

## Список использованных источников

1. Добряков Т.С., Мигай В.К., Назаренко В.С. Воздухоподогреватели котельных установок. – Д.: «Энергия», 1977. – 184 с.
2. Апатовский Л.Е., Фомина В.Н., Халупович В.А. Подогрев воздуха на тепловых электростанциях. – М.: «Энергоатомиздат», 1986. – 120 с.
3. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. – Л.: «Энергоатомиздат», 1987. – 264 с.
4. Levin B.F. Modeling solid-particle erosion of ductile alloys / B.F. Levin [et al.] // Metall. Mater. Trans. A. – 1999. – № 30 (7). – P. 1763–1774.
5. Parsi M. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications / M. Parsi, [et al.] // J. Nat. Gas Sci. Eng. – 2014. – № 21. – P. 850–873.
6. Жихар Г.И. Котельные установки тепловых электростанций / Г.И. Жихар. – М.: Высшая школа, 2015. – 751 с.

УДК 620.178.16; 66.045.12

**И. Д. Тихонов, И. Д. Суворин, Г. Е. Масленников, В. А. Микула** <sup>33</sup>

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА СПИРАЛЬНОГО ГАЗООХЛАДИТЕЛЯ

**Аннотация.** В данной работе было выполнено моделирование эрозионного износа и оптимизация конструкции спирального конвективного газоохладителя (ГО) в среде CFD. Эрозия была рассчитана при помощи модели Табакова-Гранта (Tabakoff-Grand), которая разработана для расчета эрозии стальных поверхностей частицами золы [5].

**Ключевые слова:** газоохладитель, эрозионный износ.

**Abstract.** We performed a simulation of erosive wear and optimization of the design of a spiral convective gas cooler in a CFD environment. The erosion was calculated using the Tabakoff - Grand model, which was developed to calculate the erosion of steel surfaces by ash particles [5].

**Key words:** gas cooler, erosion wear.

В результате моделирования стандартной конструкции ГО с плоской перегородкой получен высокий уровень эрозии металлической поверхности трубного элемента 2.2 (второй виток – вторая трубная спираль), эрозия на нем составила  $3 \cdot 10^{-8}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (рис. 1). В то же время на трубном элементе 1.2 максимальная эрозия достигает  $0,2 \cdot 10^{-8}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), а на трубном элементе 3.2 составляет  $0,6 \cdot 10^{-8}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (рис. 1). На остальной (большей части) теплообменной поверхности ГО эрозия не превышает  $0,2 \cdot 10^{-8}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), т.е. на порядок ниже.

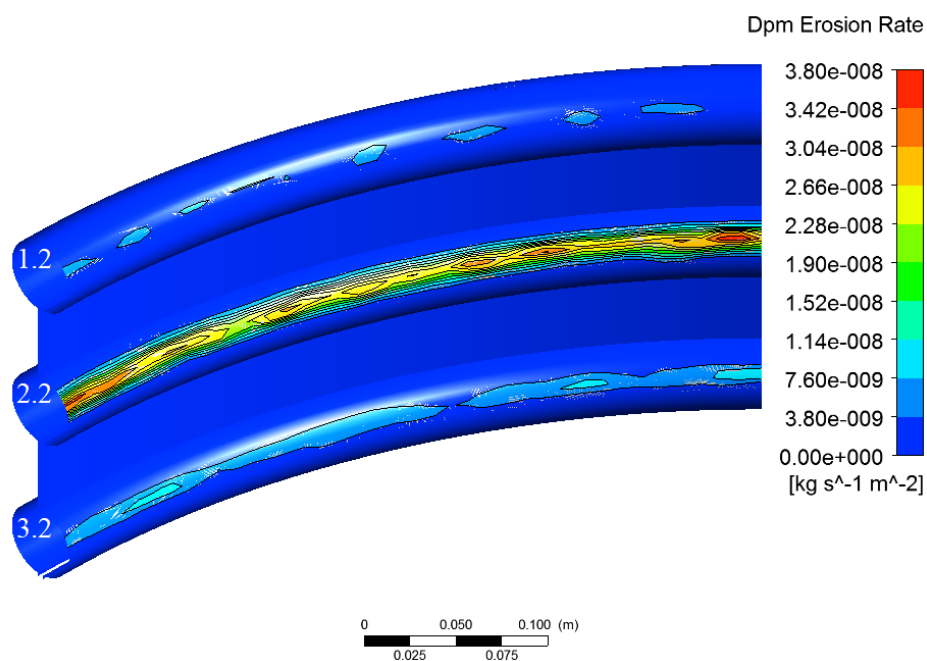


Рис. 1. Эрозия поверхностей нагрева ГО

Определяется это тем, что частицы золы, направляющиеся на плоскую перегородку, в основном вытесняются в ближайший кольцевой канал 1-2 (между 1-ой и 2-ой трубными спиралями). В результате этого траектории движения частиц на входе в канал заметно отклонены от вертикали и основной поток этих частиц соударяется с поверхностью мембраны и трубным элементом 2.2 (рис. 2). Проследим как это сказывается на изменении трех выделенных варьируемых параметрах  $u$ ,  $\gamma$  и  $\alpha$ .

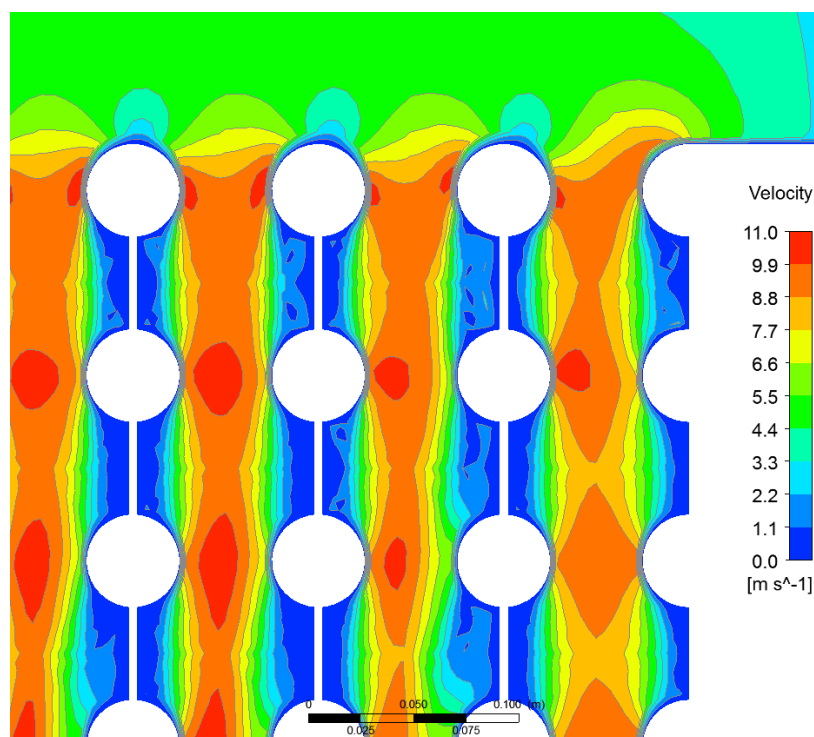


Рис. 2. Траектории частиц

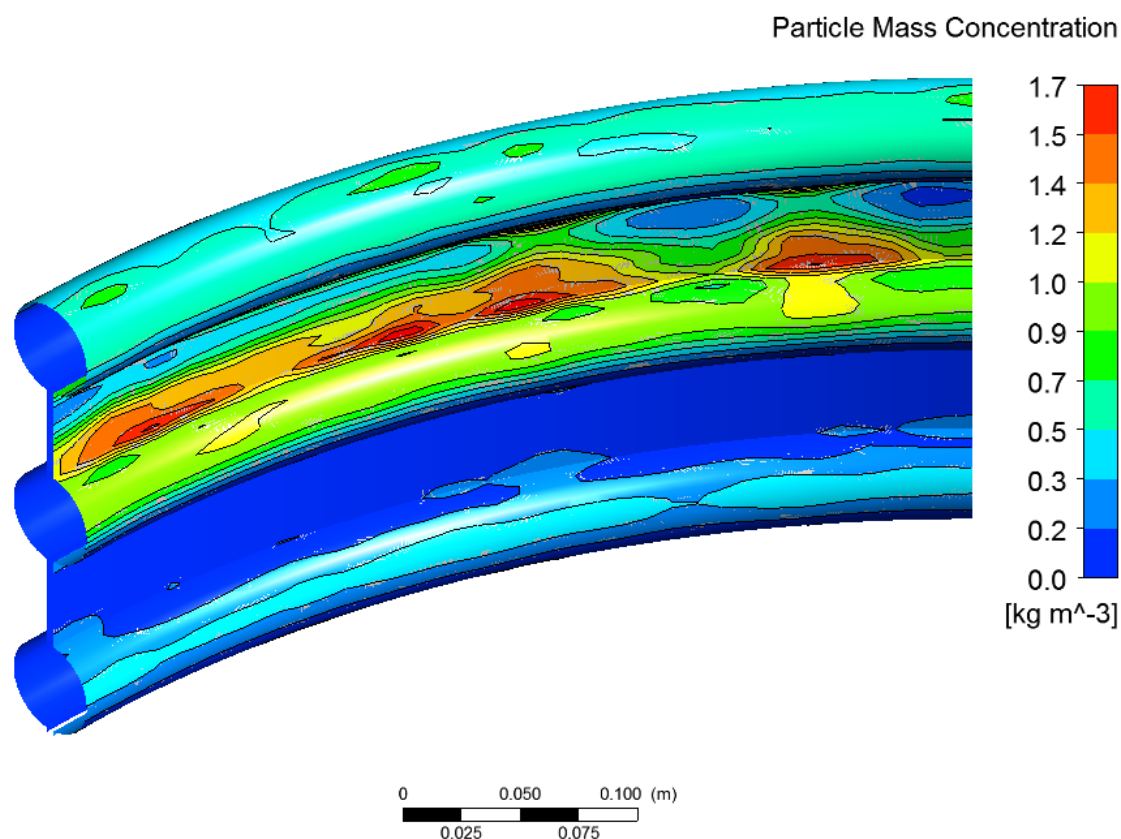


Рис. 3. Концентрации частиц

Как видно, из рис. 3, максимальный уровень концентрации частиц ( $\gamma$ ) наблюдается на стыке мембраны и трубного элемента 2.2 и достигает  $1,7 \text{ кг/м}^3$ , при этом износ меняется в пределах от 0 до  $3,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ . Максимальный уровень износа наблюдается в другой области, на поверхности трубного элемента 2.2 при  $\varphi = 55\text{-}60^\circ$  (рис. 4, а, 4, б) и достигает  $3,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$ .

Таким образом, при заданном наборе конструктивных характеристик ГО и режимных параметрах его работы, концентрация частиц не является фактором, определяющим максимум эрозии. Следовательно, нет необходимости использовать средства направленные на выравнивание концентрации частиц по сечению ГО, например, дополнительные элементы, перенаправляющие часть потока частиц.

Во всех каналах (между трубными спиралями 1-6) скорость газа изменяется по вертикальной координате, в наиболее узких сечениях (между трубными элементами) достигает  $\sim 11 \text{ м/с}$ , а в наиболее широких (между мембранами)  $\sim 8 \text{ м/с}$ . В отличие от потока газа, траектории движения частиц в каналах между трубными спиралями 2-6 практически вертикальные (рис. 2) и скорость частиц практически не меняется по вертикальной координате, в таком случае взаимодействие частиц с поверхностью трубных элементов происходит только в наиболее узких сечениях и по касательной к поверхности.

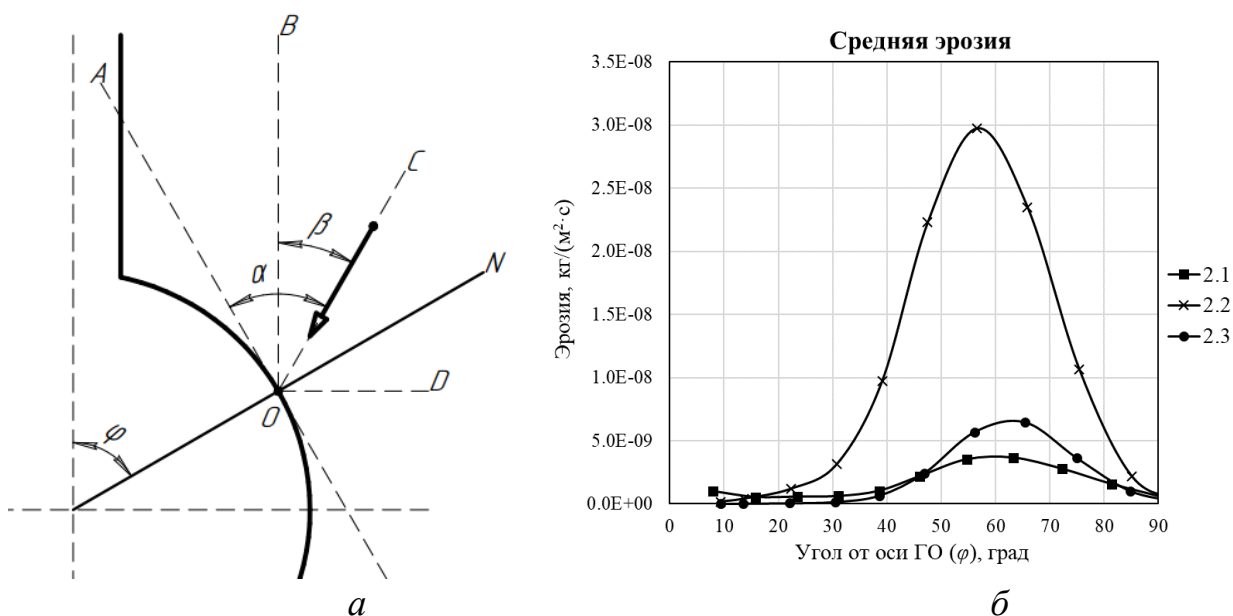


Рис. 4. Интенсивность эрозии по профилю труб второй спирали

Другая картина движения частиц наблюдается в канале 1-2, на начальном участке канала (от первого до второго витка), за счет соударений с перегородкой, а затем с мембраной и трубным элементом 2.2, скорость частиц ниже, чем в других каналах. Однако, износ в каналах 2-6 (с более высокой скоростью частиц) минимальный – менее  $0,2 \cdot 10^{-8}$  кг/(м²·с), поэтому можно сделать вывод, что при заданном наборе конструктивных характеристик ГО и режимных параметров его работы, скорость частиц не является фактором, определяющим максимум эрозии.

Третьим параметром, выделенным при анализе влияния на скорость эрозии, является угол удара частиц о поверхность  $\alpha$ . Если принять, что частицы ударяются о трубный элемент 2.2, двигаясь по вертикали, то для цилиндрической поверхности  $\alpha = 90 - \phi$ . По результатам моделирования максимальный износ при  $\phi = 55^\circ$  (рис. 4), т.е.  $\alpha = 35^\circ$ , что согласуется данными [3, 4], где при скоростях потока до 30 м/с экспериментальные зависимости эрозии от угла удара частиц имеют экстремальный характер с максимумом при углах  $25-45^\circ$ .

Таким образом, по результатам моделирования стандартной конструкции ГО с плоской перегородкой, используемого для парогазовой установки с внутрицикловой газификацией по схеме Shell, можно сделать вывод, что угол удара частиц о поверхность  $\alpha$  является главным фактором, определяющим максимум эрозии. Следовательно, для уменьшения эрозии необходимо вместо плоской перегородки установить конструктивный элемент, позволяющий выровнять траекторию движения потока частиц золы на входе в канал 1-2. Было проведено моделирование для трех форм перегородки цилиндрическая, коническая и полусфера, оптимальным был признан обтекатель в виде полусферы.

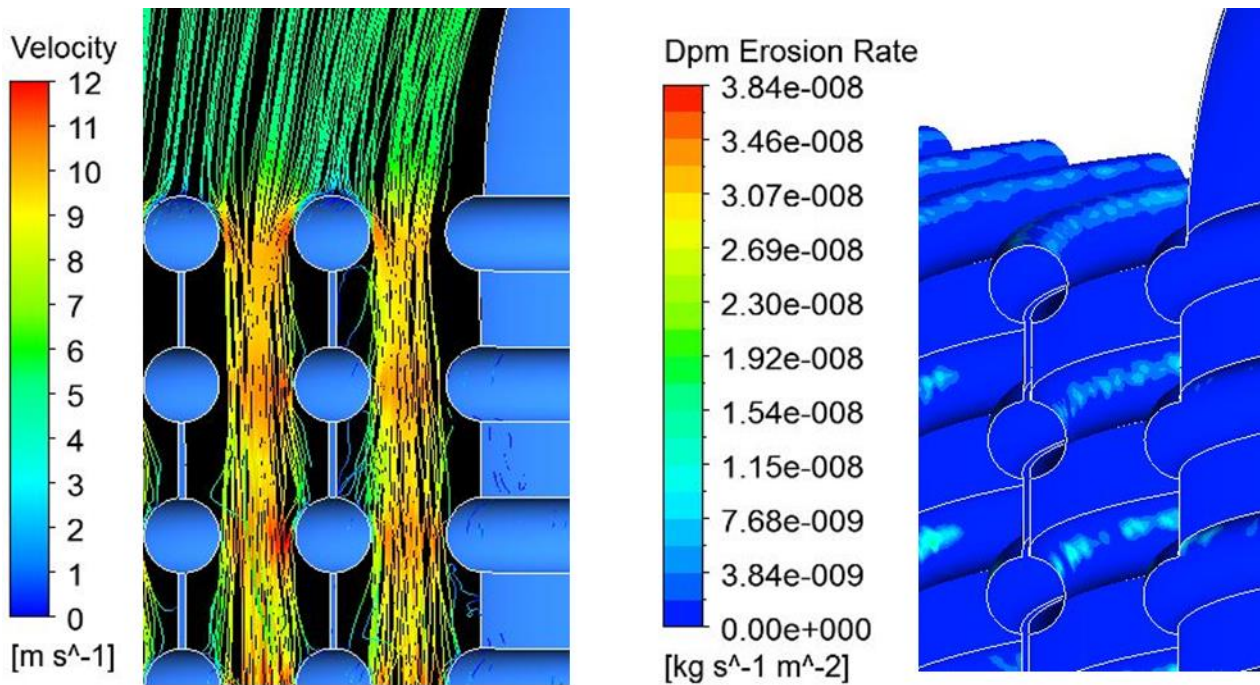


Рис. 5. Траектории частиц и эрозия с установленной полусферической перегородкой

Как видно из рис. 5, использование полусферической перегородки позволило выровнять траекторию движения потока частиц золы на входе в каналы и снизить максимальный уровень эрозии до  $10^{-8}$  кг/(м<sup>2</sup>·с), т.е. почти в 4 раза по сравнению со стандартной геометрией перегородки.

### Список использованных источников

1. Park S., Ye I-S, Oh J., Ryu C., Koo J.H. Gas and particle flow characteristics in the gas reversing chamber of a syngas cooler for a 300 MWe IGCC process. *Appl. Therm. Eng.* 70, 388–396 (2014).
2. Parsi M., Najmi K., Najafifard F., Hassani S., McLaury B.S., Shirazi D.A. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2014. № 21. – P. 850–873.
3. Mbabazi J.G., Sheer T.J., Shandu R., A model to predict erosion on mild steel surfaces impacted by boiler fly ash particles // *Wear* 257. 2004. P. 612-624.
4. Raask E. Mineral impurities in coal, behavior, problems, and remedial measures // Hemisphere Publishing Corporation. 1985. – 484 p.
5. Tabakoff W., Kotwal R., Hamed A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles // *Wear* 52. P. 161–173 (1979).
6. Levin B.F., Vecchio K.S., DuPont J.N., Marder A.R. Modeling solid-particle erosion of ductile alloys // *Metall. Mater. Trans. A.* 1999. № 30 (7). – P. 1763–1774.