

**ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ,
ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОЛНОВОГО НАГРЕВА**

Никифоров А.Л., Легкова И.А., Ульева С.Н., Колобов М.Ю.

Никифоров Александр Леонидович, Легкова Ирина Анатольевна, Ульева Светлана Николаевна
Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
г. Иваново, Россия, 153040, Ивановская область, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33.
E-mail: anikiforoff@list.ru; legkovai@mail.ru; jivotjagina@mail.ru
Колобов Михаил Юрьевич
Ивановский государственный химико-технологический университет,
г. Иваново, Россия, 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметьевский, д. 7.
E-mail: mikhaikolobov@rambler.ru

Данная статья посвящена проблемам обеспечения пожарной безопасности процессов волнового нагрева диэлектриков. В работе рассмотрены ИК, ВЧ и СВЧ диапазоны спектра электромагнитных колебаний. Основное внимание уделено проблемам, связанным с пожарной опасностью технологических процессов, основанных на использовании оборудования ИК-нагрева. Приведена математическая модель, позволяющая рассчитать распределение температуры в объеме диэлектрика, подвергающегося воздействию электромагнитных полей, и определить пожаробезопасные условия реализации волнового нагрева на практике. Предложенная математическая модель позволяет использовать как справочные данные, так и собственные экспериментальные результаты, включая диэлектрические и некоторые физико-механические характеристики обрабатываемых материалов. Статья подчеркивает важность комплексного подхода к обеспечению пожарной безопасности при использовании волнового нагрева, включая как физические, так и математические аспекты.

Ключевые слова: тепловая обработка, волновой нагрев, электромагнитное поле, пожарная опасность

FIRE HAZARD OF THERMAL PROCESSES BASED ON THE USE OF WAVE HEATING

Nikiforov A.L., Legkova I.A., Uleva S.N., Kolobov M.Yu.

Nikiforov Alexander Leonidovich, Legkova Irina Anatolyevna, Uleva Svetlana Nikolaevna
Ivanovo Fire and Rescue Academy of the SFS of Emercom of Russia,
Ivanovo, Russia, 153040, Ivanovo region, Ivanovo, Stroiteley Ave., 33.
E-mail: anikiforoff@list.ru; legkovai@mail.ru; jivotjagina@mail.ru
Kolobov Mikhail Yurievich
Ivanovo State University of Chemical Technology,
Ivanovo, Russia, 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetyevsky Ave., 7.
E-mail: mikhaikolobov@rambler.ru

This article is devoted to the problems of ensuring fire safety of wave heating processes of dielectrics. The work considers the IR, HF and microwave ranges of the spectrum of electromagnetic oscillations. The main attention is paid to the problems associated with fire hazard of technological processes based on the use of IR heating equipment. A mathematical model is given, which allows to calculate the temperature distribution in the volume of a dielectric exposed to electromagnetic fields and to determine fire-safe conditions for the implementation of wave heating in practice. The proposed mathematical model allows the use of both reference data and own experimental results, including dielectric and some physical and mechanical characteristics of the processed materials. The article emphasizes the importance of a comprehensive approach to ensuring fire safety when using wave heating, including both physical and mathematical aspects.

Key words: heat treatment, wave heating, electromagnetic field, fire hazard

Для цитирования:

Никифоров А.Л., Легкова И.А., Ульева С.Н., Колобов М.Ю. Пожарная опасность тепловых процессов, основанных на использовании волнового нагрева. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. 2026. № 1. С. 150-157. DOI: 10.6060/snt.20268501.00018

For citation:

Nikiforov A.L., Legkova I.A., Uleva S.N., Kolobov M.Yu. Fire hazard of thermal processes based on the use of wave heating. *Modern high technology. Regional application*. 2026. N 1. P. 150-157. DOI: 10.6060/snt.20268501.00018

Большинство технологических процессов связано с использованием тепловых обработок. Традиционно для нагрева применяют контактный и конвективный способы, реже радиационный и диэлектрический. Контактный и конвективный способы нагрева достаточно широко изучены и описаны, включая и вопросы, связанные с обеспечением пожарной безопасности соответствующих технологических процессов. В меньшей степени уделено внимание радиационному (инфракрасному – ИК) нагреву. И практически не содержится сведений об обеспечении пожарной безопасности процессов, протекающих с использованием волнового или диэлектрического (ВЧ – высокочастотного, СВЧ – сверхвысокочастотного) способов тепловой обработки. Поэтому актуальной задачей является выявление вероятных причин возникновения пожаров на установках волнового нагрева диэлектриков. Остановимся подробно на рассмотрении физических принципов реализации волнового нагрева диэлектрических материалов, особо отметив, что большинство диэлектриков органического происхождения являются горючими материалами.

К волновым методам нагрева следует отнести методы генерации тепловой энергии в объеме диэлектрического материала, инициированного электромагнитными полями различной частоты (длины волны). В данном случае, в отличие от контактного и конвективного нагрева, отсутствуют внешние источники тепла и его переносчики – теплоносители. Электромагнитные излучения инициируют колебательные процессы на молекулярном уровне, что приводит к возникновению межмолекулярного трения. В результате этого происходит высокоскоростной нагрев реакционной среды – жидкостей или диэлектриков, имеющих полярное строение молекул. При этом процесс нагрева протекает с разгоном [1-8].

Чтобы понять физическую сущность механизмов волнового нагрева необходимо сначала рассмотреть спектр электромагнитных колебаний. При этом отметим, что для практической реализации волнового нагрева наиболее широкое применение в промышленности и быту нашли ИК, ВЧ и СВЧ диапазоны спектра. На рис. 1 представлены участки электромагнитного спектра, где выделены области длин волн, соответствующие ИК, ВЧ и СВЧ излучениям.

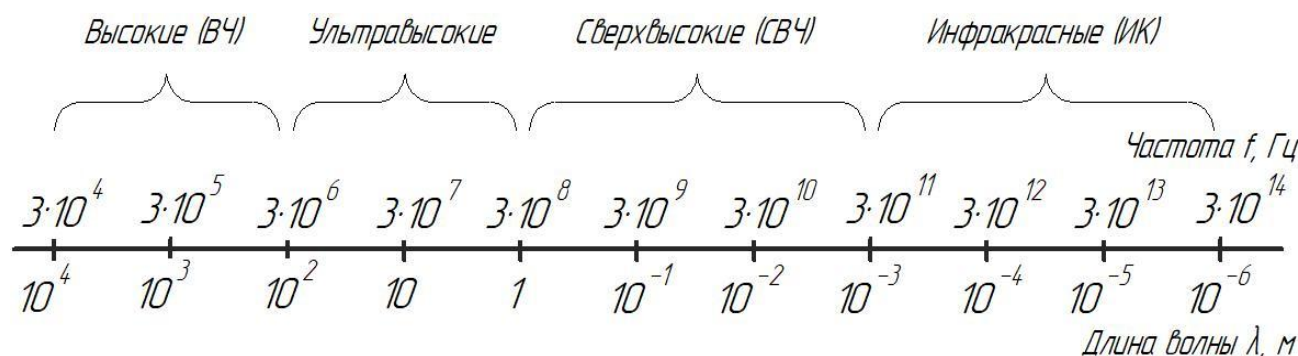


Рис. 1. Спектр электромагнитных колебаний
Fig. 1. The spectrum of electromagnetic oscillations

При реализации ИК-нагрева волновой процесс, приводящий к выделению тепла в обрабатываемом объекте, затрагивает лишь его молекулярную структуру. Воздух, разделяющий ИК-источник и нагреваемое тело, не нагревается. Однако, необходимо помнить, что наличие в воздухе взвешенных частиц, пара и пр. сказывается на эф-

фективности нагрева объекта вследствие поглощения и рассеивания ИК-излучения в непрозрачной воздушной среде.

Радиационный нагрев, как правило, находит применение при обработке листовых материалов (пластиков, тканей, полимерных плёнок) либо тонких поверхностных слоев объемных материа-

лов, например лакокрасочных покрытий, клеевых соединений. Широкое применение ИК-излучатели нашли в технике для обогрева помещений. Условно инфракрасный нагрев обычно делят, в зависимости от длины волны, на три диапазона:

- коротковолновой диапазон с длиной волны $0,75 \div 1,4$ мкм. В данном случае ИК-излучение обладает узкой направленностью и наибольшей энергией. Однако, по мере проникновения вглубь нагреваемой поверхности происходит интенсивное снижение мощности излучения. В связи с этим данный диапазон рекомендуется применять для тепловой обработки тонких материалов.

- диапазон средневолнового излучения с длиной волны $1,4 \div 3$ мкм. Находит более широкое применение чем коротковолновое, что обусловлено большей глубиной проникновения в материал при сохранении достаточно высокой мощности. В частности, данный вид излучения был реализован в установках непрерывного радиационного нагрева текстильных материалов УРТК-120, УРТК-140, УРТК-180.

- длинноволновое излучение с длиной волны $3 \div 100$ мкм, обладает наименьшей энергией воздействия на материал, но позволяет воздействовать на более глубокие слои. Обычно используется при нагреве материалов с толщиной в несколько сантиметров, в том числе при обработке металлов. Наибольшую пожарную опасность представляют бытовые инфракрасные нагреватели, в которых используются ИК-излучатели с широким диапазоном волн, включающих все три диапазона. Пожарная опасность данного оборудования связана с нарушением правил их использования, например, при неправильном размещении относительно горючих предметов, эксплуатации неисправного оборудования и др. [9-12].

Важно помнить, что на эффективность радиационного нагрева объектов существенное влияние оказывает цветовая температура (цвет) и состояние их поверхности. Под цветовой температурой следует понимать характеристику светового излучения облучаемой ИК-источником поверхности нагреваемого объекта.

При этом наиболее эффективно нагреваются матовые поверхности черного цвета, в то время как белые и глянцевые эффективно отражают ИК-излучение. Отражающий эффект положен в основу защиты объектов от нежелательного радиационного нагрева. Возникновение пожаров от бытовых ИК-нагревателей достаточно широко

освещено в печати, в то время как описание пожароопасных ситуаций на промышленном оборудовании практически отсутствует. Продемонстрируем случай, который может вызвать возгорание на любой из установок непрерывного радиационного нагрева текстильных материалов, например, УРТК-140. На рис. 2 представлен фрагмент технологической линии отделки расправленных текстильных полотен, где сушка или фиксация красителя на ткани может осуществляться на данной установке. Оборудование оснащено ИК-излучателями, представляющими собой нихромовую спираль, помещенную в кварцевую трубку. Количество единичных ИК-элементов в каждой установке может варьироваться. Потребляемая электрическая мощность установки может составлять от 50 до 100 кВт. В зависимости от ширины отделочной линии мощность единичного элемента составляет от 1,5 до 3 кВт.

При обработке ткань движется вдоль излучателей, располагаясь на небольшом (несколько сантиметров) расстоянии. Аварийный режим наступает при остановке движения ткани. При этом участки ткани, находящиеся напротив излучателя, подвергаются интенсивному нагреву, что может привести к возгоранию.

Данный аварийный режим учитывается при проектировании оборудования. В качестве защитной меры от возгорания предусмотрено аварийное отключение ИК-излучателей от источника питания и включение принудительной системы вентиляции рабочей зоны. Следует отметить, что указанные мероприятия не гарантируют 100% защиты, что необходимо учитывать и использовать на практике дополнительные системы, например, автоматические средства тушения пожара, порошковые огнетушители или заполнение рабочего объема инертными газами.

В целом вопросы обеспечения пожарной безопасности, связанные с эксплуатацией оборудования ИК-нагрева, изложены в ряде нормативных документов [13-16].

В частности, ГОСТ ИЕС 60519-12-2016 устанавливает требования безопасности к промышленным электронагревательным установкам использующих инфракрасное излучение. Данный стандарт описывает факторы, которые могут привести к возникновению аварийной, пожароопасной ситуации связанные с ИК-излучением, **рекомендации по оценке и предотвращению опасности**, вызванной инфракрасным излучением.

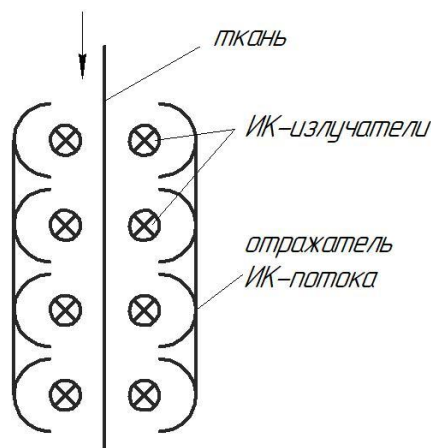


Рис. 2. Фрагмент технологической линии отделки текстильных полотен
Fig. 2. A fragment of the technological line for finishing textile fabrics

Правила противопожарного режима в Российской Федерации (**Постановление Правительства РФ от 16.09.2020 №1479**) включают требования к размещению и безопасной эксплуатации нагревательных приборов в том числе и установок ИК-излучения. Так ППР регламентирует расстояние от горелок до конструкции из горючих материалов, запрещает эксплуатировать поврежденное оборудование.

СТО НП «АВОК» 4.1.5-2006 – стандарт, который устанавливает общие принципы устройства и работы систем отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями (ГИИ) различных типов (лучистого отопления и обогрева) и устанавливает общие принципы устройства и работы систем и требования безопасности при их эксплуатации. Стандарт содержит область применения, нормативные ссылки, термины и определения, общие технические требования к системам, требования пожарной безопасности, санитарно-гигиенические требования, требования к управлению и средствам защиты системы.

Для защиты горючих материалов на объектах, использующих системы ИК-нагрева, основными правилами обеспечения пожарной безопасности являются:

- использование конструкций из негорючих материалов для размещения источников радиационного нагрева;
- соблюдение безопасных расстояний при размещении ИК-излучателей от пожароопасных материалов таким образом, чтобы температура на обогреваемых поверхностях не поднималась выше 50 °С при уровне плотности облучающего теплового потока не более 3 кВт/м²;
- обеспечение помещений и объектов вытяжными системами, предусматривающими возможность удаления продуктов горения при усло-

вии, что устройства забора воздуха должны располагаться выше излучателей, а приточный воздух должен подаваться в нижнюю зону помещения;

- применение автоматизированных систем управления и противопожарной защиты, позволяющих дистанционно управлять работой ИК-установок.

На промышленных объектах, использующих ИК-нагрев, применяют средства коллективной и индивидуальной защиты от радиационного излучения, основными из которых являются:

- использование теплоизолирующих материалов (алюминиевая фольга, асбест, минеральная каменная вата, газосиликаты и др.) для экранирования нагретых поверхностей с целью снижения тепловой сигнатуры излучающей поверхности в инфракрасном диапазоне;
- применение поглощающих и отражающих ИК-излучение экранов;
- постоянная подача в рабочую зону охлажденного до комфортных температур воздуха;
- создание водяных охлаждающих завес для защиты объектов в рабочих зонах, нагрев которых не предусмотрен технологическим процессом;
- обеспечение обслуживающего персонала индивидуальной теплозащитной одеждой.

Необходимо понимать разницу между указанными на рис. 1 диапазонами волн и их эффективностью при реализации процесса нагрева.

Наиболее перспективным методом термической обработки материалов, изготовленных из натуральных и синтетических полимеров, является диэлектрический нагрев.

Этот метод характеризуется высокой скоростью нагрева, равномерным распределением тепла, отсутствием необходимости в теплоносителе, поскольку тепло генерируется внутри поля-

ных диэлектриков под воздействием внешнего электромагнитного поля высокой (ВЧ) или сверхвысокой частоты (СВЧ). Оборудование для диэлектрического нагрева отличается компактными размерами, а его коэффициент полезного действия достигает 75–85% [9]. Следует отметить, что чем выше частота, тем эффективнее протекает процесс нагрева. Однако высокой частоте излучения соответствует короткая длина волны (рис. 1), что существенно отражается на эффективности проникновения электромагнитного излучения в материал и, соответственно, глубине прогрева. Если ИК-излучение прогревает только поверхностные слои материала, то ВЧ и СВЧ излучения способны проникать на большую глубину и пригодны для тепловой обработки материалов, имеющих достаточно большую толщину (10^{-3} – 10^{-1} м). В данном случае в силу особенностей протекания тепломассообменных процессов в обрабатываемых материалах пожарная опасность имеет свою специфику.

Для понимания этого рассмотрим, нагрев диэлектриков большой толщины (пиломатериалов, паковок текстильных материалов, бобин нитей и пряжи, сельскохозяйственной продукции и продуктов питания [3, 5, 6].

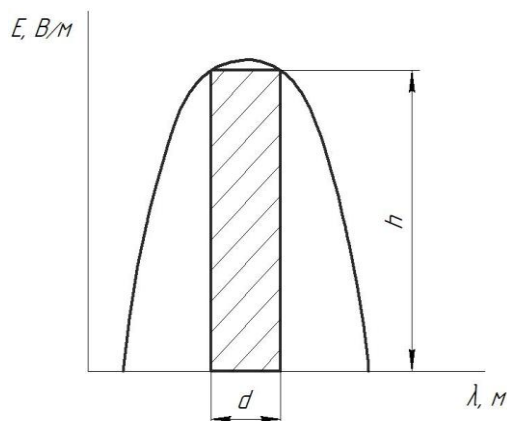


Рис. 3. Соотношение высоты (h) и толщины (d) обрабатываемого изделия с длиной волны (λ) и напряженностью (E) электромагнитного поля
Fig. 3. The ratio of the height (h) and thickness (d) of the workpiece to the wavelength (λ) and intensity (E) of the electromagnetic field

Ранее нами данное уравнение было адаптировано к специфике процессов термической обработки полярных диэлектриков, с учетом равномерного выделения тепла в объеме обрабатываемого материала.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x, t) \quad (3)$$

Были заданы начальные (а) и граничные (б) условия:

$$a) u_{t=0} = \text{const} \quad (4)$$

где u_0 – температура окружающей среды;

Мощность источника ($P_{\text{И}}$) ВЧ/СВЧ-энергии может быть рассчитана в соответствии с формулой (1) в основу которой использовано положение 10, показывающее количество генерируемой тепловой энергии ($P_{\text{М}}$) в диэлектрике, помещенном в электромагнитное поле.

$$P_{\text{И}} = 1,25 P_{\text{М}} \quad (1)$$

$$P_{\text{М}} = 0,55 \cdot 10^{-12} \cdot K \cdot f \cdot E^2 [Bm/m^3] \quad (2)$$

где f – частота электромагнитного поля, Гц; E – напряженность электромагнитного поля, В/м; U – напряжение на обкладках аппликатора (конденсатора или стенках резонаторной СВЧ-камеры), В; d – расстояние между обкладками аппликатора, м; K – фактор потерь, $K = \varepsilon \cdot \tan \delta$.

В соответствии с положением (2) тепловыделение в любой точке объема материала, помещенного в электромагнитное поле, должно быть одинаковым, при условии, что материал имеет однородную по строению и составу структуру, а его толщина по размерам существенно меньше длины волны излучения (рис. 3).

Для обеспечения пожарной безопасности ВЧ/СВЧ процессов можно воспользоваться теплотехническим расчетом, основанным на использовании одномерного уравнения теплопроводности.

$$b) \left. \begin{aligned} \frac{du}{dx} - h(u - u_0)_{x=0} &= 0 \\ \frac{du}{dx} - h(u - u_0)_{x=1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где h – коэффициент теплопередачи. Так как реальный ВЧ нагрев сопряжен с неоднородностью граничных и начальных условий, то имело смысл свести их, с целью упрощения задачи, к однородным подстановкой в уравнения (4) и (5) выражения $q = u - u_0$.

Таким образом, начальное условие можно представить как

$$q = 0 \text{ при } t = 0, \quad (6)$$

а граничное

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\theta}{dx} - h\theta_{x=0} &= 0 \\ \frac{d\theta}{dx} + h\theta_{x=1} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Тогда уравнение теплопроводности (3) примет вид

$$f(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \left(\cos \frac{\mu_n \cdot x}{l} + \frac{h \cdot l}{\mu_n} \sin \frac{\mu_n \cdot x}{l} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) X_n(x). \quad (9)$$

Величина $\left(\frac{l}{a\pi n}\right)^2$ имеет размерность времени и является характерным временем установления каждой тепловой моды. Максимальное время равно $\tau_{\max} = \left(\frac{l}{a\pi n}\right)^2$.

Уравнение (9) было взято за основу для разработки компьютерной модели, предназначенной для расчета температурного профиля в диэлектриках, подвергающихся воздействию высокочастотного поля. Программа позволяет использовать как справочные данные, такие как теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность, так и собственные экспериментальные результаты, включая диэлектрические и некоторые физико-механические характеристики обрабатываемых материалов. В результате расчетов может быть получено распределение температурных полей по толщине материала при заданном уровне мощности высокочастотного источника.

В качестве примера на рис. 4 представлено распределение температуры по толщине полимер-

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + f(x, t). \quad (8)$$

В результате решения данного уравнения была выведена функция распределения температуры по толщине материала, помещенного в электромагнитное поле:

ного материала, обладающего коэффициентом диэлектрических потерь порядка 10^{-1} , что характерно для большинства объемных изделий из таких материалов, как деловая древесина, бобины нитей, паковки пряжи, кипы текстильных волокон, пищевые продукты и др. [5, 6].

Экспериментальные данные показывают, что при высокочастотном нагреве большинство технологических процессов обработки полимерных материалов, протекают в интервале от 2 до 12 секунд. При этом, благодаря интенсивному теплообмену с окружающей средой, температура на оси материала оказывается существенно выше температуры на поверхности. Возникает риск перегрева и самовоспламенения материала изнутри, что не позволяет оценить ситуацию визуально, а также с использованием бесконтактных средств контроля температуры (тепловизоров). Использование контактных способов контроля (термометры, термопары) в ВЧ/СВЧ-полях невозможно.

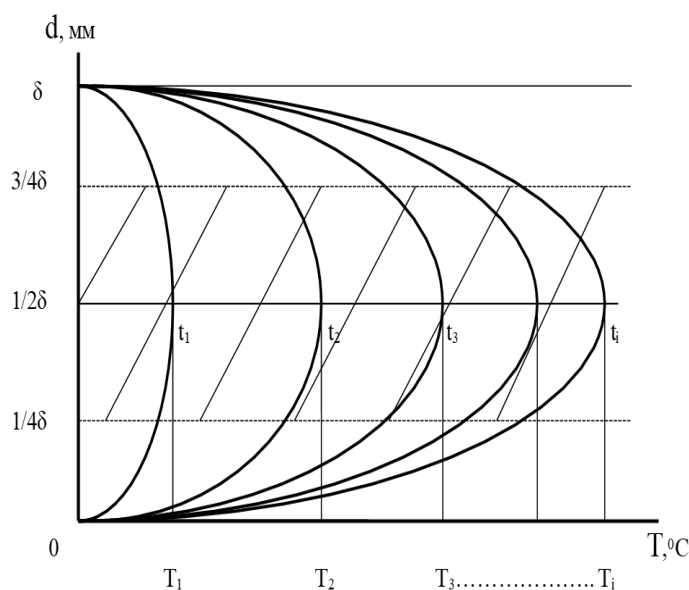


Рис. 4. Распределение температуры по толщине обрабатываемого материала (δ), нагреваемого в электромагнитном поле ВЧ/СВЧ-частот

Fig. 4. Temperature distribution along the thickness of the processed material (δ), heated in an electromagnetic field of high / ultra-high frequency

Таким образом обеспечить пожарную безопасность технологических процессов тепловой обработки горючих (полимерных) диэлектриков в ВЧ/СВЧ – электромагнитных полях возможно на основе использования математического моделирования таких процессов.

Результат моделирования – определение оптимальной продолжительности пожаробезопасного нагрева обрабатываемого материала с привязкой к его габаритам и диэлектрическим характеристикам, а также напряженности электромагнитного поля при заданных частоте и мощности источника электромагнитных колебаний.

Еще одной причиной возникновения пожароопасной ситуации на ВЧ/СВЧ-установках может стать электрический пробой обрабатываемого материала, который возникает при неправильном выборе электрического напряжения на обкладках аппликатора

$$U_a > U_{пр.м.},$$

где U_a – напряжение на обкладках аппликатора, В; $U_{пр.м.}$ – напряжение пробоя диэлектрика, с учетом его толщины, В.

Как показывает собственный практический опыт при практической реализации рассматриваемых процессов необходимо выбирать напряжение на обкладках аппликатора примерно на 25% ниже напряжения пробоя конкретного диэлектрика, соотнесенного с его толщиной.

На основании проведенного анализа вероятных причин возникновения возгораний на электроустановках волнового нагрева диэлектриков можно сделать следующие **выводы**:

- для предотвращения пожаров при эксплуатации инфракрасных (ИК) систем нагрева необходимо использовать конструкции из негорючих материалов для размещения ИК-излучателей, соблюдать безопасные расстояния от пожароопасных материалов, чтобы температура на

поверхностях не превышала 50 °С при плотности теплового потока не более 3 кВт/м², а также обеспечивать помещения вытяжными системами для удаления продуктов горения, при этом устройства забора воздуха должны располагаться выше излучателей, а приточный воздух подаваться в нижнюю зону.

- для защиты персонала и оборудования от радиационного излучения требуется применять коллективные и индивидуальные средства защиты, включая теплоизолирующие материалы, поглощающие и отражающие экраны, подачу охлажденного воздуха, водяные завесы и теплозащитную одежду. Важно учитывать различия в эффективности ИК-диапазонов для нагрева и выбирать оптимальные решения в зависимости от технологических требований.

- для обеспечения пожарной безопасности при тепловой обработке горючих полимерных диэлектриков в ВЧ/СВЧ необходимо оценивать предельно допустимые режимы воздействия электромагнитных излучений на обрабатываемый материал – продолжительность обработки, максимальную температуру нагрева образца при заданных параметрах подводимой мощности, частоты и напряженности электромагнитного поля. Для оценки данных параметров предложено использовать математическое моделирование, что позволяет определять оптимальную продолжительность нагрева, с учетом габаритов и диэлектрических характеристики материала при установленных напряженности электромагнитного поля, частоте и мощности источника колебаний.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Княжевская Н.П., Фирсова М.Г. Высоочастотный нагрев диэлектрических материалов. Л.: Машиностроение, 1980. 293 с.
2. Глуханов Н.П. Физические основы ВЧ-нагрева. Л.: Машиностроение, 1989. 56 с.
3. Никифоров А.Л., Циркина О.Г., Ульяева С.Н., Спиридонова В.Г. Обеспечение пожарной безопасности технологических процессов переработки полимерных материалов на ВЧ/СВЧ-оборудовании *Современные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 4(37). С.111-117.
4. Богданов И.А., Шабунин С.А., Ульяева С.Н., Никифоров А.Л. Оценка влияния температурных воздействий на пожарную опасность изоляции на основе ПВХ-диэлектриков. *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 4(45). С. 64-70.

REFERENECES

1. Knyazhevskaya N.P., Firsova M.G. High-Frequency heating of dielectric materials. L: Mashinostroenie, 1980. 293 p.
2. Glukhanov N.P. Physical Foundations of RF Heating. L.: Mashinostroenie, 1989. 56 p.
3. Nikiforov A.L., Tsirkina O.G., Ulyeva S.N., Spiridonova V.G. Ensuring Fire Safety of Technological Processes of Polymer Materials Processing on HF/MICrowave Equipment. *Modern problems of civil defense*. 2020. N 4 (37). P. 111-117.
4. Bogdanov I.A., Shabunin S.A., Ulieva S.N., Nikiforov A.L. Assessment of the influence of temperature effects on the fire hazard of insulation based on PVC dielectrics. *Modern problems of civil defense*. 2022. N 4 (45). P. 64-70.
5. Verein M.V., Derbasova E.M., Mukanov R., Idrisov E.Sh. Technological solution for the process of accelerated hardening of monolithic structures using IR heating. *Caspian Engineering and Construction Bulletin: Scientific and*

5. **Вереин М.В., Дербасова Е.М., Муканов Р.В., Идрисов Э.Ш.** Технологическое решение процесса ускоренного твердения монолитных конструкций методом ИК-нагрева. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. Астраханский государственный архитектурно-строительный университет*. Астрахань: ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2018. № 3 (25). С. 9-14.
6. **Никифоров А.Л., Циркина О.Г., Ульева С.Н., Карасева С.Н.** Пожарная опасность процессов ВЧ/СВЧ-сушки целлюлозосодержащих материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2019. № 5(383). С. 217-221.
7. **Мырхалыков Ж.У., Калдыбаев Р.Т., Ташменов Р.С., Калдыбаева Г.Ю., Елдияр Г.К.** Практическое использование высокочастотной техники в текстильной промышленности. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. № 3(363). С. 143-149.
8. **Сайко Д.С., Андреев Д.Г., Титов С.А., Корепанов В.И.** Тепловые процессы при ИК-облучении воды: эксперимент и модель. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. Т. 20. № 4. 2024. С.13-22. DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.4.002.
9. **Никифоров А.Л., Легкова И.А., Ульева С.Н., Колобов М.Ю.** Использование полимерных дисперсий для ремонта напорных пожарных рукавов. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. № 2(78). 2024. С. 93-98. DOI: 10.6060/snt.20247802.00013.
10. **Махов Н.М., Торопова М.В., Махов О.Н.** О причинах пожаров в текстильной отрасли. Пожарная и аварийная безопасность: сборник материалов XI Международной научно-практической конференции. Иваново: ИПСА, 2016. С. 277-278.
11. **Циркина О.Г., Спиридонова В.Г., Салихова А.Х., Сырбу С.А.** К вопросу обеспечения пожарной безопасности предприятий текстильной промышленности. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2022. № 6 (402). С. 177-182.
12. **Сторонкина О.Е., Мочалова Т.А., Калашников Д.В.** Исследование показателей пожарной опасности текстильных материалов в целях судебной пожарно-технической экспертизы. *Современные наукоёмкие технологии. Региональное приложение*. № 4(68). 2021. С. 80-85. DOI: 10.6060/snt.20216804.00012.
13. ГОСТ ИЕС 60519-12-2016 «Установки электронагревательные. Безопасность. Часть 12. Частные требования к инфракрасным электронагревательным установкам».
14. . Постановление Правительства РФ от 16 сентября 2020 года №1479 «Правила противопожарного режима в Российской Федерации».
15. СТО НП АВОВ 4.1.5-2006 Системы отопления и обогрева с газовыми инфракрасными излучателями.
16. **Блинничев В.Н., Лабузин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурин Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю., Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В.** Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. вып. 7. С. 185-202. DOI:10.6060/ivkkt.20236607.6845j
- Technical Journal. Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering*. Astrakhan: GAOU AO VO «AGASU», 2018. N 3 (25). P. 9-14.
6. **Nikiforov A.L., Tsirkina O.G., Ulieva S.N., Karaseva S.N.** Fire hazard of RF/microwave drying processes of cellulose-containing materials. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2019. N 5 (383). P. 217-221.
7. **Myrkhalikov Zh.U., Kaldybaev R.T., Tashmenov R.S., Kaldybaeva G.Yu., Eldiyar G.K.** Practical use of high-frequency technology in the textile industry. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2016. N 3 (363). P. 143-149.
8. **Saiko D.S., Andreev D.G., Titov S.A., Korepanov V.I.** Thermal processes during IR irradiation of water: experiment and model. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. V. 20. N 4. 2024. P. 13-22. DOI 10.36622/1729-6501.2024.20.4.002.
9. **Nikiforov A.L., Legkova I.A., Ulieva S.N., Kolobov M.Yu.** Use of polymer dispersions for repair of pressure fire hoses. *Modern high technologies. Regional application*. N 2 (78). 2024. P. 93-98. DOI: 10.6060/snt.20247802.00013.
10. **Makhov N.M., Toropova M.V., Makhov O.N.** On the causes of fires in the textile industry. Fire and emergency safety: collection of materials of the XI International scientific and practical conference. Ivanovo: IPSA, 2016. P. 277-278.
11. **Tsirkina O.G., Spiridonova V.G., Salikhova A.Kh., Syrbu S.A.** On the issue of ensuring fire safety of textile industry enterprises. *News of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2022. N 6 (402). P. 177-182.
12. **Storonkina O.E., Mochalova T.A., Kalashnikov D.V.** Study of fire hazard indicators of textile materials for the purposes of forensic fire-technical examination. *Modern high technologies. Regional application*. N 4 (68). 2021. P. 80-85. DOI: 10.6060/snt.20216804.00012.
13. GOST IEC 60519-12-2016 «Electric heating systems. Safety. Part 12. Particular requirements for infrared electric heating systems».
14. Resolution of the Government of the Russian Federation of September 16, 2020. N 1479 «Fire Safety Rules in the Russian Federation».
15. STO NP AVOK 4.1.5-2006 Heating and heating systems with gas infrared emitters.
16. **Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G. N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu. N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V.** Problems of developing energy- and resource-saving processes, reactor systems and intensive equipment, modeling and optimal control. *ChemChemTech [Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. issue 7. P. 185-202. DOI:10.6060/ivkkt.20236607.6845j

Поступила в редакцию(Received) 24.11.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 14.02.2026