

# Особенности применения ИК-систем

## в камерах полимеризации

**Во-первых, небольшое замечание, чтобы исключить критику в наш адрес. Термин «камера полимеризации» используется нами как общепринятый.**

Реально, при порошковой покраске, назначение камеры – это нагрев поверхности материала, или его покрытия, для 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 покрасочной линии. Поэтому поиск новых методов и средств термообработки, направленных на совершенствование процесса полимеризации порошковых красок – актуальная задача при создании современного экономичного покрасочного оборудования.

По физической сути, нагревание любого тела происходит за счет механизма теплообмена. А вот «канал» передачи энергии может быть разным: непосредственный теплообмен, конвективный, либо лучистый. Каждый, из указанных способов реализуется в оборудовании очень широкого применения.

В последнее время, в связи с серьезным подорожанием энергоносителей, все чаще и чаще производители термооборудования стали искать пути эффективного использования особенностей инфракрасного излучения при подаче лучистой энергии. Однако, для широкого промышленного внедрения ИК-техники имеются серьезные препятствия. С одной стороны – это трудности состава, а с другой – отсутствие специализированных научно-конструкторских подразделений целенаправленно работающих в этом направлении. Создание новых современных ИК-установок требует как аналитического так 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 эксперимен-

тальных моделей к промышленным установкам и разработка надежных инженерных методов расчета, учитывающих специфику процессов и кинетику их протекания, позволит научно обоснованно решить вопрос внедрения теплотехнологий с применением ИК-энергоподвода.

Понятно, что этот вопрос актуален и в лакокрасочном производстве, где современные технологии требуют более совершенных методов термообработки, как жидких, так и порошковых покрытий.

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

В отличие от жидких красок, где выполняется «сушка», т. е. удаление влаги, находящейся в различных связях с высушиваемым материалом, и «нагрев» поверхности для выполнения процесса отверждения, при порошковой покраске цель нагрева состоит только в термоактивировании физико-химических процессов, перечисленных в начале статьи. 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 и связана с интенсификацией процессов, вследствие резонансного воздействия поглощаемой энергии на связи атомов в молекулах, частоты колебаний которых совпадают, 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 составляют  $2 \times 10^{-19}$  Дж и  $(0,32 - 0,46) \times 10^{-19}$  Дж соответственно. Поэтому ИК-излуче-

ние, вызывая повышение уровня собственных колебаний определенных групп атомов в молекуле, что означает превращение энергии излучения в тепловую, способствует ускорению технологического процесса. Этот наиболее сложный вопрос находится еще 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 как полимера так и подложки. Известно /1,2,3/, что для большинства покрытий материалов 85% лучистой энергии в спектре излучения проникают 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 нагревов при формировании полимерного покрытия. Это разные направления температурного градиента. При конвективном нагреве направление градиента от поверхности покрытия к подложке, при ИК наоборот, т.е. покрытие частично нагревается за счет тепла, отдаваемого подложкой. Как показывают анализ литературных данных /4,5/, а так же наши тесты, такой механизм существенно влияет на качество формируемого порошкового покрытия, в первую очередь, повышая его адгезионную прочность.

При разработке своего оборудования, первая задача, с которой мы столкнулись: это 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 ИК-излучением – это нахождение связей между плотностью мощности, предельно допустимой температурой и предельно допустимой скоростью нагрева (очень важная характеристика в процессах полимеризации). В данной ситуации методологической основой модели может быть дифференциальное уравнение энергетического баланса, при помощи которого можно установить правила соответствия, связывающие взаимодействие системы «излучатель-изделие», 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 температур и эффективных потоков с оптическими свойствами и с параметрами взаимного расположения элементов конструкции системы.

При этом, как постоянные так и варьируемые параметры которые необходимо учитывать:

- 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 разработки, 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 резуль-



таты достигаются при использовании NIR-излучения с длиной волны в четко заданном диапазоне 0,78–2,00 мкм. В этом диапазоне работают лампы галогенные инфракрасные излучатели типа КГ, у которых температура тела накала ниже, чем у обычных осветительных, и, 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, очень малую термиче-

скую инерцию, простоту устройства цоколей, выгодную линейную форму, высокий КПД, механическую прочность и стойкость по отношению к воздействию воды, агрессивных сред и т.д.

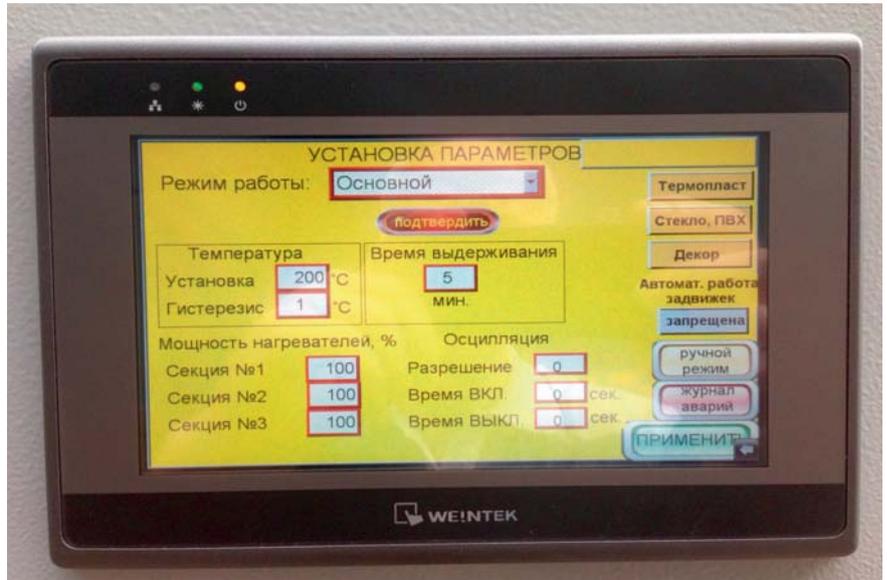
В качестве примера на рисунке приведены графики спектрального распределения энергии излучения лампы типа КГ-220-2000-4 в зависимости от подаваемого напряжения. Измерения проводились (по нашей просьбе) в лаборатории № 373 ОАО «Лисма-ВНИИИС» им. А. Н.Ладыгина (протоколы замеров № С1Л – 2445, 2447, 2449).



Наш выбор остановился на использовании кварцевых галогенных излучателей, у которых рабочая цветовая температура  $T = 2\ 400^{\circ}\text{K}$ .

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, чем закономерное. В этом случае наиболее рациональным, технически доступным и экономически целесообразным методом термообработки, при максимальном значении критерия количественной и качественной оценки эффективности, является осциллирующий режим ИК-энергоподвода с релаксацией теплового потока. При этом для его практической реализации необходимо выявить причинные и функциональные взаимосвязи электротехнологических и временных показателей ИК-облучения на показатели покрасочного 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-генераторов, а также совершенство способа генерации тепла в разрабатываемых ИК-установках появилась возможность применения компьютерных технологий, позволяющих обеспечивать автоматическое программное регулирование теплового режима 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 управления излучателями подтвердило время, интерес потребителей к нашим разработкам и расширение области их применения.

В качестве примера, на рисунке приведены динамические термохарактеристики ИК-печи полимеризации. Габариты печи (7,3 × 2,2 × 2,2 м), максимальная мощность 66 кВт. Загрузка печи: 56 (7 связок по 8 изделий) профильных труб (60 × 80 × 3 мм, L = 4 м) общим весом около 1 500 кг. Восемь термодатчиков были установлены на изделиях равномерно по всему объему загруженной печи.

Уместно отметить, что в литературе, в качестве основного недостатка ИК-систем, часто упоминается их прямое, направленное действия излучение, что, как часто утверждают, делает их непригодными 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: мы используем внутри камер (по всей площади) 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 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 так же направленного воздействия лучей, обеспечивается максимальная равномерность передачи энергии объему сложной формы.

Считаем необходимым затронуть еще один вопрос, с которым мы часто сталкиваемся: о вредном влиянии на здоровье персонала, работающего на оборудовании с ИК-излучателями. Оно абсолютно безвредно. Мало того, за последнее время исследования, проведенные медицинскими лабораториями Японии, Китая, США доказали лечебные факторы ИК-прогрева. Пример тому – широкое распространение ИК-саун.

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

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

2. Возможность создавать плотные 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 создавать в оборудовании зоны нагрева с различными температурами.

5. Широкий диапазон управления, за счет гибкого регулирования мощностью 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.

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

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

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

В конце небольшая ремарка. Исходя из приведенного краткого анализа особенностей применения ИК-энергоподвода в технологических линиях порошковой покраски, 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, как ИК-генераторов, так и в целом 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 украинском рынке оборудования появились новоиспеченные производители ИК-печей полимеризации, у которых на фоне декларируемых преимуществ своего

оборудования на первом плане 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 полностью доверять 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 и, хотя бы, основами инженерно-конструкторских расчетов ИК-систем. Каждый, уважающий себя, производитель с удовольствием предоставит Вам вместе с предложением и список референции, где будет указано поставленное ранее оборудование.

### ООО Белмар

г. Николаев, ул. Янтарная 318/10  
 тел.: (0512) 58-18-23  
 факс: (0512) 25-49-13  
 e-mail: belmar-ltd@mail.ru  
<http://www.belmar-ltd.com>

Оборудование для порошковой покраски, декорирования металлоизделий, стекла, МДФ, ПВХ, газопламенной порошковой покраски.

