

УДК 658.012.011.57:66.013.6

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА КАМЕРЫ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. В. С. Болдырев^{а, *}, В. В. Меньшиков^{б, с}, Б. Б. Богомолов^б,
С. В. Кузнецов^с, А. М. Зубарев^б

^аМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

^бРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

^сНаучно-производственное объединение “Лакокраспокрытие”, Хотьково, Россия

*e-mail: boldyrev.v.s@bmstu.ru

Поступила в редакцию 01.06.2020 г.

После доработки 28.09.2020 г.

Принята к публикации 20.11.2020 г.

Авторским коллективом представлена разработка алгоритма и его практическое применение в программном обеспечении при решении задач автоматизации расчета основных характеристик камер нанесения порошковых лакокрасочных материалов. Алгоритм позволяет разработчику, учитывая исходные данные, рассмотреть несколько вариантов конструктивных решений и выбрать оптимальный. Показано применение алгоритма и программного обеспечения на его основе при выполнении проектно-конструкторских работ Научно-производственного объединения “Лакокраспокрытие”.

Ключевые слова: пейнт-технологии, лакокрасочные материалы, окрасочная камера, алгоритм, гидродинамические показатели, технологическое оборудование

DOI: 10.31857/S0040357121020020

ВВЕДЕНИЕ

Окраска порошковыми лакокрасочными материалами (ЛКМ) требует применения комплекса специального технологического оборудования, одним из основных элементов которого является камера для нанесения порошковых красок. Выбор формы окрасочной камеры зависит от ряда факторов: габаритов и конфигурации окрашиваемых изделий, распределения внутри камеры аэродинамических потоков, необходимых для оптимальных режимов окраски и экономии ЛКМ, и др. [1–3].

Окрасочные камеры должны отвечать следующим требованиям:

- должны быть удобны в работе и обслуживании, обеспечивать оптимальные условия для нанесения лакокрасочных покрытий (ЛКП);
- камера должна предотвращать проникновение красочного аэрозоля и растворителя в окружающие помещения;
- загрязненный воздух, удаляемый из камеры, должен быть полностью очищен от красочного аэрозоля на выходе из зоны распыления;
- быть пожаро- и взрывобезопасными, обеспечивать санитарно-гигиенические условия труда обслуживающего персонала, экологически дружелюбными.

Реализованный алгоритм и программно-информационное обеспечение на его основе позволяет учесть все указанные требования на этапе проектирования, произвести расчет параметров оптимальной работы камеры и окрасочной системы в целом, с учетом требований заказчика.

Окрашивание изделий представляет собой сложный, многостадийный, трудоёмкий и энергоёмкий технологический процесс, организация которого требует специальных знаний. Отечественной лакокрасочной промышленностью выпускается огромный ассортимент лакокрасочных материалов (более 1500 наименований), что, с одной стороны, расширяет возможности обеспечения заданных свойств покрытий, а с другой — затрудняет их выбор, применение и эффективное нанесение с использованием окрасочных камер [3]. Представленный алгоритм расчета позволяет подобрать оптимальные конструкторские решения при проектировании окрасочных камер с использованием широкого ассортимента лакокрасочных материалов. Основным разработчиком окрасочных систем на территории РФ является НПО “Лакокраспокрытие”. С применением рассматриваемого алгоритма и программного обеспечения, НПО “Лакокраспокрытие” реализовало совместный проект с фирмами Alta (Чехия) и GALATEK A.S. (Чехия) по реинжинирингу и автоматизации

окрасочного цеха АО “Уралвагонзавод” (г. Нижний Тагил), уникального и крупнейшего в Европе.

Окрасочные камеры производятся такими зарубежными фирмами, как Omia (Франция), Wurster (Германия), Coral (Италия), Wagner (Германия), Daphne (Италия), Krautzberger (Германия), Haden S.A. (Франция), Saico (Италия). Однако роль указанных фирм на отечественном рынке незначительна, ввиду высокой стоимости и сложностей по обслуживанию, а также последующему реинжинирингу всей окрасочной камеры и системы в целом.

Автоматизация проектирования с использованием разработанного алгоритма позволяет конструктору, учитывая исходные данные, рассмотреть несколько вариантов конструктивных решений камеры, что невозможно сделать без использования средств вычислительной техники и специального программно-информационного обеспечения [4–6]. Авторским коллективом разработано алгоритмическое обеспечение расчета камер для нанесения порошковых ЛКМ, необходимое для проведения следующих работ:

- расчета условий эксплуатации камеры при ее заданных габаритах и основных параметрах выходного коллектора (определение скорости воздушных потоков в камере и коллекторе, гидравлического сопротивления всех технологических элементов, отклонения расчетных эксплуатационных параметров от заданных);

- определения эксплуатационных характеристик вентилятора (мощность, напор и производительность, число оборотов двигателя, диаметр рабочего колеса);

- экологического анализа работы камеры (определение концентрации опасных веществ, размеров окон, обеспечивающих безопасную эксплуатацию);

- аэродинамической оценки поведения окрашиваемого изделия внутри камеры (лобовое сопротивление, скорость обтекания потоком воздуха).

Окрасочные камеры потребляют большое количество воздуха, который необходимо подготовить: очистить, нагреть или охладить, а иногда и увлажнить. Это заставляет обращать особое внимание при проектировании окрасочных камер на энергоэффективность систем. Алгоритм позволяет произвести расчет целого ряда проектных решений, которые позволяют достигнуть существенной экономии энергозатрат: системы рекуперации тепла, зонирование рабочей зоны, автоматические системы управления производительностью приточно-вытяжных установок и т.д. В свою очередь это позволяет быстро окупить стоимость окрасочно-сушильной системы, что обеспечивает конкурентоспособность продукции.

На данный момент времени НПО “Лакокраспокрытие” является единственным предприятием в РФ и Восточной Европе, которое конструи-

рует и предлагает различное оборудование для типовых и оригинальных технологических систем нанесения жидких и порошковых ЛКМ различного назначения.

Цель работы – показать основные этапы разработки алгоритма для расчета камеры нанесения ЛКМ, представить ключевые параметры окрасочной системы, рассчитываемые с использованием программного комплекса на основе реализованного алгоритма в режиме автоматизированного проектирования, а также описать практическое применение алгоритма и программного обеспечения при выполнении опытно-конструкторских работ.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассчитываемая конструкция окрасочной камеры включает рабочую камеру, в которой происходит нанесение ЛКМ, зону выхода загрязненного краской воздуха в коллектор, в которой могут находиться сетка, конфузор или отбойные устройства, трубопроводный коллектор и вентилятор для организации воздушного потока из камеры и сброса отфильтрованного воздуха в атмосферу. Схема окрасочной камеры для нанесения лакокрасочных материалов изображена на рис. 1.

Исходные данные, необходимые для проведения расчетов, включают:

- габаритные размеры камеры, мм;
- габаритные размеры рабочего окна (мм), а также допустимую по СНиП скорость потока в окне, равную 0.8 м/с;
- количество и габаритные размеры грузочных окон, мм;
- характеристики сетки, устанавливаемой на выходе из камеры в коллектор (место ее расположения, размер и форма ячеек);
- информацию об использовании и размерах конфузора;
- место выхода воздушного потока из камеры в коллектор;
- характеристики коллектора для выхода воздуха (форма и габариты, производительность по воздуху, заданная скорость потока, равная 20 м/с, длина и конфигурация трубопроводов) и тип применяемого вентилятора;
- форму и размеры окрашиваемого изделия.

В алгоритмическом обеспечении расчета камеры используется методика гидравлического расчета трубопроводных систем химических производств, в которой, кроме общих уравнений гидродинамики, учитываются технологические ограничения, характеризующие условия эксплуатации трубопроводов предприятий химической промышленности (допустимые скорости потоков, воздействие веществ и материалов на параметры гидравлических систем и т.д.).

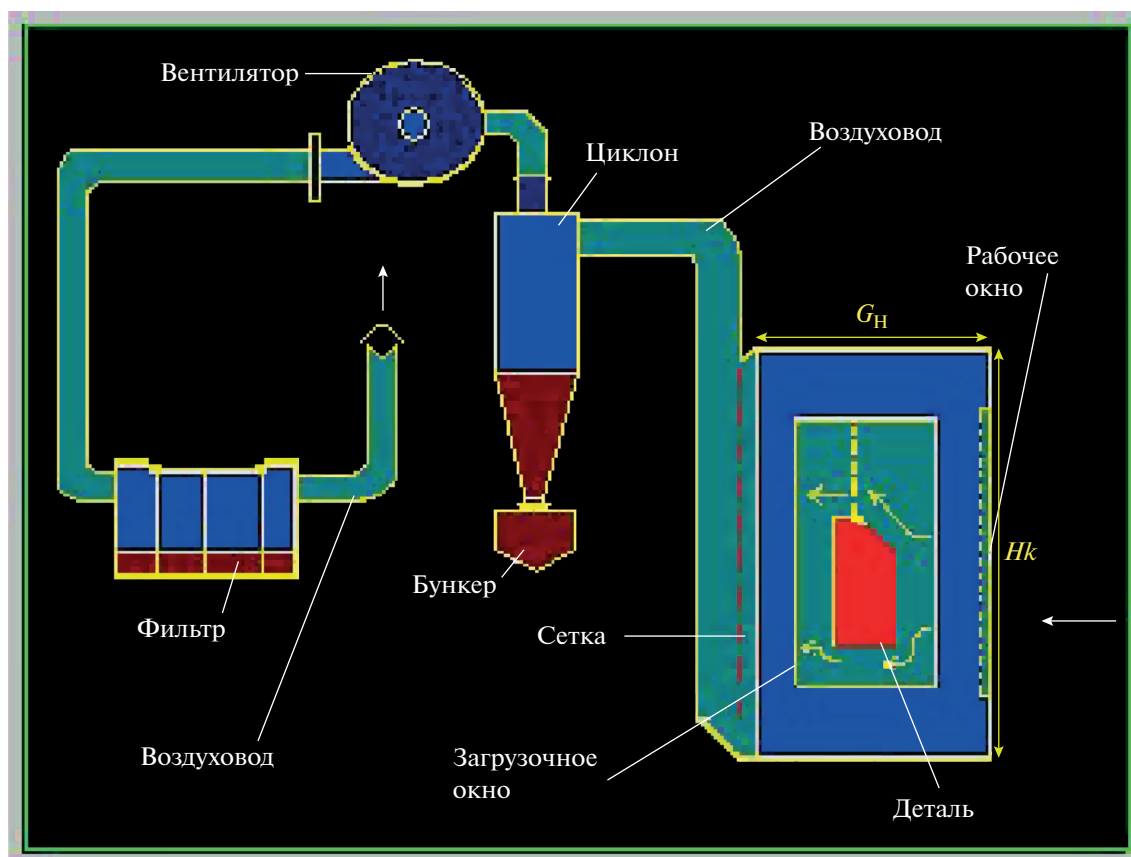


Рис. 1. Схема окрасочной камеры для нанесения лакокрасочных материалов.

В качестве основных гидродинамических зависимостей используются следующие соотношения:

– уравнение расхода, устанавливающее зависимость между скоростью потока W (м/с), площадью поперечного сечения трубопровода f (м²) и объемным расходом потока K (м³/с), и уравнение неразрывности потока, учитывающее постоянство расхода в различных сечениях одного участка гидравлической системы f_1 и f_2 [1]:

$$W_1 f_1 = W_2 f_2 = K \quad (1)$$

– уравнение Бернулли, учитывающее падение давления (Па) при движении потока между двумя участками гидравлической системы с сечениями f_1 и f_2 [1]:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{W_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{W_2^2}{2g} + h_0, \quad (2)$$

где Z – высота расположения участка (высотный напор), м; P – давление на участке, Па; ρ – плотность перемещаемого вещества, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; h_0 – потери давления при движении потока от сечения 1 до сечения 2, м;

– мощность (кВт), требуемая вентилятору для перемещения воздушного потока определяется по формуле [2]

$$N = k_{stock} \frac{Q H_F}{1000 \eta_1 \eta_2}, \quad (3)$$

где k_{stock} – коэффициент запаса (1.1–1.6), Q – производительность вентилятора, м³/с, H_F – напор вентилятора, Па, η_1 – коэффициент полезного действия вентилятора, η_2 – коэффициент полезного действия передачи.

H_F – напор вентилятора, Па, рассчитываемый по уравнению

$$H_F = (P_2 - P_1) + (\Delta P_{Suc} \Delta P_{Pres}) + \frac{W_{out}^2}{2}, \quad (4)$$

где P_1 и P_2 – давление на выходе нагнетательной и входе всасывающей линий вентилятора, Па; $\Delta P_{Suc/Pres}$ – сопротивление всасывающей/нагнетательной линии вентилятора, соответственно; W_{out} – скорость потока на выходе из сети, м/с.

Потери давления на любом участке трубопроводной системы ΔP [1]:

$$\Delta P = \left(\lambda \frac{l}{d_{eq}} + \varepsilon \right) \frac{W^2 p}{2}, \quad (5)$$

где λ — коэффициент сопротивления трению; l — длина участка трубопровода, м;

d_3 — эквивалентный диаметр трубопровода (для некруглого сечения $d_3 = 4f/U$, где U — периметр сечения); ε — сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке трубопровода.

При создании программного обеспечения, кроме вычислительных процедур гидравлического расчета элементов камеры, были использованы дополнительные процедуры переработки информации [7, 8]:

- диалоговая процедура ввода и корректировки исходных данных с контролем ошибочных действий пользователя;

- проверка наличия на диске файла исходных данных о проектируемой камере, что позволяет исключить повторный ввод информации;

- вывод результатов расчетов на экран дисплея и в файл;

- расчет концентрации вредных примесей внутри камеры и в рабочем пространстве вокруг нее.

Разработанный алгоритм расчета использован при реализации программного обеспечения автоматизированного расчета камеры для нанесения порошковых ЛКМ [9] и включает вычислительные модули, учитывающие условия эксплуатации оборудования [10].

При расчете скоростей и расходов воздуха в рабочем и загрузочных окнах выполняются следующие основные операции:

- расчет объемной производительности коллектора по воздуху (V), проводимый в соответствии с заданными габаритами камеры и окон, а также технологически заданной скоростью воздуха в окнах (0.8 м/с);

- расчет гидравлического сопротивления окон и давления внутри камеры при отсутствии окрашиваемого изделия (принимается, что вне камеры давление атмосферное);

- определение скорости воздушного потока в коллекторе в соответствии с уравнением неразрывности потока (1). Оценка отклонения рассчитанной скорости от заданной и выдача рекомендации по изменению размеров коллектора.

При расчете сопротивления сетки и условий движения за ней воздуха при заданных размерах сетки, форме и размерах отверстий, размерах зоны за сеткой выполняются следующие основные вычислительные операции:

- определение гидравлического сопротивления сетки и скорости движения воздуха в ее отверстиях. При этом используются соотношения (1) и (5),

а коэффициент местных сопротивлений сетки ξ_{grid} рассчитывается по уравнению [1]:

$$\xi_{grid} = \left[A_{ref} \sqrt{(1-f)} + (1-f) \right]^2 \frac{1}{f^2}, \quad (6)$$

где A_c — коэффициент, определяемый по справочной литературе и зависящий от формы отверстий, f — относительная площадь отверстий, определяемая делением суммарной площади отверстий на общую поверхность, перекрываемую сеткой;

- расчет наиболее целесообразных параметров сетки и соответствующего и гидравлического сопротивления сетки с учетом известных из гидродинамики оптимальных условий растекания потока по сетке;

- определение гидравлического сопротивления участка камеры, находящегося за сеткой, с учетом условий входа потока в коллектор и расположения сетки. В этом случае учитывается наличие конфузора (наиболее существенное влияние конфузора наблюдается при входе в трубопроводный коллектор сразу за сеткой). Расчет выполняется по формуле (5) при значениях коэффициентов местных сопротивлений (расширение, сужение, поворот), определяемых по справочной литературе, и последовательном увеличении скорости потока за сеткой при верхнем или нижнем выходе в коллектор.

При расчете сопротивления выходного участка камера-коллектор основной задачей является определение падения давления при сужении потока на выходе из зоны камеры, расположенной за сетками до выхода в коллектор, а также гидравлические расчеты, связанные со смешением потоков при размещении сетки на нижней и задней стенках камеры.

Расчет трубопроводного коллектора включает следующие основные процедуры:

- определение гидравлического сопротивления всасывающего и нагнетающего участка вентилятора при его заданных длине, сечении и числе оборотов (1), (5);

- расчет напора вентилятора (4) и определение диаметра рабочего колеса, к. п. д., мощности и числа оборотов двигателя в соответствии с типом вентилятора, выбранным из следующего списка: ВР-86-77, ВР-6, ВР-300-45, В-Ц14-46;

- расчет рекомендуемых размеров коллектора, при которых обеспечивается технологически целесообразная скорость (20 м/с), проводимый исходя из уравнения неразрывности потока (1).

Этап расчета концентрации вредных веществ в рабочей зоне камеры и вблизи нее позволяет оценить экологическую безопасность [11, 12] работы персонала и пожаро- и взрывоопасности камеры, связанных со скоплением порошковых ЛКМ в застойных зонах. При расчете используется методика проектирования вытяжных шкафов.

Основное уравнение, позволяющее рассчитать концентрацию веществ внутри или вне камеры, а также глубину окна, имеет следующий вид [2]:

$$W_0 = \frac{A}{0.434x} \lg \left(\frac{\delta q_0}{q_A - (1 - \delta)q_{p3}} \right), \quad (7)$$

где W_0 — скорость воздуха в отверстии (окне) между внутренне зоной камеры и помещением вне камеры (рабочая зона); A — коэффициент турбулентного обмена; x — сумма глубины окна (a) и зоны поступления воздуха перед окном (Δa); δ — коэффициент, зависящий от диссипации энергии в камере; q_A — концентрация вредных примесей на рабочем месте (за отверстием снаружи камеры), принимая равной ПДК, г/м³; q_{p3} — концентрация вредных примесей в помещении за камерой, равная 40% от ПДК, г/м³; q_0 — концентрация вредных примесей камере, г/м³, рассчитываемая по формуле [2]

$$q_0 = \frac{iG}{V}, \quad (8)$$

где i — коэффициент, зависящий от формы и организации движения воздуха в камере (при расположении сетки на задней и нижней стенках $i = 0.1$), G — количество вредных веществ в камере (г/с), V — объем камеры, м³.

При определении значений A , Δa и δ используется значение энергии диссипации, определяемой как количество кинетической энергии, переходящей от главного движения потока к турбулентным пульсациям и диссипируемой в единице массы за единицу времени [13–17]. При рассмотрении потока в камере диссипируемая энергия (ϵ) складывается из энергии приточных струй (ϵ_{sj}), тепловых струй (ϵ_{hj}) и энергии, связанной с движением изделий в камере (ϵ_{pm}). Зависимости параметров, входящих в уравнение (7), от значения диссипируемой энергии известны из литературы [1].

Аэродинамический расчет окрашиваемого изделия предусматривает определение сопротивления изделия потоку воздуха из рабочего окна и расчет скорости в наиболее узкой части камеры. Исходными данными для этого расчета являются форма и габариты окрашиваемого изделия. Расчет проводится по следующим основным формулам:

— расчет коэффициента лобового сопротивления детали ξ_d [1]:

$$\xi_d = 1.15C_x \frac{S_m}{\left(1 - \tau \frac{S_m}{F_{cam}}\right)^3} \left(1 - \frac{2y}{D_{eq}}\right) \frac{1}{3}, \quad (9)$$

где C_x и τ — коэффициенты, зависящие от формы детали и определяемые по справочной литературе, S_m — миделево сечение детали (площадь, на которую набегае воздушный поток), d_m — миде-

лева сторона детали (как правило, наибольшая), F_{cam} — сечение камеры, параллельное рабочему окну D_{eq} — эквивалентный диаметр камеры, y — смещение оси детали относительно центра камеры.

Расчет скорости обтекания детали W_d (м/с) [1, 2]:

$$\xi_d = C_x \frac{S_m}{F_{cam}} \left(\frac{W_d}{W_0}\right)^3, \quad (10)$$

где W_0 — скорость воздушного потока в пустой камере (м/с);

Расчет числа Рейнольдса для миделевого сечения Re_m [1]:

$$Re_m = W_0 d_m \frac{\rho}{\mu}, \quad (11)$$

где d_m — миделева сторона детали.

Расчет лобового сопротивления детали ΔP_d выполняется по уравнению (5), но при этом принимается, что сопротивление трения пренебрежимо мало по сравнению с лобовым сопротивлением изделия (т.е. $X = 0$).

В массив выходной информации включают все введенные данные [18, 19] и следующие рассчитанные примеры:

- расходы воздуха в рабочем и загрузочных окнах камеры, м³/с;
- падение давления (сопротивление) при прохождении воздуха через рабочее и загрузочные окна, Па;
- скорость воздуха в отверстиях сетки, м/с;
- гидравлическое сопротивление сетки, Па;
- оптимальное число отверстий и сопротивление сетки, Па;
- сопротивление участка камера-коллектор, Па;
- скорость воздуха за сеткой, м/с;
- массовый и объемный расход воздуха в коллекторе;
- гидравлическое сопротивление всасывающего и нагнетательного участков коллектора, Па;
- реальная скорость воздуха в коллекторе, м/с;
- рекомендуемые размеры коллектора для обеспечения скорости 20 м/с;
- напор вентилятора, Па;
- мощность вентилятора, кВт;
- размер и число оборотов рабочего колеса вентилятора;
- концентрация краски в камере, г/м³;
- расчетная глубина загрузочного и рабочего окон камеры, мм;
- лобовое сопротивление окрашиваемой детали, Па, скорость обтекания детали воздушным потоком.

Важной особенностью представленного алгоритма является возможность возврата к процеду-

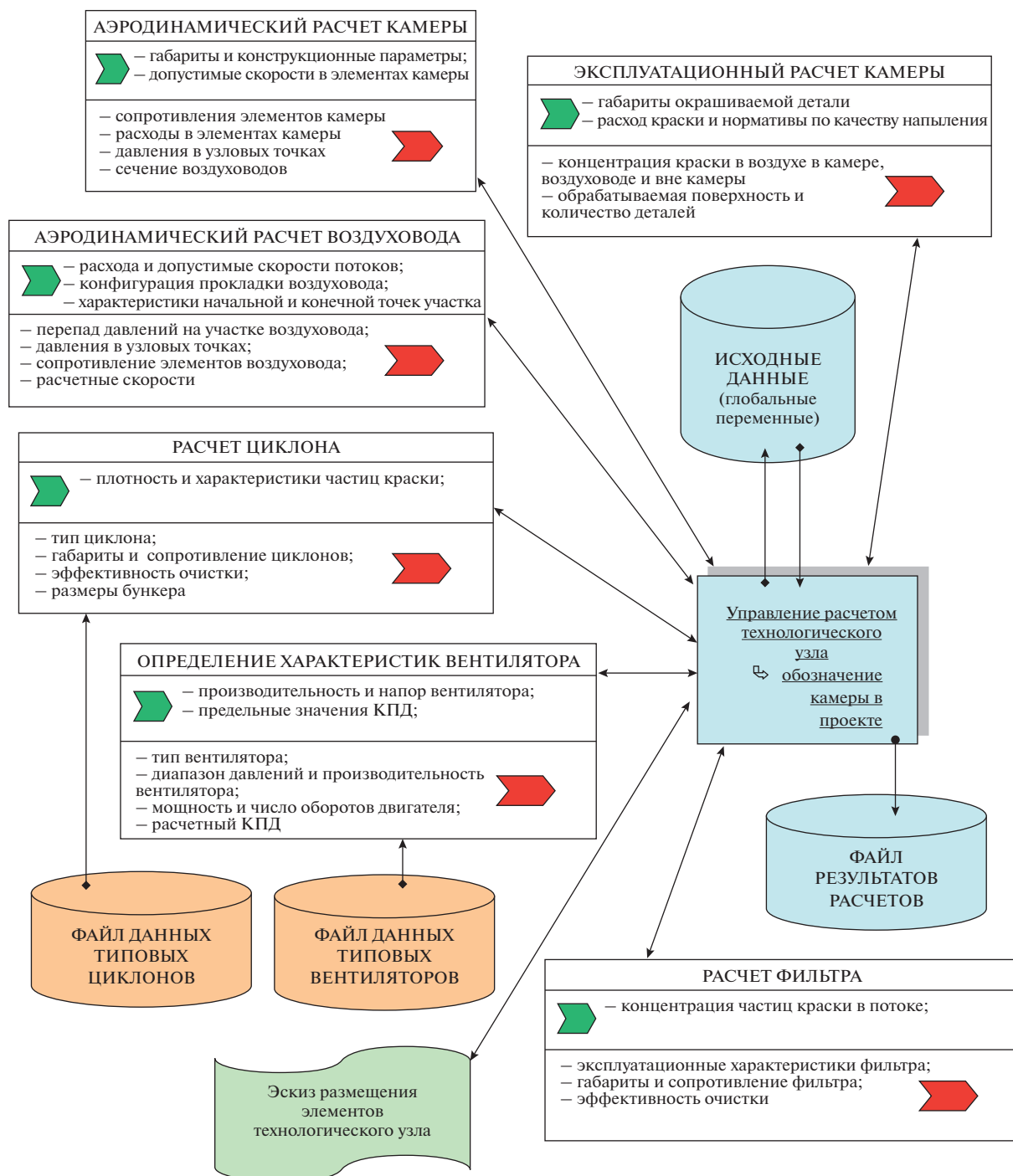


Рис. 2. Функционально-информационная структура программного комплекса расчета технологического узла камеры для нанесения порошковых красок.

ре ввода исходной информации для корректировки на любом этапе.

Представленный алгоритм лежит в основе программного обеспечения, реализованного на НПО «Лакокраскокрытие» и содержит группу диалоговых панелей, включающих кнопки для управления работой программы, текстовые окна для выхода информации, необходимые для рабо-

ты подсказки и комментарии. Функционально-информационная структура программного комплекса представлена на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА

Разработанный алгоритм был реализован в концепции экологически безопасных пейнт-тех-

нологий [20, 21], на основе которой было создано программное обеспечение для автоматизированного проектирования окрасочных линий, в том числе для окрашивания порошковыми красками. Алгоритм и программно-информационное обеспечение на его основе успешно опробовано на реальных производственных объектах НПО “Лакокраспокрытие” при конструировании окрасочных камер различных габаритов и конфигураций, а также показало эффективность предложений разработки при решении проектно-конструкторских задач.

Алгоритм и программное обеспечение применены при выполнении договоров НПО “Лакокраспокрытие” по разработке промышленных лакокрасочных материалов для окрашивания электродвигателей и технологии их нанесения. Технология окрашивания электродвигателей позволяет унифицировать технологический процесс окрашивания различных видов деталей электродвигателя для различных климатических исполнений изделия. Было разработано технико-коммерческое предложение по организации окрасочного участка электродвигателей в сборе на Владимирском ЭМЗ Российского электротехнического концерна “РУСЭЛПРОМ” по выпуску различных модификаций электродвигателей на российском рынке. Технология окрашивания позволила организовать окрашивание до 20 тысяч электродвигателей (или 40 тыс. м²) в месяц на производительной площади размером 72 × 18 м при минимальном потреблении энергоресурсов, обеспечила получение качественного лакокрасочного покрытия с продолжительным сроком службы.

Алгоритм применен при разработке универсального автоматизированного комплекса для окраски контейнеров с радиоактивными отходами с использованием блока автоматического дистанционного управления и элементов робототехники. Указанный уникальный комплекс установлен и запущен на Воронежской АЭС.

Программное обеспечение активно использует научный и проектный отдел, конструкторское бюро, машиностроительный завод, входящие в структуру НПО “Лакокраспокрытие”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный авторским коллективом алгоритм расчета камеры для нанесения лакокрасочных материалов и программное обеспечение на его основе применяется на НПО “Лакокраспокрытие”. Интеграция алгоритма в процесс проектирования новых окрасочных камер и реинжиниринге существующих, позволило предприятию существенно увеличить доход, снизить временные и ресурсные издержки.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A	коэффициент турбулентного обмена
C_x	коэффициент, зависящий от формы детали
D	диаметр камеры, м
d	сторона детали или эквивалентный диаметр, м
F	сечение камеры, м ²
f	площадь поперечного сечения трубопровода, м ²
G	количество вредных веществ в камере, г/с
g	ускорение свободного падения, м/с ²
H	напор, Па
h	высота при движении потока, м
i	коэффициент, зависящий от формы и организации движения воздуха
K	объемный поток расхода, м ³ /с
l	длина участка трубопровода, м
P	давление, Па
ΔP	сопротивление, Па
Q	производительность вентилятора, м ³ /с
q	концентрация вредных примесей, г/м ³
S	сечение детали, м ²
V	объем камеры, м ³
W	скорость потока, м/с
X	сумма глубин в зонах, м
y	смещение оси детали относительно центра камеры, м
Z	высота расположения участка (высотный напор), м
δ	коэффициент, зависящий от диссипации энергии в камере
ε	диссипируемая энергия, Дж, или сумма коэффициентов местных сопротивлений
η	коэффициент полезного действия
λ	коэффициент сопротивления трению
ξ	коэффициент местных сопротивлений
ρ	плотность перемещаемого вещества, кг/м ³
τ	коэффициент, зависящий от формы детали

ИНДЕКСЫ

0	вредные примеси
cam	камера
d	деталь
eq	эквивалентный
F	вентилятор
$grid$	сетка
hj	тепловая струя

<i>hole</i>	отверстие
<i>m</i>	миделево сечение
<i>Out</i>	выход
<i>ou</i>	вне
<i>pm</i>	движение изделия
<i>Pres</i>	нагнетание
<i>ref</i>	справка
<i>sj</i>	приточная струя
<i>St</i>	запас
<i>Suc</i>	всасывание

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мячин В.А., Шабельский В.А.* Конструирование оборудования окрасочных цехов. М.: Машиностроение, 1989.
2. *Рабинович Г.Д., Слободкин Л.С.* Терморационная и конвективная сушка лакокрасочных покрытий. Минск: Наука и техника, 1966.
3. *Меньшиков В.В., Богомолов Б.Б., Быков Е.Д., Аверина Ю.М., Рыбина О.Е., Курбатов А.Ю.* Основы проектирования окрасочных производств. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2018.
4. *Кафаров В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1976.
5. *Кафаров В.В., Мешалкин В.П.* Анализ и синтез химико-технологических систем. М.: Химия, 1991.
6. *Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I.* Integrated design of flexible chemical process, devices, and control systems // Theor. Found. Chem. Eng. 2014. V. 48. № 5. P. 614. [*Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И.* Интегрированное проектирование гибких химико-технологических процессов, аппаратов и систем управления // Теор. осн. хим. технол. 2014. Т. 48. № 5. С. 557.]
7. *Bogomolov B.B., Meshalkin V.P.* Expert system for optimum composing of chemical plants equipment // Theor. Found. Chem. Eng. 1994. V. 28. № 6. P. 638. [*Богомолов Б.Б., Мешалкин В.П.* Принципы разработки экспертной системы оптимальной компоновки оборудования химических производств // Теор. осн. хим. технол. 1994. Т. 28. № 6. С. 638.]
8. *Bogomolov B.B., Zubarev A.M., Meshalkin V.P., Men'shikov V.P., Boldyrev V.S.* Intelligent logical information algorithm for choosing energy- and resource-efficient chemical technologies // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 5. P. 709. [*Богомолов Б.Б., Болдырев В.С., Зубарев А.М., Мешалкин В.П., Меньшиков В.В.* Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической технологии // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 5. С. 483.]
9. *Богомолов Б.Б., Меньшиков В.В., Болотин Б.М., Болдырев В.С., Елистраткина В.О.* Информационно-вычислительная система для проектирования и конструирования промышленных окрасочных линий // Лакокрас. матер. их примен. 2019. № 11. С. 27.
10. *Omelchenko I.N., Lyakhovich D.G., Dobryakova K.V.* Algorithm for innovative development management of a project-oriented organization // Herald Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng. 2019. № 1. P. 129.
11. *Bogoslovskii S.Yu., Kuznetsov N.N., Boldyrev V.S.* Parameter optimization of electrolytic process of obtaining sodium hypochlorite of disinfection of water // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 918. № 1. Article number 012028.
12. *Averina Yu.M., Kalyakina G.E., Menshikov V.V., Kapustin Yu.I., Boldyrev V.S.* Neutralization process design for electroplating industry wastewater containing chromium and cyanides // Herald Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci. 2019. № 3. P. 70. [*Аверина Ю.М., Калякина Г.Е., Меньшиков В.В., Капустин Ю.И., Болдырев В.С.* Проектирование процессов нейтрализации хромо- и цианосодержащих сточных вод на примере гальванического производства // Вестн. Моск. гос. тех. ун-в. им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2019. № 3. С. 70.]
13. *Gordeeva Y.L., Borodkin A.G., Gordeeva E.L., Rudakovskaya E.G.* Mathematical modeling of continuous fermentation in lactic acid production // Theor. Found. Chem. Eng. 2019. V. 53. № 4. P. 501. [*Гордеева Ю.Л., Бородкин А.Г., Гордеева Е.Л., Рудаковская Е.Г.* Математическое моделирование процесса непрерывной ферментации при получении молочной кислоты // Теор. осн. хим. технол. 2019. Т. 53. № 4. С. 402.]
14. *Koshev A.N., Varentsov V.K.* Mathematical modeling of effective systems of reaction with flow-through 3D electrodes // Theor. Found. Chem. Eng. 2018. V. 52. № 1. P. 87. [*Кошев А.Н., Варенцов В.К.* Математическое моделирование эффективных систем реакторов с проточными трехмерными электродами // Теор. осн. хим. технол. 2018. Т. 52. № 1. С. 93.]
15. *Коробец Б.Н.* Задачи управления проектными и программными рисками // Инф.-измер. упр. сист. 2017. Т. 15. № 7. С. 54.
16. *Meshalkin V.P., Panchenko S.V., Dli M.I., Panchenko D.S.* Analysis of the thermophysical processes and operating modes of electrothermic reactor using a computer model // Theor. Found. Chem. Eng. 2018. V. 52. № 2. P. 166. [*Мешалкин В.П., Панченко С.В., Дли М.И., Панченко Д.С.* Анализ теплофизических процессов и режимов работы электротермического реактора с использованием компьютерной модели // Теор. осн. хим. технол. 2018. Т. 52. № 2. С. 141.]
17. *Елисаветский А.М., Ратников В.Н., Дорошенко В.Г. и др.* Лакокрасочные покрытия. Технология и оборудование: справ. изд. М.: Химия, 1992.
18. *Мошев Е.Р., Мешалкин В.П., Ромашкин М.А.* Разработка моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки жизненного цикла оборудования химических производств // Мат. методы техн. технол. — ММТТ. 2019. Т. 6. С. 94.
19. *Ziyatdinov N.N.* Modeling and optimization of chemical engineering processes and systems // Theor. Found. Chem. Eng. 2017. V. 51. № 6. P. 889. [*Зиятдинов Н.Н.* Моделирование и оптимизация химико-техно-

- гических процессов и систем // Теор. осн. хим. технол. 2017. Т. 51. № 6. С. 613.]
20. *Boldyrev V.S., Averina Yu.M., Menshikov V.V., Kuznetsov S.V., Kolybanov K.Yu.* Technological and organizational engineering of paint processing // Theor. Found. Chem. Eng. 2020. V. 54. № 3. P. 420. [*Болдырев В.С., Аверина Ю.М., Меньшиков В.В., Кузнецов С.В., Колыбанов К.Ю.* Технологическо-организационный инжиниринг окрасочных производств // Теор. осн. хим. технол. 2020. Т. 54. № 3. С. 299.]
21. *Bogomolov B., Boldyrev V., Elistratkina V., Menshikov V., Seina Ya., Zubarev A.* Information-computing system for designing and construction of industrial painting lines // Proceedings of the 22nd International Conference MEKON 2020. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2020. P. 1.