

УДК 67.019

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЧАСТИЦ ПОРОШКА КРАСЯЩЕГО ПИГМЕНТА

© 2023 Т.И. Комаров, В.С. Пузырева, А.В. Чабаненко

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 15.05.2023

Постановка задачи (актуальность работы). Чаще всего, производство лакокрасочных изделий состоит из основных этапов: от поступления в складские помещения до фасовки по коробкам. И контроль качества осуществляется на входе и на выходе. Однако при производстве лакокрасочных изделий необходимо внедрить промежуточный контроль на этапе перемолла пигментного сырья в порошок тонкого помола, так как от размерного диапазона частиц порошка тонкого помола зависят основные качества готовой лакокрасочной продукции. ГОСТ 2093-82 рекомендует использование ситового анализа, который представляет собой механизм просеивания решетом от наиболее крупных размеров ячеек до наиболее мелких. Однако данный метод уступает более современным по скорости анализа на более чем 10 минут, по диапазону измерения частиц на 10-30% и по информативности анализа. **Цель работы.** Повышение качества лакокрасочных материалов посредством внедрения промежуточного контроля методом лазерной дифракции. **Используемые методы.** В представленной работе были применены такие методы, как математическое моделирование, метод идеализации и формализации процессов исследования лакокрасочных материалов. **Новизна.** В ходе работы были разработаны новые механизмы оценки и управления качеством частиц порошка красящего пигмента, а также новые способы повышения эффективности производства лакокрасочных материалов. В процессе исследования был проведен анализ технологического процесса. **Результат.** Итогом работы стала разработанная модель совершенствования системы контроля качества частиц порошка красящего пигмента. **Практическая значимость.** Разработанная модель повысит результативность текущих процессов производства лакокрасочных изделий посредством внедрения промежуточного контроля, что повысит прибыль организации и сократит издержки на качество.

Ключевые слова: контроль, качество, пигмент, порошок тонкого помола, лазерная дифракция.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-16-25

EDN: JMAQLO

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент даже в крупных компаниях, производящих лакокрасочную продукцию, недостаточно уделяют внимание контролю качества процесса измельчения пигмента до состояния порошка. Чаще всего оценка сводится к визуальному осмотру.

В соответствии с ГОСТ 2093-82 анализ формы и размера частиц рекомендуется производить ситовым методом, который представляет собой механизм просеивания решетом от наиболее крупных размеров ячеек до наиболее мелких. Проблема заключается в том, что такой метод дает очень скромное представление о составе порошка, а изображение частиц и вовсе не

предусмотрено. Кроме того, недостатком является ограниченность исследуемого размерного ряда и отсутствие автоматических систем.

Таким образом, требуется найти, изучить и внедрить такой метод анализа, который бы дал полную информацию о частицах, действовал автоматически и являлся выгодным вложением в качество.

Процесс производства лакокрасочных изделий состоит из 11 основных этапов (рис. 1).

На рисунке 1 видно, что проверка качества осуществляется только на входе сырья и на выходе готовой продукции.

ГОСТ 9.032-74 предписывает определенные свойства готовой лакокрасочной продукции: отсутствие волнистости, неоднородности структуры, разнооттеночности. [2, с. 3]

Данные требования формируют необходимость в контроле качества основного составляющего лакокрасочной продукции – порошкового пигмента. При внедрении промежуточного контроля появляется возможность регулировать выполнение вышеуказанных требований (рис. 2).

Комаров Тимофей Игоревич, магистрант.

E-mail: tim1kot@yandex.ru SPIN-код автора: 5009-3930

Пузырева Виктория Сергеевна, магистрант.

E-mail: vikar1999@mail.ru SPIN-код автора: 1185-1776

Чабаненко Александр Валерьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества.

E-mail: a@chabanenko.ru ORCID 0000-0002-5949-6579

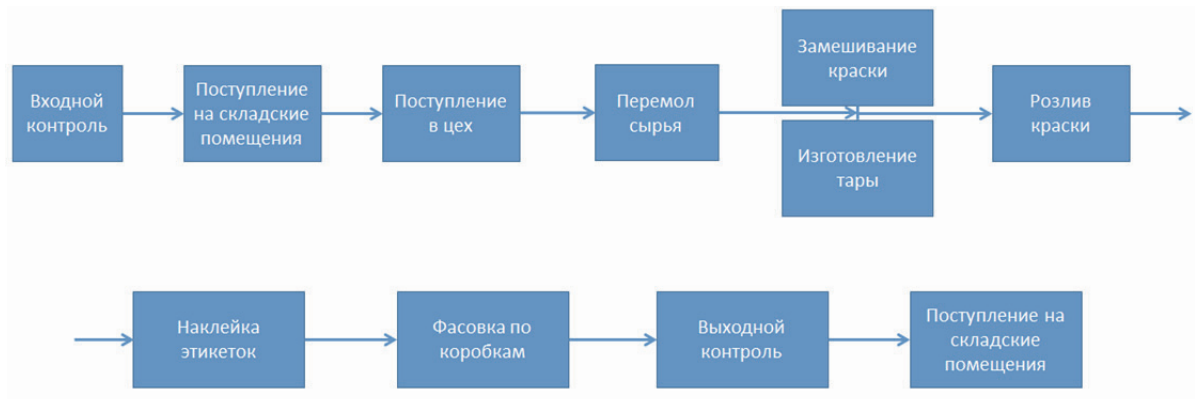


Рис. 1. Карта процессов для визуализации производства ЛКМ [1]
Fig. 1. Process map for visualization of paintwork production [1]

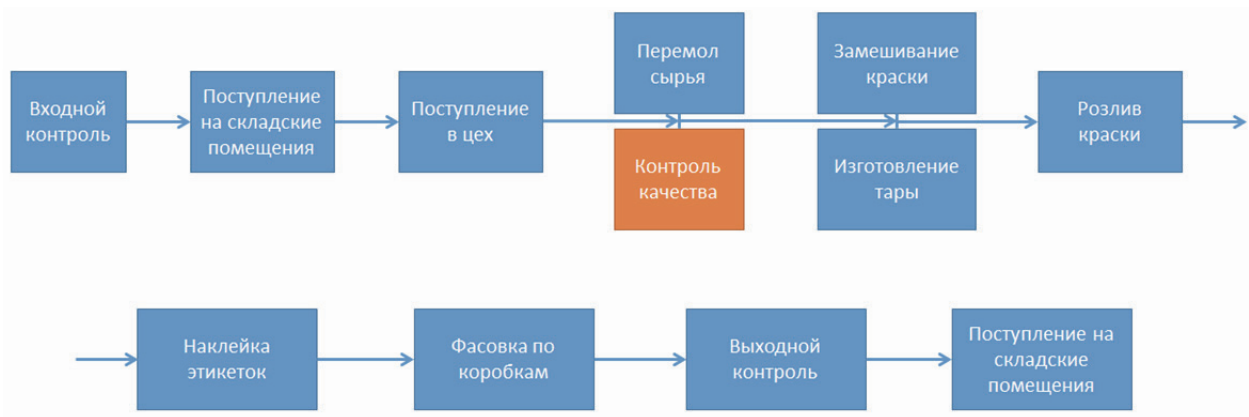


Рис. 2. Измененная карта процессов для визуализации производства ЛКМ
Fig. 2. Modified process map for visualization of paintwork production

В соответствии с ГОСТ 2093-82 анализ формы и размера частиц рекомендуется производить ситовым методом, который представляет

собой механизм просеивания решетом от наиболее крупных размеров ячеек до наиболее мелких (рис. 3).

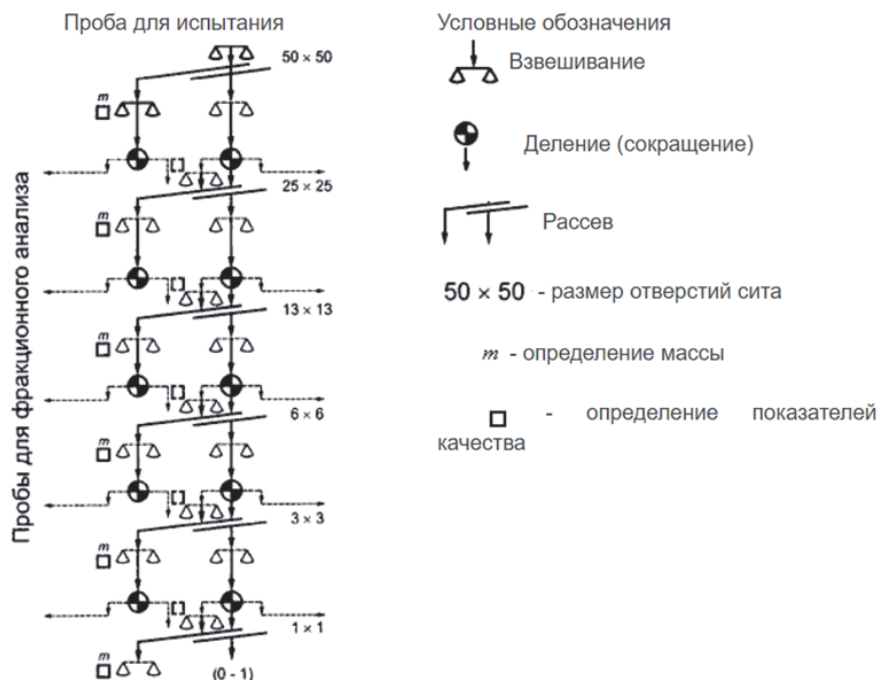


Рис. 3. Схема проведения ситового анализа по ГОСТ 2093-82 [3; с.4]
Fig. 3. Scheme of sieve analysis according to GOST 2093-82

Проблема заключается в ограниченности исследуемого размерного ряда и в отсутствии автоматических систем. Кроме того, данный метод дает очень краткую информацию о составе порошка, а изображение частиц не предусмотрено. А, как было доказано, [4, с. 32-33] детальный анализ формы и размеров частиц позволяет определить, например, уровень прочности материала (рис. 4). [5]

На данный момент в России, кроме ситового анализа, существует еще несколько методов измерения и анализа частиц тонкого помола, среди которых: микроскопический метод, лазерная дифракция, динамический анализ и т.д. Компания «MICROTRAC» опубликовала данные о возможностях каждого метода анализа (рис. 5).

Сравнение характеристик методов анализа представлено в табл. 1.

Для частиц перемолотого пигмента необходим широкий диапазон измерения, скорость осуществления анализа и возможность анализа всех частиц. Наложив ограничения, продиктованные

потребительскими ожиданиями, получим допустимые альтернативы (табл. 2).

Введем критерии для оценки: стоимость осуществления (K_1), измеряемый диапазон (K_2), полнота анализа (K_3), сложность обучения сотрудников (K_4), время измерений (K_5).

Путем попарного сравнения, выявим наиболее предпочтительную альтернативу (табл. 3).

Таким образом, наиболее предпочтительный метод – «Лазерная дифракция (сухая)» (A_2) со взвешенной оценкой = 0,348.

Лазерная дифракция – это метод измерения частиц путем направления на них лазерного луча. Луч отражается от частицы под некоторым углом. Как раз данные об этом угле и позволяют определить размер анализируемой частицы. [7] Аппарат выглядит следующим образом (рис. 6).

Имея наиболее предпочтительный метод анализа частиц пигментного порошка тонкого помола, построим имитационную модель распределения частиц.

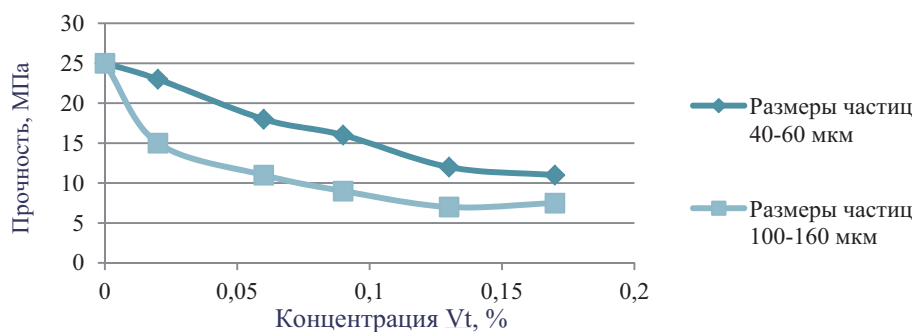


Рис. 4. Зависимость прочности композитов на основе СЭВА от содержания частиц SiO₂ при разных размерах

Fig. 4. Dependence of the strength of CMEA-based composites on the content of SiO₂ particles at different sizes

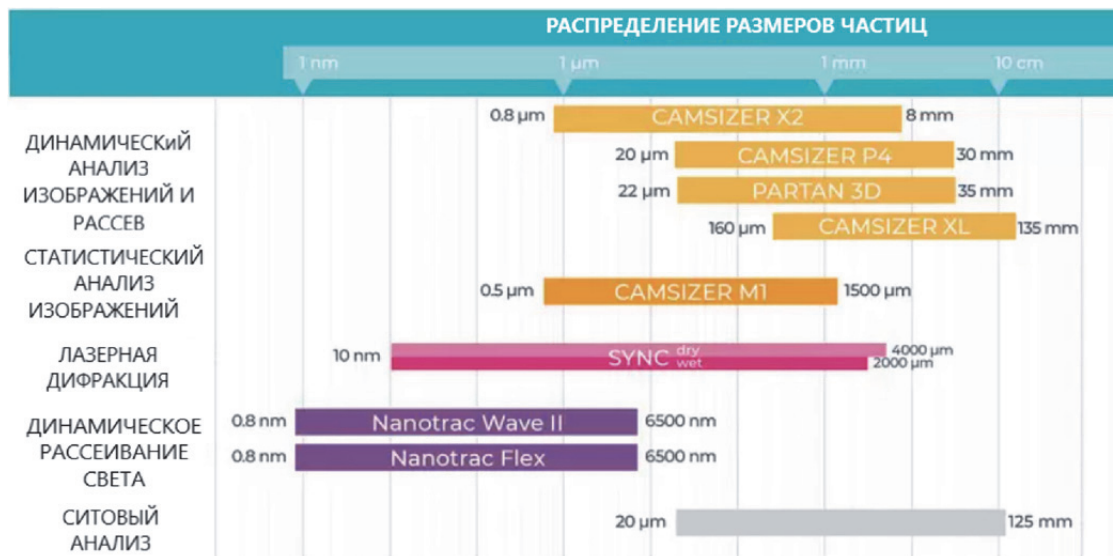


Рис. 5. Распределение частиц по размерам при данных методах анализа [6]

Fig. 5. Particle size distribution with these analysis methods [6]

Таблица 1. Генерация альтернатив
Table 1. Generation of alternatives

№	Наименование метода анализа	Диапазон измерений, мкм	Время измерения, мин	Полнота анализа
1	Динамический анализ	0,8-80	20	Случайный анализ частиц (размер + форма)
2	Анализ изображений и рассев	20-30	15	Случайный анализ частиц (размер + форма)
3	Статический анализ изображений	0,5-1500	10	Анализ всех частиц (размер)
4	Лазерная дифракция (сухая)	0,01-4000	до 5	Анализ всех частиц (размер)
5	Лазерная дифракция (влажная)	0,01-2000	до 5	Анализ всех частиц (размер)
6	Динамическое рассеивание света	0,8-6,5	5-10	Случайный анализ частиц (размер)
7	Ситовый анализ	20-125000	5-10	Анализ всех частиц (размер)

Таблица 2. Допустимые альтернативы
Table 2. Acceptable alternatives

№	Наименование метода анализа	Диапазон измерений, мкм	Время измерения, мин	Полнота анализа
1	Статический анализ изображений	0,5-1500	10	Анализ всех частиц (размер)
2	Лазерная дифракция (сухая)	0,01-4000	до 5	Анализ всех частиц (размер)
3	Лазерная дифракция (влажная)	0,01-2000	до 5	Анализ всех частиц (размер)
4	Ситовый анализ	20-125000	5-10	Анализ всех частиц (размер)

Таблица 3. Свертка альтернатив по критериям
Table 3. Convolution of alternatives by criteria

Альтернативы	Критерии					Взвешенные оценки альтернатив
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
A ₁	0,070	0,093	0,206	0,446	0,182	0,182
A ₂	0,274	0,401	0,449	0,160	0,347	0,348
A ₃	0,171	0,335	0,172	0,104	0,273	0,217
A ₄	0,485	0,171	0,172	0,290	0,198	0,253
					Σ	1

Американская фармацевтическая компания «Review» опубликовала данные об измерениях размеров частиц пигментов разного назначения при определенной степени затемнения (рис. 7). Было выяснено, что распределение частиц по размерам имеет нормально распределение. Значит, есть возможность построить функциональную эмпирическую модель, характеризующую это распределение.

Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 4.

Среднее значение параметра по параллельным опытам вычисляется по формуле (1).

$$\bar{y}_i = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} y_{ij}, \quad (1)$$

где m_i – число параллельных опытов в i -ой сточ-

ке матрицы планирования; y_{ij} – значение выходного параметра.

Дисперсия параллельных опытов вычисляется по формуле (2).

$$S_{\text{воспр}}^2 = \frac{1}{m_i} \sum_{j=1}^{m_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad (2)$$

где m_i – число параллельных опытов в i -ой сточке матрицы планирования; y_{ij} – значение выходного параметра; \bar{y}_i – среднее значение параметра по параллельным опытам.

Все результаты внесены в табл. 5.

Из таблицы 5 видно, что для 2 и 8 опыта величина дисперсий больше/меньше остальных, поэтому была осуществлена проверка дисперсий с использованием критерия Кохрена.



Рис. 6. Лазерный анализатор
Fig. 6. Laser analyzer

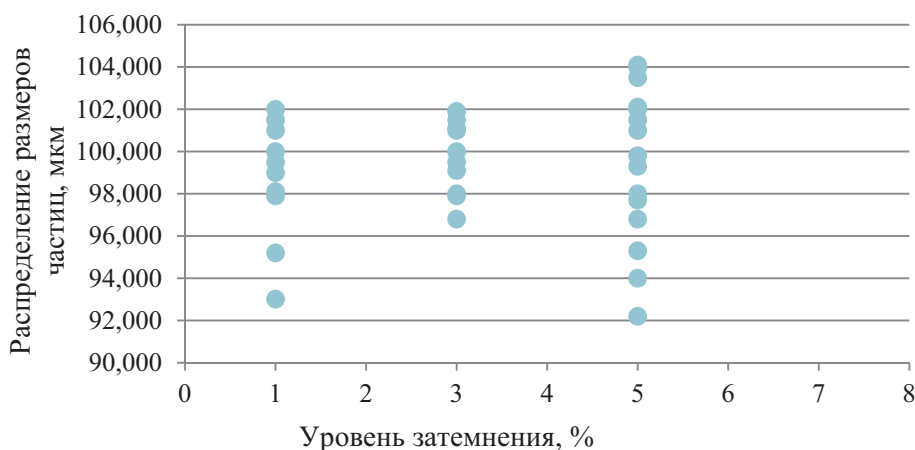


Рис. 7. Анализ размеров частиц по % затемнения [9; с.14]
Fig. 7. Particle size analysis by % dimming

Таблица 4. Матрица планирования и результаты эксперимента
Table 4. Planning matrix and experiment results

N	Планирование				Выход		
	X0	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
1	+	-	-	-	93,01	96,80	91,00
2	+	+	-	-	95,20	97,90	91,50
3	+	-	+	-	97,90	98,00	93,58
4	+	+	+	-	98,10	99,10	94,00
5	+	-	-	+	99,00	99,50	95,20
6	+	+	-	+	102,00	101,90	99,50
7	+	-	+	+	103,70	103,50	101,50
8	+	+	+	+	104,15	104,30	103,10

Дисперсия воспроизводимости для всего эксперимента рассчитывается по формуле (3).

$$S^2_{\text{воспр эксп}} = S^2_{(y)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2_{\text{воспр}}, \quad (3)$$

$$S^2_{\text{воспр эксп}} = 5,264.$$

Ошибка всего эксперимента вычисляется по формуле (4).

$$S(y) = \sqrt{S^2_{(y)}}, \quad (4)$$

$$S(y) = \sqrt{5,264} = 2,294.$$

Таблица 5. Расчет значений
Table 5. Calculation of values

N	Планирование								Выход			\bar{y}_i	$S_{\text{воспр}}^2$
	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	Y1	Y2	Y3		
1	+	-	-	-	+	+	+	-	93,01	96,80	91,00	93,60	8,67
2	+	+	-	-	-	-	+	+	95,20	97,90	91,50	94,87	10,32
3	+	-	+	-	-	+	-	+	97,90	98,00	93,58	96,49	6,37
4	+	+	+	-	+	-	-	-	98,10	99,10	94,00	97,07	7,30
5	+	-	-	+	+	-	-	+	99,00	99,50	95,20	97,90	5,53
6	+	+	-	+	-	+	-	-	102,00	101,90	99,50	101,13	2,00
7	+	-	+	+	-	-	+	-	103,00	102,00	101,00	102,00	1,48
8	+	+	+	+	+	+	+	+	104,15	104,30	103,10	103,85	0,43
Сумма:											787,81	42,11	

Коэффициенты уравнения рассчитываются по формулам (5), (6), (7).

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i, \quad (5)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{in} \bar{y}_i, \quad (6)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{in} X_{jn} \bar{y}_i, \quad (7)$$

где N – количество опытов.

После расчета всех коэффициентов уравнение регрессии принимает следующий вид:

$$\hat{y} = 98,48 + 0,75X_1 + 1,6X_2 + 2,97X_3 - 0,52X_1X_2 + 0,29X_1X_3 + 0,33X_2X_3 - 0,2X_1X_2X_3.$$

После проверки статистической значимости коэффициентов с помощью t-критерия Стьюдента, выяснилось, что коэффициенты уравнения b_{12} , b_{13} , b_{23} и b_{123} оказались статистически не значимыми и уравнение регрессии принимает вид:

$$\hat{y} = 98,48 + 0,75X_1 + 1,6X_2 + 2,97X_3$$

Для доказательства адекватности модели и оценки отклонений вычисленных по уравнениям регрессии значений функции был использован критерий Фишера F-критерий.

Таким образом, функциональная эмпирическая модель имеет следующий вид:

$$\hat{y} = 98,48 - 0,75X_1 + 1,6X_2 + 2,97X_3. \quad (8)$$

Модель означает, что при задании факторов X_1 , X_2 , X_3 (степени затемнения для каждого из трех лазеров), частицы будут распределяться близ прямой, заданной данным уравнением. Можно сказать, что с увеличением значений факторов X_2 и X_3 (уровня затемнения на лазерах 2 и 3), то и значения результатов будут увеличиваться (так как коэффициенты b_2 и b_3 – положительные). А с увеличением фактора X_1 , значения измерения будут уменьшаться, так как коэффициент b_1 имеет отрицательное значение. [10;с.10-14]

Внешнее схематичное изображение установки представлено на рис. 8.

Исследуемый образец 1 устанавливается на лоток 2 и всасывается в систему анализатора.

Система доставки образца 3 направляет сжатый воздух 4 через встроенные сопла, обеспечивая «торможение» частиц материала перед подачей в измерительную ячейку 5.

Внутреннее схематичное изображение измерительной ячейки представлено на рис. 9.

Для измерения используются лазерные диоды и системы анализа изображений. Оптическая система состоит из трех диодных лазеров 1,2,3, трех постоянно включенных детекторов 4,5,6, находящихся в фиксированных точках. Лазерные детекторы улавливают свет, рассеянный под углом 165°. Одновременно отдельный светодиодный источник света 7 освещает кювету с образцом, высокоскоростная цифровая камера 8 фиксирует изображение частиц. Данные анализируются с помощью специального программного обеспечения, использующего функциональную эмпирическую модель (21), где X_1, X_2, X_3 – это факторы, влияющие на частицу.

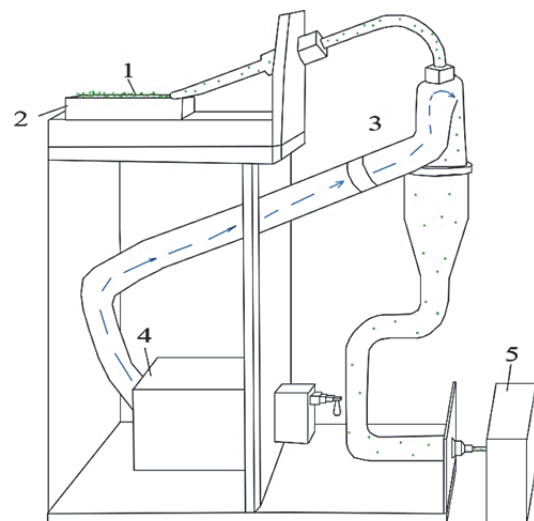


Рис. 8. Схематичное изображение разработанного лазерного анализатора
Fig. 8. Schematic representation of the developed laser analyzer

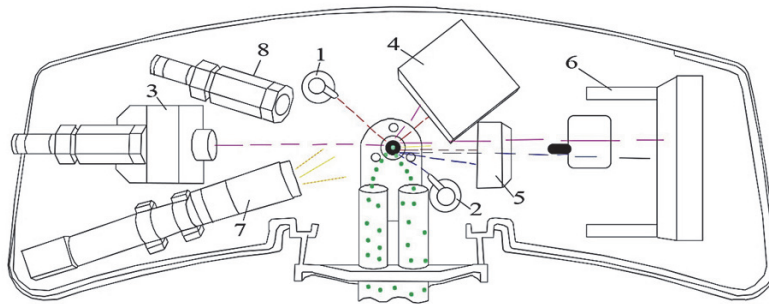


Рис. 9. Схематичное изображение оптической системы разработанного лазерного анализатора
 Fig. 9. Schematic representation of the optical system of the developed laser analyzer

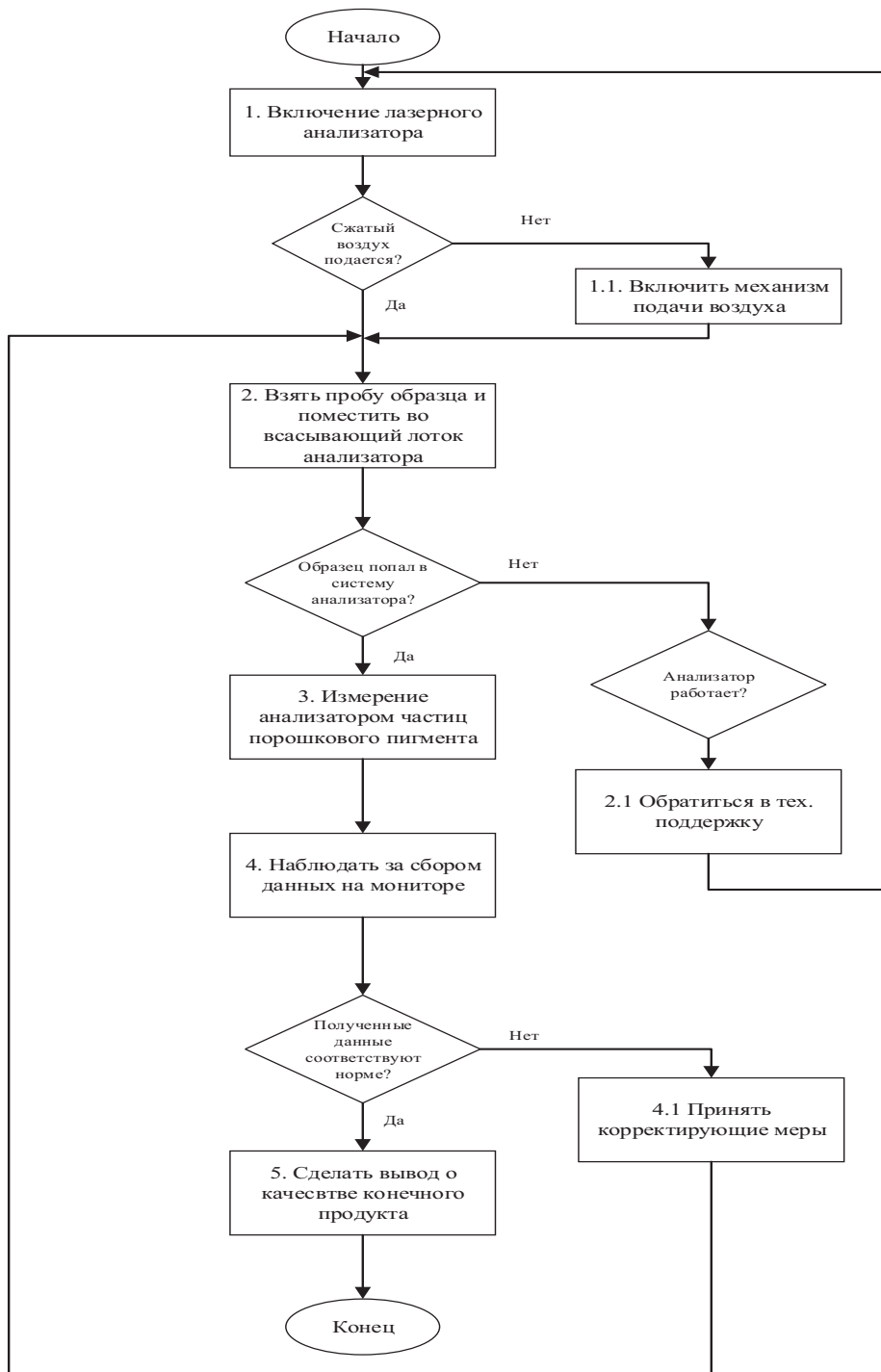


Рис. 10. Алгоритм процесса измерения
 Fig. 10. Algorithm of the measurement process

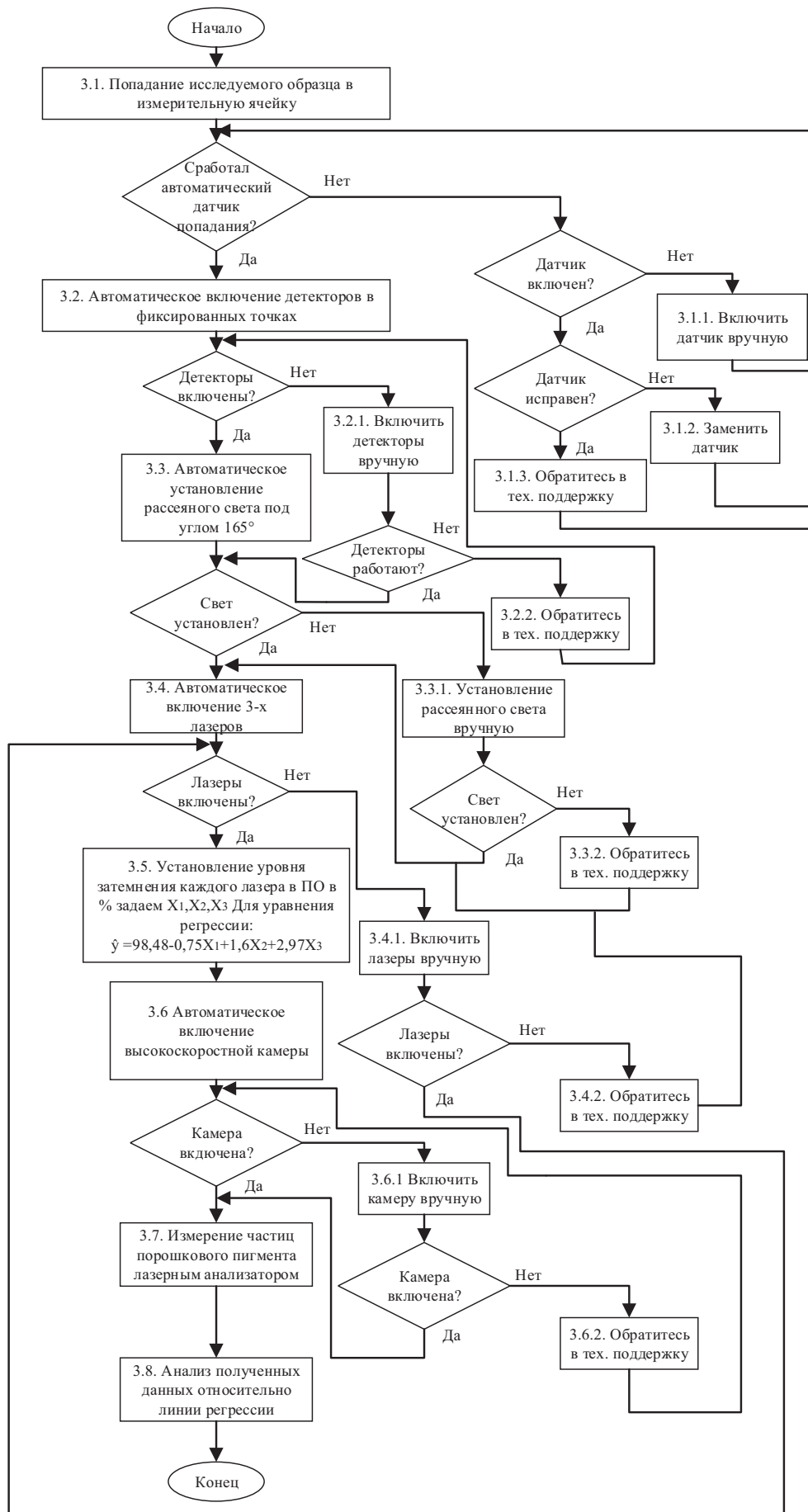


Рис. 11. Алгоритм процесса измерения лазерным анализатором
 Fig. 11. Algorithm of the laser analyzer measurement process

В целом, общий алгоритм анализом методом лазерной дифракции представлен на рис. 10.

Алгоритм процесса измерения части порошкового пигмента представлен на рис. 11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнить главные требования заинтересованных сторон механическим человеческим трудом не представляется возможным, поэтому необходимо прибегнуть к автоматизации, роботизации и цифровизации процесса анализа распределения по размерам частиц тонкого помола.

В ходе исследования была разработана модель совершенствования системы контроля качества частиц порошка красящего пигмента, с помощью которой производство получает точные данные о характеристиках и параметрах частиц. Система анализирует не только размер, но и предоставляет изображение исследуемых частиц, что позволяет повысить прибыль организации и сократить издержки на качество.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мануленко, А.Ф. Технология лакокрасочных материалов и покрытий. Проектирование производств / А.Ф. Мануленко. – Минск: БГТУ, 2021. – 114 с.
1. ГОСТ 9.032-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения. – М.: Стандартинформ, 1989. – 5 с.
3. ГОСТ 2093-82. Ситовый метод определения гранулометрического состава. – М.: Стандартинформ, 2015. – 20 с.
4. Десятков, А.В. Влияние размера частиц на механические свойства композитов на основе однородно деформирующегося полимера / А.В. Десятков. – М.: Академия естествознания, 2009. – Т.23. №5. – С. 32-33.
5. Александров, А.А. Взаимосвязь между геометрическими параметрами зерен шлифовальных порошков, исследованная методами лазерной дифракции и оптической микроскопии / А.А. Александров // Современные научные исследования и инновации. – 2018. – № 5(85). – 8 с.
6. Microtrac MRB: Сравнение методов определения размеров частиц – URL: <https://www.microtrac.com/ru> (дата обращения 29.11.2022).
7. Фармакопоя: Определение распределения частиц по размеру методом лазерной дифракции света. – URL: <https://pharmacopoeia.ru> (дата обращения 15.12.2022).
8. Гарибей К., Олсон Э., Салсбери Дж. С. Понимание взаимосвязи между источниками красного и синего света при определении профилей распределения частиц по размерам. – URL: <https://www.americanpharmaceuticalreview.com> (дата обращения 29.01.2023).
9. Пузырева, В.С. Исследование метода анализа распределения частиц тонкого помола / В.С. Пузырева. – Пенза: Молодые учёные России, 2021. – 338 с.
10. Пузырева, В.С. Построение функциональной эмпирической модели распределения по размерам частиц тонкого помола / В.С. Пузырева. – Пенза: Фундаментальные и прикладные научные исследования, 2022. 222 с.

REFERENCES

1. Manulenko, A.F. Tekhnologiya lakokrasochnyh materialov i pokrytij. Proektirovanie proizvodstv / A.F. Manulenko. – Minsk: BG TU, 2021. – 114 s.
2. GOST 9.032-74. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya lakokrasochnye. Gruppy, tekhnicheskie trebovaniya i oboznacheniya. – M.: Standartinform, 1989. – 5 s.
3. GOST 2093-82. Sitovyy metod opredeleniya granulometricheskogo sostava. – M.: Standartinform, 2015. – 20 s.
4. Desyatkov, A.V. Vliyanie razmera chastic na mekhanicheskie svoystva kompozitov na osnove odnorodno deformiruyushchegosya polimera / A.V. Desyatkov. – M.: Akademiya estestvoznaniya, 2009. – T.23. – №5. – S. 32-33.
5. Aleksandrov, A.A. Vzaimosvyaz' mezhdru geometricheskimi parametrami zeren shlifoval'nyh poroshkov, issledovannaya metodami lazernoj difrakcii i opticheskoy mikroskopii / A.A. Aleksandrov // Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovacii. – 2018. – № 5(85). – 8 s.
6. Microtrac MRB: Sravnenie metodov opredeleniya razmerov chastic, URL: <https://www.microtrac.com/ru> (data obrashcheniya 29.11.2022).
7. Farmakopeya: Opredelenie raspredeleniya chastic po razmeru metodom lazernoj difrakcii sveta. – URL: <https://pharmacopoeia.ru> (data obrashcheniya 15.12.2022).
8. Garibey K., Olson E., Salsberi Dzh. S. Ponimanie vzaimosvyazi mezhdru istochnikami krasnogo i sinego sveta pri opredelenii profilej raspredeleniya chastic po razmeram. – URL: <https://www.americanpharmaceuticalreview.com> (data obrashcheniya 29.01.2023).
9. Puzyreva, V.S. Issledovanie metoda analiza raspredeleniya chastic tonkogo pomola / V.S. Puzyreva. – Penza: Molodye uchyonye Rossii, 2021. – 338 s.
10. Puzyreva, V.S. Postroenie funkcional'noj empiricheskoy modeli raspredeleniya po razmeram chastic tonkogo pomola / V.S. Puzyreva. – Penza: Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya, 2022. – 222 s.

**DEVELOPMENT OF A MODEL FOR IMPROVING THE QUALITY CONTROL SYSTEM
OF COLORING PIGMENT POWDER PARTICLES**

© 2023 T.I. Komarov, V.S. Puzyreva, A.V. Chabanenko

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

Problem Statement (Relevance). Most often, the production of paints and varnishes consists of the main stages: from receipt to warehouses to packaging in boxes. And quality control is carried out at the entrance and at the exit. However, in the production of paints and varnishes, it is necessary to introduce intermediate control at the stage of grinding pigment raw materials into finely ground powder, since the main qualities of the finished paintwork product depend on the size range of particles of the finely ground powder. GOST 2093-82 recommends the use of sieve analysis, which is a sieving mechanism with a sieve from the largest mesh sizes to the smallest. However, this method is inferior to more modern ones in terms of analysis speed by more than 10 minutes, in terms of particle measurement range by 10-30%, and in terms of information content of the analysis. **Objectives.** Improving the quality of paints and varnishes through the introduction of intermediate control by laser diffraction. **Methods Applied.** In the presented work, methods such as mathematical modeling, the method of idealization and formalization of the research processes of paints and varnishes were applied. **Originality.** In the course of the work, new mechanisms were developed for assessing and controlling the quality of the particles of the coloring pigment powder, as well as new ways to improve the efficiency of the production of paints and varnishes. In the course of the study, an analysis of the technological process was carried out. **Result.** The result of the work was the developed model for improving the quality control system for the particles of the coloring pigment powder. **Practical Relevance.** The developed model will increase the effectiveness of current processes for the production of paints and varnishes through the introduction of intermediate control, which will increase the profit of the organization and reduce quality costs.

Keywords: quality control, pigment, fine powder, laser diffraction.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-3-16-25

EDN: JMAQLO

Timofey Komarov, Undergraduate.

E-mail: tim1kom@yandex.ru Author SPIN: 5009-3930.

Victoria Puzyreva, Undergraduate.

E-mail: vikap1999@mail.ru. Author's SPIN: 1185-1776.

*Alexander Chabanenko, Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of the Department of Innovation and
Integrated Quality Systems.*

E-mail: a@chabanenko.ru ORCID 0000-0002-5949-6579