

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ПРЕ-СКРУББЕРЕ СИСТЕМЫ МОКРОЙ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА ПРОЕКТА КОМПАНИИ PAUL WURTH

**Н.В. Юшков, В.Я. Губарев**

*Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия*

Доменный газ является побочным продуктом выплавки чугуна. Сегодня на многих металлургических предприятиях России и Европы широко используются системы газоочистки доменного газа проекта люксембургской компании Paul Wurth. С точки зрения эффективности и затрат энергии на очистку колошниковога газа в данных системах газоочисток очень важен процесс тепло- и массообмена в пре-скруббере. В данной работе представлены результаты расчета тепломассообмена в пре-скруббере при различных диаметрах капель диспергированной технической воды. В основе данного расчета лежит уравнение теплового баланса для капли распыленной технической воды, движущейся в потоке запыленного доменного газа. Для определения значения величин коэффициентов тепло- и массоотдачи используется аналогия процессов переноса тепловой энергии и массы.

*Ключевые слова:* доменный газ, пре-скруббер, среднее значение диаметра капель, испарение, конденсация.

Доменный газ является побочным продуктом процесса выплавки чугуна в доменной печи. Выход доменного газа с печи составляет 300–800 тыс. м<sup>3</sup>/ч. При отводе из колошника доменной печи, особенно в период ее загрузки, доменный газ захватывает мелкие фракции шихтовых материалов. При использовании на современных доменных печах для загрузки кокса и шихтовых материалов бесконусного засыпного аппарата содержание пыли в грязном колошниковом газе составляет 1–5 г/м<sup>3</sup> [1, 2].

Физико-химический состав и параметры грязного доменного газа зависят от режима работы доменной печи, качества шихтовых материалов и кокса, способа интенсификации доменного процесса и многих других факторов [3].

На металлургических предприятиях доменный газ используется в качестве газообразного топлива для воздухонагревателей доменных печей, котельных агрегатов ТЭЦ и на различных типах нагревательных печей прокатных производств. Кроме того, энергия избыточного давления доменного газа используется в газовых утилизационных бескомпрессорных турбинах (ГУБТ) для выработки электроэнергии. Для нормальной работы данных агрегатов значение запыленности доменного газа после аппаратов газоочистки должно быть не более 4 мг/м<sup>3</sup> [4].

В настоящее время на многих металлургических предприятиях России и Европы в качестве газоочистного оборудования доменных печей используются системы мокрой газоочистки проекта люксембургской компании Paul Wurth [5].

Принципиальная схема системы газоочистки доменного газа проекта компании Paul Wurth (рис. 1) состоит из скруббера и каплеотделителя 4. Скруббер состоит из двух частей: пре-скруббера 1 и скруббера 2 с элементами регулируемых кольцевых зазоров (ЭРКЗ) 3, обеспечивающих определенное значение давления доменного газа под колошником доменной печи и перепад давлений на газоочистке. В пре-скруббере установлено девять эвольвентных форсунок, размещенных по центру вертикально в линию.

Пре-скруббер и скруббер с ЭРКЗ соединены между собой коническим зумфом 7 и тремя газопроводами подвода доменного газа к ЭРКЗ 11. Внутри газопроводов подвода доменного газа установлено три эвольвентных форсунки, орошающие ЭРКЗ.

Данная система газоочистки имеет двухконтурный замкнутый цикл водоснабжения. Очищенная техническая вода 12 поступает на четыре нижних форсунки пре-скруббера и три форсунки, орошающие ЭРКЗ. Кроме того, техническая вода после орошения элементов регулируемых кольцевых зазоров собирается в конический зумф скруббера с ЭРКЗ 6 и по соединительному водоводу поступает в конический зумф каплеотделителя 8. Далее с помощью рециркуляционного насоса 5 техническая вода 13 подается на пять верхних форсунок пре-скруббера.

После контакта с газом техническая вода собирается в коническом зумфе пре-скруббера 7 и поступает на очистку и охлаждение в оборотный цикл водоснабжения газоочистки.

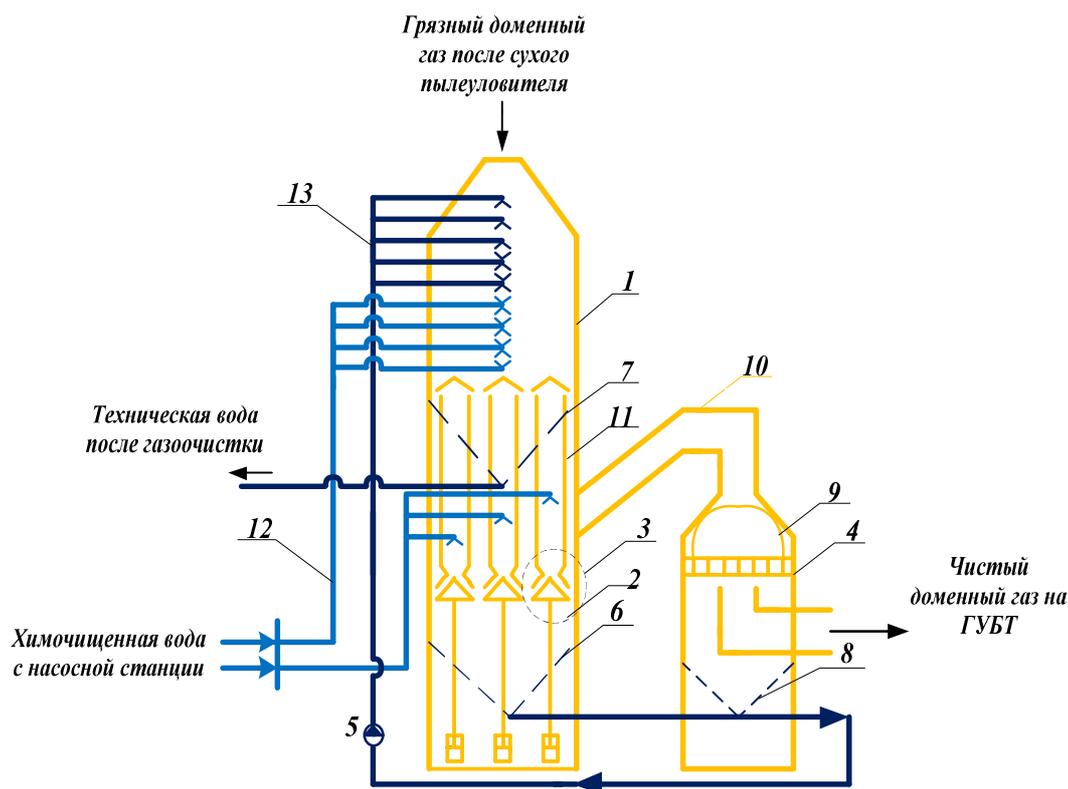


Рис. 1. Принципиальная схема мокрой газоочистки доменного газа проекта компании Paul Wurth: 1 – пре-скруббер; 2 – скруббер с ЭРКЗ; 3 – элементы регулируемых кольцевых зазоров; 4 – каплеотделитель; 5 – рециркуляционный насос; 6 – конический зумф скруббера с ЭРКЗ; 7 – конический зумф пре-скруббера; 8 – конический зумф каплеотделителя; 9 – завихритель; 10 – газопровод, соединяющий скруббер с каплеотделителем; 11 – газопроводы подвода доменного газа к ЭРКЗ; 12 – тракт химически очищенной технической воды; 13 – тракт рециркуляционной технической воды

Пре-скруббер является аппаратом полутонкой очистки доменного газа. За счет постоянного движения потока доменного газа и капель диспергированной технической воды происходит интенсивный процесс перемешивания, что, во-первых, приводит к улавливанию частиц колошниковой пыли, и, во-вторых, к эффективному процессу тепло- и массообмена, что обеспечивает необходимое охлаждение доменного газа [6].

Принцип очистки доменного газа в пре-скруббере, как и во многих других аппаратах мокрой очистки доменного газа, основан на свойстве увлажненных частиц колошниковой пыли коагулировать (слипаться). При этом частицы становятся более крупными и тяжелыми, в результате чего выпадают из потока газа [7].

С учетом высокой теплоемкости воды и относительно высокого значения температурного напора между доменным газом и каплями в пре-скруббере доменный газ теряет значительное количество тепловой энергии. Доменный газ, входящий в пре-скруббер в количестве 650–750 тыс. м<sup>3</sup>/ч и с температурой 120–180 °С, охлаждается до 60–70 °С при относительно небольшом расходе технической воды 1000–1200 м<sup>3</sup>/ч.

Процесс тепло- и массообмена в пре-скруббере неразрывно связан с процессом очистки до-

менного газа. Данный процесс чувствителен к условиям, его определяющим: качеству распыла технической воды (среднее значение диаметра капель), расходу технической воды, параметрам потока доменного газа (давление, плотность, температура, удельное влагосодержание) [8].

С учетом вышеперечисленного, с точки зрения повышения эффективности и снижения затрат энергии на очистку доменного газа весьма важным является исследование и моделирование процесса тепло- и массообмена в пре-скруббере.

Для проведения расчета теплообмена объем данного аппарата полутонкой очистки доменного газа был разделен на девять равных участков в соответствии с количеством и расположением эвольвентных форсунок в пре-скруббере.

Данный расчет проведен для четырех различных значений диаметра капель диспергированной технической воды (2; 3; 4; 5 мм). Выбранные значения соответствуют распределению по диаметрам капель при распыле рециркуляционной и химически очищенной технической воды эвольвентными форсунками с данными конструктивными параметрами и при номинальных режимах работы системы газоочистки (давление и расход доменного газа, расход и давление рециркуляционной и химически очищенной технической воды) [9].

Для учета времени движения капли на каждом расчетном участке в соответствии с выбранными средними значениями диаметра капель, получаемых в эвольвентных форсунках, используется значение полной (абсолютной) скорости их движения в пре-скруббере –  $w_{drop}^{B.F.G.}$  [10], которая определяется по следующей формуле

$$w_{drop}^{B.F.G.} = w_{B.F.G.} + w_{drop}, \quad (1)$$

где  $w_{drop}^{B.F.G.}$  – полная (абсолютная) скорость движения капли диспергированной технической воды на конкретном расчетном участке пре-скруббера, м/с;

$w_{drop}$  – скорость движения капли диспергированной технической воды в неподвижном газе, м/с;

$w_{B.F.G.}$  – скорость движения потока запыленного доменного газа в пре-скруббере, м/с (данная величина определяется с учетом диаметра сечения пре-скруббера и объемного расхода влажного доменного газа на каждом расчетном участке).

Среднее значение диаметра капель при условии постоянных значений расхода и давления технической (рециркуляционной и химически очищенной) воды определяет величину площади контакта запыленного доменного газа и технической воды (площадь тепло- и массообмена).

В качестве граничных условий для первого расчетного участка использованы параметры грязного доменного газа на входе в газоочистку (температура – 150 °С, избыточное давление – 2,5 бар, удельное влагосодержание – 18,5 г/кг сухого газа, массовый расход влажного доменного газа – 209 кг/с, массовый расход рециркуляционной технической воды, поступающей на форсунку № 1 – 31 кг/с, температура рециркуляционной технической воды – 50 °С).

Граничные условия для второго и последующих расчетных участков: параметры доменного газа (давление, температура, массовый расход с учетом содержания водяных паров, удельное влагосодержание), температура капли на выходе из предыдущего расчетного участка пре-скруббера и значения расходов и температур рециркуляционной и химически очищенной технической воды для эвольвентных форсунок № 2–9.

Целью расчета является нахождение величин температуры и удельного влагосодержания доменного газа на выходе из каждого расчетного участка пре-скруббера, коэффициентов теплоотдачи и массотдачи при различных средних значениях диаметра капель.

В основе расчета тепло- и массообмена лежит уравнение теплового баланса для капель технической воды, распыленной каждой форсункой. Данное уравнение составляется для капель каждой форсунки, взаимодействующих с доменным газом в конкретном расчетном участке пре-скруббера [11, 12]:

$$Q_1 = \alpha S (\vartheta_{MID} - t_{MID}) = M_{WET}^{B.F.G.} c_{pm}^{B.F.G.} (\vartheta_i - \vartheta_{i+1}), \quad (2)$$

где  $Q_1$  – величина теплового потока от запыленного доменного газа к каплям диспергированной технической воды, кВт;

$\alpha$  – значение коэффициента теплоотдачи при передаче тепловой энергии от доменного газа каплям технической воды, кВт/(К·м<sup>2</sup>);

$S$  – суммарная площадь тепло- и массообмена (суммарная площадь поверхности капель), м<sup>2</sup>;

$\vartheta_{MID}$  – средняя температура доменного газа в рассматриваемом расчетном участке, °С;

$t_{MID}$  – средняя температура капель диспергированной технической воды в рассматриваемом расчетном участке, °С;

$c_{pm}^{B.F.G.}$  – значение удельной массовой изобарной теплоемкости влажного доменного газа, кДж/(кг·К);

$M_{WET}^{B.F.G.}$  – массовый расход влажного доменного газа, кг/с;

$\vartheta_i$  – температура доменного газа на входе в рассматриваемый расчетный участок, °С;

$\vartheta_{i+1}$  – температура доменного газа на выходе из рассматриваемого расчетного участка, °С.

Тепловой поток от доменного газа идет на нагрев и частичное испарение капель диспергированной технической воды (конденсацию водяных паров из потока очищаемого газа) [13, 14]:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 = M^{T.W.} c_{pm}^{T.W.} (t_{i+1}^{T.W.} - t_i^{T.W.}) + M^{evap(cond)} r, \quad (3)$$

где  $Q_2$  – величина теплового потока, идущего на нагрев капель диспергированной технической воды, кВт;

$Q_3$  – величина теплового потока, идущего на частичное испарение капель диспергированной технической воды (конденсацию водяных паров из потока очищаемого газа), кВт;

$M^{T.W.}$  – массовый расход технической воды, поступающий на форсунку, кг/с;

$c_{pm}^{T.W.}$  – величина удельной массовой изобарной теплоемкости технической воды, кДж/(кг·К);

$t_{i+1}^{T.W.}$  – температура капли технической воды на входе в рассматриваемый расчетный участок, °С;

$t_i^{T.W.}$  – температура капли технической воды на выходе из рассматриваемого расчетного участка, °С;

$M^{evap(cond)}$  – массовый расход испарившейся технической воды (конденсировавшихся водяных паров), кг/с;

$r$  – удельная теплоты парообразования (конденсации), кДж/кг

Массовый расход испарившейся технической воды (конденсирующихся водяных паров) определяется по следующей формуле [15, 16]:

$$M^{evap(cond)} = \beta S (\rho_S - \rho_{H_2O}^{B.F.G.}), \quad (4)$$

где  $\beta$  – значение коэффициента массоотдачи, кг/с;

$\rho_S$  – значение плотности насыщения водяных паров (при температуре капель диспергированной технической воды), кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{H_2O}^{B.F.G.}$  – значение плотности водяных паров, содержащихся в доменном газе, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения значений коэффициентов тепло- и массоотдачи при контакте потока запыленного доменного газа с каплями диспергированной технической воды с учетом аналогии процессов переноса тепловой энергии и массы принимаем равенство теплового и диффузионного чисел Нуссельта [17]:

$$Nu = Nu_M, \quad (5)$$

где  $Nu$  – значение теплового критерия Нуссельта;

$Nu_M$  – значение диффузионного критерия Нуссельта.

С учетом значений критерия Рейнольдса для капли, движущейся в потоке доменного газа в пре-скруббере, для определения величины диффузионного критерия Нуссельта используется следующее критериальное уравнение [18]:

$$Nu_M = 2 + 0,55 Re^{0,55} Sc^{0,33}, \quad (6)$$

где  $Re$  – значение величины критерия Рейнольдса;

$Sc$  – значение величины критерия Шмидта.

При определении критерия Рейнольдса в качестве значения характерного размера использовалась величина среднего значения диаметра капель, а в качестве значения характерной скорости использовалась относительная скорость движения капли в потоке запыленного доменного газа. В данном случае относительная скорость – это скорость витания (скольжения) капли в потоке доменного газа [19].

Скорость витания (скольжения) капли диспергированной технической воды в потоке запыленного доменного газа на конкретном расчетном участке пре-скруббера определяется по следующей расчетной формуле:

$$w_{vit} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{d_{drop} (\rho_{T.W.} - \rho_{WET}^{B.F.G.})}{\rho_{WET}^{B.F.G.} \xi_B}}, \quad (7)$$

где  $w_{vit}$  – скорость витания капли диспергированной технической воды в потоке запыленного доменного газа на конкретном расчетном участке пре-скруббера, м/с;

$d_{drop}$  – среднее значение диаметра капли диспергированной технической воды, мм;

$\rho_{T.W.}$  – значение плотности капли диспергированной технической воды на конкретном расчетном участке пре-скруббера, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{WET}^{B.F.G.}$  – значение плотности влажного доменного газа на конкретном расчетном участке пре-скруббера, кг/м<sup>3</sup>;

$\xi_B$  – коэффициент лобового столкновения шара,  $\xi_B = 0,5$ .

Значение температуры доменного газа на выходе из каждого расчетного участка определяется с учетом уравнения теплового баланса для капли диспергированной технической воды:

$$\vartheta_{i+1} = \vartheta_i - \frac{Q_1}{M_{WET}^{B.F.G.} c_{pm}^{B.F.G.}}. \quad (8)$$

Величина удельного влагосодержания запыленного доменного газа на выходе из каждого расчетного участка определяется по следующей формуле:

$$\begin{aligned} d_{i+1}^{B.F.G.} &= \frac{M_{i+1}^{H_2O}}{M_{DRY}^{B.F.G.}} \cdot 1000 = \\ &= \frac{M_i^{H_2O} + (-)M^{evap(cond)}}{M_{DRY}^{B.F.G.}} \cdot 1000, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $d_{i+1}^{B.F.G.}$  – значение удельного влагосодержания запыленного доменного газа на выходе из конкретного расчетного участка пре-скруббера, г/кг сух. газа;

$M_{i+1}^{H_2O}$  – массовый расход водяных паров, содержащихся в доменном газе, на выходе из конкретного расчетного участка пре-скруббера, кг/с;

$M_i^{H_2O}$  – массовый расход водяных паров, содержащихся в доменном газе, на входе в конкретный участок пре-скруббера, кг/с.

По результат расчета процессов тепло- и массопереноса в пре-скруббере построены графики изменения величин удельного влагосодержания и температуры доменного газа по высоте пре-скруббера.

С учетом принципов построения графиков длина линий, описывающих изменение температуры и удельного влагосодержания на конкретном расчетном участке пре-скруббера, определяет интенсивность процессов тепло- и массоотдачи на данном расчетном участке.

Следует отметить, что при движении капли диспергированной технической воды по высоте пре-скруббера изменение величины ее среднего диаметра не превышает 5 % даже для самых мелких (2 мм) капель. Изменение величин температуры и удельного влагосодержания доменного газа определяется суммой его взаимодействий со всеми потоками впрыскиваемой форсунками технической воды с учетом ее температуры.

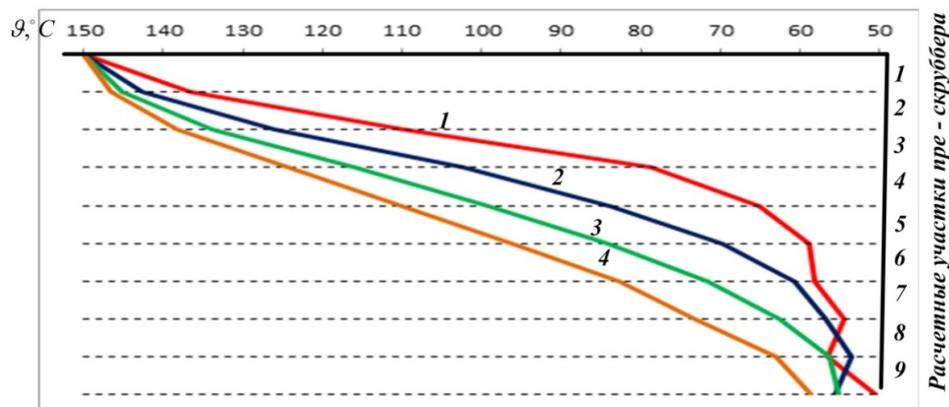


Рис. 2. График изменения температуры доменного газа по высоте пре-скруббера. Среднее значение диаметра капель: 1 – 2 мм; 2 – 3 мм; 3 – 4 мм; 4 – 5 мм

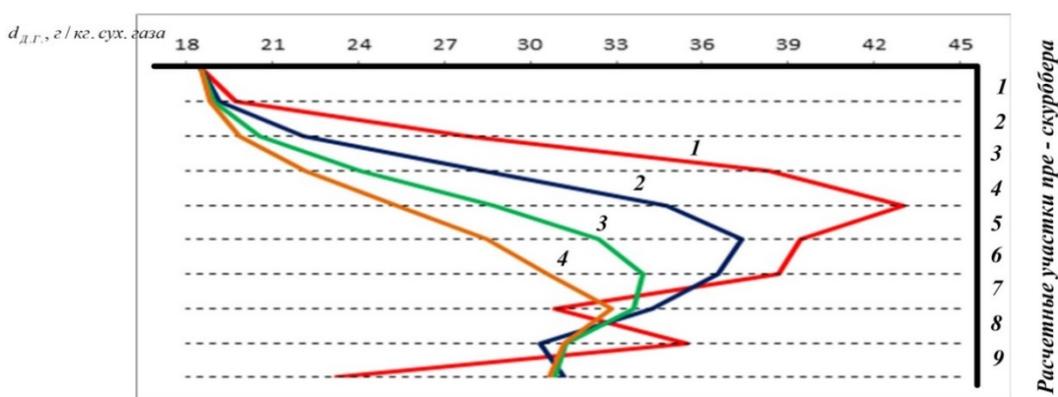


Рис. 3. График изменения удельного влагосодержания доменного газа по высоте пре-скруббера. Среднее значение диаметра капель: 1 – 2 мм; 2 – 3 мм; 3 – 4 мм; 4 – 5 мм

На нижних участках пре-скруббера впрыскивается химически очищенная техническая вода с температурой 35 °С, тогда как температура капель предыдущих форсунок около 60 °С. При этом одновременно идут процессы конденсации на «холодных» каплях и испарения «горячих» капель. Для капель с малой тепловой инерционностью (среднего диаметра 2 мм) это приводит к преобладанию процесса испарения на восьмом участке и повышению величины удельного влагосодержания очищаемого газа. Такой же эффект имеет место и для капель со средним диаметром 3 мм на девятом участке (рис. 2 и 3).

### Выводы

1. В соответствии с характером процессов тепло- и массообмена объем пре-скруббера можно условно разделить на две зоны:

– зона преимущественного испарения капель диспергированной технической воды, в которой протекают процессы интенсивного охлаждения доменного газа и насыщения его водяными парами;

– зона преимущественной конденсации водяных паров из потока запыленного доменного газа.

2. При уменьшении величины среднего значения диаметра капель диспергированной технической воды имеет место увеличение зоны кон-

денсации и, соответственно, повышение эффективности очистки доменного газа (см. график изменения величины удельного влагосодержания по высоте пре-скруббера – рис. 3).

Процесс конденсации водяных паров из потока доменного газа обеспечивает улавливание мелкодисперсной фракции колошниковой пыли, так как влага из доменного газа конденсируется на пылинках, которые являются центрами конденсации. В результате данного процесса повышается эффективность очистки доменного газа, так как увлажненные пылинки приобретают способность коагулировать, становясь более крупными и тяжелыми, что обеспечивает их выпадение из потока очищаемого газа [20].

### Литература

1. Geerdes, M. *Modern blast furnace ironmaking* / M. Geerdes. – Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2004. – 118 с.
2. Biswas, A. *Principles of blast furnace ironmaking: Theory and practice* / A. Biswas. – Brisbane: Cootha Publishing House, 1981 – 528 p.
3. Babich, A. *Ironmaking. Textbook* / A. Babich. – Aachen: RWTH Aachen University Department of Ferrous Metallurgy, 2006. – 402 p.

4. Старицкий, В.И. Газовое хозяйство заводов черной металлургии / В.И. Старицкий. – М.: Металлургия, 1973. – 496 с.
5. Белоусов, В.В. Теоретические основы процессов газоочистки / В.В. Белоусов. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
6. Сталинский, Д.В. Решение проблем очистки доменного газа и энергосбережения / Д.В. Сталинский, Г.М. Каненко, В.В. Алхазов // *Сталь*. – 2008. – № 6. – С. 85–90.
7. Сперкач, И.Е. Новые технологические и технические решения по газоочистной системе доменной печи / И.Е. Сперкач // *Сталь*. – 2007. – № 3. – С. 97–103.
8. Сталинский, Д.В. Результаты испытания новой системы очистки доменного газа / Д.В. Сталинский, Г.М. Каненко, В.В. Алхазов // *Сталь*. – 2009. – № 5. – С. 73–75.
9. Хавкин, Ю.И. Центробежные форсунки / Ю.И. Хавкин. – Л.: Машиностроение, 1976. – 168.
10. Старк, С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии / С.Б. Старк. – М.: Металлургия, 1977. – 328 с.
11. Лобасова, М.С. Теплообмен. Электронный учебно-методический комплекс / М.С. Лобасова, К.А. Финников, Т.А. Миловидова. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 292 с.
12. Телегин, А.С. Теплоперенос: учеб. пособие для вузов / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1995. – 400 с.
13. Nise, N.S. Control System Engineering / N.S. Nise. – 3<sup>rd</sup> ed. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 970 p.
14. Incropera, F.P. Fundamentals of heat and mass transfer / F.P. Incropera. – USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 999 p.
15. Holman, J. Heat Transfer / J. Holman. – USA: McGraw-Hill Science, 1986. – 702 p.
16. Theodore, L. Transfer Applications for the Practicing Engineer / L. Theodore. – USA: Wiley, 2011. – 664 p.
17. Han, J-C. Analytical Heat Transfer / J-C. Han. – USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. – 303 p.
18. Karwa, R. Heat and Mass Transfer / R. Karwa. – USA: Springer, 2017. – 1039 p.
19. Leal, L.G. Advanced Transport Phenomena: Fluid Mechanics and Convective Transport Processes / L.G. Leal. – United Kingdom: Cambridge University, 2007. – 934 p. DOI: 10.1017/CBO9780511800245
20. Юдашкин, М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М.Я. Юдашкин. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.

**Юшков Николай Владимирович**, аспирант, кафедра «Промышленная теплоэнергетика», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк; yushk.nikolai@yandex.ru.

**Губарев Василий Яковлевич**, канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Липецкий государственный технический университет, г. Липецк; gv\_lipetsk@rambler.ru.

*Поступила в редакцию 13 октября 2017 г.*

---

DOI: 10.14529/power180101

## STUDYING THE PROCESS OF HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PRE-SCRUBBER OF BLAST-FURNACE GAS WET SCRUBBING SYSTEM DESIGNED BY PAUL WURTH CO.

**N.V. Yushkov**, yushk.nikolai@yandex.ru,

**V.Ya. Gubarev**, gv\_lipetsk@rambler.ru

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

Blast furnace gas is a secondary product of cast-iron smelting. Nowadays, many metallurgy companies in Russia and Europe use blast furnace gas scrubbing systems designed by the Luxembourg-based company Paul Wurth. Speaking of the efficiency and energy cost of purifying blast-furnace gas by such scrubbing system, the heat-and-mass transfer in the pre-scrubber is of utmost importance. The paper presents computational analysis of pre-scrubber heat-and-mass transfer for different dispersed processed water drop sizes. Computations are based on heat balance equations for droplets of dispersed process water flowing in the stream of impure blast-furnace gas. The analogy of heat energy and mass transfer processes is used for computing the heat and mass loss factors.

*Keywords: blast-furnace gas, pre-scrubber, mean droplet diameter, evaporation, condensation.*

## References

1. Geerdes M. *Modern Blast Furnace Ironmaking*. Dusseldorf, Verlag Stahleisen GmbH Publ., 2004. 118 p.
2. Biswas A. *Principles of blast furnace ironmaking: Theory and practice*. Brisbane, Cootha Publishing House Publ., 1981. 528 p.
3. Babich A. *Ironmaking. Textbook*. Aachen, RWTH Aachen University Department of Ferrous Metallurgy Publ., 2006. 402 p.
4. Staritskiy V.I. *Gazovoe khozyaystvo zavodov chernoy* [Gas Economy of Ferrous Metallurgy Factories]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 496 p.
5. Belousov V.V. *Teoreticheskie osnovy protsessov gazoочистki* [Theoretical Foundations of Gas Scrubbing Processes]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 256 p.
6. Stalinskiy D.V., Kanenko G.N., Alkhazov V.V. [Solving the Problems of Blast-Furnace Gas Scrubbing and Power Saving]. *Stal'* [Steel], 2008, no. 6, pp. 85–90. (in Russ.)
7. Sperkach I. E. [New Technological and Technical Solutions for Gas Scrubbing Systems Used in Blast Furnaces]. *Stal'* [Steel], 2007, no. 3, pp. 97–103. (in Russ.)
8. Stalinskiy D.V., Kanenko G.N., Alkhazov V.V. [The Results of Testing a New Blast-Furnace Gas Scrubbing System]. *Stal'* [Steel], 2009, no. 5, pp. 73–75. (in Russ.)
9. Khavkin Yu.I. *Tsentrobezhnnye forsunki* [Centrifugal Atomizers]. Leningrad, Machine-building Publ., 1976. 169 p.
10. Stark S.B. *Pyleulavlivaniei ochistka gazov v metallurgii* [Dedusting and Gas Scrubbing in Metallurgy]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 328 p.
11. Lobasova M.S., Fennikov K.A., Milovidova T.A. *Teplomassоobmen. Elektronnyy uchebno-metodicheskiy kompleks* [Heat and Mass Transfer. Educational Software]. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2009. 292 p.
12. Telegin A.S., Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heat and Mass Transfer: A Textbook for Universities]. Moscow, Metallurgy Publ., 1995. 400 p.
13. Nise N.S. *Control System Engineering*. USA, John Wiley & Sons, Inc., 2000. 970 p.
14. Incropera F.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. USA, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 999 p.
15. Holman J. *Heat Transfer*. USA, McGraw-Hill Science, 1986. 702 p.
16. Theodore L. *Transfer Applications for the Practicing Engineer*. USA, Wiley, 2011. 664 p.
17. Han J-C. *Analytical Heat Transfer*. USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2012. 303 p.
18. Karwa R. *Heat and Mass Transfer*. USA, Springer, 2017. 1039 p.
19. Leal L.G. *Advanced Transport Phenomena: Fluid Mechanics and Convective Transport Processes*. United Kingdom, Cambridge University, 2007. 934 p. DOI: 10.1017/CBO9780511800245
20. Yudashkin M.Ya. *Pyleulavlivaniei i ochistka gazov v chernoy metallurgii* [Dedusting and Gas Cleaning in Ferrous Metallurgy]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984. 320 p.

Received 13 October 2017

## ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Юшков, Н.В. Исследование процесса теплообмена в пре-скруббере системы мокрой газоочистки доменного газа проекта компании Paul Wurth / Н.В. Юшков, В.Я. Губарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 5–11. DOI: 10.14529/power180101

## FOR CITATION

Yushkov N.V., Gubarev V.Ya. Studying the Process of Heat and Mass Transfer in the Pre-Scrubber of Blast-Furnace Gas Wet Scrubbing System Designed by Paul Wurth Co. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 5–11. (in Russ.) DOI: 10.14529/power180101