

УДК 658.012.011.57:66.013.6

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНОГО РАСЧЕТА КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОЙ СУШКИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

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

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

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

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

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

Поступила в редакцию 02.07.2020 г.

После доработки 24.09.2020 г.

Принята к публикации 30.09.2020 г.

Приведены результаты разработки и внедрения уникального аппаратно-программного комплекса, в основе которого лежит метод алгоритмизации расчета параметров конвективно-радиационной сушки лакокрасочных покрытий по заданным характеристикам. Программный комплекс обеспечивает расчет процесса конвективно-радиационной или конвективной сушки, оперативный анализ исходных данных с целью исключения проектных ошибок, поиск рационального проектного решения путем внесения корректив в исходную информацию и быстрого пересчета процесса, получение протокола проектного расчета, содержащего все этапы и результаты решения задачи. Приведены этапы алгоритмизации и формулы для расчета оборудования, составляющие основу алгоритма. Показаны основные функции программного комплекса и возможности его применения для расчета сушки с различными характеристиками под конкретную окрасочную систему. Описана практическая реализация и применение проектного расчета при выполнении работ на Научно-производственном объединении “Лакокраспокрытие”.

Ключевые слова: алгоритмизация, конвективно-радиационная сушка, оптимизация, химическая технология, моделирование, лакокрасочные покрытия, пейнт-технологии

DOI: 10.31857/S0040357121010036

ВВЕДЕНИЕ

Ужесточение экологических требований к лакокрасочным материалам (ЛКМ) обусловило интенсивное развитие производства и потребления материалов радиационного отверждения [1]. В мировом объеме выпуска 80% составляют лакокрасочные материалы для промышленных покрытий различного назначения. Общемировой объем производства этих материалов в 2004 г. составил 177 тыс. тонн. В 2019 г. наблюдается его увеличение до 750 тыс. тонн.

В настоящее время наибольшее количество этих материалов (около 80%) относится к промышленным ЛКМ и печатным краскам. Стоит отметить, что в автомобильной промышленности использование ЛКМ радиационного отверждения началось лишь в 2008 г., но при этом к 2019 г. потребление увеличилось более чем в 12 раз.

Европейский рынок ЛКМ радиационного отверждения сосредоточен в основном в западноевропейских странах, однако аналитики прогнози-

руют его заметное развитие в странах Восточной Европы, в том числе за счет России и стран СНГ.

Западные эксперты в области лакокрасочной промышленности считают, что одним из главных путей развития отрасли, направленных на решение экологических проблем и ресурсосбережение, является производство и применение порошковых ЛКМ с реализацией радиационно-конвективного отверждения [2, 3]. Однако европейский рынок порошковых ЛКМ перенасыщен и повышение мирового спроса на ЛКМ данного типа предполагается главным образом в странах Азии, Восточной Европы, России и странах СНГ.

Согласно концепции “пейнт-технологий” [4] и стратегии развития по инновационному пути, НПО “Лакокраспокрытие” совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева и факультетом машиностроения Островского технического университета был выполнен цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (в рамках межправительственного соглашения) по созданию технологий антикоррозионных покрытий труб и металлокон-

струкций на основе водных ЛКМ, модифицированных нанодобавками для улучшения экологических и потребительских свойств продукции. Промышленные испытания опытной партии на заводе Accellor-Mittal (Чехия) показали положительный результат.

Сотрудничество с РХТУ им. Д.И. Менделеева позволило создать экспертно-информационную интегрированную систему проектирования лакокрасочных и окрасочных производств, а на машиностроительном заводе НИИ при НПО “Лакокраспокрытие” возможна реализация проектов.

НПО “Лакокраспокрытие” реализовало совместный проект с компаниями “Тагилтрансмаш-проект”, Alta (Чехия) и GALATEK A.S. (Чехия) по реинжинирингу окрасочного цеха АО “Уралвагонзавод”, крупнейшего в Европе, а также разработке рабочего проекта на окрасочное производство грузовых вагонов. В рамках перечисленных работ был разработан и внедрен алгоритм и программный комплекс на его основе, обеспечивающий проектирование окрасочных систем. Разработанный программный комплекс не имеет аналогов на территории РФ и Восточной Европы.

Комплексный подход к созданию окрасочного производства позволяет разрабатывать линии нанесения жидких и порошковых ЛКМ различного назначения, конструировать и предлагать различное технологическое оборудование для типовых и оригинальных технологических процессов [5]. В зависимости от проектной технологии линии окрашивания могут включать различное оборудование: агрегаты химической подготовки поверхности различной конструкции, камеры нанесения жидких ЛКМ пневматическим, безвоздушным или электростатическим методом распыления с комплексами оборудования нанесения лакокрасочных покрытий (ЛКП), сушильные камеры, туннели для стекания излишков ЛКМ и охлаждения, транспортные системы в различном исполнении.

Рассматриваемый в статье программный комплекс для проектного расчета конвективно-радиационной сушки обеспечивает расчет процесса конвективно-радиационной или конвективной сушки, оперативный анализ исходных данных с целью исключения проектных ошибок, поиск рационального проектного решения путем внесения корректив в исходную информацию и быстрого пересчета процесса, получение протокола проектного расчета, содержащего все этапы и результаты решения задачи. Программы реализованы на основе принципа объектно-ориентированного программирования и сопровождаются дружественным интеллектуальным интерфейсом, что обеспечивает универсальность и эффективность программного обеспечения. На рис. 1 представлен блок-схема алгоритма расчета.

Для расчета оборудования конвективно-радиационной сушки были выбраны известные из литературы конструкции аппаратов для отверждения покрытий, режимы ведения процесса, типы растворителей и ЛКП [6, 7]. Рассматривались аппараты конвективной и терморadiационно-конвективной сушки [8–10]. Терморadiационные сушильные установки имеют следующие преимущества перед конвективными: время отверждения в 2–10 раз меньше, чем в конвективных установках; простота конструкции; малая тепловая инерционность; легкость регулирования. Недостатки: невозможность обеспечения равномерного нагрева сложно-профильных изделий; влияние экранирования на нагрев; возможность изменения оттенков покрытия в наиболее облучаемых участках.

Терморadiационно-конвективные установки обеспечивают быстрый подъем температуры и более равномерный обогрев изделий. Особенно эффективны установки для крупногабаритных изделий и изделий сложной формы [11–13].

МЕТОДИЧЕСКОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

В алгоритме предусмотрен ввод исходной информации по отдельным характеристикам процесса сушки детали. Для этого в окне ввода данных предусмотрены закладки, включающие характеристики камеры, параметры излучателей, свойства теплоносителя (воздуха), характеристики окрашиваемой детали, параметры ведения процесса сушки. Такой подход позволяет изменять только одну из групп данных, что обеспечивает поиск рационального решения путем вариаций одной из характеристик процесса [14, 15].

Например, для заданной детали и заданных характеристик камеры можно варьировать параметры процесса (время сушки), находя лучшую динамику процесса, или, изменяя число излучателей, обеспечить оптимальную температуру лакокрасочного слоя. Возможен автоматический подбор количества излучателей, что дает ресурсо- и энергосбережение за счет отсутствия лишних излучателей.

Реализован ввод информации в режиме меню по типу растворителя, материалу детали и виду лакокрасочного покрытия, что целесообразно для текстовых данных. В программном блоке происходит расчет некоторых конструктивных характеристик камеры и детали, а также извлечение нормативной и справочной информации из баз данных.

Для контроля корректности введенных данных предусмотрен вывод автоматически формируемого эскиза камеры (рис. 2), из которого можно представить расположение излучателей, поло-

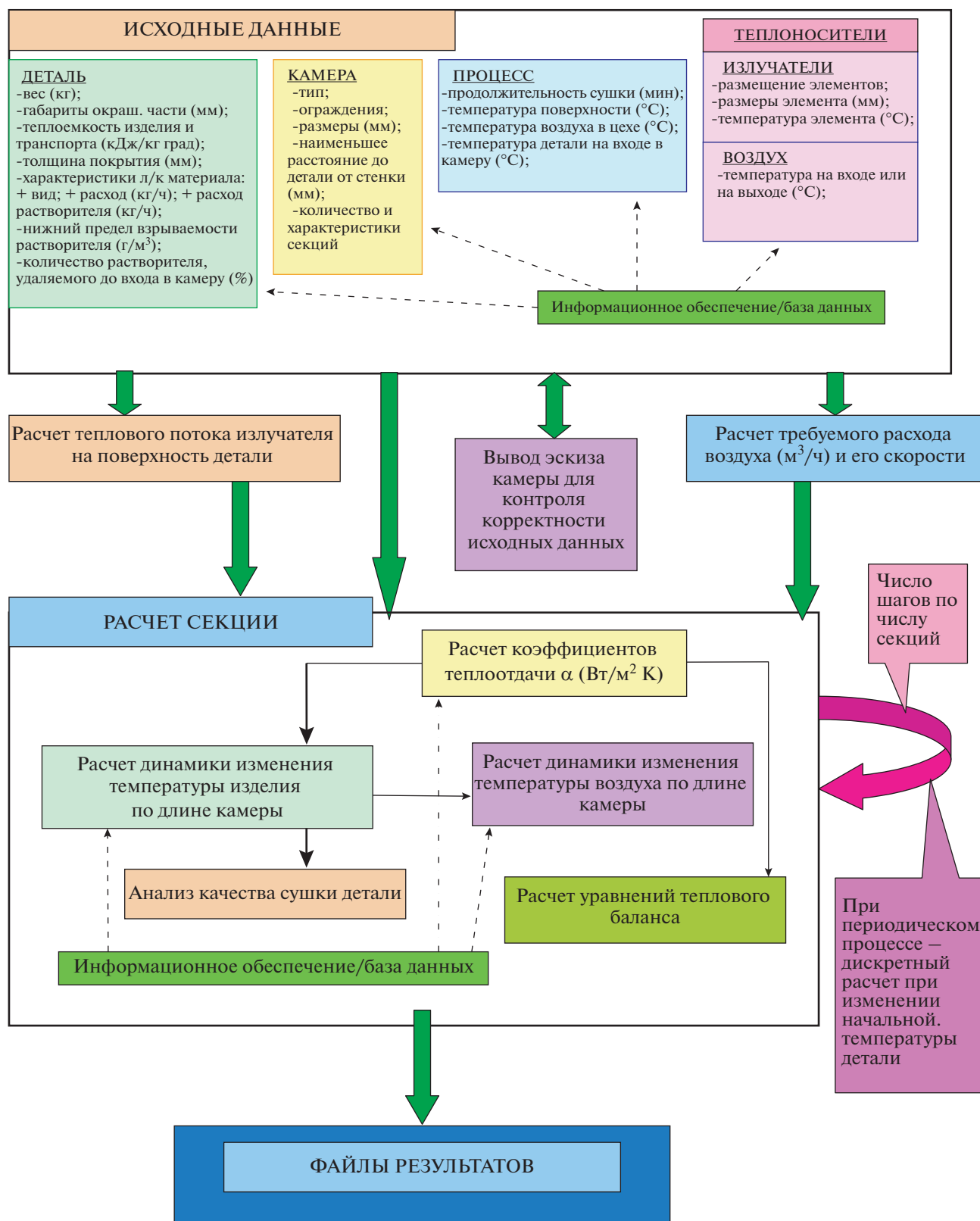


Рис. 1. Блок-схема алгоритма проектного расчета конвективно-радиационной сушки изделий в лакокрасочных производствах.

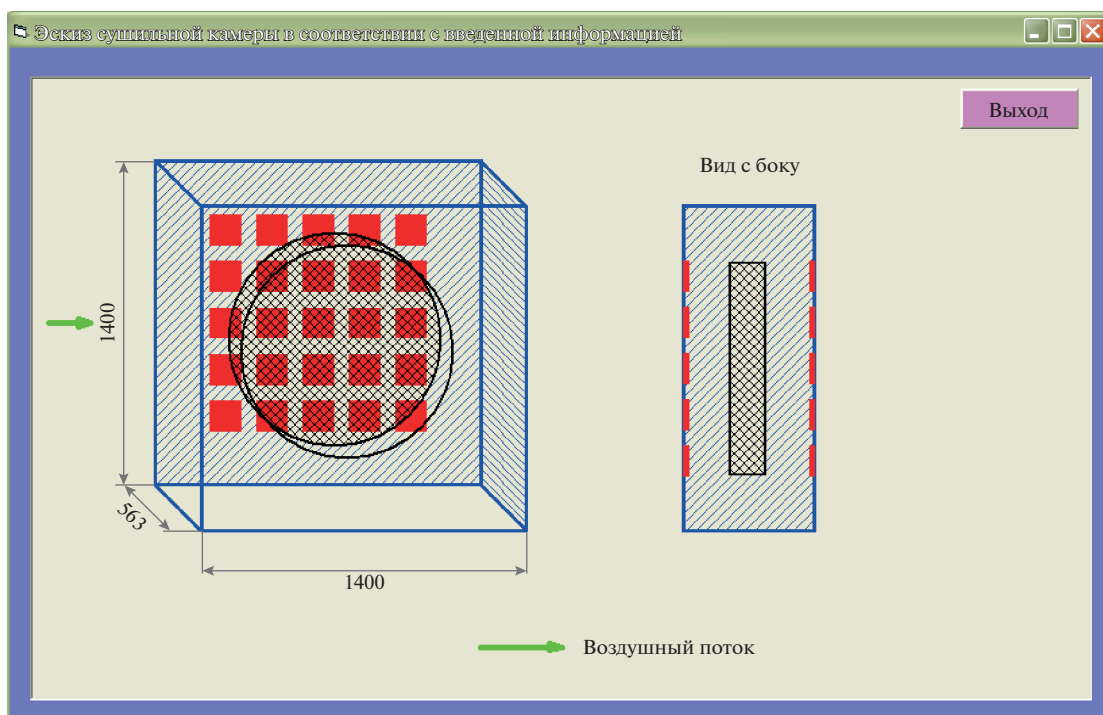


Рис. 2. Автоматически формируемый эскиз камеры конвективно-радиационной сушки.

жение детали внутри камеры, габариты камеры и внести изменения в исходные данные.

Если исходные данные правильны, следует нажать кнопку “выполнить расчет”, и происходит последовательный расчет излучателей, определение характеристик воздушного потока, расчет динамики сушки по длине камеры, расчет теплового баланса процесса.

Расчет теплового потока излучателей. Выполнение расчета начинается с определения теплового воздействия излучателей на деталь и воздух в камере, для чего применяется специальное диалоговое окно. В случае использования только конвективной сушки расчет свойств излучателей не производится. Основным результатом работы блока является тепловой поток Q_e (кДж/ч) между произвольно расположенными плоскостями излучателями F_e и поверхности F_s , который приближенно определяется по формуле Шака [9]:

$$Q_e = 20.7824 \epsilon_{Re} \epsilon_e \frac{F_e F_s}{\pi r^4} s_1 s_2 \left[\left(\frac{T_e}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

где ϵ_{Re} – приведенный коэффициент теплового излучения системы; ϵ_e – степень черноты поверхности излучателя (для чугуна 0.7); s_1, s_2 – минимальное и максимальное расстояния между поверхностями (для параллельного расположения $s_1 = s_2$); T_e – температура излучателя, К; T_s – температура поверхности детали для учета ее отражаю-

щей способности, К; r – предельное расстояние действия одного излучателя на поверхности детали.

При нескольких излучателях определяется суммарный удельный тепловой поток излучателей Q_e (кДж/(ч м²)), а при изменении положения детали в процессе сушки – средняя величина суммарного удельного теплового потока при разных положениях.

Расчет параметров воздушного потока. Известен расход растворителя G_s (кг/ч) и его доля, удаляемая в камере ϕ_s . Известен расход лакокрасочного материала G , сухой остаток материала ϕ_r . Минимальный расход воздуха V_{min} (м³/ч) определяется по следующей формуле [9]:

$$V_{min} = \frac{1000 G \phi_r \phi_s}{PDK}, \quad (2)$$

где PDK – нижний предел взрываемости паров растворителя (г/м³), получаемый из таблицы базы данных. Для обеспечения взрывобезопасной концентрации принимается трехкратное превышение определенного по уравнению (2) значения $V_V = 3 V_{min}$.

При использовании только конвективной сушки скорость воздуха, рассчитанная по методике (2), оказывается слишком низкой, поэтому предусматривается ввод скорости пользователем.

В этом же программном блоке рассчитывают коэффициенты теплоотдачи. Задаются температура воздуха на входе в камеру T_{li} (К), температу-

ра детали (изделия) на входе в камеру T_{ld} (К), температура излучателя T_e (К).

Расчет коэффициента теплоотдачи между воздухом и поверхностью изделия α_{as} [8]:

$$\alpha_{as} = \frac{\alpha_{as1}F_s + \alpha_{as2}(F_{fs} - F_s)}{F_{fs}}, \quad (3)$$

где F_s – облучаемая поверхность изделия (m^2), F_{fs} – полная поверхность изделия (m^2), α_{as1} – коэффициент теплоотдачи между воздухом и облучаемой поверхностью изделия ($Вт/(m^2 K)$), α_{as2} – коэффициент теплоотдачи между воздухом и необлученной поверхностью изделия ($Вт/(m^2 K)$).

Для темного излучателя [9]:

$$\alpha_{as1} = 1.164 \times (13.3 + 0.0053857T_e + 0.00004785T_e^2). \quad (4)$$

Для светлого излучателя [9]:

$$\alpha_{as1} = 1.164 \times (17.56 - 0.001357T_e + 0.000564286T_e^2), \quad (5)$$

где T_e – температура излучателя (К).

Расчет коэффициента теплоотдачи между воздухом и поверхностью изделия α_{as2} в условиях отсутствия облучения выполняется в соответствии с основными соотношениями, принятыми для условий вынужденной конвекции [8].

Дополнительно рассчитывается коэффициент теплоотдачи от излучателей воздуха α_{ea} с использованием соотношения для вынужденной конвекции [15–17], но с некоторыми изменениями, связанными с передачей тепла вдоль стенки, на которой размещены излучатели.

Расчет динамики изменения температуры в камере. Расчет кинетики нагрева изделия и воздуха в камере проводят на основе методики, предложенной в [8–10]. Он включает следующие основные соотношения:

– расчет параметров теплообмена со стороны излучателей (S_e) и детали (S_d) по соотношениям [8]

$$S_d = \frac{F_{fs}}{L_d}, \quad (6)$$

где F_{fs} – полная площадь поверхности детали (m^2), L_d – длина детали по направлению движения конвейера (м);

$$S_e = \frac{F_e}{L_e}, \quad (7)$$

где F_e – суммарная площадь излучателей, действующих на деталь (m^2); L_e – длина стенки камеры вдоль направления движения конвейера, на которой располагаются действующие излучатели (м).

– определяется коэффициент, оценивающий распределение энергии и нагрев изделия и нагрев воздуха в камере [8]:

$$\beta = \frac{\alpha_{as}S_d}{\alpha_{ea}S_e} \quad (8)$$

– расчет дополнительных параметров, определяющих динамику сушки [15]:

$$\varepsilon_{Re}\varphi_{es} = \frac{q_s}{q_0 - mT_{ld}}, \quad (9)$$

где T_{ld} – температура детали на входе в зону сушки (К); $m = 12.55$ $Вт/(m^2 K)$ – постоянный параметр при рабочей температуре излучателя; q_0 – параметр, зависящий от температуры излучателя;

$$\xi = \varepsilon_{Re}\varphi_{es}m^\delta, \quad (10)$$

где $\delta = F_s/F_{fs}$ – доля облучаемой поверхности детали.

– расчет водяных эквивалентов теплоносителя – воздуха W_a и детали W_d ($кДж/(ч K)$) [6]:

$$W_a = C_p\rho_{an}V_v, \quad (11)$$

где C_p – теплоемкость воздуха при нормальных условиях ($кДж/(m^3 K)$), ρ_{an} – плотность воздуха при нормальных условиях ($кг/м^3$), V_v – расход воздуха ($m^3/ч$);

$$W_d = C_{pd}G_d = C_{pd}M_d\delta t_D, \quad (12)$$

где C_{pd} – теплоемкость детали ($Дж/(кг K)$), G_d – производительность по массе для части детали, подвергаемой излучению ($кг/ч$), M_d – масса детали ($кг$), t_D – время сушки ($ч$).

Определяется отношение [7]

$$R_{ed} = \frac{W_a}{W_d}. \quad (13)$$

Далее происходит расчет кривой кинетики нагрева детали. Основное уравнение для расчета температуры T_d (К) имеет следующий вид [7]:

$$T_d = A + Be^{-\gamma v x} + Ce^{-\gamma' v x}, \quad (14)$$

где x – расстояние от входа детали в камеру до текущей точки, а для определения всех составляющих применяется следующая последовательность соотношений (используется значение температуры (К)) [7]:

$$A = 1 + \beta \left[1 + R_{ed} \left(1 + \frac{\xi}{\alpha_{as}} \right) \right], \quad (15)$$

$$B = \beta R_{ed} \left(1 + \frac{\xi}{\alpha_{as}} (1 + \beta) \right), \quad (16)$$

$$\lambda = \sqrt{a^2 - 4b}; \quad r = \frac{a + \lambda}{2}; \quad p = \frac{a - \lambda}{2}, \quad (17)$$

$$\varepsilon_H = \frac{T_e - T_{li}}{T_{ld} - T_{li}}. \quad (18)$$

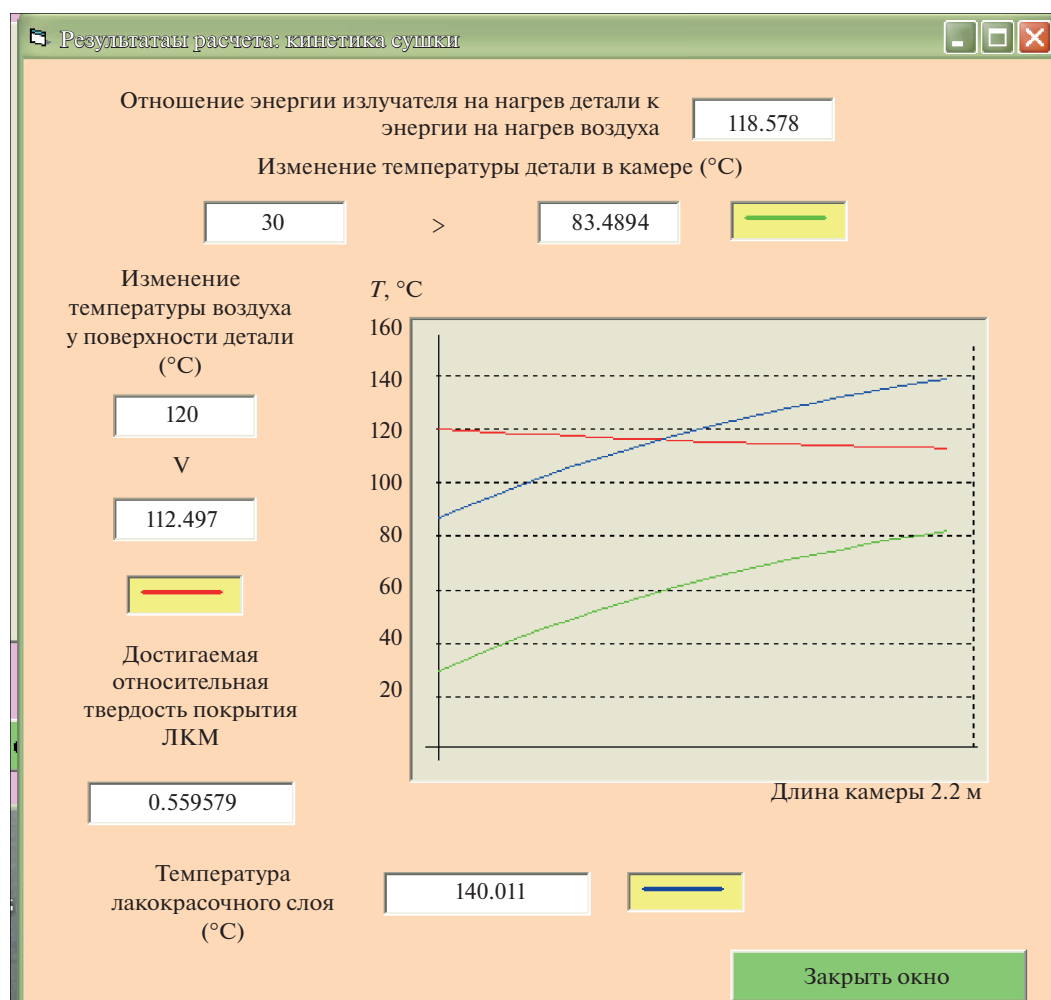


Рис. 3. Программное окно расчета кинетики сушки в камере.

Для случая прямотока, когда направление конвейера и воздушного потока совпадают, при малых скоростях, следует применять следующие уравнения [9]:

$$B = -\frac{\beta R_{ed}}{r(p-r)}(T_{ld} - T_{li}) \left[r - 10_s + \frac{(1 + \beta - r)q_e \delta}{a_{as}(T_{ld} - T_{li})} \right], \quad (19)$$

$$C = -\frac{\beta R_{ed}}{p(p-r)}(T_{ld} - T_{li}) \left[p - 10_s + \frac{(1 + \beta - p)q_e \delta}{a_{as}(T_{le} - T_{li})} \right] \quad (20)$$

Аналогично происходит расчет кривой кинетики нагрева воздуха [9]:

$$T_a = A \left(1 + \frac{\zeta}{a_{as}} \right) - \frac{\delta_0}{a_{as} m} + B \left(1 + \frac{\zeta}{a_{as}} + \frac{r}{R_{ed}} \right) e^{-\gamma v x} + C \left(1 + \frac{\zeta}{a_{as}} - \frac{p}{R_{ed}} \right) e^{-\gamma v x}. \quad (21)$$

Основными численными результатами расчета являются конечные температуры воздуха, детали и лакокрасочного покрытия в камере. Для

оценки динамики изменения температур по длине аппарата в окне программы выводятся графики температур (рис. 3).

Анализ качества сушки детали. При известной скорости конвейера V_c и температуре изделия T_d по длине камеры x строится зависимость $\lg t$ от T_d . Далее с использованием номограммы для определения времени отверждения эмалей (существует для каждого типа эмали) строится линия темпа нагрева. Определяется твердость покрытия при максимальной температуре поверхности изделия внутри камеры $\lg h$ и далее — h . Полученное значение твердости сравнивают с заданным.

Возможен вариант дополнительной сушки детали воздухом за счет увеличения длины камеры. В этом случае не будет дополнительного разогрева поверхности детали, что может вызвать повреждение слоя эмали [18–20].

Длительность запекания эмали при температуре завершения радиационной сушки определяется по номограмме, составленной для случая конвектив-

ной сушки. В этом случае температура воздуха на номограмме может быть меньше температуры детали. Вторым допущением может быть пренебрежение влиянием скорости воздуха, омывающим деталь [21].

Определяя время достижения твердости, полученной с помощью радиационной сушки, и время достижения требуемой твердости, находим время дополнительной сушки и, по скорости конвейера, дополнительную длину камеры. Значения по номограмме обычно дают завышенные параметры.

Расчет теплового баланса камеры. Целью расчета уравнений теплового баланса сушильной камеры является оценка энергетических затрат на сушку окрашенной детали [6, 22]. Программный блок включает следующие уравнения.

Расчет теплотерь через ограждения камеры Q_1 [8]:

$$Q_1 = (k_1 F_a + k_2 F_{fl} + k_3 F_{door})(T_{cam} - T_w), \quad (22)$$

где F_a – площадь стенок и потолка камеры (m^2); k_1 – коэффициент теплопередачи через изолированные стенки ($кДж/(m^2 \cdot K)$); F_{fl} – площадь неизолированного пола камеры (m^2); k_2 – коэффициент теплопередачи через неизолированный пол ($кДж/(m^2 \cdot K)$); F_{door} – площадь дверей и воздуховодов камеры (m^2); k_3 – коэффициент теплопередачи через двери и прорези ($кДж/(m^2 \cdot K)$); T_{cam} – средняя температура воздуха внутри камеры (K); T_w – температура воздуха в помещении, где установлена камера (K).

Расчет тепла Q_2 , расходуемого на нагрев ЛКМ и испарение растворителя [8]:

$$Q_2 = G_{pr} c_{pr} (T_{2pr} - T_1) + G_{tr} c_{tr} (T_{2tr} - T_1), \quad (23)$$

где G_{pr} – производительность установки по массе изделия ($кг/ч$); G_{tr} – производительность установки по массе транспорта изделия ($кг/ч$); c_{pr} , c_{tr} – удельная теплоемкость изделия и транспорта ($кДж/(кг \cdot K)$); T_{2pr} , T_{2tr} – температура изделия и транспорта на выходе из камеры (K); T_1 – температура на входе в камеру (K).

Расчет тепла Q_3 , расходуемого на нагрев ЛКМ и испарение растворителя [8]:

$$Q_3 = G_m c_{pr} (T_2 - T_1) + G_s q_s, \quad (24)$$

где G_m – производительность по массе ЛКМ ($кг/ч$); c_{pr} – теплоемкость материала изделия ($кДж/(кг \cdot K)$); T_2 – температура на выходе из камеры (K); T_1 – температура на входе в камеру (K); G_s – производительность по массе испаренного растворителя ($кг/ч$); q_s – теплота испарения растворителя ($кДж/кг$).

Приравнивая Q_3 тепловому потоку излучатель и принимая температуру слоя, прилегающего к детали, равной температуре детали, рассчитывается температура внешней поверхности лакокрасочного слоя. Это соотношение используется

и в блоке расчета динамики сушки [23–25] для определения изменения температуры слоя краски на поверхности детали по длине камеры.

Расчет тепла Q_4 , расходуемого на нагрев воздуха [8]:

$$Q_4 = V_{air} c_{air} \rho_{air} (T_2 - T_1), \quad (25)$$

где V_{air} – объемный расход воздуха ($m^3/ч$); ρ_{air} – плотность воздуха в камере ($кг/m^3$); c_{air} – удельная теплоемкость воздуха ($кДж/(кг \cdot K)$); T_1 – температура на входе в камеру (K); T_2 – температура на выходе из камеры (K).

Суммарное количество тепла определяется по соотношению [8]

$$\Sigma Q = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) k_{st}, \quad (26)$$

где k_{st} – коэффициент запаса ($\sim 1.2–1.3$).

По результатам расчета теплового баланса определяется температура воздуха на выходе из камеры.

Комплекс программ протестирован на реальных технологических линиях, что позволило не только проверить правильность вычислений, но и создать дружественный интерфейс, удобный инженеру-проектировщику. На рис. 4 представлено окно ввода исходной информации о характеристиках окрашенной детали.

В окне информации о результатах расчета воздушного потока предусмотрена возможность редактирования объемного расхода воздуха или линейной скорости потока в свободном пространстве камеры. Для этого нажимается соответствующая кнопка, вводятся коррективы и автоматически пересчитываются расход или скорость воздуха, коэффициенты теплоотдачи и нижний предел взрываемости для растворителя (рис. 5).

При расчете конвективной сушки предусматривается возможность задать требуемую скорость воздушного потока до расчета его теплового воздействия. Это связано с тем, что расход воздуха, определяемый по пределу взрываемости растворителя, как правило, ниже требуемого для качественной конвективной сушки. А так как диапазон допустимых скоростей воздуха достаточно велик, ввод значения скорости потока целесообразно предоставить пользователю.

После получения расчетных характеристик камеры происходит возвращение в окно ввода данных (рис. 4), где необходимо найти кнопки, управляющие расчетом. Так, например, можно скорректировать массив исходных данных. И далее, после нажатия кнопки “выполнить расчет”, процедуры расчета повторяются с получением новых результатов.

После завершения расчета и нажатия кнопки “завершить работу” (рис. 4) вся информация, как введенная в виде исходных данных, так и полученная в ходе расчета, сохраняется в рабочей директории компьютера в форме файла результатов.

Радиационная и конвективная сушка ЛКП

Задайте обозначение сушильной камеры:

Характеристики камеры | Излучатели | Теплоноситель | **Характеристики детали** | Характеристики процесса

Деталь

материал: сталь чугун алюминий

Масса, кг:

Габариты, мм: длина глубина высота

Доля общей площади детали под действием излучателей, %:

Теплоемкость материала детали, кДж/кг К:

Профиль детали: Прямоугольник Крив

Лакокрасочное покрытие

Вид покрытия: эмаль порошковая краска грунт

Толщина покрытия, мм:

Расход краски, кг/час:

Расход растворителя, кг/час:

Доля растворителя, удаленного до входа в камеру, %:

Тип растворителя: Нижний предел взрываемости растворителя, г/куб. м:

Рис. 4. Интерфейс ввода исходных данных окрашиваемой детали.

Радиационная и конвективная сушка ЛКП

Результаты расчета: характеристики воздушного потока

Объемный расход воздуха, куб. м/час:

Массовый расход воздуха, кг/час:

Скорость воздуха в свободной камере, м/с:

Скорость воздуха при обтекании детали, м/с:

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к детали, Вт/кв. м град:

Коэффициент теплоотдачи от излучателей к воздуху, Вт/кв. м град:

Допустимый нижний предел взрываемости растворителя, г/куб. м:

Рис. 5. Интерфейс работы с расчетными блоками программного комплекса.

Кроме того, в форме отдельного файла сохраняется и исходная информация, введенная для расчета. Эти данные считываются при повторном расчете термокамеры, не требуя повторного заполнения окна исходной информации.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Алгоритм и программный комплекс активно используют научный и проектный отдел, конструкторское бюро и машиностроительный завод, входящие в структуру НПО “Лакокраспокрытие”.

Программный комплекс 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 Нововоронежской АЭС.

Алгоритм использован для разработки рабочего проекта наукоемкой линии окраски грузовых вагонов АО “Уралвагонзавод”, линия действует в г. Нижний Тагил. Разработанная новая окрасочная линия позволила окрашивать до 16 тысяч различных модификаций грузовых вагонов в год. Все смонтированное оборудование соответствует отечественным и международным стандартам безопасности. На основе расчетов в проекте подобрана оптимальная система вентиляции окрасочных камер и установка очистки удаляемого из окрасочно-сушильных установок загрязненного парами растворителя воздуха. Спроектированная окрасочная линия укомплектована установкой очистки газов, работающей по принципу реверсивного улавливания органических веществ в ротационных адсорберах с последующей десорбцией горячим воздухом и термическим дожиганием. Указанная установка обеспечивает снижение концентрации загрязняющих веществ до предельно допустимых значений.

Программный комплекс позволил НПО “Лакокраспокрытие” разработать и внедрить линии окрашивания окунанием деталей автомобилей на АО “ВАЗинтерсервис” (г. Тольятти), окрашивания водно-дисперсионными ЛКМ деталей лифтов на предприятии ООО “ПКФ Сиблифт” (г. Омск), железнодорожных колес для ОАО “Нижнетагильский металлургический комбинат” (г. Нижний Тагил), деталей автомобилей на ПАО “Туймазинский завод автобетоновозов” (г. Туймазы), порошкового окрашивания на ООО “Белагромаш-Сервис” (г. Белгород), деталей экскаваторов на ЗАО “Эксмаш” (г. Тверь) и на других предприятиях. Всего разработано, изготовлено и внедрено более 50 новых окрасочных линий, проведен ре-

инжиниринг и переоборудование действующих окрасочных линий и цехов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизация проектирования процесса сушки позволяет снизить технологические риски, которые служат одной из причин брака конечных изделий. Кроме того, автоматизация проектирования позволяет улучшить систему контроля качества продукции на производстве.

Разработанный авторами алгоритм и программный комплекс применен для повышения эффективности деятельности НПО “Лакокраспокрытие”, что позволило предприятию существенно увеличить доход и производительность труда, снизить временные и ресурсные издержки. Анализ путей развития мирового рынка создания ЛКМ и ЛКП позволил выработать концепцию инновационных “пейнт-технологий”, что помогло, резко, в короткие сроки НПО “Лакокраспокрытие” улучшить экономические и социальные показатели.

НПО “Лакокраспокрытие” является единственным в России и Восточной Европе инновационным научно-производственным объединением в области разработки технологии окраски, рецептуры ЛКМ, оборудования для производства ЛКМ и нанесения покрытий, стандартизации требований к покрытиям, а также проектирования и пуска производственных предприятий.

Работа выполнена при финансировании РХТУ им. Д.И. Менделеева (ВИГ № X-2020-011).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

F	площадь поверхности, m^2
G	массовый расход, $кг/ч$
K	коэффициент запаса
L	длина детали, m
Q	тепловой поток, $кДж/ч$
S	расстояние между поверхностями, m
T	температура, K
t	время, $ч$
V	скорость, $м/с$
α	коэффициент теплоотдачи
ϵ_e	степень черноты поверхности излучателя
ϵ_{Re}	приведенный коэффициент теплового излучения системы
φ	доля растворителя

ИНДЕКСЫ

1, 2	минимальное и максимальное (расстояние)
<i>a</i>	площадь
<i>as</i>	воздух/поверхность
<i>c</i>	конвейер
<i>D</i>	сушка
<i>d</i>	деталь
<i>door</i>	дверь/воздуховод
<i>e</i>	излучатель
<i>ea</i>	излучатель/воздух
<i>fs</i>	полная поверхность
<i>i</i>	выходящий
<i>mat</i>	материал
<i>pr</i>	изделие
Re	приведенный
<i>r</i>	удаленный
S	поверхность
<i>s</i>	растворитель
<i>st</i>	запас
<i>tr</i>	транспорт
<i>w</i>	цех

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Vergidis K., Tiwari A., Maieed B.* Business process analysis and optimization: beyond reengineering // IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Part C. 2008. V. 38. № 1. P. 69.
- Lutov A.G., Ishkylova A.P.* Automated systems the extreme multidimensional management of process plating // Mekhatronika, Avtom., Upr. 2017. V. 18. P. 185.
- Shinoda K., Noda H., Ohtomi K., Yamada T., Akedo J.* Promotion of knowledge and technology transfer towards innovative manufacturing process: case study of new hybrid coating process // Int. J. Autom. Technol. 2019. V. 13. № 3. P. 419.
- Меньшиков В.В., Рыбкин В.А.* Концепция инновационных “пейнт-технологий” и ее практическая реализация // Лакокрас. матер. их примен. 2016. № 5. С. 49.
- Меньшиков В.В., Аверина Ю.М., Зубарев А.М.* Технологический маркетинг, коммерциализация и принципы реализации инноваций. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2017.
- Мячин В.А., Шабельский В.А.* Конструирование оборудования окрасочных цехов. М.: Машиностроение, 1989.
- Яковлев А.Д.* Химия и технология лакокрасочных покрытий. Л.: Химия, 1989.
- Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.
- Рабинович Г.Д., Слободкин Л.С.* Терморadiационная и конвективная сушка лакокрасочных покрытий. Минск: Наука и техника, 1966.
- Кафаров В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1976.
- Кафаров В.В., Мешалкин В.П.* Анализ и синтез химико-технологических систем. М.: Химия, 1991.
- 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.
- 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.]
- 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.
- Макаренков Д.А., Назаров В.И., Баринский Е.А.* Процессы и аппараты химической технологии. Основные процессы и оборудование производства пигментов, суспензий и паст в лакокрасочной промышленности. М.: МГУИЭ, 2010.
- 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.]
- 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.
- Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P.* Intensive technologies for drying a lump material in a dense bed // Theor. Found. Chem. Eng. 2017. V. 51. № 1. P. 70. [*Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П.* Интенсивные технологии сушки кускового материала в плотном слое // Теор. осн. хим. технол. 2017. Т. 51. № 1. С. 72.]
- Аверина Ю.М., Калякина Г.Е., Меньшиков В.В., Капустин Ю.И., Болдырев В.С.* Проектирование процессов нейтрализации хромо- и циансодержащих сточных вод на примере гальванического производства // Вестн. Моск. гос. тех. унив. им. Н.Э. Баумана. Сер. Естеств. науки. 2019. № 3. С. 70.]
- 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.]
- 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.]
22. Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P. Multicomponent fuzzy model for evaluating the energy efficiency of chemical and power engineering processes of drying of the multilayer mass of phosphorite pellets // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2018. V. 52. № 5. P. 786. [Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П. Многокомпонентная нечеткая модель оценки энергоэффективности химико-энерготехнологических процессов сушки многослойной массы фосфоритовых окатышей // *Теор. осн. хим. технол.* 2018. Т. 52. № 5. С. 504.]
23. Бобков В.И. Интенсификация процесса слоевой сушки дисперсного материала // *Тепл. процессы тех.* 2014. Т. 6. № 9. С. 425.
24. Men'shutina N.V., Gordienko M.G., Voinovskii A.A., Kudra T. Dynamic criteria for evaluating the energy consumption efficiency of drying equipment // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2005. V. 39. № 2. P. 158. [Меньшутина Н.В., Гордиенко М.Г., Войновская А.А., Кудра Т. Динамические критерии для оценки эффективности энергопотребления сушильного оборудования // *Теор. осн. хим. технол.* 2005. Т. 39. № 2. С. 170.]
25. Bogomolov B., Boldyrev V., Elistratkina V., Menshikov V., Seina Ya., Zubarev A. Information-computing system for designing and construction of industrial painting lines // *Proc. 22nd International Conference MEKON 2020. Ostrava: VSB-Technical University of Ostrava, 2020. P. 1.*