

## РАЗРАБОТКА ГОРЕЛКИ С ПЛАВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ДЛИНЫ ФАКЕЛА

**Аннотация.** В работе представлена информация о конструкции и принципе работы горелки с плавным регулированием длины факела. Задача изобретения нового горелочного устройства заключается в создании конструкции горелки с регулируемой длиной факела в условиях подачи окислителя (воздуха) вне горелки. Для изучения принципа работы разработанного горелочного устройства проведено компьютерное математическое моделирование в программном комплексе ANSYS. Результаты расчетов представлены в графическом виде.

**Ключевые слова:** вращающаяся печь, горелка с плавным регулированием длины факела, горение, топливо, компьютерное моделирование.

**Abstract.** The paper presents information about the design and principle of operation of the burner with smooth adjustment of the flame length. The task of inventing a new burner device is to create a burner design with an adjustable flame length under conditions of oxidizer (air) supply outside the burner. To study the principle of operation of the developed burner device, computer mathematical modeling was carried out in the ANSYS software package. The calculation results are presented graphically.

**Key words:** rotary furnace, burner with smooth adjustment of the flame length, burn, fuel, computer simulation.

В настоящее время вращающиеся печи используются во многих промышленных отраслях. Для обеспечения их стабильной и долговечной работы, а также эксплуатации на разных режимах обжига, необходимо предусмотреть возможность установки горелочного устройства с регулируемыми характеристиками факела.

Перемещение высокотемпературной зоны вдоль рабочего пространства печи, достигается изменением длины факела горелки, что в свою очередь позволяет изменять длину зоны спекания обжигаемого материала в печи и позволяет избежать налипания на огнеупорной футеровке материала в результате его размягчения и подплавления.

Изменять длину факела при постоянной тепловой нагрузке возможно только путем воздействия на характер смешения горючего газа с окислителем (воздухом или кислородом), то есть на интенсивность этого процесса. Известны способы изменения интенсивности смешения газа с окислителем, например, с помощью удлинения пути совместного течения газа и окислителя, закручивание потоков и газа и окислителя, направления потоков газа и окислителя под углом друг другу, турбулизация газовых потоков путем разбиения потоков на множественные струи [1].

В данном случае задача изобретения нового горелочного устройства заключается в создании конструкции горелки с регулируемой длиной факела в условиях подачи окислителя (воздуха) вне горелки.

Для этого предложено устройство для плавного регулирования длины факела горелки, которое содержит корпус 1, коаксиально установленную в нем трубу 2, которые вместе образуют центральный 3 и периферийный 4 каналы подачи газообразного топлива, заканчивающиеся, соответственно, центральным соплом 5 и рядами периферийных сопел 6 с отдельными подводами этого газа для выхода его к центральному соплу или к рядам периферийных сопел. Новое устройство отличается тем, что в центральном канале по оси коаксиальных труб смонтирован распределитель 7 газообразного топлива, подаваемого в горелку, содержащий цилиндрическую камеру 8 с отверстиями для подачи в нее газообразного топлива 9, которая с обеих сторон заканчивается диффузорами 10, обращенными вершинами внутрь этой камеры, при этом распределитель также содержит пару конусов 11, обращенных вершинами внутрь цилиндрической камеры, жестко связанных между собой штоком 12, перемещающимся по оси этой камеры, пара жестко связанных конусов, выполнена с возможностью полного перекрытия потока газообразного топлива, входящего в камеру при полном открытии потока, выходящего из камеры, осуществляемого путем входа одного из конусов в диффузор с одной стороны камеры, при выходе другого из диффузора с другой стороны камеры.

При перемещении штока с парой конусов по оси цилиндрической камеры, один из конусов входит в диффузор с одной стороны этой камеры, другой выходит из диффузора с другой стороны камеры. Это обеспечивает полное перекрытие потока газообразного топлива, входящего в камеру при полном открытии потока, выходящего из камеры. При перемещении конусов газообразное топливо перераспределяется между диффузорами пропорционально степени открытия и закрытия диффузоров конусами, что обеспечивает плавное изменение длины факела от минимального до максимального.

Использование в предлагаемом устройстве распределителя подаваемого в горелку газообразного топлива, позволяет управлять интенсивностью смешивания, а значит длиной факела, при постоянном расходе топлива и подачи окислителя вне горелки. С помощью этого распределителя можно подавать газообразное топливо через ряд периферийных сопел, расположенных радиально относительно корпуса горелки. В этом случае факел будет коротким. Можно подавать газообразное топливо через центральное сопло в виде прямоструйного потока, идущего вдоль оси горелки. В этом случае перемешивание топлива с окислителем будет плохим и факел будет длинным. Предусмотрена возможность одновременной подачи одной части газа через радиальные отверстия, а второй – через центральное сопло, что позволит иметь факел промежуточной длины в пределах минимальной и максимальной величины. При этом расход топлива не изменяется. В качестве окислителя можно использовать окружающий горелку воздух, подсасываемый во вращающуюся печь дымососом.

Новый технический результат, достигаемый заявленным устройством, заключается в возможности плавного регулирования длины факела горелки для

отопления вращающейся печи в пределах от 12 до 16 м без изменения расхода топлива. Кроме того, регулирующее устройство защищено от воздействия высоких температур, тем, что расположено внутри горелки в той части, которая находится снаружи печи.

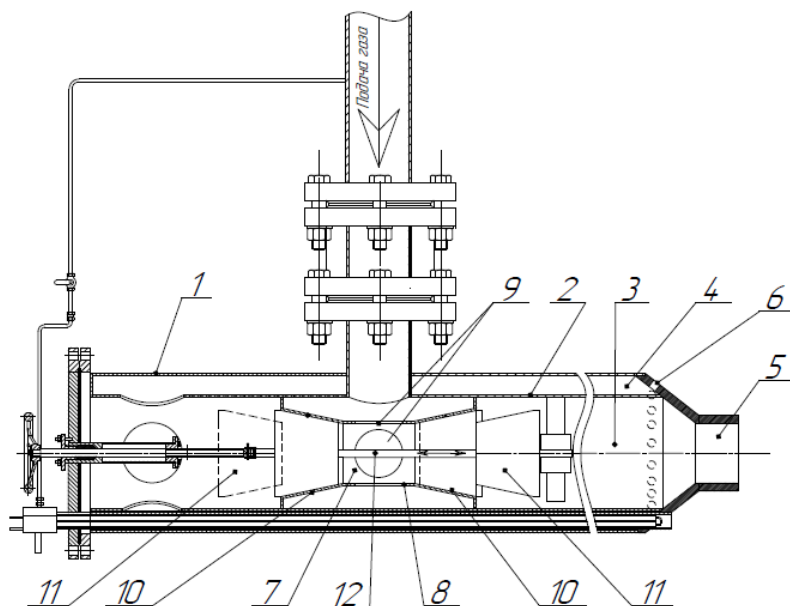


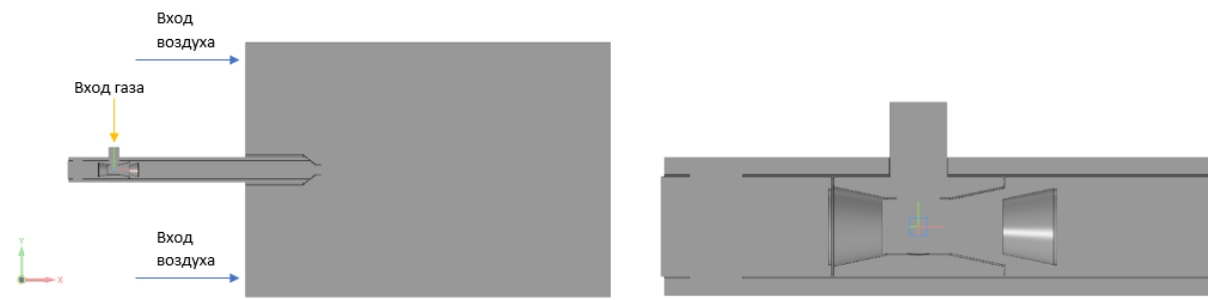
Рис. 1. Эскиз горелки: 1 – корпус; 2 – коаксиальная труба; 3 – центральный канал; 4 – периферийный канал; 5 – центральное сопло; 6 – периферийные сопла; 7 – распределитель; 8 – цилиндрическая камера; 9 – отверстия подачи газообразного топлива; 10 – диффузоры; 11 – конусы; 12 – шток

Для анализа работы горелочного устройства было проведено компьютерное математическое моделирование с использованием программного комплекса ANSYS CFD. Данный инструмент исследования позволяет получить исчерпывающие данные в ходе проведения виртуального эксперимента.

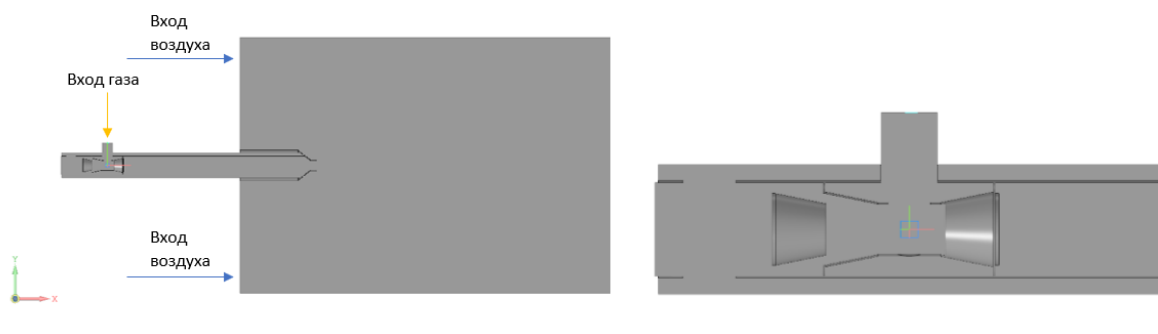
Благодаря достаточной точности данного метода инженерного анализа, существует возможность на стадии проектирования проверить работоспособность оборудования, а также сравнить результаты аналитических расчетов с машинными.

Работа в программном комплексе ANSYS подразумевает поэтапную проработку задачи от создания геометрической модели (рисунок 2) до визуализации полученных результатов в графическом формате (рисунок 3-8). Моделирование проводилось для двух вариантов работы горелки:

- весь объём газа подается через центральное сопло;
- весь объём газа подается через периферийные отверстия.



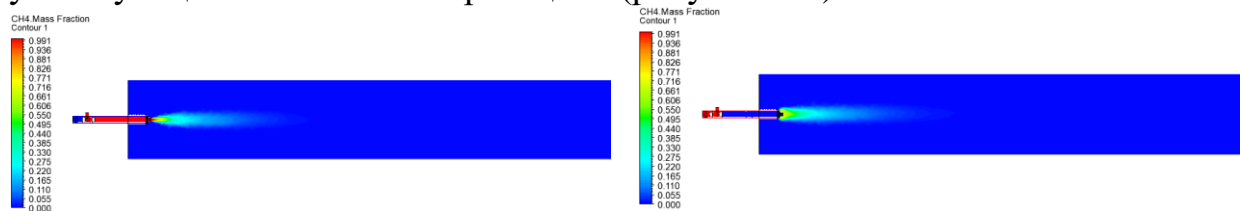
*а*



*б*

Рис. 2. Твёрдотельная геометрическая модель горелочного устройства и рабочего пространства вращающейся печи: *а* – подача газа через центральное сопло; *б* – подача газа через периферийные отверстия

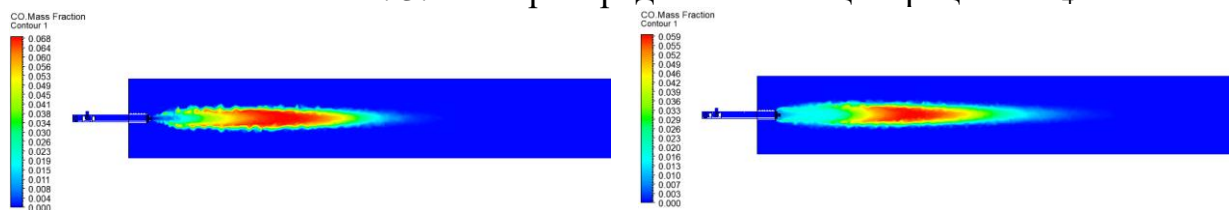
Результаты компьютерного моделирования процесса сжигания газа в рабочем пространстве цилиндрической вращающейся печи представлены в виде изображений полей скоростей, температур и концентраций компонентов, участвующих в химических реакциях (рисунок 3-8).



*а*

*б*

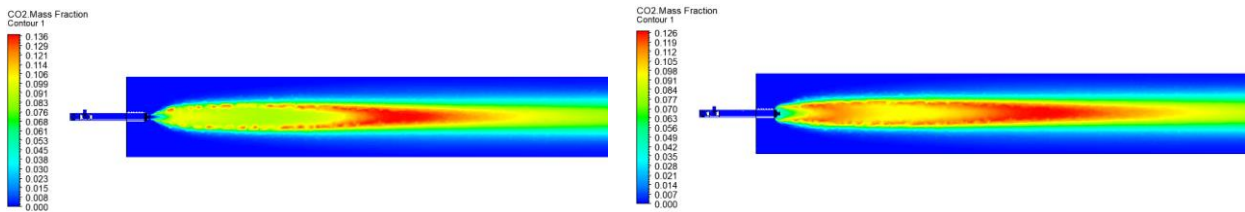
Рис. 3. Поля распределений концентрации  $\text{CH}_4$



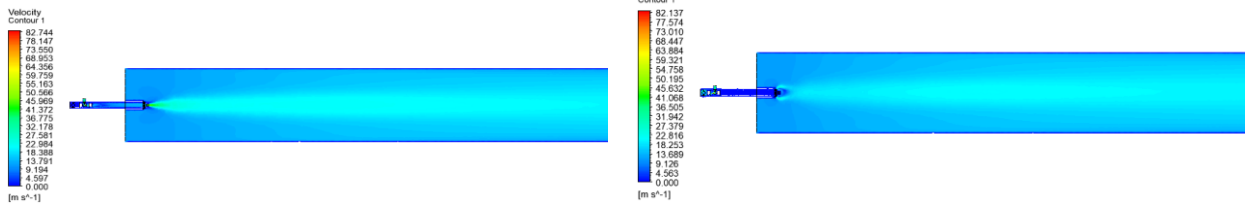
*а*

*б*

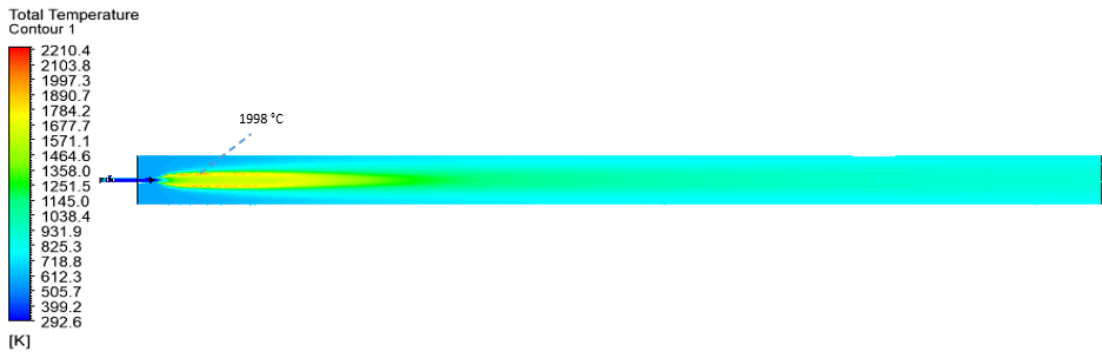
Рис. 4. Поля распределений концентрации  $\text{CO}$



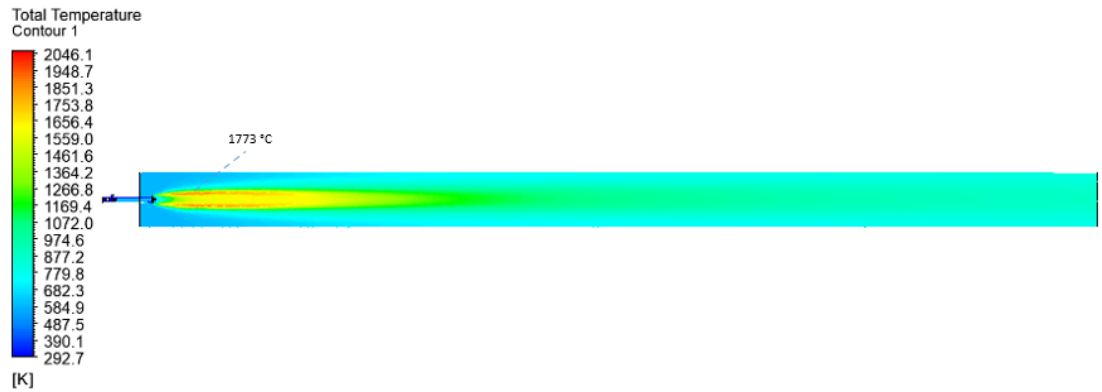
а б  
Рис. 5. Поля распределений концентрации CO<sub>2</sub>



а б  
Рис. 6. Поле распределения скоростей в корпусе горелки и в рабочем пространстве вращающейся печи



а



б

Рис. 7. Поле распределения температур в рабочем пространстве вращающейся печи в продольной плоскости

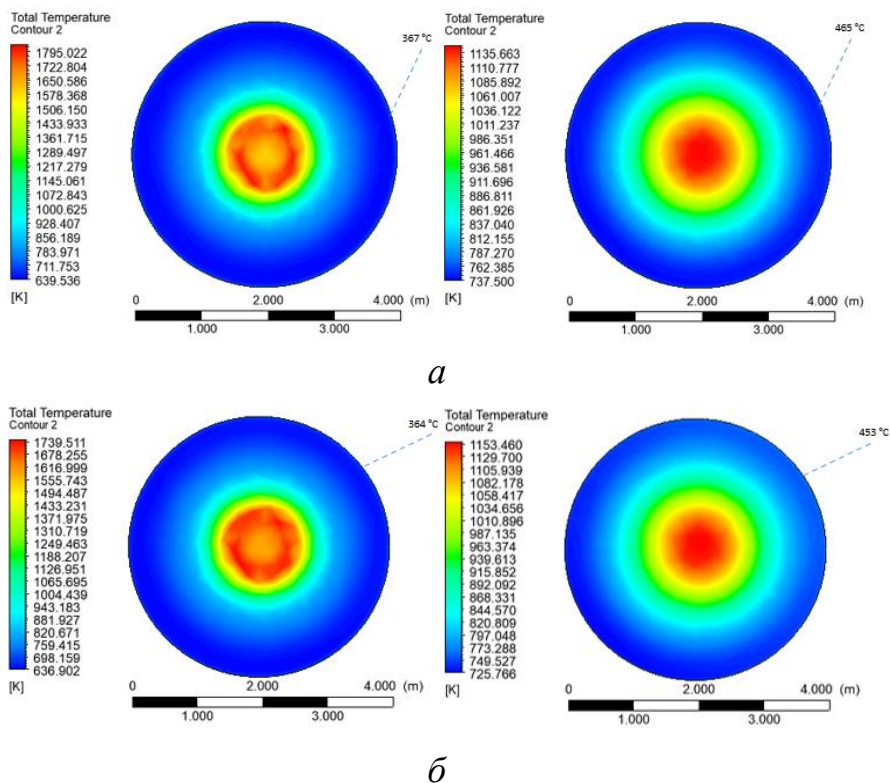


Рис. 8. Поле распределения температур в рабочем пространстве вращающейся печи в поперечной плоскости

Результаты моделирования по варианту 1 (весь объем газа подается через центральное сопло): на рисунке ба представлено поле распределения скоростей в продольном сечении вращающейся печи. Непосредственно в рабочем пространстве печи максимальная скорость наблюдается на выходе из центрального сопла горелки (45 м/с). По мере удаления смеси воздуха и продуктов сгорания от торца выдачи материала, происходит постепенное снижение и выравнивание скоростей по диаметру печи.

В качестве топлива в компьютерном расчете использовался метан ( $\text{CH}_4$ ). Максимальная концентрация наблюдается в корпусе горелки (рисунок 3,а), а также вблизи выходного сопла в центральном конусе (где все еще находится «свежее» топливо с неизменной концентрацией и температурой).  $\text{CH}_4$  сгорает на расстоянии 8 м от среза сопла горелки, в результате чего происходит образование продуктов неполного горения:  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .

Распределение концентрации  $\text{CO}$  представлено на рисунке 4,а. Максимальная концентрация оксида углерода наблюдается на расстоянии 6-9 м, полное сгорания происходит на расстоянии 15 м от среза сопла горелки.

Образование продуктов полного горения происходит в результате сгорания компонентов  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ .

На рисунке 5,а представлено распределение концентрации диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). Концентрация достигает максимального значения на расстоянии 13-16 м от среза сопла горелки и снижается к моменту выхода дымовых газов из печи.

На рисунке 7,*a* показано поле распределения температур в продольном сечении вращающейся печи, на рисунке 8,*a* – поле температур в поперечном сечении печи на расстоянии 10 м и 24 м от торцевой стенки печи. Максимальная температура в факеле составила 1998 °С. Температура вблизи стенки на расстоянии 10 м составила 367 °С, температура вблизи стенки на расстоянии 24 м составила 465 °С.

Результаты моделирования по варианту 2 (весь объем газа подается через периферийные отверстия): максимальные скорости (рисунок 6,*б*) в рабочем пространстве печи наблюдаются на выходе из периферийных сопел и по оси печи на некотором расстоянии от выходного сопла горелки (в зоне интенсивно протекающих химических реакций). В целом распределение скоростей по диаметру на всей протяженности печи более равномерное благодаря струйной подаче топлива, обеспечивающей улучшенное перемешиванием с окислителем.

Распределение концентрации метана (рисунок 3,*б*) при данном варианте работы горелки выглядит несколько иначе. Максимальные значения также наблюдаются в корпусе горелки, на выходе из сопел происходит резкое снижение концентрации. Горение начинается в непосредственной близости к корпусу горелки. Вследствие того, что газ попадает в рабочее пространство печи через множество отверстий, отсутствует зона центрального конуса с топливом, не вступившим в реакцию. При выходе из периферийных отверстий метан смешивается с воздухом, подаваемым в рабочее пространство печи с помощью дымо-соса, и полностью сгорает на расстоянии 9 м.

Распределение концентрации СО представлено на рисунке 4б. Зона интенсивного образования СО смещена от торца выдачи нагреваемого материала и имеет меньшую протяженность в сравнении с первым вариантом моделирования. Максимальные значения концентраций наблюдаются на расстоянии 7-9 м, полное сгорания происходит на расстоянии 15 м от среза сопла горелки.

При подаче всего объема топливного газа через периферийные отверстия происходит интенсивное образование компонента СО<sub>2</sub>, которое начинается вблизи выходных сопел горелки (рисунок 5,*б*). В данном случае зона высоких концентраций диоксида углерода имеет гораздо большую протяженность, чем в первом случае (рисунок 5,*a*).

Максимальная температура в факеле горелки составляет 1773 °С (рисунок 7,*б*). Температура вблизи стенки на расстоянии 10 м составила 364 °С, температура вблизи стенки на расстоянии 24 м составила 453 °С (рисунок 8,*б*).

По результатам компьютерного моделирования можно сделать выводы о том, как меняется конфигурация факела горелки при изменении положения конусов.

В случае подачи всего объема газа через периферийные сопла, зона интенсивного горения смещена ближе к торцу выдачи материала, факел имеет сравнительно больший диаметр в месте, где топливо с окислителем вступают в реакцию, распределение скоростей в рабочем пространстве печи более равномерное.

Однако, длины факелов в обоих вариантах практически совпадают. В первую очередь это связано с тем, что особо сильное влияние на процессы го-

рения оказывает скорость потока воздуха, подаваемого на сжигание. Несмотря на то, что струйная подача газа подразумевает улучшенное перемешивание потоков топлива и окислителя, о чем также свидетельствуют изображения полей концентраций компонентов горения, большой объем воздуха, необходимый для полного сжигания, уносит более легкие частицы топлива, препятствуя своевременному завершению химических реакций. В связи с этим длина факела увеличивается.

### Список использованных источников

1. Теория и практика теплогенерации: учебник. Изд. 2-е перераб. и доп. / С.Н. Гуцин, М.Д. Казяев, Ю.В. Крюченков [и др.]; под ред. Лобанова и С.Н. Гуцина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 379 с.

УДК 620.178.16;66.045.12

**И. Д. Суворин, Н. А. Абаимов, В. А. Микула**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА ТРУБЧАТОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ CFD

**Аннотация.** В данной работе проводилось численное моделирование входного участка трубчатого воздухоподогревателя с помощью программного пакета CFD. Основной целью являлось моделирование движения потока газа и частиц на входе в трубчатый воздухоподогреватель, а также предварительная оценка влияния эрозии на входной участок. Эрозия рассчитывалась при помощи модели Финни (Finnie). Следующим шагом планируется усложнить модель путем добавления нескольких рядов трубок для получения более наглядного результата.

**Ключевые слова:** абразивный износ; трубчатый воздухоподогреватель; эрозионный износ; CFD.

**Abstract.** Numerical modeling of the tube sheet section of a tubular air heater was carried out using the CFD software. The main scope was to simulate the movement of the gas and particle flow at the inlet to the tubular air heater as well as a preliminary assessment of the effect of erosion on the inlet section. Erosion was calculated using the Finnie model. The next step is to complicate the model by adding several rows of tubes to get a more visual result.

**Key words:** abrasive wear; CFD; erosion wear; tubular air heater.

Воздухоподогреватели играют важную роль в современных котельных агрегатах. Они воспринимают теплоту уходящих газов, передают её воздуху и тем самым уменьшают значительную статью потерь теплоты с уходящими газами. Температура горения топлива повышается, так как используется подогретый воздух. Это способствует повышению КПД котла за счет интенсификации процесса сжигания топлива.