

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИК-СИСТЕМ В КАМЕРАХ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

ВЯЧЕСЛАВ МАРЬЯНКО  
Кандидат технических наук, СИС  
Директор ООО «БЕЛМАР»

Сразу позволим себе небольшое замечание, чтобы исключить критику в свой адрес. Термин «камера полимеризации» используется нами как общепринятый.

При порошковой окраске камера полимеризации используется для нагрева поверхности материала или его покрытия, активации физико-химических процессов, включающих несколько стадий: переход частичек порошка в вязкое состояние, сплавление, смачивание подложки, растекание, удаление газовых включений, отверждение (для терморезактивных комбинаций).

**Камеры (печи) полимеризации** – это основные звенья любой окрасочной линии, поэтому поиск новых методов и средств термообработки, направленных на совершенствование процесса полимеризации порошковых красок, – актуальная задача при создании современного экономичного окрасочного оборудования.

Согласно физическим процессам, нагревание любого тела происходит за счет механизма теплообмена, а вот канал передачи энергии может быть разный: непосредственный теплообмен, конвективный либо лучистый. Каждый из указанных способов очень широко реализуется в промышленном оборудовании.

В последнее время в связи с серьезным повышением цен на энергоносители все чаще и чаще производители термооборудования стали искать пути эффективного использования особенностей инфракрасного (ИК-) излучения при подаче лучистой энергии. Однако для широкого промышленного внедрения ИК-техники имеются серьезные препятствия. С одной стороны, это трудности роста, а с другой – отсутствие специализированных научно-конструкторских подразделений, целенаправленно работающих в этом направлении.

Создание новых современных ИК-установок требует аналитического и экспериментального углубленного изучения процессов переноса энергии в поглощающих средах, а также процессов теплообмена излучением, протекающих в рабочих камерах. Знание этих закономерностей, а также сокращение сроков перехода от экспериментальных моделей к промышленным установкам и разработка надежных инженерных методов расчета, учитывающих специфику процессов и кинетику их протекания, позволят решить вопрос внедрения теплотехнологий с применением ИК-энергоподвода.

Понятно, что этот вопрос актуален и для лакокрасочного производства, где современные технологии требуют более совершенных методов термообработки как жидких, так и порошковых покрытий.

Впервые широкое применение ИК-лучи для сушки и запекания лакокрасочных покрытий получили в 1934 году на заводах Генри Форда. Считается, что с этого времени были заложены основы процесса сушки посредством выделенного спектрального диапазона ИК-излучения.

**В отличие от жидких красок**, где происходят **сушка**, т.е. удаление влаги, находящейся в различных связях с высушиваемым материалом, и **нагрев** поверхности в процессе отверждения, **при порошковой окраске** цель нагрева состоит только в термоактивировании физико-химических процессов. Поэтому при использовании ИК-нагрева в первую очередь необходимо определить перечень и последовательность решаемых технологических задач.

Физическая сущность ИК-нагрева объясняется корпускулярно-волновой природой электромагнитного поля, она связана с интенсификацией процессов вследствие резонансного воздействия поглощаемой энергии на связи атомов в молекулах, частоты колебаний которых совпа-

дают или кратны частоте падающего излучения. Энергия отдельных химических связей соизмерима с энергией фотонов ИК-излучения.

Так при  $\lambda \leq 1$  мкм энергия фотона

$E = h\nu \leq 2 \times 10^{-19}$  Дж, а энергия химических связей основных групп полимеров С-С и О-Н составляет  $2 \times 10^{-19}$  и  $(0,32 - 0,46) \times 10^{-19}$  Дж соответственно. Поэтому ИК-излучение, повышая уровень собственных колебаний определенных групп атомов в молекуле, что означает превращение энергии излучения в тепловую, способствует ускорению технологического процесса.

Пока этот очень сложный вопрос находится в стадии изучения, так как облучение предметов ИК-лучами нельзя рассматривать только как метод интенсивной термической обработки, это еще и процесс более глубокого воздействия на физико-химическую природу материала.

Эффективность ИК-нагрева определяется оптимизацией соотношения энергии отраженной, поглощенной и прошедшей сквозь образец. Указанные характеристики зависят от диапазона длин волн, типа и физических свойств, полимера и подложки.

Известно, что для большинства материалов 85% лучистой энергии в спектре излучения проникает в вещество на глубину до 30–50 мкм. При этом воздушная среда практически не влияет на пропускание лучистого потока. Вот в этом и состоит основное принципиальное отличие в механизмах ИК- и конвективного нагрева при формировании полимерного покрытия. Это разные направления температурного градиента. При конвективном нагреве градиент направлен от поверхности покрытия к подложке, при ИК – наоборот, т.е. покрытие частично нагревается за счет тепла, отдаваемого подложкой. Как показывает анализ литературных данных, а также наши тесты, такой механизм существенно



**КАМЕРЫ (ПЕЧИ) ПОЛИМЕРИЗАЦИИ – ЭТО ОСНОВНЫЕ ЗВЕНЬЯ ЛЮБОЙ ОКРАСОЧНОЙ ЛИНИИ, ПОЭТОМУ ПОИСК НОВЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ТЕРМООБРАБОТКИ, – АКТУАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ПРИ СОЗДАНИИ СОВРЕМЕННОГО ЭКОНОМИЧНОГО ОКРАСОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ.**

влияет на качество формируемого порошкового покрытия, в первую очередь повышая его адгезионную прочность.

При разработке своего оборудования в первую очередь требовалось учесть вышеперечисленные особенности ИК-нагрева при выборе оптимального спектрального диапазона и, как следствие, типа излучателя, генерирующего длины волн в выбранной части спектра. При этом немаловажным критерием являлись экономические и эксплуатационные характеристики разрабатываемого оборудования.

В отличие от стандартных конвекционных систем, строгое математическое моделирование процесса нагрева в ИК-печах – архисложная задача. Аналитическое описание кинетики нагрева изделий посредством ИК-излучения – это нахождение связей между плотностью мощности, предельно допустимой температурой и предельно допустимой скоростью нагрева (очень важная характеристика в процессах полимеризации).

В данной ситуации для методологической основы модели будет использоваться дифференциальное уравнение энергетического баланса, при помощи которого можно установить правила соответствия, связывающие взаимодействие системы «излучатель – изделие», да

и то только для некоторых частных случаев при серьезных допущениях и приближениях, часто снижающих практическую ценность решений. Более того, существенным недостатком приближенных расчетов является полное отсутствие аналитической связи между функциями температуры и эффективных потоков с оптическими свойствами и параметрами взаимного расположения элементов конструкции системы.

При этом постоянные и изменяемые параметры, которые необходимо учитывать, весьма разнообразны: мощность источников, длина волны излучения, спектральные терморрадиационные характеристики порошковых полимерных красок, отражающие характеристики обшивки, конфигурация отражателей, время воздействия, степень черноты изделия, расстояние от источников до изделия, соотношение открытой площади к массе изделия, удельная теплопроводность изделий, движение воздуха в печи и др. Поэтому при проектировании ИК-систем разработчики в основном опираются на результаты математического моделирования, которые подтверждены экспериментальной апробацией.

Теоретический анализ и проведенные физические эксперименты с различными комбинациями излучателей и образцами порошковых

красок подтвердили, что наилучшие результаты достигаются при использовании NIR-излучения с длиной волны в четко заданном диапазоне – **0,78–2,00 мкм**. В этом диапазоне работают ламповые галогенные ИК-излучатели типа КГ, у которых температура тела накала ниже, чем у обычных осветительных, соответственно доля потока, испускаемого в ИК-области, намного больше, чем в видимой. Кроме того, указанные источники позволяют создать высокую энергетическую освещенность объектов облучения, имеют большой срок службы при стабильности лучистого потока, обладают очень малой термической инерцией, простотой устройства цоколей, выгодной линейной формой, высоким КПД, механической прочностью и стойкостью по отношению к воздействию воды, агрессивных сред и т.д.

На рисунке 1 приведены графики спектрального распределения энергии излучения лампы типа **КГ-220-2000-4** в зависимости от подаваемого напряжения. Измерения проводились (по нашей просьбе) в лаборатории **№ 373 ОАО «Лисма-ВНИИИС» имени А.Н. Ладыгина** (протоколы замеров № С1Л–2445, 2447, 2449).

Мы остановили свой выбор на кварцевых галогенных излучателях с рабочей цветовой температурой 2400 К.

На современном этапе развития технологии изготовления ИК-генераторов совпадение требуемых характеристик с характеристиками серийно выпускаемых излучателей при работе их в номинальном режиме явление скорее случайное, а не закономерное. В этом случае наиболее рациональным, технически доступным и экономически целесообразным методом термообработки при максимальном значении критерия количественной и качест-

венной оценки эффективности является осциллирующий режим ИК-энергоподвода с релаксацией теплового потока. Для его практической реализации необходимо выявить причинные и функциональные взаимосвязи электротехнологических и временных показателей ИК-облучения на показатели окрасочного слоя. В порядке пробного опыта была сформулирована и в первом приближении решена задача, описывающая кинетику импульсного подвода ИК-излучения к слою порошковой краски. Теоретически обоснована целесообразность применения режима пространственно-временной осцилляции. Получены формулы эффективной скважности периода работы излучателей.

Для практической реализации различных режимов термообработки была разработана и реализована гибкая информационно-измерительная и управляющая система автоматического регулирования импульсного ИК-энергоподвода по зонам, которая позволяет поддерживать максимальную и минимальную температуру материала. При этом, учитывая малую инерционность применяемых ИК-

**(7связок по 8 изделий) профильных труб (60×80×3 мм, L = 4 м) общим весом около 1500 кг. 8 термодатчиков были равномерно установлены на изделиях по всему объему загруженной печи.**

Уместно отметить, что в литературе в качестве основного недостатка ИК-систем часто упоминается их прямое излучение направленного действия, что, как часто утверждают, делает их не пригодными для получения покрытий на изделиях сложной формы. Наши исследования и разработки опровергают бытующее мнение.

Во-первых, ИК-нагрев неразрывно связан с конвективным, за счет передачи тепла от нагреваемых изделий. Во-вторых, внутри камер (по всей площади) мы используем отражатели со специально обработанной поверхностью, создающей резонатор, в котором за счет многократного отражения создается равномерный поток диффузного облучения. В-третьих, коротковолновые излучатели из-за высокой плотности излучаемой энергии способны прогревать недоступные части изделий. В-четвертых, в режиме термостабилизации за счет снижения

1. Снижение затрат путем сокращения времени отверждения при одновременном повышении качества покрытия.

2. Возможность создания плотности тепловых потоков на поверхности изделий в десятки раз больше по сравнению с традиционными способами нагрева.

3. Высокий КПД устройств за счет исключения влияния на процесс нагрева промежуточной среды между источником и объектом.

4. Возможность создания зоны нагрева с различными температурами.

5. Широкий диапазон управления за счет гибкого регулирования мощности излучателей.

6. Безинерционность коротковолновых излучателей обеспечивает высокую точность и чувствительность режима термостабилизации.

7. Простота конструктивных решений намного уменьшает занимаемые оборудованием площади по сравнению с конвективными печами.

8. Возможность создания установок с различной формой и размерами рабочих камер в зависимости от производительности и ассортимента окрашиваемых изделий.

Рисунок 1. Графики спектрального распределения энергии излучения лампы типа КГ-220-2000-4

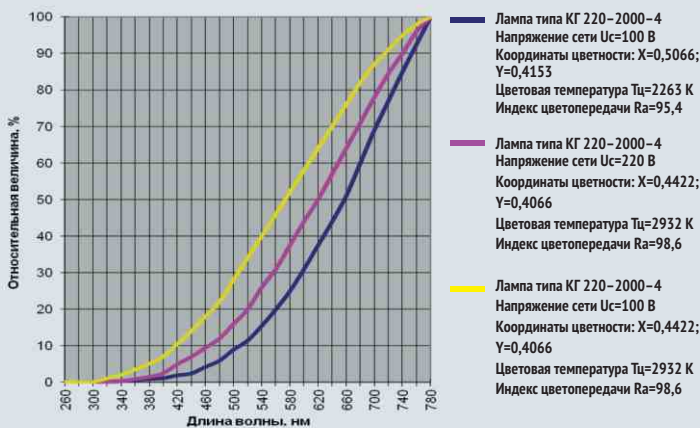


Рисунок 2. Динамические термохарактеристики ИК-печи полимеризации



генераторов, а также совершенство способа генерации тепла в разрабатываемых ИК-установках, появилась возможность применения компьютерных технологий, позволяющих программно регулировать тепловой режим в рабочей камере в соответствии с заданной кинетикой подвода тепла к нагреваемому образцу или слою. Это позволило экспериментально подтвердить теоретически выдвинутую гипотезу о закономерности управления импульсно-прерывным ИК-энергоподводом в процессе запекания порошковых красок.

Правильность выбора идей и технических решений, заложенных в конструкциях наших ИК-печей и систем управлений излучателями подтвердили время, интерес потребителей к нашим разработкам и расширение области их применения.

На рисунке 2 приведены динамические термохарактеристики ИК-печи полимеризации. **Габариты печи – 7,3×2,2×2,2 м, максимальная мощность – 66 кВт. Загрузка печи – 56**

номинального напряжения на излучатели увеличивается длина волн излучения, что приводит к образованию дополнительной конвективной составляющей. И последнее, при использовании ИК-излучения за счет зонального включения источников, а также направленного воздействия лучей обеспечивается максимальная равномерность передачи энергии объему сложной формы.

Необходимо затронуть еще один вопрос, с которым мы часто сталкиваемся: вредное влияние ИК-излучателей на здоровье обслуживающего их персонала. ИК-излучатели абсолютно безвредны. Мало того, в последнее время исследования, проведенные медицинскими лабораториями Японии, Китая и США, доказали лечебные факторы ИК-прогрева. Пример тому – широкое распространение ИК-саун.

В заключение подведем итоги и обобщим основные особенности, а также выраженные преимущества использования в печах полимеризации коротковолновых ИК-излучателей:

9. Легко реализуется модульная схема конструкций с автономной либо с комбинированной системой управления.

10. Расширение спектра функциональных возможностей (сушка при окраске жидкими красками стекла и ПВХ-профилей).

11. Широкий диапазон температур ИК-печи позволяет производить нагрев изделий до 250–300 °С.

В конце небольшая ремарка. Исходя из приведенного анализа особенностей применения ИК-энергоподвода в технологических линиях порошковой окраски понятно, что создание термодинамически наиболее эффективной конструкции ИК-установки требует глубокого изучения и понимания как процесса формирования окрасочного слоя, так и теплотехнических и эксплуатационных характеристик ИК-генераторов и всей системы. Правильно рассчитанная и сконструированная ИК-установка является довольно сложным инженерным сооружением, конструктивная разработка которого может



быть осуществлена только на базе предварительного научно обоснованного выбора источников излучения, их количества, режимов работы, расположения в рабочей камере и т.д.

В последнее время на рынке оборудования появились новоиспеченные производители ИК-печей полимеризации, у которых на фоне декларируемых преимуществ оборудования на первом плане стоят бизнес-задачи, а не продвижение прогрессивных ИК-технологий.

Еще раз хотим подчеркнуть, что разработка и конструирование термооборудования с ИК-энергоподводом требует не только специальных знаний, но и достаточно высокого общеобразовательного уровня, поэтому при выборе оборудования не стоит доверяться рекламным обещаниям и низким ценам. Важно обратить внимание на известность производителя, его специализацию, убедиться, что разработчик не просто копирует чьи-то разработки, а самостоятельно владеет методологическими подходами к решению поставленной задачи или хотя бы основами инженерно-конструкторских расчетов ИК-систем. Каждый уважающий себя производитель с удовольствием предоставит вам вместе с предложением список референций, где будет указано поставленное ранее оборудование. ■



ООО БЕЛМАР, УКРАИНА

## ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОРОШКОВОЙ ОКРАСКИ, ДЕКОРИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ, СТЕКЛА, МДФ, ПВХ, ГАЗОПЛАМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ ОКРАСКИ

г. Николаев, ул. Янтарная, 318/10  
 тел.: +38 (0512) 25-49-13  
 факс: +38 (0512) 58-18-23  
 E-mail: [belmar-ltd@mail.ru](mailto:belmar-ltd@mail.ru)  
[www.belmar-ltd.com](http://www.belmar-ltd.com)