

Технология СВЧ-Нагрева: потенциал и границы

Иван Именохов ^{*1}, Ханс Виндсхаймер¹, Роланд Вайтц¹, Надя Кинтсель¹ и Хорст Линн¹

¹LINN HIGH THERM GmbH, Heinrich-Hertz-Platz 1, 92275 Eschenfelden, Germany

*Автор: Imenokhoyev@linn.de, Интернет: <http://www.linn.de>

Аннотация: Уже более 50 лет технология СВЧ-нагрева применяется в промышленности. Для того чтобы представить преимущества этой техники, следует наглядно обратиться к теории СВЧ-нагрева. Дополнительно практические эффекты будут продемонстрированы на некоторых примерах.

На данный момент существуют СВЧ-нагреватели различных моделей. Наряду с классическими камерными системами, как например, СВЧ-печью, СВЧ-нагрев применяется также в промышленных, работающих непрерывно сушильных и нагревательных установках. Многолетний опыт в области СВЧ-нагрева и инновационных идей являются базисом СВЧ-установок от фирмы Linn High Therm (LHT).

Эта статья предоставляет обзор о имеющихся сейчас в наличии видов промышленных низкотемпературных и высокотемпературных СВЧ-установок. Процессы, проводимые в этих установках, а именно процессы сушки и нагрева, настолько разнообразны, также как и в традиционных термических процессах. СВЧ-нагрев может зачастую значительно ускорить процесс сушки и нагрева и, в таком случае, сэкономить энергию и деньги.

Ключевые слова: СВЧ-нагрев, СВЧ-технология, производство промышленного оборудования, цифровое моделирование, МКЭ, электротермия, технология производственных процессов, СВЧ-печь, применение низких температур, сушка, термообработка, закалка, обжиг, специальные установки, применение высоких температур, удаление органических вяжущих, спекание.

Обработка материалов с помощью СВЧ демонстрирует большое количество перспективных преимуществ по сравнению с традиционными технологиями нагрева, например, улучшенное качество изделия, сокращение временного интервала управления процессом, экономию энергии и затрат на энергию благодаря более высокому КПД, снижение уровня загрязнения окружающей среды, незначительные расходы по содержанию оборудования и более высокую гибкость установки. [Linn 2007, Im 2007, Feh 2009, IMW 2011, Linn 2012].

В этом случае, под СВЧ-нагревом понимают процесс, в котором энергия с частотой от МГц до 300 ГГц проникает в нагреваемый материал в качестве электромагнитной волны с длиной волны в диапазоне от 1 м до 1 мм, а затем преобразуется в тепло (см. Рис. 1).

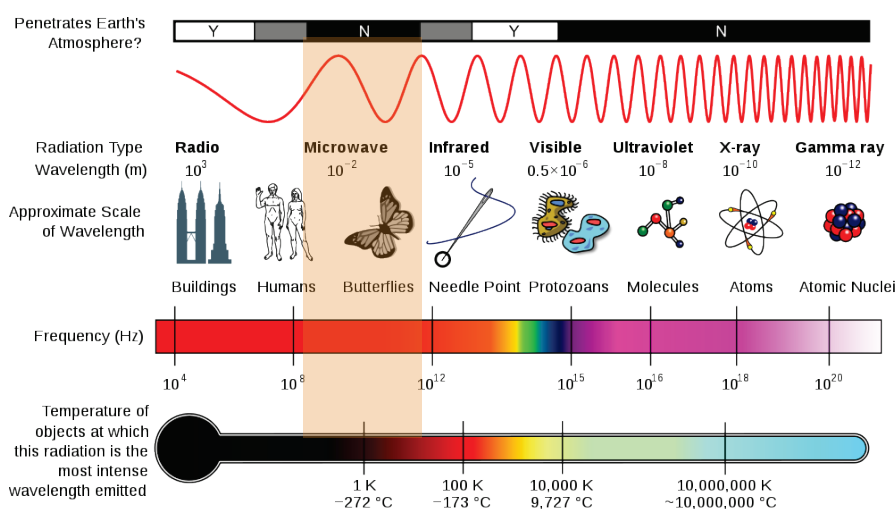


Рис. 1 Спектр электромагнитного излучения [википедия 2012]

В распоряжении СВЧ-техники находятся, преимущественно, 4 частоты индуктивных статических измерительных установок (частота для промышленного применения, научно-исследовательского и медицинского радиооборудование), которые могут отличаться друг от друга в зависимости от правил конкретной страны. Самый высокий показатель частоты составляет 28000 или 30000 МГц, однако, промышленное и экономичное применение такой частоты в крупных масштабах еще не попало в поле зрения. Низкая частота в размере 915 МГц имеет определенные технические затраты, которые лишь в определенных случаях оправдывают свое применение. Бытовые СВЧ-печи, используемые во всем мире, имеют экономичную “частоту” размером 2450 ± 50 МГц. С точки зрения СВЧ-устройств управления термического процесса, СВЧ-лента с частотой $5800 \text{ МГц} \pm 75 \text{ МГц}$ также находит свое промышленное применение [Linn 2012].

Прежде чем, мы подробно остановимся на принципе СВЧ-техники, рассмотрим кратко традиционный процесс нагрева. Источниками нагрева служат, например, нагревательные элементы сопротивления и инфракрасные лучи, хотя эти элементы находятся в среде нагреваемого материала. Благодаря температурному излучению и конвективному теплообмену их энергия передается на поверхность материала и оттуда перемещается во внутреннюю часть, для того чтобы обеспечить сквозной прогрев материала. Теплопроводность, адсорбция и удельная теплоемкость материала определяют при этом, главным образом, процесс нагрева.

Чувствительные материалы при определенных обстоятельствах не допускают высокую температуру, и если материал обладает еще плохой теплопроводностью, то в этом случае неизбежен длительный процесс, поэтому при производстве определенных изделий с применением традиционных технологий нагрева устанавливают границы. Для того чтобы обойти эти границы, не обязательно переписывать физику заново, а всего лишь отдать большее внимание “высокочастотной или радиолокационной технике”.

СВЧ-нагрев отличается от традиционных систем нагрева за счет того, что тепло не должно поступать в обход нагреву окружающего газа и теплоизоляции в нагреваемом материале, а может напрямую подключаться в объем материала. Он сохраняет в себе потенциал крайне энергоэффективного метода нагрева, так что уже образовалось разнообразие исследовательских работ по изучению СВЧ-нагрева. [Kum 1986, Mer 1998, Linn 2007, Im 2007, Feh 2009, Linn 2012].

Преобразование электромагнитной энергии в тепловую энергию осуществляется в связи электромагнитных свойств, и в принципе зависит от материала, температуры и частоты. Так как в процессе нагрева, в большинстве случаев, используют лишь одну частоту, а температурная зависимость электродинамических свойств не известна, анализ осуществляется только в зависимости от самого материала.

Для того чтобы описать любой материал необходимы три параметра, а именно: электрическая проводимость, магнитная проницаемость и абсолютная диэлектрическая проницаемость. Для абсолютной диэлектрической проницаемости часто используют устаревшее название диэлектрическая константа (ДК) или диэлектрическая проницаемость или коэффициент потерь.

Комплексная диэлектрическая константа излагается согласно уравнению (1). Для постоянной проницаемости действительно уравнение (2).

$$\underline{\varepsilon}_{ges} = \varepsilon_0 \cdot [\varepsilon_r' - j \varepsilon_r''] = \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon}_r \quad (1)$$

$$\underline{\mu}_{ges} = \mu_0 \cdot [\mu_r' - j \mu_r''] = \mu_0 \cdot \underline{\mu}_r \quad (2)$$

Решающим фактором для преобразования энергии является реактивная составляющая диэлектрической константы $\varepsilon_r'' = \text{коэффициент потерь} (\tan \delta) \times \text{диэлектрическая проницаемость} (\varepsilon_r')$. Часто эту проницаемость ошибочно приравнивают к коэффициенту потерь. Связь видна в уравнении (3).

$$\varepsilon_r'' = \tan \delta \cdot \varepsilon_r' \quad \text{und} \quad \tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (3)$$

При этом являются действительными

$\underline{\varepsilon}_{ges}$ = комплексная диэлектрическая константа (ДК); $\underline{\mu}_{ges}$ = комплексная постоянная проницаемость;
 $\varepsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$ = электрическая постоянная; $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ = магнитная постоянная;
 ε'_r = действительная часть диэлектрической константы; μ'_r = действительная часть магнитной проницаемости;
 ε''_r = реактивная составляющая ДК; μ''_r = реактивная составляющая магнитной проницаемости;
 $\underline{\varepsilon}_r$ = относительная диэлектрическая проницаемость; $\underline{\mu}_r$ = относительная магнитная проницаемость;
 $\tan \delta$ = фактор потерь и δ = угол потерь.

С этим описанием комплексной диэлектрической константы и комплексной постоянной проницаемости значительно облегчается обработка уравнений Максвелла в частотном диапазоне в форме уравнений Гельмгольца (4) и (5), которые являются основой СВЧ-техники. Для цифрового моделирования в частотном диапазоне уравнения разрабатывают дальше [Kum 1986, Im 2007].

$$\nabla^2 \underline{\vec{E}}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\varepsilon}_{ges} \cdot \underline{\vec{E}}(\vec{r}) \quad (4)$$

$$\nabla^2 \underline{\vec{H}}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\varepsilon}_{ges} \cdot \underline{\vec{H}}(\vec{r}) \quad (5)$$

Передаваемая энергия электромагнитных волн определяется уравнениями Максвелла и известной приводит к теореме Пойнтинга в частотном диапазоне. [Kum 1986, Sim 1989]:

$$P_{cin} = \frac{1}{2} \int_F [\underline{\vec{E}} \times \underline{\vec{H}}^*] \cdot \underline{\vec{n}}^0 dF = \frac{1}{2} \int_F \underline{\vec{S}} \cdot \underline{\vec{n}}^0 dF \quad (6)$$

Эта теорема означает, что проникаемая в огибающую поверхность F средняя энергия P_{cin} , следуя от модуля и фазы, зависит от амплитуды, распределения и соответствующей фазы электрического и магнитного поля. Преобразование поверхностного интеграла в уравнение (6) согласно теореме Гаусса в интеграл по объему, приводит к определению потери активной энергии в любом диэлектрике:

$$P_{abs} = \frac{1}{2} \omega \varepsilon_0 \cdot \iiint_V \varepsilon''_r \cdot |\underline{\vec{E}}|^2 dV \quad (7)$$

Тем самым, получают 3D-источник нагрева распределения плотности в немагнитном материале. Рис. 2 показывает электромагнитное распределение и источника нагрева плотности напряженности поля в качестве примера цифрового метода моделирования 3D-конечных элементов. Речь идет о цилиндрическом многомодовом аппликаторе (СВЧ-камера, см. Рис. 2 слева), который имеет продольное расположение прямоугольного волновода и наполнен материалом модели. В качестве материала модели применяют низко и высоко абсорбирующие материалы с различными показателями ДК $\underline{\varepsilon}_{ges}$ eingesetzt [IMW 2011].

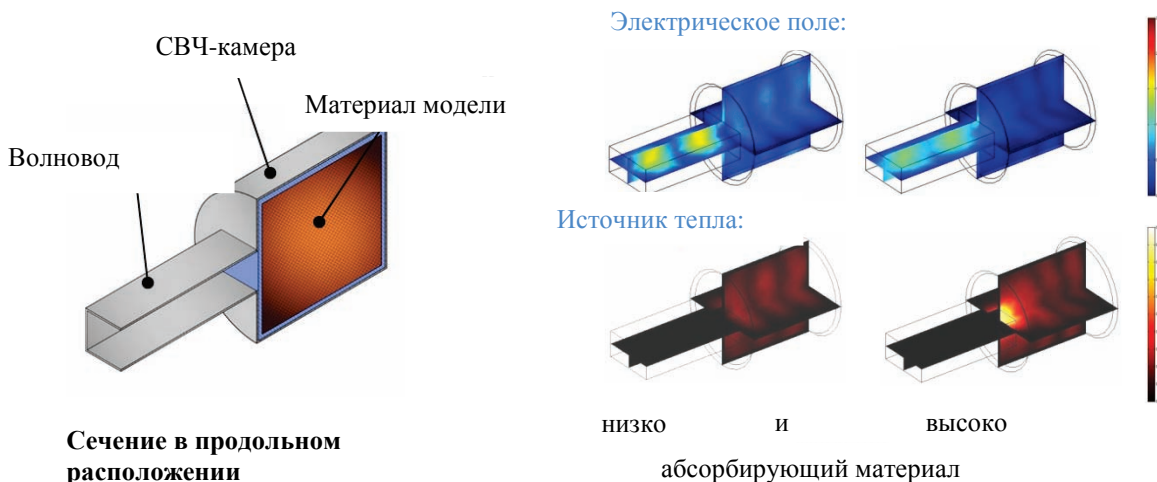


Рис. 2 Моделирование по методу конечных элементов: Распределение электрического поля и источников нагрева в цилиндрическом многомодовом аппликаторе [IMW 2011]

Так как тело нагревается одновременно по всему объему, во внутренней части образуется высокая температура, так как поверхность соприкасается с "холодной внешней средой" и, тем самым, охлаждается. Внутренняя среда оказывает теплоизолирующее действие, так как соседние молекулы имеют такую же температуру. Распределение температуры, тем самым, является противоположным по отношению к традиционному нагреву. Во многих случаях, этот эффект является желаемым, так как поверхность сохраняет свое прежнее состояние, а тепло во внутренней части может собраться быстрее.

Скоростью распространения СВЧ является скорость света в вакууме или в воздухе. Если СВЧ-источник включен, то он непосредственно присутствует в нагреваемом теле и сразу же начинается преобразование энергии. При быстром отключении процесс нагрева сразу прекращается. Не существует длительных процессов нагрева и охлаждения печи.

Неполярные материалы (например, воздух, тефлон, кварцевое стекло) не могут преобразовывать энергию и, тем самым, их не нагревают. СВЧ проникают через эти материалы, но не ослабевают при этом (без преобразовании энергии). В общем нагреваемый материал, который в состоянии провести преобразовании энергии, рассматривают в качестве «нагревателей», так как материал сам по себе представляет источник нагрева. Металлический корпус печи (СВЧ-камера) служит для того чтобы направлять СВЧ назад на материал, так что не будет утеряна СВЧ-энергия и обслуживающий персонал не будет подвергаться СВЧ-излучению.

Сушка, являющаяся примером промышленного применения низкой температуры, имеет особое место в производственном процессе и, в некоторых случаях, определяет даже производственную скорость или продолжительность производственного цикла. Тем самым, во время оптимизации всего процесса, процесс сушки изучается тщательно. В керамической промышленности время сушки составляет от 10 до 14 дней, а сушка крупных деталей иногда длится даже несколько месяцев, и это не редкость. Так как существует стремление достичь более короткий срок поставки и незначительную складскую мощность, то СВЧ-сушка будет занимать все более значимую роль. Почему это так, зависит от физики СВЧ-техники или расширения и свойств электромагнитных волн. В специальных случаях с помощью СВЧ-обработки может быть даже достигнуто улучшение материала.

Преимуществом СВЧ-сушки является противоположный температурный профиль, так как во внутренней части материала образуется более высокое давление пара и сушка осуществляется изнутри наружу. В холодных внешних слоях конденсируется часть пара и оставляет поверхность влажной и прозрачной до тех пор, пока изнутри больше не добавится пар, а поверхность затем начнет сохнуть. Так как вода ввиду высокого фактора потерь, как правило, преобразует наибольшее количество энергии, то в зависимости от сухой массы и от степени сушки во внутренней части происходит лишь незначительное преобразование энергии (СВЧ передвигаются усиленно дальше), хотя эту энергию можно использовать в другом месте. В результате этого возможна эффективная сушка с удалением всех «водяных гнезд». В результате различного потребления энергии высушиваемого материала, в принципе, возможны различные производственные процессы, хотя если уровень влажности составляет ок. 15 %, то это не имеет существенного отличия. Здесь вода определяет ход процесса. В диапазоне от 5 % до 15 % сухая масса может сама играть важную роль. Если материал сам может преобразовать СВЧ-энергию, то температура материала может повыситься, хотя температурная зависимость диэлектрической константы определяет процесс. В результате этого в определенных химикатах может расширяться связанная вода. С понижающей влажностью, а именно ниже 5 %, СВЧ-сушка может стать неэффективной. Однако, желательно перед этим провести испытание материала, чтобы убедиться в том, что может быть достигнута необходимая температура.

1. Конвейерные СВЧ-печи серии MDBT

В начале 90-ых годов фирма LINN HIGH THERM GmbH вместе с фирмой Riedhammer GmbH начала свою работу в области СВЧ-нагрева. Для того чтобы покрыть потребности промышленных сушилок была разработана **конвейерная СВЧ-печь [патент DE 198 47 299]**.

На основе простой и гибкой схемы, как модульная конструкция, удалось сконструировать требующую меньших затрат **конвейерную печь (MDBT)**, которую можно применять в различных применениях. Основным применением является сушка различных производственных процессов.

Конвейерная СВЧ-печь серии **MDBT** имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными установками нагрева:

1. Быстрый, воспроизводимый и однородный нагрев.
2. Мгновенная эксплуатационная готовность или управление теплопроизводительностью без задержки.
3. Хорошая пригодность для автоматизации производственных процессов.
4. Без потерь аккумулированного тепла.
5. Низкое специфическое потребление энергии.
6. Более короткий период производственного цикла.
7. Более быстрый прогрев толстых слоев.

В толстых материалах или объемной насыпной массе проникновение СВЧ в материал и моментальное преобразование СВЧ-энергии в тепловую энергию способствует быстрой сушке, в отличие от традиционного сушильного оборудования. Если длительность сушки некоторых материалов занимала раньше несколько часов или даже дней, то сейчас она значительно сократится. Дополнительно появится возможность, получать улучшенное качество изделия. Так как нагрев материала осуществляется за счет объема, то, в значительной степени, следует избегать перегрев. В изоляционных материалах, которые имеют плохой коэффициент теплопроводности, процесс сушки длится дольше, а именно пока тепло, полученное традиционным способом не достигнет внутреннюю часть, и там начнется процесс сушки. В СВЧ-сушке теплопроводность материала играет лишь второстепенную роль.

Конечно область применения конвейерной печи не ограничивается только сушкой материала. В пищевой промышленности СВЧ-нагрев применяется ок. 50 лет. В качестве примера здесь упоминается производство хлеба, нарезанного ломтями, в то время как, СВЧ-нагрев используют для пастеризации [Linn 2011]. Кроме того, выпечка хлеба без корочки с помощью СВЧ показала себя с энергосберегающей стороны, более 40% меньше потребления энергии благодаря сокращению процесса выпечки по сравнению с традиционной хлебопекарной печью, время выпечки с СВЧ составляет ок. 10 мин, а с помощью традиционной хлебопекарной печи - ок. 24 мин. Производство риса быстрого приготовления с помощью СВЧ составляет до 90% экономии энергии, вкусовые качества при этом не изменяются, а его производство возможно и без применения воды (Рис.3). Так как последующая сушка отсутствует, то в этом случае можно сэкономить достаточное количество энергии. [патент WO 03/073867].



Рис. 3 Установка серии **MDBT** для производства риса быстрого приготовления (установленная СВЧ-мощность 21 кВт, производительность ок. 300 кг/ч)

Этот принцип нагрева все еще используют для размораживания, кальцинирования, закалки, термической обработки и для ускорения синтеза.

Более устаревшие конвейерные СВЧ-печи основаны на принципе использования малого количества генераторов (магнетронов) с высокой мощностью на прямоугольных СВЧ-камерах. Из этого следует, что в такой установке сложно получить однородное СВЧ-поле. В местах подачи электроэнергии магнетронов передается высокая мощность, однако, которая не может равномерно распределиться в объеме камеры. Дополнительно благодаря прямоугольной форме камеры отражение СВЧ транспортируется назад в магнетрон. Все это приводит к относительно неравномерному распределению СВЧ-поля.

Конвейерные СВЧ-печи фирмы LHT основываются на принципе многих многих небольших магнетронов и цилиндрической микроволновой камеры. Благодаря распределению большого количества магнетронов на стенках камер, получается равномерная подача энергии многими маленькими СВЧ-мощностями. В результате этого, получается однородное распределение СВЧ. Этот эффект поддерживается за счет закругления камеры, которое равномерно отражает падающие СВЧ в камере объема.

В качестве примера для такой установки нового дизайна изображена конвейерная СВЧ-печь серии **MDBT 70+24/1040/210/16300**, которая служит для нагрева и сушки бобовых. Эта установка имеет длину нагрева ок.16,3 м и ширину ленты ок. 1 м. (Рис.4).



Рис. 4 Конвейерная СВЧ-печь серии MDBT 70+24/1040/210/16300 фирмы LINN HIGH THERM на производстве (установленная СВЧ-мощность 70 кВт, мощность нагретого воздуха 24 кВт, производительность ок. 2 000 – 3 000 кг/ч)

Для этой печи была выбрана модульная конструкция, которая позволяет позже перестроить печь без больших затрат. При этом СВЧ-генераторы (магнетроны) расположены в виде спирали вокруг продольной оси камеры цилиндра, так что будет достигнуто равномерное распределение поля. Конвейерная лента проходит через листовую обшивку пода, которая оснащена вторичными лучами (щелевыми антеннами), так что возможно дальнейшее влияние поля (концентрация). Впускные/выпускные отверстия облицованы специальным поглощающим веществом, для того чтобы не превышать установленные максимальные предельные показатели утечки излучения. В зависимости от размера отверстия встраивают дополнительные поглощающие зоны, которые способствуют восстановлению утечки излучения. В крупных отверстиях применяют дополнительный процесс поглощения. Применяемые магнетроны охлаждаются воздухом, при чем нагретый охлаждающий воздух поступает в печь и может поглощать влажность. Влажный воздух высасывают затем из печи с помощью системы откачки. Эта конвейерная СВЧ-печь может быть оснащена с СВЧ-мощностью до 100 кВт.

2. Камерная вакуумная СВЧ-сушилка серии MKST

Для **вакуумной сушки** используют запатентованную СВЧ-печь серии **MKST** (Рис. 5). Это универсальная экспериментальная установка подходит для самых различных способов применения, например, для сушки дерева, керамики, химических веществ, продуктов питания, строительных материалов, закалки армированного волокна (стеклопластика) и многих других.



Bild 5 Камерная СВЧ-сушилка серии МКСТ-9,6 200/2500

СВЧ-установка состоит из цилиндрической СВЧ-камеры с внутренним диаметром в размере 550 мм и длиной ок. 3485 мм. СВЧ-установка предназначена для работы с нормальным давлением, низким вакуумом (10 мбар) и незначительным избыточным давлением инертного газа. В наличии имеются 12 магнетронов, каждый из которых по 800 Вт/2,45 ГГц (в общем 9,6 кВт), мощность которых постоянно можно установить в диапазоне от 15% до 100%.

3 СВЧ-сушка в бочке серии MIDD

Результатом длительной совместной работы с немецкой ядерной промышленностью (Nukem) фирма LINN HIGH THERM запатентовала процесс, который выпаривает жидкие отходы с помощью СВЧ. Исходной причиной применения являлась сушка/кристаллизация легко радиоактивных солевых растворов, возвращение в прежнее состояние шламов, охлаждающей и промывочной жидкости, которые были представлены в многочисленных публикациях [Linn 2007].

Процесс СВЧ-сушки в бочке – это процесс сушки, регулируемый за счет испарения (Microwave In Drum Drying - MIDD-процесс).

Самые важные свойства и преимущества MIDD-процесса можно сравнить с системами с элементами сопротивления:

- Тепло напрямую вырабатывается в растворе через весь объем.
- При этом образуются лишь минимальные температурные градиенты и, тем самым, гарантируется по возможности однородная сушка/кристаллизация
- Длительность процесса существенно сокращена по сравнению с системами с элементами сопротивления.

Установка MIDD приводится в движение полунепрерывно. Для начала закачивается определенное количество жидких отходов в контейнер для захоронения, в то время как индуктивный нагрев (под дном бочки) предварительно нагревает его. Затем начинается СВЧ-нагрев, а жидкие отходы непрерывно добавляются. Контейнер для захоронения и СВЧ-аппликатор выдерживают до абсолютного давления размером ок. 900 мбар. Образовавшийся пар отсасывают с помощью нагнетателя. Капельный отделитель фильтрует частички пыли и захваченные капли воды из потока пара, прежде чем, он конденсируется в пластинчатый теплообменник. Конденсат задерживается в отдельном контейнере. В конце процесса прекращается подача жидких отходов и остаточная жидкость испаряется в контейнере для захоронения с адаптированной СВЧ-мощностью. После охлаждения контейнера, его заменяют новым контейнером для захоронения и цикл начинается снова.

Конденсат можно использовать дальше или перерабатывать, а твердые, сухие отходы можно захоронить в контейнер. Во время процесса обратный охладитель циркуляционный воды следит за тем, чтобы охлаждающая жидкость пластинчатого теплообменника находилась ниже определенной границы температуры для обеспечения полной конденсации.

Установка MIDD приводится в движение с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК). Наряду со всеми массовыми потоками температура, уровень наполнения, а также дифференциальное давление контролируется и измеряется, для того чтобы сделать вывод общего расхода массы на плотность жидкого слоя поверх уже высохшего материала. Этот слой имеет значащую роль для автоматизированного режима работы

установки. Все измеренные данные визуализируют и документируют с помощью отдельного самописца. Процесс визуализируют с помощью сенсорной панели, все сообщения документируются. Результатом многочисленных тестов и дальнейших разработок этого процесса фирма LINN HIGH THERM сконструировала готовый для серийного производства прототип серии MIDD (см.рис. 6). Новая установка была разработана и изготовлена для длительного промышленного применения. Установки, запрашиваемые ядерной промышленностью, соответствуют всем условиям технической безопасности, были разработаны в совместной работе с партнером немецкой ядерной промышленности.

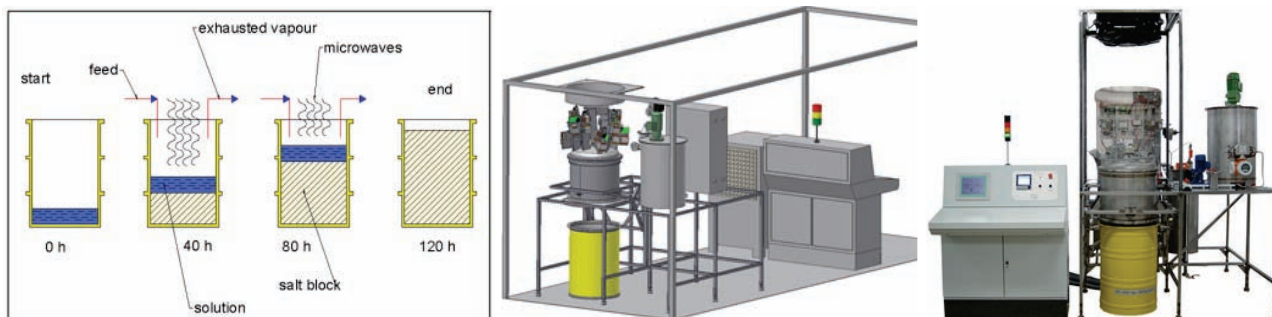


Рис. 6 В виде схемы MIDD-процесс (слева) и новый MIDD-прототип (справа)

Важным для процесса является то, чтобы по возможности достичь хороший КПД, а также однородное электромагнитное поле. Это достигается за счет девяти 900 Вт стандартных магнетронов, которые наряду с незначительными затратами на техническое обслуживание и ремонт имеют очень длительный срок службы. Все компоненты, имеющие отношение к СМИ, состоят из нержавеющей стали, тефлона или силикона. Во время разработки было также обращено внимание на то, чтобы все компоненты легко поддавались чистке, техническому обслуживанию и смене [Linn 2007].

4. Камерная СВЧ-сушилка серии МКТ

При СВЧ-сушке можно для определения необходимой СВЧ-мощности использовать основное правило, которое гласит, что для испарения 1 кг. воды в час необходимо ок. 1 кВт СВЧ-мощности. Это правило действует до тех пор, пока имеется достаточное количество начальной влажности.

Многомодовый периодический режим работы состоит из СВЧ-камеры, которая закрывается дверью. СВЧ-мощность чаще всего находится на боковых сторонах и/или на своде или на задней стене. Установки могут быть оснащены, как это представлено на рисунке, роликовой транспортной системой. В этих установках используемый материал, чаще всего, неподвижен, поэтому необходимо очень однородное СВЧ-распределение в камере, для того чтобы избежать неравномерного нагрева. Такие установки чаще всего используют для сушки или нагрева изделия, слишком большого размера, слишком тяжелого или слишком чувствительного, чтобы транспортировать их в непрерывной установке. Использование установок периодического режима работы часто является преимуществом для длительного времени сушки.

В качестве примера для **многомодового периодического режима** изображена **камерная СВЧ-сушка** с СВЧ-мощностью размером в 30 кВт и объемом камеры ок. 21 м³ (Рис.7).

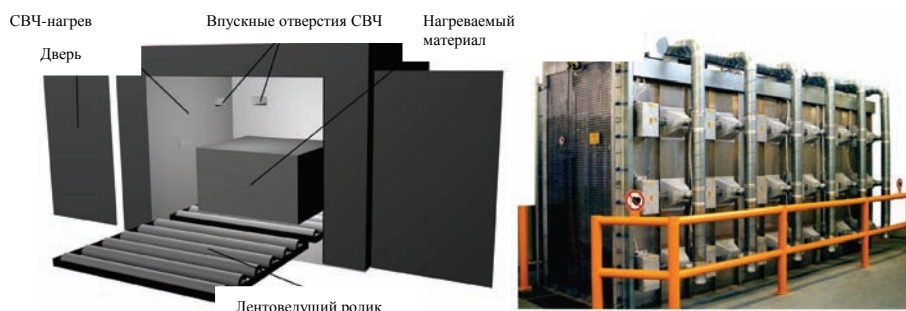


Рис. 7 Принципиальная схема установки многомодового периодического режима (слева) и камерной СВЧ-сушилки серии МКТ-30 (справа)

Камерную СВЧ-сушилку применяют для сушки промышленной керамики или шлифовальных кругов, связанных смолой, которые могут заехать в установку на металлических станинах. СВЧ-энергия вырабатывается 38 магнетронами, которые расположены по обе стороны камеры, чтобы гарантировать равномерный нагрев. Также по обе стороны находится система вентиляции, так что гарантируется однородная сушка всех частей. Для того чтобы гарантировать СВЧ-плотность, жалюзийные ворота в СВЧ-режиме прижимаются пневматически. [патент DE 101 53 944].

Другой областью применения является природное и синтетическое нагревание каучука. До сих пор для холодного времени года согласно последнему уровню техники предварительный нагрев натурального каучука основывался на применениях больших камер нагрева, в которых стандартные каучуковые пластины предварительно нагревались днями или даже неделями. Прежде всего, время предварительного нагрева в зимние месяцы занимало много времени, так как поддоны частично поставляли при низких температурах до -10 °С или ниже. Незначительная теплопроводность каучука и большой объем поддонов неизбежно приводят к длительному предварительному нагреву, так как нагрев осуществляется за счет теплого воздуха, составляющего 60 °С.

СВЧ-способ гарантирует предварительный нагрев отдельных поддонов по желанию от 0,5 до 2 часов. Преимуществом СВЧ является то, что они могут проникать в материал, а также выделять тепло во внутри каучука. В результате этого весь поддон можно нагреть однородно и быстро.

Тем самым благодаря применению двух СВЧ-установок можно избежать применение тепляков (составляющие несколько 1000 м³). Это приводит к значительному восстановлению потребностей лагеря и капиталовложению, так как больше не следует хранить каучук, например, для одной недели производства в тепляках.

5. Лабораторные СВЧ-печи серии МКЕ

В результате многообразия материалов и производственных процессов необходимо сначала проконтролировать, в какой степени можно оптимально использовать СВЧ-процесс для ткани. Для таких целей используют специальные лабораторные СВЧ-печи, с помощью которых на фирме Linn High Therm можно проводить специальные опыты..

Многомодовая установка типа МКЕ оснащена двумя магнетронами. Эти магнетроны могут приводиться в движение как отдельно так и вместе, и при мощности в 2,45 ГГц каждый из них имеет по 800 Вт. СВЧ непосредственно подводятся в цилиндрическую СВЧ-камеру. Управление СВЧ-мощностью осуществляется за счет соответствующего потенциометра. Для теплоизоляции используют квадратобразный короб из изоляционных волокнистых плит с полезным объемом в один литр. Измерение температуры поверхности пробы происходит бесконтактно с помощью пирометра. Запись анализа этих данных осуществляется за счет программного обеспечения DASyLab. Установка разработана для применения в лаборатории, прежде всего, в диапазоне низкой температуры. Благодаря этой установке можно получить первые общие сведения о поведении СВЧ различных материалов (Рис. 8).



Рис. 8 Лабораторная СВЧ-печь серии МКЕ-1,6

6. СВЧ-печи серии МЕК и МФН

В качестве специальных установок для нагрева жидких, высоковязких материалов используют проточные СВЧ-установки. Жидкость протекает в СВЧ прозрачной тefлоновой трубе (труба из PTFE) через зону нагрева и в результате этого нагревается за счет СВЧ. При этом, жидкость можно однородно нагреть по общему объему без соприкосновения со стенками нагревательной СВЧ-камеры (см. Рис. 9).



Рис. 9 Проточные СВЧ-установки типа MEK (слева или в середине) и MFH (справа)

Промышленным применением является предварительный нагрев литьевой смолы [патент WO 94/26077]. При этом производят пластмассовые изоляторы для установок высокого напряжения, в результате чего литьевая смола загружается в металлическую форму. Время заковки смолы в форме, так называемое время желатинизации, определяет на сколько высокой является производительность определенной установки. Для того чтобы сократить время желатинизации и, тем самым, повысить производительность возможен предварительный нагрев литьевой смолы до 50% массовой доли минерального наполнения Al_2O_3 и SiO_2 , прежде чем она попадет в форму. В качестве опции проявил себя нагрев до ок. 100 °С, причем удалось сократить время желатинизации до 40 %. Для того получить этот эффект следует равномерно нагреть литьевую смолу до определенной температуры. Если это не так, то смола при сокращенном времени желатинизации не сможет полностью затвердеть. С применением традиционных нагревателей, которые нагревают металлический трубопровод, через который протекает смола, было невозможно достичь равномерный нагрев, так как лишь те части смолы, которые вступают в контакт с трубой, нагреваются.

Во время СВЧ-нагрева литьевая смола протекает через прозрачную СВЧ-трубу из PTFE. Тем самым, СВЧ могут снаружи сквозь трубу нагреть смолу. Так как СВЧ могут проникнуть в литьевую смолу, весь объем смолы нагревают равномерно.

Наряду с сокращением времени желатинизации СВЧ-нагрев принес еще и другие преимущества, в результате этого удалось повысить цветоскойкость и прочность.

В качестве другой области применения можно упомянуть закалку прутков стеклопластиков. Прутки из стеклопластиков изготавливают в процессе пултрузии и используют, например, в качестве сердечников для оптического кабеля удилища. Импрегнированные искусственной смолой стекловолокна должны затвердеть, для того чтобы они получили свою предельную плотность. При этом особенно важно полностью прокалить прутки, чтобы получить оптимальные свойства изделия. С применением традиционных методов это было не всегда гарантировано, так как сердечник прутков из-за плохой теплопроводности местами не полностью затвердевал.

Благодаря СВЧ-нагреву удалось устранить эту проблему, так как СВЧ накаливает прутки изнутри, так что было гарантировано их затрерждение полностью. Применяемые для этого СВЧ-установки очень компактные и достигают необходимый нагрев в протоке длины нагрева ок. 30 см. При производстве кронштейна для кабелей бортового проволочного кольца из стекловолокна были, например, заменены шестиметровые трубчатые печи традиционной конструкции.

7. Вращающаяся трубчатая СВЧ-сушилка серии MDRT

В качестве специальной установки для порошка и гранулята используют **вращающуюся трубчатую СВЧ-печь** типа MDRT [патент DE 198 28 843]. Материал подается во вращающуюся трубу из PTFE и кварцевого стекла и при этом нагревается за счет СВЧ. Установка может работать как в вакуумной среде так и в среде

защитного газа. Вращающуюся трубчатую СВЧ-установку можно использовать для термообработки и напыления гранулятов, порошка и волокон. В этой установке материал также не вступает в контакт с зоной нагрева (Рис. 10).



Рис. 10 Вращающаяся трубчатая СВЧ-сушилка типа MDRT (СВЧ-мощность 2,7 кВт или 5,4 кВт)

8. Гибридные СВЧ-печи серии МНТ

В этой установке речь идет о **гибридной СВЧ-печи**, которая рассчитана на **применение высоких температур**. Нагрев может проводиться нагревом сопротивления или СВЧ, или в комбинации. СВЧ-камера сконструирована в прямоугольной форме и состоит из нержавеющей стали. Термоизоляция состоит из 3 или 4 слоев пластин керамической ваты и размещена внутри стенок СВЧ-камеры. Изоляция гибридной СВЧ-печи рассчитана на максимально 1800 °С. Она оснащена 8 магнетронами, которые располагают частотой 2,45 Гц по 900 Вт мощностью нагрева и могут быть подключены отдельно. Общая имеющаяся в наличии СВЧ-мощность составляет тем самым 7,2 кВт.

Магнетроны закреплены непосредственно на СВЧ-камере, так что осуществляется прямое излучение СВЧ в камеру. По два магнетрона находятся на обратной стороне, по обе стороны боковых сторон и на поду СВЧ-камеры. Впуск СВЧ расположен смещено, для того чтобы улучшить равномерность СВЧ-поля. Возможны варианты с температурой применения до 1400 °С, 1600 °С и 1800 °С. Управление общей СВЧ-мощностью может выборочно осуществляться с помощью потенциометра или программного регулятора. Для традиционного нагрева используют 6 нагревательных элементов сопротивления, например, из силицида молибдена с общей мощностью в 9 кВт (Рис. 11).



Рис. 11 Расположение магнетронов в СВЧ-камере (слева) и гибридной СВЧ-печи типа МНТ-1600 (справа)

Гибридный СВЧ-нагрев комбинируют с традиционными способами нагрева. Общеизвестными видами нагрева являются нагрев горячим воздухом и нагрев сопротивления, но также возможны и другие виды, как например, газовая топка или инфракрасный нагрев.

Гибридный СВЧ-нагрев с дополнительным нагревом горячего воздуха достигает высокую общепринятую температурную однородность благодаря рециркуляции воздуха в камере. Необходима изоляция, чтобы защитить металлическую СВЧ-камеру и сократить потери тепла. Горячий воздух, чаще всего, используют при средних температурах, также как он, например, необходим при удалении органического вяжущего в керамических деталях.

При гибридном СВЧ-нагреве с дополнительным нагревом сопротивления используют элементы нагрева, чтобы достичь высокую предварительную температуру нагрева, например, для спекания. И здесь также необходима изоляция камеры. С дополнительным нагревом сопротивления можно предварительно нагреть материалы, которые лишь при высоких температурах поглощают СВЧ-энергию. Поэтому в диапазоне низкой температуры происходит почти традиционный нагрев с нагревом горячего воздуха и нагревом сопротивления, а СВЧ вносит свой вклад лишь при более высоких температурах. Дополнительное проникновение горячего

воздуха может также иметь преимущество и в процессах с применением низкой температуры, например, во время сушки, чтобы ускорить отвод влажности.

Областями применения обеих гибридных нагревов являются в основном удаление органического вяжущего и спекание керамики порошкового металла.

Для области применения высоких температур фирма LINN HIGH THERM GmbH производит специальные конвейерные гибридные СВЧ-печи для вторичного использования углеродного волокна, отходов производства и деталей, снятых с производства (Рис.12).



Рис. 12 Вторичное использование углеродных волокон (слева и справа) и гибридных конвейерных СВЧ-печей (середина)

9. Моделирование нагревательных СВЧ-установок

За последние два десятилетия следует отметить большой прогресс в развитии и применении цифровых методов для вычисления электростатического распределения поля, а также распределения температуры. В связи с параллельно к этому стремительному развитию вычислительной техники можно сегодня вычислить электромагнитные и термические поля в технической постановке задач, также в сложной геометрии и неядерном материале для трехмерных случаев.

Тема относительно моделирования установок СВЧ-нагрева уже часто рассматривалась в литературе. [На 2000, Im 2007, Feh 2009, IMW 2011]. Однако, цифровое моделирование СВЧ-аппликаторов все еще является предметом многих трудов, так как результаты других авторов нельзя напрямую перенести на исследуемые конфигурации и, тем самым, они почти не применяются.

Во время разработки установок СВЧ-нагрева решающим является распределение электромагнитного поля. Однако, электромагнитное моделирование не достаточно для планирования установок СВЧ-нагрева.

В СВЧ-нагреве наряду с рассеянием электромагнитной энергии также термический процесс играет важную роль. Для того чтобы точно определить ход нагрева, следует принять во внимание различные механизмы теплообмена, а также образовавшиеся при этом эффекты.

Что касается темы теплообмена, то существует большое количество замечательной специальной литературы, которая затрагивает темы известных математических методов механизмов теплообмена. Из разнообразия книг следует упомянуть книги Метаксаса [Met 1996], а также Крамера и Мюльбаура [KM 2002]. Специально теме теплообмена СВЧ-нагрева посвящены труды Метаксаса и Мередита [MM 1993], Чао и Турнера [ZT 1996] и Фелера [Feh 2009].

В литературе можно найти как электромагнитные так и зависящие от температуры свойства, рассмотренных материалов [Dan 2001]. Измерения свойств материала, зависящих от температуры, являются затратными и противоречивыми [Ni 2001]. Они представляют большую научную и техническую проблему, что в настоящее время еще было решено неудовлетворительным путем [Pohl 1996].

Примером текущего контроля расчета по методу конечных элементов следует рассматривать через эксперимент цилиндрического многомодового аппликатора с нагруженным сажей кордиеритовый дизельный сажевый фильтр. Для транспортировки СВЧ-мощности от одного магнетрона в аппликатор применяется открытый волновод. При этом виде подвода энергии тангенциально расположенный, питающий

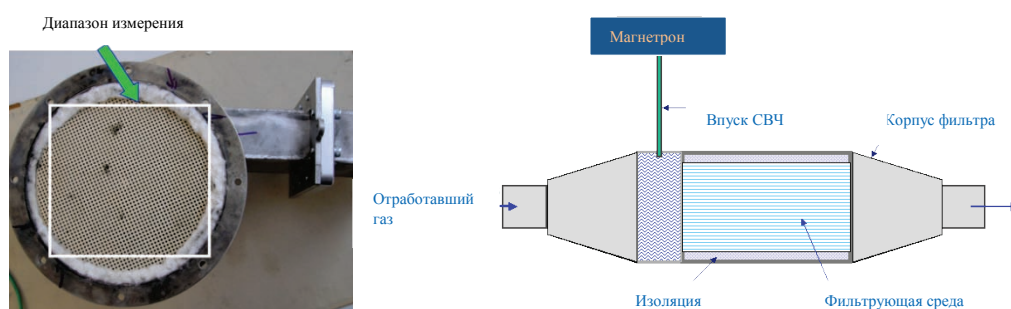
прямоугольный волновод вливается в цилиндрический многомодовый аппликатор. Корпус аппликатора состоит из металлического цилиндра (диаметр= 155 мм, длина= 162 мм) с восемью толстыми стальными стенками. Металлические решетки служат щитом нежелательной СВЧ утечки излучения.

Цилиндрический фильтр производится с диаметром 143,76 мм и длиной 152,4 мм, весом 1255,5 гр. В качестве фильтрующего материала выбирают кордиерит ($Mg_2Al_4Si_5O_{18}$).

Загрузка сажи составляет ок. 18,4 гр. Дизельный сажевый фильтр, загруженный сажей, имеет вес 1273,9 гр. Сажа неравномерно распределена в кордиеритовом дизельном сажевом фильтре. Из макроскопической перспективы кордиеритовый дизельный сажевый фильтр с сажей представляет неоднородную среду с шестью заметными однородными областями.

Другие детали, необходимые для дальнейшего моделирования и физические параметры подробно представлены в публикациях [Im 2007 и IMW 2011].

На рисунках 13-15 видны испытательный стенд и результаты экспериментального текущего контроля 3D моделирования цилиндрического многомодового аппликатора [IMW 2011].



Билд 13 Испытательный стенд (задняя сторона) и экспериментальная установка для экспериментального текущего контроля расчета по методу конечных элементов 3D моделирования [IMW 2011]

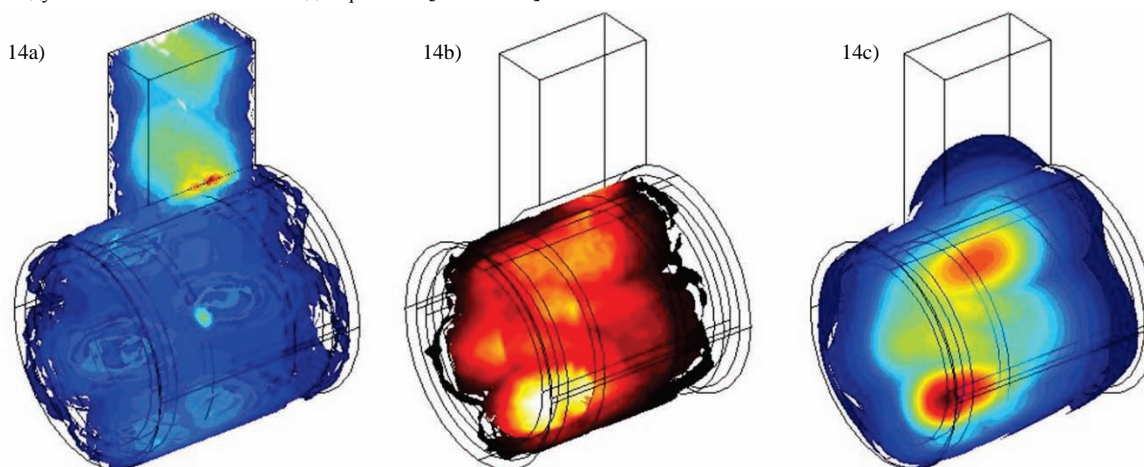


Рис. 14 Результаты расчета по методу конечных элементов моделирования: 14а) электрическое поле, 14б) плотность источника нагрева и 14с) распределение температуры [IMW 2011]

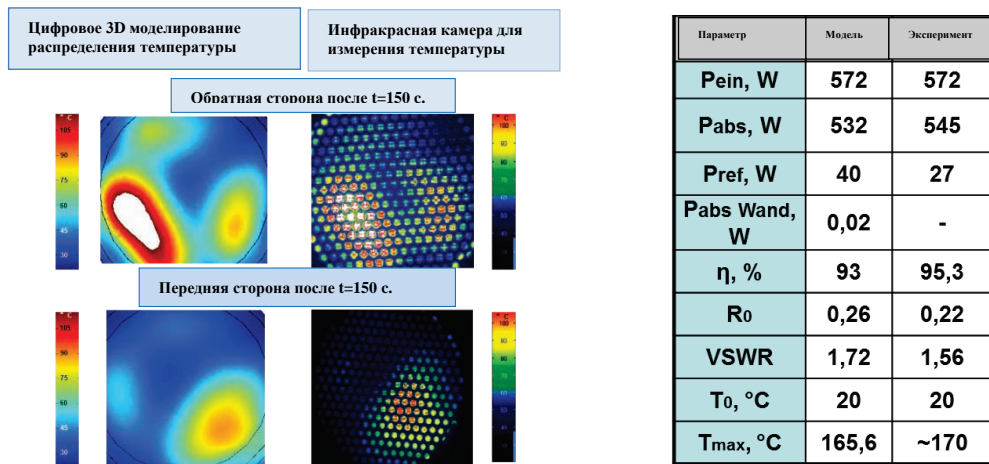


Рис. 15 Результаты экспериментального текущего контроля моделирования [IMW 2011]

На рисунках 13 – 15 видны очень хорошие качественные и количественные соответствия, вычисленные цифровым путем и измеренные экспериментальным путем распределения температурного поля.

Отражающая мощность определяется уравнением (8)

$$P_{ref} = P_{ein} - P_{abs} \quad (8)$$

разницей между наклонной мощностью P_{ein} и абсорбирующей мощностью P_{abs} .

КПД определяется за счет известного соотношения согласно уравнению (9).

$$\eta = \frac{P_{abs}}{P_{ein}} = \frac{P_{ein} - P_{ref}}{P_{ein}} = 1 - \frac{P_{ref}}{P_{ein}} \quad (9)$$

Согласно уравнению (10) можно определить предел отражающего фактора.

$$R_0 = \sqrt{\frac{P_{ref}}{P_{ein}}} = \sqrt{1 - \frac{P_{abs}}{P_{ein}}} = \sqrt{1 - \eta} \quad (10)$$

В заключении согласно уравнению (11) вычисляется так называемый коэффициент стоячей волны КСВН (англ. *Voltage Standing Wave Ratio*) [Kum 1986].

$$VSWR = \frac{1 + R_0}{1 - R_0} \quad (11)$$

Полученные результаты экспериментального текущего контроля можно установить нижеследующим путем:

- Вычисленные цифровым и экспериментальным путем распределения температурного поля очень хорошо совпадают качественно и количественно.
- Проверенная экспериментально лабораторная СВЧ-установка является энергоэффективной, а фактический КПД составляет ок.. 95,3 %.
- Распределение поля при использовании одного магнетрона остается, однако, неоднородным. (см. рис.14 и 15).
- Конечно очевидно, что план фирмы LINN HIGH THERM с многими используемыми магнетронами приносит лучшее распределение поля и, в результате этого обуславливает однородный нагрев различных материалов (см. сверху **конвейерные СВЧ-печи серии MDBT**, страницы 4-6).
- Модели расчета по методу конечных элементов 3D дают соответствующие практике и более надежные результаты.
- Они в общем дают возможность визуализировать образование местных гиперссылки и оптимизировать быстрее благодаря быстрому приспособлению дизайна к установкам.

- Модели 3D установок СВЧ-нагрева можно использовать для автоматизированной оптимизации промышленных установок СВЧ-нагрева.
- Результаты моделирования следует в любом случае проверить экспериментально.

10. Вывод

Эта статья дает обзор о инновационных установках СВЧ-нагрева для применения в диапазоне низких и высоких температур для различных промышленных областей, которые были разработаны фирмой LINN HIGH THERM GmbH, основываясь на многолетний опыт, для лабораторий и промышленного производства. Эти установки применяют успешно во всем мире. На конкретных примерах показаны эффективность и потенциал экономии в установках СВЧ-нагрева, а также вопросы обсуждаемые относительно моделирования компьютерного расчета по методу конечных элементов 3D промышленных установок СВЧ-нагрева.

11. Благодарность

Авторы хотят выразить сердечную благодарность всем клиентам и партнерам фирмы LINN HIGH THERM, которые благодаря своей многолетней плодотворной работе и опыту внесли свой вклад в разработку многих инновационных высокоэффективных СВЧ-установок.

12. Литература

- [Dan 2001] Daneke, N. Zur Anlagentechnik von multimoden Mikrowellen Sinteranlagen – von der Wellenausbreitung in Hohlleiter bis zum erwärmten Gut. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2001
- [Ha 2000] Haala, J. Analyse von Mikrowellenheizprozessen mittels selbstkonsistenter finiter Integrationsverfahren. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2000
- [Feh 2009] Feher, L. Energy Efficient Microwave Systems, Springer Verlag, 2009
- [Im 2007] Imenokhoyev, I.: Computergestützte 3D-Modellierung von Mikrowellen-Erwärmungsanlagen. Berichte aus der Verfahrenstechnik. Aachen: Shaker Verlag, zugl. Freiberg, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2007 – ISBN 978-3-8322-6604-2
- [IMW 2011] Imenokhoyev, I.; Matthes, A.; Walter, G. Numerical 3D-FEM-Simulation made by COMSOL Multiphysics of a Microwave Assisted Cleaning System for a Diesel Sooty Particle Filter and its Experimental Validation. In Proceeding Book, International COMSOL Multiphysics Conference, Ludwigsburg 2011, October 26 – 28
- [KM 2002] Praxishandbuch Thermoprozess-Technik / Carl Kramer/Alfred Mühlbauer (Hrsg.) 1. Grundlagen und Verfahren. Essen: Vulkan-Verl., 2002 – ISBN 3-8027-2922-6
- [Kum 1986] Kummer, M. Grundlagen der Mikrowellentechnik. 1. Auflage, Berlin: Technik, 1986 – ISBN 3-341-00088-7
- [Linn 2007] Möller, M. und Waitz, R. Mikrowellen In-Fass Trocknung Effektives Eindampfen von radioaktiven Flüssigabfällen. In atw 52. Jg. (2007) Heft 12 – Dezember, S. 807-810, Internationale Zeitschrift für Kernenergie
- [Linn 2011] Wübben, P. und Kintsel, N. Sparsam erwärmen mit Mikrowellen. In VDMA-Nachrichten Mai/2011 VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main (Germany)
- [Linn 2012] DKG-Fachtagung “Moderne Verfahren in der Trocknungstechnik“, 14./15. Februar 2012, Eschenfelden
- [Mer 1998] Meredith, R. Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating. London: The Institution of Electrical Engineers, 1998 – ISBN 0852969163
- [Met 1996] Metaxas, A.C. Foundations of electroheat. Chichester (u.a.): Wiley, 1996 – ISBN 0-471-95644-9
- [MM 1983] Metaxas, A.C.; Meredith, R.J.: Industrial Microwave Heating. Power Engineering Series. London: Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the JEE, London, 1983, reprinted 1993
- [Ni 2001] Nimtz, G. Mikrowellen: Einführung in Theorie und Anwendungen. München; Bad Kissingen (u.a.): Richard Pflaum Verlag GmbH & Co KG, 2001 – ISBN 3-7905-0849-7
- [Pohl 1996] Pohl, V. Messung von temperaturabhängigen Permittivitäten im Mikrowellenbereich. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 585. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996 – ISBN 3-18-358508-1
- [Sim 1989] Simonyi, K. Theoretische Elektrotechnik. 9., durchges. Aufl., Berlin: Dt. Verl. d. Wiss., 1989 – ISBN 3-326-00045-6

[Wiki 2012] http://en.wikipedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_edit.svg, Stand 06.08.2012

[ZT 1996] Zhao, H.; Turner I. W. „An Analysis of the Finite-Difference Time-Domain Method for Modelling the Microwave Heating of Dielectric Materials within a Three-Dimensional Cavity System“. In: Journal Microwave Power and Electromagn. Energy, Vol. 31, Nr. 4 (1996) , S. 199-214