

Антонов Г.Г., Ковшечников В.Б.

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, РФ

Определение теплофизических характеристик установки плазменного плавления и деструкции материалов

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований, выполненных на электротермической установке косвенного действия (плавители) объемом 0,056 м³. Приведены данные по коэффициенту теплоотдачи между рабочим газом и внутренней стенкой плавителя. Источником нагрева служили галогенные лампы мощностью 2 кВт и двухструйный плазмотрон мощностью 6 кВт.

Ключевые слова: плавитель, плазмотрон, коэффициент теплоотдачи.

Розглянуто результати експериментальних досліджень, виконаних на електротермічній установці непрямої дії (плавители) об'ємом 0,056 м³. Наведено дані щодо коефіцієнту тепловіддачі між робочим газом та внутрішньою стінкою плавителя. Джерелом нагріву були галогенні лампи потужністю 2 кВт та двоструменевий плазмотрон потужністю 6 кВт.

Ключові слова: плавитель, плазмотрон, коефіцієнт тепловіддачі.

По способу передачи энергии к нагреваемому телу электротермическая установка является установкой косвенного действия. Для обоснованного качественного планирования экспериментов по плавлению и (или) деструкции материалов с использованием дуговой плазмы необходима информация по теплофизическим характеристикам плавителя, прежде всего величине теплопотерь, динамике изменения температуры и распределению изотерм по объему, эффективности передачи энергии от плазмы к нагрузке и т.д. С этой целью проводились предварительные исследования на установке «плазменный плавитель». В качестве источника тепла использовались плазмотрон и галогенные лампы. Эквивалентом загрузки служил бытовой гравий.

На рис.1 приведена схема электротермической установки (ЭТУ) объемом 0,056 м³. В качестве нагревателя газа используется двухструйный плазмотрон переменного тока мощностью 6 кВт, который может размещаться под углом или по оси симметрии полусферической камеры ЭТУ (показано пунктирной стрелкой).

Для теплового КПД плазмотронов данной конструкции получено следующее соотношение [1]:

$$\eta = [1 + 1,06 \cdot 10^{-3} I^{0,48} / G^{0,59}]^{-1},$$

где I — сила тока, А; G — расхода газа, кг/с.

Формула справедлива в диапазоне изменения расхода газа (воздуха) 10⁻³–10⁻² кг/с и действующего значения тока 2–20 А при $\eta = 0,94$.

В систему измерений входили термопары хромель-копель и медь-константан, датчики замера расхода газа через плазмотрон, тока и напряжения на дуге [2]. При определении положения термопары, измеряющей температуру газа, были проведены расчеты по втеканию газа в данный объем. Их проводили в осесимметричной постановке с изотермическими условиями на стенке. По данным расчета показание термопары не должны отличаться от среднemasсовой температуры газа в объеме более чем на 17 %.

Плазменная струя, втекающая в реактор, является источником излучения и нагретого газа. По оценкам различных исследователей, на

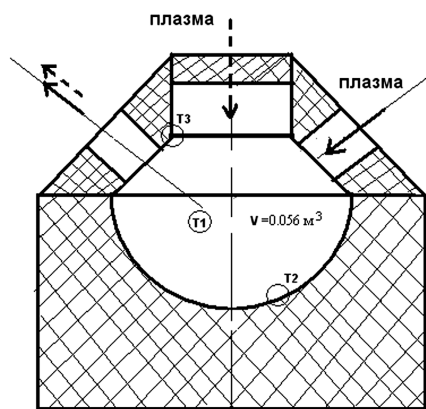


Рис.1. Электротермическая установка с плазменным нагревом. Термопары для замера температуры: T1 — газа; T2 — на сферической поверхности; T3 — в месте соединения цилиндрической и конической поверхностей плавителя.

долю излучения приходится 5–20 % энергии плазменной струи [3]. Поэтому в первом приближении влияние излучения можно не учитывать. Однако с целью определения особенностей конфигурации внутренней поверхности реактора были проведены эксперименты с использованием двух галогенных ламп мощностью по 1 кВт. Лампы подвешивались на тоководах в центре реактора. При нагреве лампами температура газа всюду меньше температуры стенок. Его нагревание происходит за счет теплопроводности и конвекции, вызванной градиентом температуры внутри реактора.

На рис.2 приведено значение интегрального коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{ср}$) от стенок к газу; сплошной линией проведена аппроксимация расчетных точек полиномом четвертой степени.

Коэффициент теплоотдачи вычислялся из следующего соотношения:

$$\alpha_{н\delta} \approx \frac{\dot{n}_v \rho V}{S(T_w - T)} \frac{dT}{dt},$$

где c_v – удельная теплоемкость, (Дж/кг)/К; ρ – плотность газа, кг/м³; V – объем реактора, м³; S – площадь внутренней поверхности реактора, м²; T_w – температура внутренней поверхности реактора, К; T – температура газа, К.

Из рис.2 видно, что наибольшее значение коэффициента теплоотдачи имеет в начальный период нагрева. В этот период на долю конвективного процесса приходится около 26 % подведенной энергии. Примерно к 90-й минуте устанавливается регулярный режим теплообмена, в котором доля конвективного процесса составляет 5–6 %. Сравнивая полученные данные по теплоотдаче естественной конвекцией с ре-

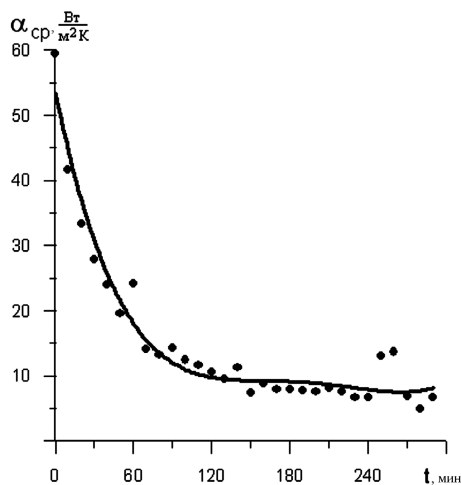


Рис.2. Изменение коэффициента теплоотдачи при нагреве лампами.

зультатами других исследователей, можно отметить, что значения этих величин одного порядка [4].

Измерения температуры показали, что наиболее теплонпряженная область находится у горловины – места перехода конической части реактора в цилиндрическую. Подобная ситуация сохраняется и при работе плазмотрона с той только разницей, что значение температуры зависит от расположения плазмотрона по отношению к камере. При вертикальном расположении плазмотрона она на 200 градусов выше. Это вызвано тем, что в данной конструкции, для вертикального расположения плазмотрона, горловина ближе находится ко входу плазменной струи, истекающей из плазмотрона.

По данным замера температуры определяли коэффициент теплоотдачи. Его значение рассчитывали из следующего соотношения:

$$\alpha_{н\delta} \approx \frac{H_{in} Q_{in} - QH - V d\rho E/dt}{S(T - T_w)}.$$

где H_{in} , H – энтальпия входящего и выходящего из реактора газов, Дж/кг; Q_{in} , Q – расход газа на входе и выходе реактора, кг/с; E – внутренняя энергия газов в объеме реактора, Дж/кг.

Интегральное значение коэффициента теплоотдачи от газа к стенкам реактора при различных расположениях плазмотрона приведено на рис.3. Интенсивнее процесс теплоотдачи наблюдается при вертикальном расположении плазмотрона. Это связано с тем, что при боковом расположении выходное отверстие реактора находится напротив плазмотрона и большая (по сравнению с вертикальным расположением) часть энергии теряется с отходящими газами. Тем не менее, с нагревом стенок реактора и выходом на регулярный ре-

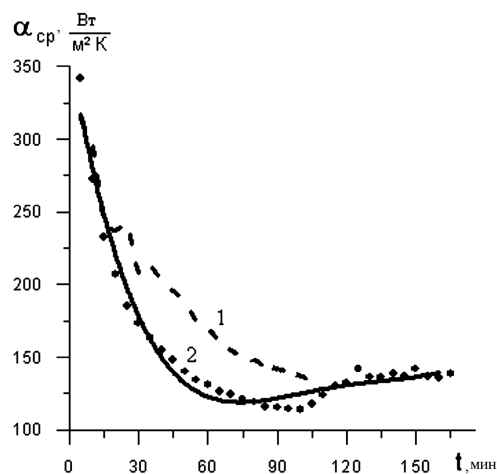


Рис.3. Изменение теплоотдачи при вертикальном (1) и боковом (2) расположениях плазмотрона.

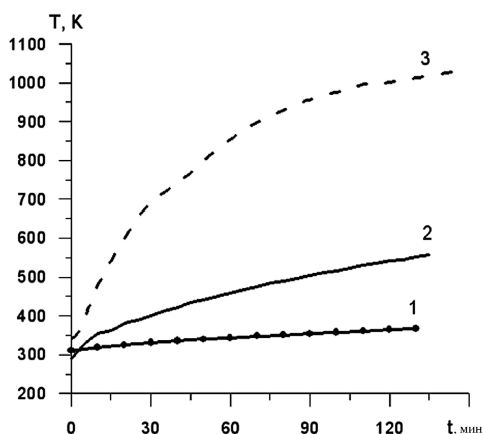


Рис.4. Временные зависимости температуры газа в плавителе от источника энергии: 1 — лампы 2 кВт; 2 — плазматрон 6 кВт; 3 — плазматрон 35 кВт.

жим средний коэффициент теплоотдачи становится приблизительно таким же и не зависит от расположения плазматрона.

В дальнейшем были проведены измерения температур при заполненном гравием реакторе. Если обозначить через β долю объема, занимаемую обрабатываемым образцом по отношению к объему сферической части реактора, то β принимала значения 0; 0,8; 1,2. При значениях загрузки $\beta < 0,8$ средняя температура газа в объеме реактора практически не зависит от величины загрузки, а также от расположения плазматрона (вертикальное или боковое). Это можно объяснить тем, что при использовании плазматрона данной мощности любое заметное струйное течение в объеме отсутствует.

На рис.4 представлен сводный график зависимости изменения температуры газа в плавителе для различных источников нагрева. С целью более интенсивного нагрева был использован плазматрон подобной конструкции мощностью 35 кВт. Почти шестикратное увеличение

мощности плазматрона (35 вместо 6 кВт) приводит к двукратному увеличению температуры газа (1000 против 540 К). Трехкратное увеличение мощности нагрева при использовании плазматрона 6 кВт по сравнению с лампами мощностью 2 кВт вызывает увеличение температуры к 30-й минуте лишь на 18 %. В дальнейшем это соотношение несколько улучшается, достигая 33 % к 120-й минуте. Парадоксальный на первый взгляд результат обусловлен конструктивными особенностями плавителя и сложным характером теплообмена. Выражается он в том, что в проточном режиме работы значительная часть запасенной в газе энергии покидает объем и не используется в плавителе.

Проведенные эксперименты позволили получить данные, необходимые для расчета ЭТУ подобного типа. Выявлены наиболее теплонапряженные места в конструкции плавителя. Однако необходимы дополнительные эксперименты с выходом на стационарный режим теплообмена для уточнения коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов, используемых в данной конструкции.

Список литературы

1. Ковшечников В.Б. Электродуговые нагреватели переменного тока. Экспериментально-расчетные исследования : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2000. — 15 с.
2. Глебов И.А., Рутберг Ф.Г. Мощные генераторы плазмы. — М. : Энергоатомиздат, 1985. — 100 с.
3. Александрова А.Ф., Аззеддин Б., Скворцов М.Г. и др. Излучательные характеристики плотной плазменной струи в воздухе // VI Всесоюз. конф. по физике низкотемператур. плазмы : Тез. докл. (Ленинград, 1983 г.). — Л., 1983. — Т. 1. — С. 381.
4. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. Ч. 1. Электрические печи сопротивления. — М. : Энергия, 1970. — 364 с.

Поступила в редакцию 20.07.12

Antonov G.G., Kovshechnikov V.B.

The Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, Russia

The Installation for Plasma Melting and Materials Decomposition Thermophysical Characteristics Determination

The results of experimental studies carried out on electrothermal installation of indirect influence (melter) of 0,056 m³ are conducted. The data of heat transfer coefficient between the working gas and melter inner wall of are adduced. The halogen lamps of 2 kW power and double-jet plasmatron of 6 kW power served as heating source.

Key words: melter, plasmatron, heat transfer coefficient.

Received July 20, 2012