

УДК 536.252:532.527.2

к.т.н. Карпук И. А.,
Юрьев С. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИАЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СВЧ-ПЛАЗМОТРОНА

Показана возможность применения СВЧ-плазмотрона для розжига пылеугольного топлива в котлах. На основании анализа известных способов интенсификации теплоотдачи с цилиндрической поверхности предложен способ воздушного охлаждения рабочей камеры СВЧ-плазмотрона. Представлены условия, обеспечивающие равномерный проток воздуха сквозь поверхность рабочей камеры плазмотрона.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, СВЧ-плазмотрон, теплообмен, вращающийся про-ницаемый цилиндр.

Введение. В последние годы в промышленности для обогрева помещений, нагрева воды или для получения насыщенного пара высокого давления всё чаще используют котлы на угле. Такие котлы считаются одними из самых экономичных, поскольку уголь — самый дешёвый вид топлива, что особенно актуально для энергетической структуры Донбасса.

Для розжига пылеугольных котлов и стабилизации процессов горения обычно применяют природный газ или мазут, стоимость которых постоянно растёт.

Поэтому актуальным является использование в качестве растопочного топлива угольной пыли, требующей, по сравнению с газом и мазутом, более высокой температуры воспламенения [1], которую способны развивать плазмотроны [2–3].

Воздействие плазмы на угольную пыль приводит к ряду положительных изменений в ней, например: частицы угля дробятся на более мелкие части, происходит их интенсивная газификация, вследствие этого повышаются реакционные свойства топлива, горение протекает более устойчиво [1]. Это является актуальным при сжигании низкосортных углей и позволяет осуществить растопку котла при кратковременной работе плазмотрона, необходимой для достижения растопочных параметров котла. Применяемые электродуго-

вые плазмотроны имеют существенный недостаток — износ электродов.

Наиболее оптимальным является использование в таких горелках СВЧ-плазмотронов. Они не требуют использования специальных угольных и медных электродов, а температура плазмы при СВЧ-разряде обычно 6000–7000 К, что способствует быстрому воспламенению углевоздушной смеси и её интенсивному выгоранию.

Однако в процессе длительной эксплуатации СВЧ-плазмотронов в такого рода горелках важной проблемой является отвод тепла с поверхности рабочей камеры, так как температура, создаваемая плазменным факелом, может достигать 800 К вблизи стенки камеры.

Целью данной работы является определение оптимального способа охлаждения рабочей камеры СВЧ-плазмотрона, используемого для розжига пылеугольного топлива.

Постановка задачи. Использование в качестве теплоотводящей среды воды осложняется тем, что плазмотроны работают при высоких значениях силы тока и напряжения. Обдув рабочей камеры воздухом малоэффективен из-за высокой температуры поверхности.

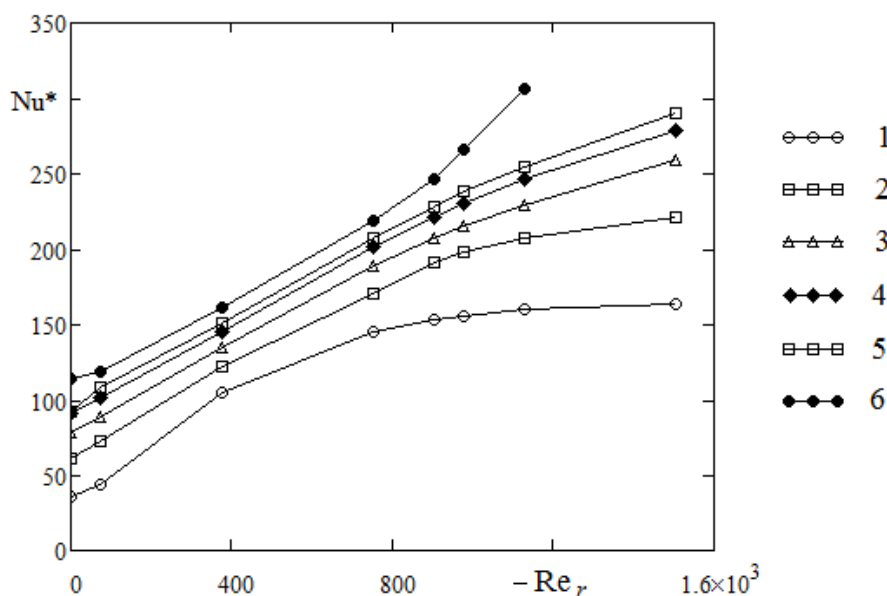
Однако система охлаждения воздухом может быть достаточно эффективной. Например, в случае вращения рабочей камеры плазмотрона в потоке газа возможно

увеличение теплоотдачи с её поверхности, так как известно [4], что в закрученных потоках жидкостей и газов существенно интенсифицируются процессы обмена импульсом, теплотой и массой.

Изложение материала и его результаты. Основными способами улучшения теплоотдачи с вращающейся цилиндрической поверхности являются: увеличение скорости вращения, наложение вынужденного осевого течения, нанесение на поверхности различной рельефной структуры (например, продольных пазов). Сравнительный анализ этих способов интенсификации теплообмена между вращающейся цилиндрической поверхностью и потоком газа [5] указывает на наличие недостатков. В частности, наличие рельефной структуры на поверхности незначительно увеличивает теплоотдачу, существенно повышая гидродинамические потери, а вынужденное осевое течение заметно усиливает теплоотдачу только при больших значениях скорости осевого потока.

Известны результаты [6–7], которые подтверждают возможность интенсификации теплообмена снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра за счёт протока газа через его поверхность. Такой способ существенно увеличивает теплоотдачу по сравнению с другими известными способами. На рисунке 1 представлены зависимости изменения коэффициента теплоотдачи — числа Нуссельта — от радиального числа Рейнольдса, характеризующего интенсивность протока газа через пронцаемую цилиндрическую поверхность, при различной скорости вращения.

Представленная зависимость показывает, что фактор протока газа сквозь вращающуюся пронцаемую поверхность позволяет весьма существенно (в 3–5 раз) повысить интенсивность теплообмена между вращающимся цилиндром и потоком газа, что заметно больше того эффекта, который, по данным обзора [5], могут обеспечить вынужденное осевое течение и пазы в цилиндрах.



1 — $Re_\varphi = 4.1 \cdot 10^4$; 2 — $Re_\varphi = 8.2 \cdot 10^4$; 3 — $Re_\varphi = 1.24 \cdot 10^5$; 4 — $Re_\varphi = 1.5 \cdot 10^5$;
5 — $Re_\varphi = 1.65 \cdot 10^5$; 6 — $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$

Рисунок 1 Зависимость числа Нуссельта от интенсивности протока воздуха через пронцаемую цилиндрическую поверхность

Реализация такого метода охлаждения СВЧ-плазмотрона заключается в следующем (рис. 2). Вращающаяся рабочая камера плазмотрона имеет некоторое количество продольных щелей, через которые рабочий газ попадает в камеру. Газ подаётся в область между неподвижной внешней стенкой и вращающейся камерой.

Регулируя скорость вращения камеры и скорость потока (расход) рабочего газа, можно управлять структурой течения и, как следствие, степенью охлаждения камеры [8]. Кроме того, газ, проходя через поверхность вращающейся рабочей камеры, закручивается, что позволяет реализовать газовихревую стабилизацию плазмы.

Из-за вращения поверхности рабочей камеры в зазоре между рабочей камерой и неподвижной стенкой могут развиваться макровихревые структуры. Данные вихревые структуры снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра сопровождаются неравномерностью протекания газа через его поверхность. Это явление нежелательно, поскольку приводит к очень сильному повышению локальных скоростей движения газа через перегородку.

В работе [4] показано, что возникающие в результате центробежной неустойчивости вихревые структуры могут блокировать значительную часть поверхности пронцаемого цилиндра для протока газа, вплоть до того, что весь подаваемый через входное сечение поток будет протекать через малую часть этой поверхности у самого входного сечения. Это явление сопровождается крайне неравномерным распределением радиальной скорости протока рабочего газа вдоль поверхности цилиндра.

Значительное влияние на характер течения и равномерность протекания газа оказывает сопротивление пористой перегородки [9].

По результатам численного моделирования было установлено [9], что с уменьшением сопротивления пористой перегородки часть поверхности пронцаемого цилиндра блокируется для протока жидкости. При этом площадь блокируемой поверхности растёт с увеличением скорости вращения. На рисунках 3, 4 приведены результаты, которые получены при нескольких фиксированных значениях Re_φ , Re_z и различном коэффициенте сопротивления пористой перегородки b_r .

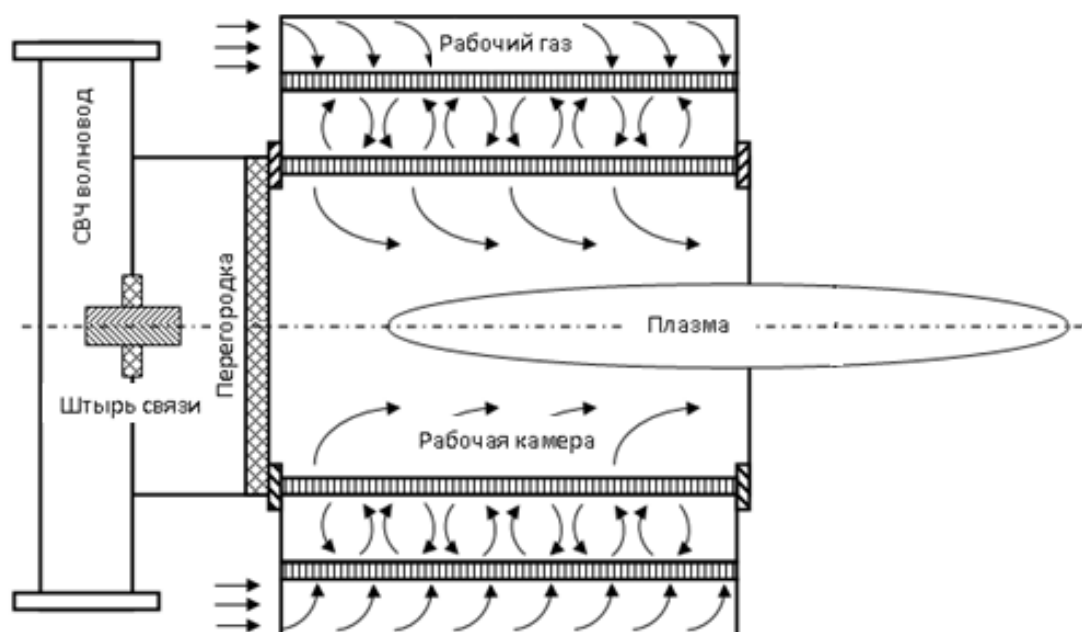


Рисунок 2 Схема воздушного охлаждения СВЧ-плазмотрона

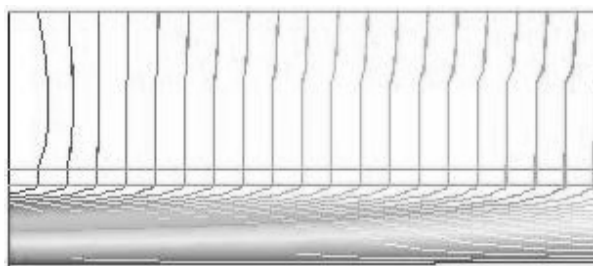


Рисунок 3 Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ($b_r = 10^{11} \text{ м}^{-2}$, $Re_\varphi = 10^4$, $Re_r = 100$)

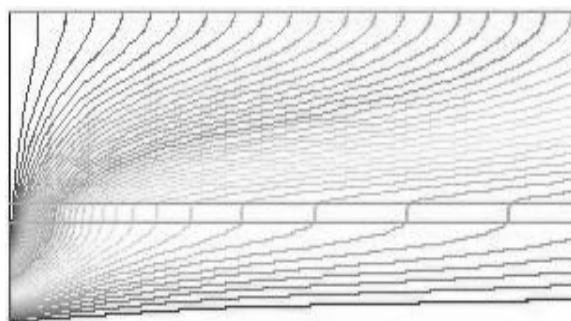


Рисунок 4 Линии тока относительного движения частиц жидкости, пересекающих входное сечение ($b_r = 10^4 \text{ м}^{-2}$, $Re_\varphi = 10^4$, $Re_r = 100$)

Для обеспечения равномерного протока газа сквозь поверхность вращающегося цилиндра необходимо задать сопротивление пористой щели в диапазоне $3.5 \cdot 10^5 (Re_r = 100) - 3.5 \cdot 10^8 (Re_r = 5000)$ для значений окружного числа Рейнольдса

Библиографический список

1. Буров, В. Ф. СВЧ-плазмотрон со свободно парящим плазмодом [Текст] / В. Ф. Буров, Ю. В. Стрижко // Сб. докл. VI Всероссийской конференции «Горение твёрдого топлива». — Новосибирск : ИТ СО РАН, 2006.
2. Жуков, М. Ф. Плазменная безмазутная растопка котлов и стабилизация горения пылеугольного факела [Текст] / М. Ф. Жуков, Е. И. Карпенко, В. С. Перегудов и др. — Новосибирск : Наука, 1995. — 304 с.
3. Иманкулов, Э. Р. Плазменный розжиг и стабилизация горения факела донецкого АШ [Текст] / Э. Р. Иманкулов, В. Е. Мессерле, З. Е. Закипов, Т. М. Сейтимов, А. Б. Устименко // Теплоэнергетика. — 1990. — № 1. — С. 51–53.

от $Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$ до $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$ [9]. При данных значениях сопротивления пористой щели неравномерность течения потока воздуха является технически приемлемой.

Выводы и направления дальнейших исследований. Применение наложенного вынужденного радиального течения воздуха через вращающуюся рабочую камеру СВЧ-плазмотрона позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи с его поверхности в 3–5 раз и использовать для его охлаждения воздух.

Равномерное охлаждение рабочей камеры обеспечивается путём распределения протока воздуха сквозь эту поверхность. Для этого необходимо задать коэффициент сопротивления пористой щели в диапазоне $3.5 \cdot 10^5 (Re_r = 100) - 3.5 \cdot 10^8 (Re_r = 5000)$ для значений окружного числа Рейнольдса от $Re_\varphi = 1 \cdot 10^4$ до $Re_\varphi = 2 \cdot 10^5$.

Однако на данный момент отсутствуют данные о влиянии гидродинамических потерь, возникающих при течении воздушно-го потока через пористую перегородку, на эффективность предложенного способа охлаждения СВЧ-плазмотрона и его работу.

Поэтому предметом дальнейших исследований в первую очередь должен стать учёт гидродинамических потерь, обусловленных вынужденным радиальным течением воздуха сквозь вращающуюся проницаемую поверхность рабочей камеры СВЧ-плазмотрона.

4. Мочалин, Е. В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил [Текст]. Т. 8. Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах / Е. В. Мочалин, А. А. Халатов. — Киев : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. — 428 с.

5. Мочалин, Е. В. Теплообмен и гидравлические потери в зазоре между вращающимися цилиндрами [Текст] / Е. В. Мочалин, С. А. Юрьев // Технологический аудит и резервы производства, 2013. — Вып. 3/1 (11). — С. 45–49.

6. Мочалин, Е. В. Интенсивность обмена импульсом и теплотой в потоке снаружи вращающегося пронцаемого цилиндра [Текст] / Е. В. Мочалин, С. А. Юрьев // Промислова гідраліка і пневматика. — 2011. — № 4 (34). — С. 11–14.

7. Юрьев, С. О. Теплообмін і тертя поблизу обертового проникного циліндра з протоком рідини через його поверхню [Текст] / С. О. Юрьев // Технологический аудит и резервы производства. — 2012. — № 5/1 (7). — С. 19–20.

8. Мочалин, Е. В. Интенсификация теплоотдачи от вращающегося цилиндра за счёт протока жидкости через его поверхность [Текст] / Е. В. Мочалин, С. А. Юрьев // Гидроаэромеханика в инженерной практике : материалы XVII международной научно-технической конференции. — Черкассы : АПБ им. Героев Чернобыля МЧСУ, 2012. — С. 73.

9. Юрьев, С. А. Особенности течения жидкости через вращающийся пористый цилиндр [Текст] / С. А. Юрьев // Сборник научных трудов ДонГТУ, 2015. — Вып. 2 (45). — С. 136–141.

© Карпук И. А.

© Юрьев С. А.

Рекомендована к печати к.т.н., проф., и.о. зав. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В., д.т.н., проф., зав. каф. физики ЛНУ им. В. Даля Корсуновым К. А.

Статья поступила в редакцию 11.10.19.

к.т.н. Карпук І. А., Юр'єв С. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ЗАСТОСУВАННЯ РАДІАЛЬНОЇ ТЕЧІЇ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ НВЧ-ПЛАЗМОТРОНА

Показано можливість застосування НВЧ-плазмотрона для розпалювання пилувугільного палива в котлах. На підставі аналізу відомих способів інтенсифікації тепловіддачі з циліндричної поверхні запропоновано спосіб повітряного охолодження робочої камери НВЧ-плазмотрона. Представлено умови, що забезпечують рівномірний протік повітря крізь поверхню робочої камери плазмотрона.

Ключові слова: пилувугільне паливо, НВЧ-плазмотрон, теплообмін, обертовий проникний циліндр.

PhD in Engineering Karpuk I. A., Yuryev S. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

USING OF RADIAL AIRFLOW FOR MICROWAVE PLASMA TORCH COOLING

The applicability of microwave plasma torch for ignition of pulverized coal fuel in vessels is shown. Based on the analysis of known methods of intensification of heat transfer from the cylindrical surface, a method of air cooling of the operating chamber of microwave plasma torch is proposed. The conditions ensuring uniform air flow through the surface of the operating chamber of the plasma torch are presented.

Key words: pulverized coal fuel, microwave plasma torch, heat exchange, rotating permeable cylinder.