,}03X_3 + 0{,}04X_1X_2 + 0{,}03X_1X_3 + 0{,}05X_1^2 + 0{,}08X_2^2 + 0{,}08X_3^2$$

Для проверки адекватности полученной выше регрессионной модели определим расчётное значение критерия Фишера.

$$F_R = \frac{S^2_{nad}\{Y\}}{S^2\{\overline{Y}\}}$$

Значение экспериментальной дисперсии определяется следующим образом:

$$S^2\{\overline{Y}\} = \frac{\sum_{u=1}^{N} S^2\{Y\}}{N_s - 1} = \frac{0{,}078}{3-1} = 0{,}039$$

Расчёт остаточной дисперсии (дисперсии, не учитываемой моделью):

$$S^2_{nad}\{Y\} = \frac{\sum_{u=1}^{N-N_ц+1}(Y_{Ru} - \overline{Y}_u)^2}{N - N_{k.en} - (N_s - 1)^2};$$

При расчёте остаточной дисперсии в качестве делителя учитываются степени свободы. Общее число экспериментальных точек составляет N=15 (12 факторных опытов + 3 центральные точки), l – число коэффициентов, оставленных для моделирования, \(m\) — число центральных точек.

$$N - N_{k.en} - (N_s - 1)^2 = 15 - 8 - (3-1)^2 = 3.$$

Таким образом, полученная регрессионная модель с достаточной точностью описывает исследуемый процесс. С помощью уравнения регрессии построим графики взаимосвязи факторов. При этом изучается влияние каждого входного фактора на выходной параметр.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

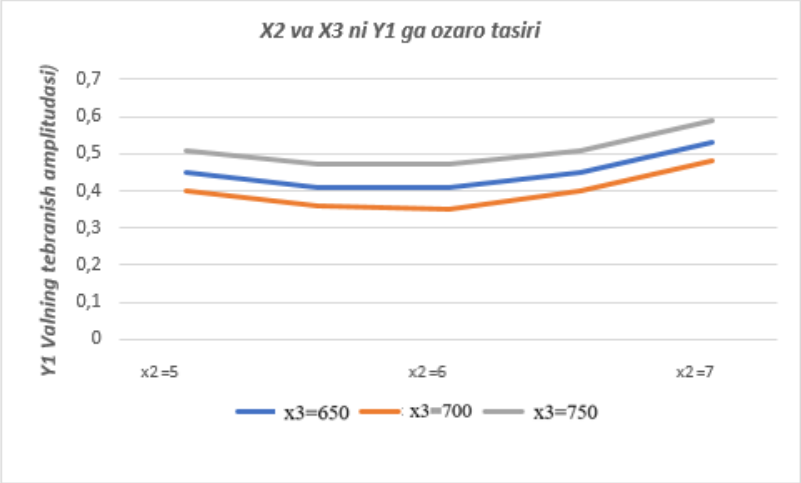

Рисунок 3. Зависимость амплитуды колебаний вала (Y_1), мм, от внутреннего диаметра вала пильного цилиндра (X_1) и количества канавок (X_2), выполненных на поверхности пильного цилиндра

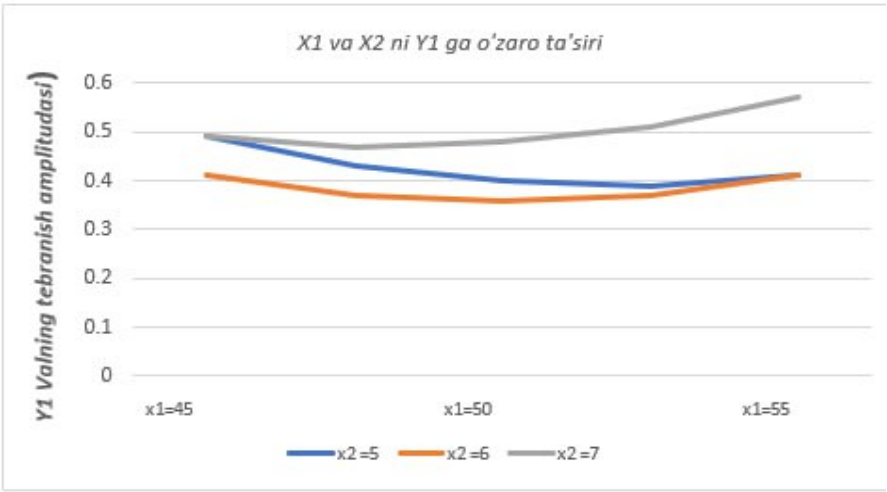

Рисунок 4. Зависимость амплитуды колебаний вала (Y_1), мм, от количества канавок (X_2), выполненных на поверхности вала пильного цилиндра, и частоты вращения вала (X_3)

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

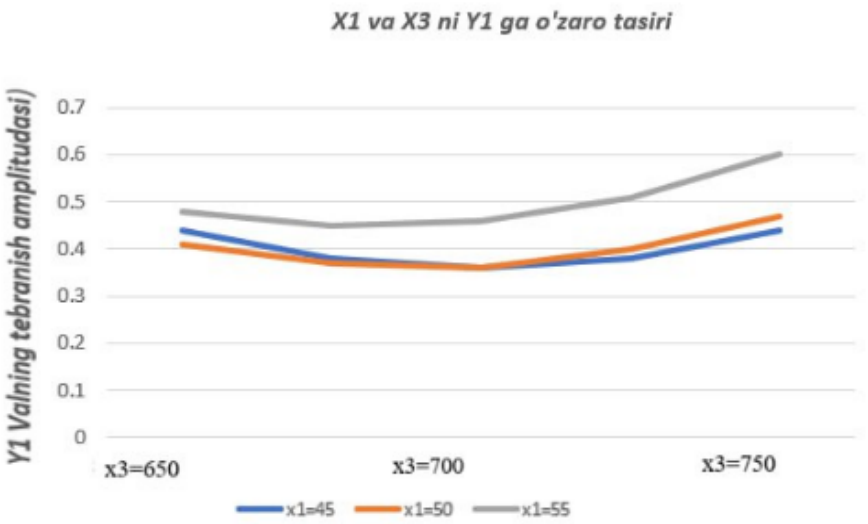

Рисунок 5. Зависимость амплитуды колебаний вала (Y_1), мм, от частоты вращения вала (X_3) и внутреннего диаметра вала пильного цилиндра

На графиках на основе результатов экспериментов определены оптимальные значения таких параметров усовершенствованного ресурсосберегающего вала пильного цилиндра линтерной машины, как внутренний диаметр, количество канавок и частота вращения вала. На основании анализа максимальных и минимальных значений поверхности обосновано, что оптимальные параметры достигаются при следующих значениях входных факторов: X_1=50 мм, X_2=6 шт., X_3=730 об/мин.

Согласно результатам динамического моделирования, программа позволяет подробно рассчитывать напряжённо-деформированное состояние, формирующееся во всех частях вала. В процессе исследования можно наглядно наблюдать распределение напряжений по всему объёму компонента, их представление в виде цветных изолиний, изменение под воздействием различных видов нагрузок, а также динамику развития во времени.

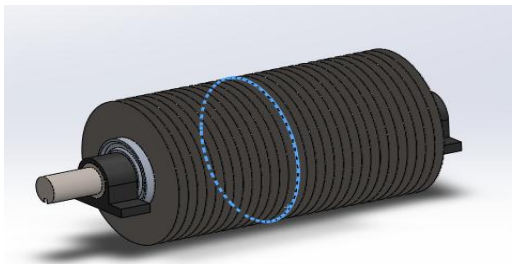

Рисунок 6. Модель конструкции ресурсосберегающего вала в составе пильного цилиндра, созданная в программе SolidWorks

Создадим сборочную модель (пакет) предлагаемой конструкции ресурсосберегающего вала в составе пильного цилиндра (рис. 6) и введём параметры системы в качестве исходных данных.

На следующем этапе были проведены исследования состояния линтерной машины, оснащённой ресурсосберегающим валом, предложенным в диссертации.

Для моделирования в программе SolidWorks Simulation сборочная модель пильного цилиндра линтерной машины с предлагаемым ресурсосберегающим валом была сформирована с учётом следующих исходных данных: сила F=784 Н; крутящий момент

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

M=246 Н·м; общая масса m=m1+m2+m3=194 кг, где m1=91 кг, m2=16 кг, m3=87 кг. Соответствующая сила тяжести составляет Fm=1940 Н.

Для облегчённого вала из стали 45 в программу вводятся следующие физико-механические характеристики материала: модуль упругости E=2 10^{11} Н/м²; коэффициент Пуассона η=0{,}3; плотность ρ_o=7850 кг/м³. Полученные результаты расчётов можно проанализировать с помощью цветовых изображений распределения напряжений и деформаций (рис. 7).

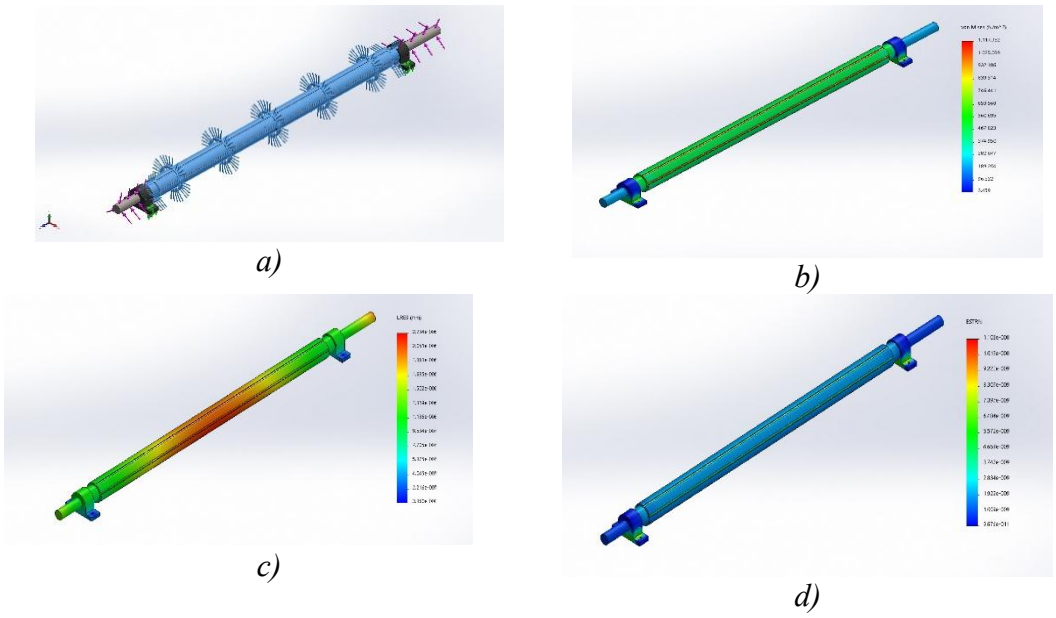

Рисунок 7. Проверка напряжений, перемещений и деформаций предлагаемого ресурсосберегающего вала в программе SolidWorks

В практических исследованиях необходимо учитывать снижение массы предлагаемого ресурсосберегающего вала, а также наличие в нём потенциально опасных сечений. По результатам моделирования в компьютерной программе направление приложенных сил, действующих на ресурсосберегающий вал в процессе технологической эксплуатации, представлено на рис. 7, а.

На рис. 7, б показано, что максимальное напряжение вала составляет приблизительно 1,11 кПа. Данное значение возникает в области, выделенной на рисунке красным цветом. На рис. 7, в видно, что максимальное перемещение наблюдается в консольной части вала и составляет 0,0022 мм. Эквивалентная деформация вала составляет 0,000011 (рис. 7, г). Действие крутящих моментов на уступы вала было рассмотрено при расчёте базовой конструкции вала.

Вывод. Таким образом, можно отметить, что в предлагаемом ресурсосберегающем вале по сравнению с существующей конструкцией существенно улучшены показатели напряжённого состояния, перемещения и деформации.

По результатам производственных испытаний конструкции линтерной машины с облегчённым пильным цилиндром установлено, что применение предлагаемой конструкции вала позволяет снизить повреждение семян хлопчатника в процессе линтерования. Благодаря наличию дополнительных пазов при замене пил во время технического обслуживания их можно устанавливать в следующий паз, что способствует сохранению жёсткости вала, экономии ресурсов и повышению надёжности конструкции.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.59

Установлено также, что энергопотребление снижается на 18–22 %, а срок службы увеличивается в 1,5 раза.

Список использованной литературы

1. Abdurasulov A., Obidov A., Mirzaumidov A., Yunisov S. Исследование вала нового модернизированного пильного цилиндра // Научно-технический журнал Ферганского политехнического института. — 2024. — Специальный выпуск № 2. — С. 249–255.

2. Mirzaumidov A. Разработка облегчённой конструкции пильного цилиндра джина // Научно-технический журнал Наманганского инженерно-технологического института. — Наманган, 2019. — № 4. — С. 123–128.

3. Obidov A. A., Mirzaumidov A. Sh., Otaqo‘ziyev D., Abdurasulov A. Деформация вала при кручении и влияние кручения в сочетании с изгибом // Научно-технический журнал Наманганского инженерно-технологического института. — 2024. — Т. 9, № 2. — С. 208–216. ISSN 2181-8622. Раздел: проблемы технологии машиностроения.