

Безусловное преимущество дифференциального метода состоит в том, что при его использовании погрешность измерения не зависит от измеряемого расхода и не может превышать максимальную (по модулю) погрешность расходомеров (поскольку модуль среднего арифметического двух чисел не может превышать модуль большего из них). В то же время погрешность измерения стандартным методом зависит от измеряемых расходов (а точнее от их соотношения) и стремится к бесконечности с уменьшением степени открытости системы. Все это определяет сферу предпочтительного применения дифференциального метода. Если первоочередным требованием пользователя являются измерения разности расходов с погрешностью в пределах погрешностей измеряемых приборов, то следует остановиться на дифференциальном методе.

Однако при выполнении определенных условий стандартный метод может обеспечить лучший результат по сравнению с дифференциальным. Эти условия сводятся к следующему. Во-первых, необходимо выбирать пары расходомеров с погрешностями одного и того же знака. Во-вторых, в подающий трубопровод следует устанавливать расходомер с меньшей (по модулю) погрешностью, а в обратный — с

большой. Если известна (хотя бы приблизительно) степень с открытости системы, то надо стремиться к тому, чтобы отношение погрешностей выбираемых расходомеров $p = p_1/p_2$ было больше значения c , определяемого из графика рис. 3 (оптимальный случай — приближалось к c). Представляется, что эти условия нетрудно выполнить. И если эта задача будет решена, то целесообразно использовать малозатратный (по сравнению с дифференциальным) стандартный метод измерения разности расходов теплоносителя.

Л и т е р а т у р а

1. Лупей А. Г. О правилах учета тепловой энергии и измерения разности масс // Коммерческий учет энергоносителей: Труды 22-й науч.-практ. конф. СПб., 2005. С. 181—190.

2. Лупей А. Г. Сравнение результатов непосредственных и косвенных измерений количества воды, потребляемой на нужды горячего водоснабжения // Коммерческий учет энергоносителей: Труды 13-й науч.-практ. конф. СПб., 2001. С. 153—161.

Дата принятия 01.12.2011 г.

621.385.6.6

Исследование возможности плавления базальта с помощью СВЧ-энергии

А. В. МАМОНТОВ, В. Н. НЕФЕДОВ, А. Л. ТУВ, Д. А. ЯЗЫКОВ

Московский государственный институт электроники и математики,
Москва, Россия, e-mail: lmis@miem.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований применения микроволновой энергии для термообработки базальта. Приведены численные результаты и график изменения температуры образца базальта. Показано, что микроволновый нагрев имеет ряд преимуществ перед традиционными методами плавления базальта с использованием сжигаемого топлива.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, теплоизоляционный материал, распределение температуры, волновод, базальт, плавление, термообработка.

The experimental research results of basalt thermal treatment with the microwave electromagnetic energy application are presented. The numerical results as well as a diagram of basalt temperature change are presented. It is shown that microwave treatment has a number of advantages over the traditional ways of basalt melting with the use of burnable fuel.

Key words: microwave radiation, heat-insulating material, temperature distribution, waveguide, basalt, melting, thermal treatment.

В условиях современного производства все большее внимание уделяется поиску новых технологических решений, соответствующих требованиям экологической чистоты, сбережения энергетических ресурсов с одновременным повышением эффективности технологических процессов. Разрабатываются новые материалы, отвечающие современным требованиям, производство которых требует внедрения новых технологических процессов, так как традиционные технологии в этом случае либо оказываются малоэффективными, либо вовсе не способными привести к необходимому результату. Ниже рассмотрен пример практического изучения возможности применения современных технологий для обработки материалов.

Предпосылкой для проведения данного исследования явилась необходимость модернизации технологии произ-

водства базальтового утеплителя на одном из российских предприятий. Существующий технологический процесс включает плавление базальтового гравия, получение сверхтонкого штапельного волокна из расплава базальта с его одновременной пропиткой связующим веществом, формование полотна утеплителя с последующим отверждением связующего [1, 2]. Наиболее затратным и трудоемким этапом технологического цикла является именно процесс плавления базальта, поскольку обладает рядом недостатков:

длительный этап запуска плавильной печи (несколько дней);

применение кокса в качестве топлива для плавильной печи (в условиях данного технологического процесса);

необходимость использования для плавления щебня базальта только определенных фракций;

вынужденная холостая работа печи для поддержания температуры при технических сбоях на последующих после плавления технологических этапах (формование, отверждение).

Существует и еще несколько менее значимых по сравнению с приведенными выше недостатков данного способа плавления базальта. Для их устранения были проведены экспериментальные исследования по оценке возможности применения энергии электромагнитных волн сверхвысокой частоты (СВЧ) в процессе плавки базальтового сырья.

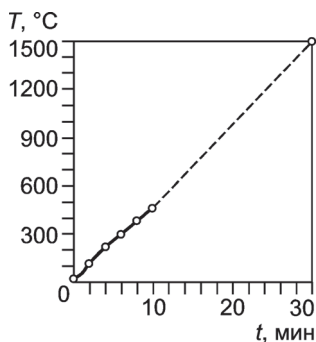
Выбор данного способа нагрева обоснован рядом преимуществ использования в качестве источника тепла СВЧ-энергии по сравнению с сжиганием различных видов топлива: равномерность прогрева материала значительной толщины вне зависимости от его теплопроводности, высокий коэффициент преобразования СВЧ-энергии в тепловую (до 100 %), безынерционность и экологическая чистота процесса и др.

Исследовали образец кондопожского базальта массой около 700 г и объемом 400 см³, который нагревали в СВЧ-камере, питаемой одним источником СВЧ-мощностью 600 Вт. С целью снижения теплоотдачи в окружающее пространство образец помещали в теплоизоляционную оболочку из радиопрозрачного материала с низкой теплопроводностью. Для контроля температуры в образце было проделано несквозное отверстие диаметром 2 мм, заканчивавшееся приблизительно в геометрическом центре объема образца. Такое расположение отверстия обусловлено объемным характером нагрева при воздействии СВЧ-излучения и ожидаемым максимумом температуры именно в середине нагреваемого образца.

Температуру измеряли при помощи термпарного датчика в течение нескольких секунд после извлечения базальта из камеры нагрева. К сожалению, возможности используемого измерительного оборудования были ограничены температурой 500 °С. Результаты измерений представлены в таблице.

t , мин	0	2	4	6	8	10
T , °С	22	110	200	300	380	450

После проведения последнего измерения, указанного в таблице, образец был помещен в камеру, где подвергся непрерывному нагреву до появления видимого даже сквозь слой теплоизоляционного материала яркого свечения. Время нагрева составило 20 мин.



Зависимость температуры внутри образца базальта от времени нагрева в СВЧ-камере

После этого образец был извлечен из камеры и удален слой теплоизоляционного материала. На образце образовалась глубокая трещина, разделившая его на две части. Эта трещина явилась следствием сильного теплового расширения внутренней области образца по отношению к внешней, что наглядно демонстрирует именно объемный характер нагрева при СВЧ-термообработке.

Далее образец был разделен на две части по образовавшейся трещине, после чего расплавленная внутренняя область образца вытянулась в стекловидные нити разной толщины, что свидетельствует о достижении необходимой для этого температуры. Приняв во внимание текучесть расплава и его яркое свечение в первый момент времени после разделения, температуру внутренней области можно оценить приблизительно в 1500 °С. Результаты проведенных экспериментальных исследований в виде графика зависимости температуры нагрева от времени воздействия СВЧ-мощности представлены на рисунке. Сплошная линия, проведенная через экспериментально полученные точки, практически совпадает по своему характеру с экстраполированным участком, изображенным в виде пунктирной линии. Общий вид графика демонстрирует практически линейную зависимость роста температуры внутри образца со временем нагрева в СВЧ-камере.

Кроме того, полученные данные (масса и объем образца, время нагрева до конечной температуры, мощность СВЧ-источника камеры) позволили оценить энергетические затраты, приведенные как к объему нагреваемого материала 1,5 МВт/м³, так и к его массе 0,8 (кВт · ч)/кг.

Обобщив результаты измерений, можно вполне обоснованно сделать заключение о практической перспективе применения СВЧ-нагрева в технологии плавления базальта. При этом данная технология будет обладать несомненными преимуществами по сравнению с традиционно используемыми в настоящее время: быстрым запуском процесса плавления; отсутствием сгораемого топлива и, как следствие, резким снижением вредных выбросов в атмосферу; возможностью плавления практически любых фракций базальтового щебня (от сопутствующих до 150 мм и более); возможностью получения очень высокой температуры для обеспечения необходимой текучести расплава; «выгодными» энергетическими характеристиками, обусловленными адресным характером СВЧ-нагрева; отсутствием транспорта для топлива (к примеру, трубопроводов для газа) и затрат на его обслуживание и т. д.

Однако для реализации такого процесса на практике требуется соответствующее метрологическое обеспечение, позволяющее контролировать температуру расплава в реальном времени. Термпары, применяемые для этого при традиционном способе плавления, малоприменимы в случае СВЧ-нагрева. Наиболее удачным решением в этом случае могут стать пирометры, обладающие необходимым диапазоном измеряемых температур. Конструктивно пирометр может быть размещен около открытого окошка на верхней стенке плавильной камеры над расплавом. При этом для предотвращения возможных утечек СВЧ-мощности в окружающее пространство окошко может быть выполнено в виде запредельного волновода в форме трубы круглого сечения. Длину и внутренний диаметр трубы рассчитывают исходя из требуемого затухания для СВЧ-волны и показателя визирования пирометра.

Л и т е р а т у р а

1. Уваров А. С. Негорючий экологически чистый базальт-волокнистый утеплитель // Строительные материалы. 1997. № 4. С. 26—27.

2. Базальтовая вата: история и современность: Сборник материалов. Пермь: ИИЕТ РАН, 2003.

Дата принятия 02.04.2012 г.