

УДК 669.162.252

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-16-23

### **Тепломассообмен при различных режимах очистки и охлаждения доменного газа в пре-скруббере системы мокрой газоочистки доменной печи**

Н.В. Юшков, В.Я. Губарев

Представлены результаты исследования процессов тепломассообмена при различных режимах орошения доменного газа в пре-скруббере системы мокрой газоочистки доменной печи № 7 Новолипецкого металлургического комбината.

В основу исследования процесса тепломассообмена положено уравнение теплового баланса при контакте доменного газа с каплями диспергированной технической воды. На основании расчета процессов тепломассообмена построены графики изменения температуры и удельного влагосодержания доменного газа по высоте пре-скруббера, с помощью которых проанализировано влияние качества распыла форсунок рециркуляционной и химически очищенной технической воды на расположение точки начала конденсации водяных паров из потока доменного газа по высоте пре-скруббера.

Изучены влияния температур рециркуляционной воды на интенсивность процесса испарения капель в верхней части пре-скруббера и химически очищенной технической воды на интенсивность процесса конденсации водяных паров в нижней части пре-скруббера. По результатам расчета процессов тепломассообмена предложены меры по повышению качества и эффективности очистки доменного газа в пре-скруббере систем газоочистки доменного газа проекта компании Paul Wurth Новолипецкого металлургического комбината.

*Ключевые слова:* пре-скруббер, среднее значение диаметра капель, испарение капель, конденсация водяных паров, тепломассообмен.

*Для цитирования:* Юшков Н.В., Губарев В.Я. Тепломассообмен при различных режимах очистки и охлаждения доменного газа в пре-скруббере системы мокрой газоочистки доменной печи // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 16—23. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-16-23.

### **Heat and Mass Transfer in Different Blast-Furnace Gas Cleaning and Cooling Modes in the Blast-Furnace Gas Wet Washing System Prescrubber**

N.V. Yushkov, V.Ya. Gubarev

The article presents the results from studying heat and mass transfer processes in different modes of spraying blast-furnace gas in the prescrubber used in the blast furnace No. 7 gas wet washing system at the Novolipetsk Iron & Steel Works.

The study of the heat and mass transfer processes is based on the equation of thermal balance when blast-furnace gas comes in contact with dispersed cooling water droplets. The results from the calculations of heat and mass transfer processes were used to construct graphic dependences of the blast furnace gas temperature and specific content of moisture in it on the prescrubber height. In turn, the obtained graphs were used to analyze the effect the quality of atomizing the recycling and chemically treated service cooling water in spray nozzles has on the location of the point over the prescrubber height at which water vapor contained in the flow of blast-furnace gas starts to condense.

The scope of work also included studying the effect the recycling water temperature has on the droplet evaporation intensity in the prescrubber upper part and the effect the chemically treated service cooling water temperature has on the water vapor condensation intensity in the prescrubber lower part.

The obtained heat and mass transfer analysis results were used as the basis for suggesting measures for improving the quality and efficiency of cleaning blast-furnace gas in the prescrubber used in the gas cleaning systems developed by Paul Wurth company for the Novolipetsk Iron & Steel Works.

*Key words:* prescrubber, droplet average diameter, droplet evaporation, water vapor condensation, heat and mass transfer.

*For citation:* Yushkov N.V., Gubarev V.Ya. Heat and Mass Transfer in Different Blast-Furnace Gas Cleaning and Cooling Modes in the Blast-Furnace Gas Wet Washing System Prescrubber. MPEI Vestnik. 2018;5:16—23. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-16-23.

На многих промышленных предприятиях черной металлургии России и Европы в газовом хозяйстве доменных печей используются системы газоочистки доменного газа проекта люксембургской компании Paul Wurth. Подобные системы мокрой газоочистки колошникового газа установлены после доменных печей № 6 и 7 Новолипецкого металлургического комбината (ПАО «НЛМК») [1, 2]. Они характеризуются высокой эффективностью и относительно низкими затратами энергии на очистку доменного газа [3 — 5]. Величина запыленности доменного газа на выходе из системы не превышает  $4 \text{ мг/м}^3$ , что позволяет использовать избыточное давление доменного газа в газовых утилизационных бескомпрессорных турбинах для выработки электроэнергии. Кроме того, в энергетическом хозяйстве ПАО «НЛМК» доменный газ применяют в качестве топлива воздухонагревателей доменных печей, котельных агрегатов центральной теплоэлектроцентрали

(ЦТЭЦ) и ЦУ ТЭЦ и методических нагревательных печей прокатных цехов.

Система мокрой газоочистки доменной печи № 7 полезным объемом  $4291 \text{ м}^3$  представлена на рис. 1 и состоит из скруббера диаметром  $6000 \text{ мм}$  и высотой  $34000 \text{ мм}$  и каплеотделителя 4. Объем скруббера (три газопровода доменного газа 11 и конический зумф 7) разделен на две части: пре-скруббер 1 и скруббер с элементами регулируемых кольцевых зазоров (ЭРКЗ) 2, ЭРКЗ 3 обеспечивают заданную величину давления под колошником доменной печи.

По центру пре-скруббера вертикально в линию установлено девять форсунок эвольвентного типа. Три форсунки находятся в соединительных газопроводах пре-скруббера и скруббера с ЭРКЗ для орошения доменного газа, проходящего через элементы регулируемых кольцевых зазоров.

Каплеотделитель системы газоочистки ДП-7 представляет собой цилиндрический сосуд диаметром

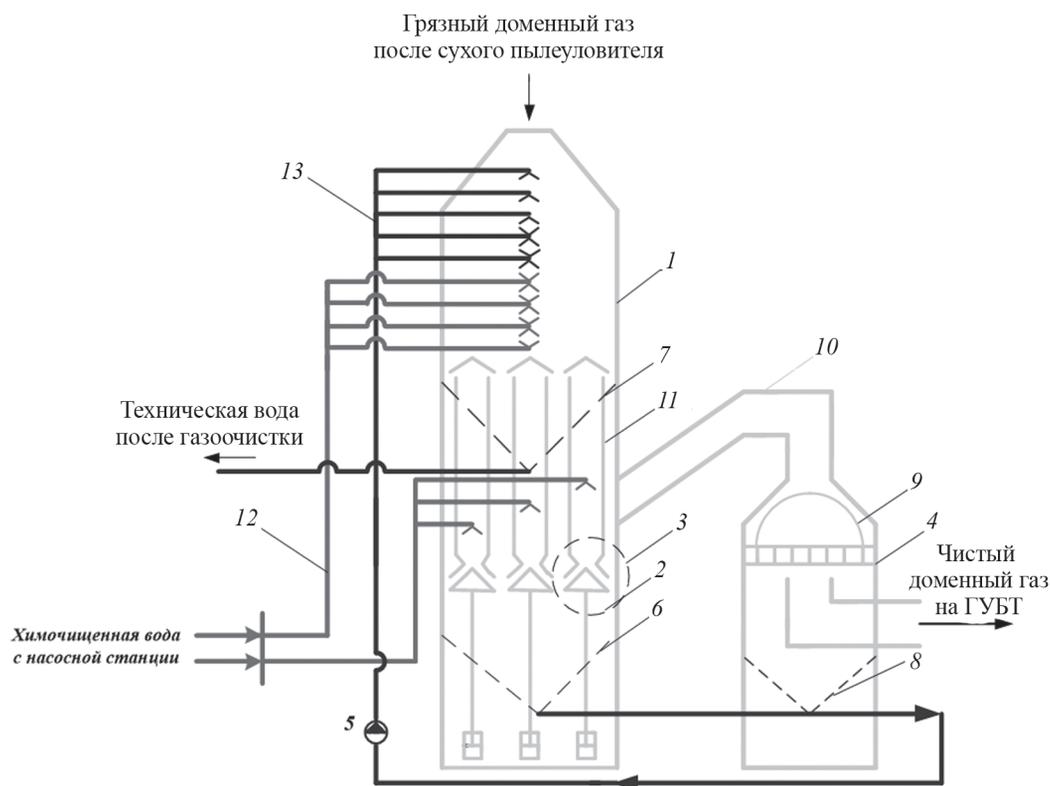


Рис. 1. Система мокрой газоочистки доменной печи №7 Новолипецкого металлургического комбината:

1 — пре-скруббер; 2 — скруббер с ЭРКЗ; 3 — элементы регулируемых кольцевых зазоров (ЭРКЗ); 4 — каплеотделитель; 5 — рециркуляционный насос; 6 — 8 — конические зумфы скруббера с ЭРКЗ, пре-скруббера и каплеотделителя; 9 — завихритель; 10 — газопровод, соединяющий скруббер и каплеотделитель; 11 — газопроводы подвода доменного газа в ЭРКЗ; 12, 13 — тракты химически очищенной и рециркуляционной технической воды

4000 мм и высотой 18000 мм. В его верхней части для отделения капельной влаги из очищенного доменного газа установлен завихритель 9.

Схема газоочистки ДП-7 имеет замкнутый двухконтурный цикл водоснабжения. Очищенная техническая вода 12 после насосной станции оборотного водоснабжения по двум отдельным водоводам подается на три форсунки ЭРКЗ и четыре нижних форсунки пре-скруббера.

Техническая вода после орошения доменного газа в элементах регулируемых кольцевых зазоров собирается в коническом зумфе скруббера с ЭРКЗ и по соединительному водоводу поступает в конический зумф каплеотделителя, после этого с помощью рециркуляционного насоса 5 подается на пять верхних форсунок пре-скруббера 13.

После контакта доменного газа с каплями диспергированной технической воды в пре-скруббере вода с большим содержанием взвешенных частиц поступает на очистку и охлаждение в оборотный цикл водоснабжения газоочистки.

Пре-скруббер — аппарат полутонкой очистки доменного газа. За счет интенсивного контакта запыленного доменного газа с каплями распыленной эвольвентными форсунками технической воды частицы колошниковой пыли смачиваются и коагулируют, после этого, становясь более тяжелыми и крупными, выпадают из потока очищаемого доменного газа [6]. Кроме того, за счет высокой величины температурного напора между доменным газом и каплями воды и процессов фазового превращения (испарения капель и конденсации водяных паров) в пре-скруббере интенсивно протекает процесс охлаждения доменного газа [7, 8].

Процессы тепломассообмена в пре-скруббере и очистки доменного газа неразрывно связаны. В нижней части пре-скруббера в результате контакта насыщенного водяными парами доменного газа с каплями диспергированной химически очищенной технической воды происходит конденсация водяных паров из потока очищаемого доменного газа. В данном случае центрами конденсации являются частицы колошниковой пыли, содержащиеся в доменном газе. Конденсация водяных паров на частицах пыли приводит к их смачиванию, укрупнению и выпадению из потока очищаемого газа под действием сил инерции [9, 10].

Среди основных факторов, определяющих интенсивность тепломассообмена при очистке доменного газа в пре-скруббере системы газоочистки доменного газа, выделяют:

- среднее значение диаметра капель диспергированной технической воды;
- массовые (объемный) расходы и значения температуры рециркуляционной и химически очищенной технической воды;
- давление, температуру, удельное влагосодержание, массовый (объемный) расход доменного газа на входе в пре-скруббер [11, 12].

Представлены результаты теоретического исследования и сравнительного анализа процессов тепломассообмена при изменении режима работы форсунок рециркуляционной и химически очищенной технической воды с различным качеством распыла, увеличении номинального значения температуры рециркуляционной технической воды с 50 до 60 °С и уменьшение номинального значения температуры химически очищенной технической воды с 35 до 30 °С.

Выполнен расчет режимов охлаждения доменного газа при изменении действующей схемы орошения (количество форсунок рециркуляционной воды уменьшено с пяти до четырех, количество форсунок химически очищенной технической воды соответственно увеличено до пяти), при этом значение расхода рециркуляционной технической воды снижено на 20%, а величина расхода химически очищенной технической воды на 20% увеличена.

Для проведения исследования процессов тепломассообмена объем пре-скруббера был разделен на девять расчетных участков (в соответствии с количеством эвольвентных форсунок).

Выбор средних значений диаметра капель (3 и 4 мм) для проведения данного расчета обусловлен возможностью форсунок эвольвентного типа с указанными конструктивными параметрами (диаметрами входного, выходного отверстий и камеры) при номинальных режимах работы системы мокрой газоочистки ДП-7.

Расчет процесса тепломассообмена базируется на уравнении теплового баланса капли диспергированной технической воды каждой форсунки, взаимодействующей с потоком запыленного доменного газа в конкретном расчетном участке пре-скруббера. Сумма взаимодействий определяет процесс охлаждения доменного газа в пре-скруббере [13]:

$$Q_1 = \alpha S (\vartheta_{\text{ср}} - t_{\text{ср}}) = M_{\text{вл}}^{\text{д.г}} c_{\text{рм}}^{\text{д.г}} (\vartheta_i - \vartheta_{i+1}),$$

где  $Q_1$  — величина теплового потока от запыленного доменного газа к каплям диспергированной технической воды, кВт;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи при передаче тепловой энергии от доменного газа каплям технической воды, кВт/(К·м<sup>2</sup>);  $S$  — суммарная площадь тепломассообмена (суммарная площадь поверхности капель), м<sup>2</sup>;  $\vartheta_{\text{ср}}, t_{\text{ср}}$  — средние температуры доменного газа и капель диспергированной технической воды в рассматриваемом расчетном участке, °С;  $M_{\text{вл}}^{\text{д.г}}$  — массовый расход влажного доменного газа, кг/с;  $c_{\text{рм}}^{\text{д.г}}$  — удельная массовая изобарная теплоемкость влажного доменного газа, кДж/(кг·К);  $\vartheta_i, \vartheta_{i+1}$  — температуры доменного газа на входе в рассматриваемый расчетный участок и выходе из него, °С.

В результате взаимодействия доменного газа с каплями технической воды происходит нагрев капель и частичное их испарение или конденсация водяных паров из потока насыщенного доменного газа [14]:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 = M^{т.в} c_{pm}^{т.в} (t_{i+1}^{т.в} - t_i^{т.в}) + M^{исп(конд)} r,$$

где  $Q_2, Q_3$  — величины тепловых потоков, идущих на нагрев и частичное испарение (конденсацию водяных паров из потока очищаемого газа) каплей диспергированной технической воды, кВт;  $M^{т.в}$  — массовый расход технической воды, поступающий на форсунку, кг/с;  $c_{pm}^{т.в}$  — удельная массовая изобарная теплоемкость технической воды, кДж/(кг·К);  $t_i^{т.в}, t_{i+1}^{т.в}$  — температуры капли технической воды на входе в рассматриваемый расчетный участок и выходе из него, °С;  $M^{исп(конд)}$  — массовый расход испарившейся технической воды (конденсировавшихся водяных паров), кг/с;  $r$  — удельная теплота парообразования (конденсации), кДж/кг.

Массовый расход испарившейся технической воды (конденсирующихся водяных паров) равен

$$M^{исп(конд)} = \beta S (\rho_s - \rho_{H_2O}^{д.г}),$$

где  $\beta$  — коэффициент массоотдачи, кг/с;  $\rho_s$  — плотность насыщения водяных паров (при температуре каплей диспергированной технической воды), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{H_2O}^{д.г}$  — плотность 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 применимо равенство теплового и диффузионного чисел Нуссельта [15, 16].

$$Nu = Nu_M.$$

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 [17]:

$$Nu_M = 2 + 0,55 Re^{0,55} Sc^{0,33},$$

где  $Re, Sc$  — критерии Рейнольдса и Шмидта.

При определении критерия Рейнольдса в качестве характерного размера использовалась величина среднего значения диаметра каплей, а в качестве скорости — относительная скорость движения капли в потоке запыленного доменного газа [18].

Относительная скорость движения капли диспергированной технической воды в потоке запыленного доменного газа определяется по следующей формуле:

$$w_{отн} = w_{д.г} - w_{вит},$$

где  $w_{отн}, w_{вит}$  — относительная скорость движения и скорость витания (скольжения) капли в потоке запыленного доменного газа, м/с;  $w_{д.г}$  — средняя скорость влажного доменного газа на каждом расчетном участке пре-скруббера, м/с.

Для учета времени взаимодействия капли диспергированной технической воды с потоком запыленного доменного газа на каждом конкретном участке пре-скруббера используется величина абсолютной скорости движения капли [19]:

$$w_{абс} = w_{д.г} + w_{вит}.$$

Скорость витания (скольжения) капли диспергированной технической воды в потоке запыленного доменного газа на конкретном расчетном участке пре-скруббера определяется по следующей расчетной формуле [20]:

$$w_{вит} = \sqrt{\frac{4 d_k (\rho_{т.в} - \rho_{вл}^{д.г})}{3 \rho_{вл}^{д.г} \xi_{ш}}},$$

где  $d_k$  — среднее значение диаметра капли диспергированной технической воды, мм;  $\rho_{т.в}, \rho_{вл}^{д.г}$  — плотности капли диспергированной технической воды и влажного доменного газа на конкретном расчетном участке пре-скруббера, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi_{ш}$  — коэффициент лобового столкновения шара,  $\xi_{ш} = 0,5$ .

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

$$\vartheta_{i+1} = \vartheta_i - \frac{Q_1}{M_{вл}^{д.г} c_{pm}^{д.г}}.$$

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

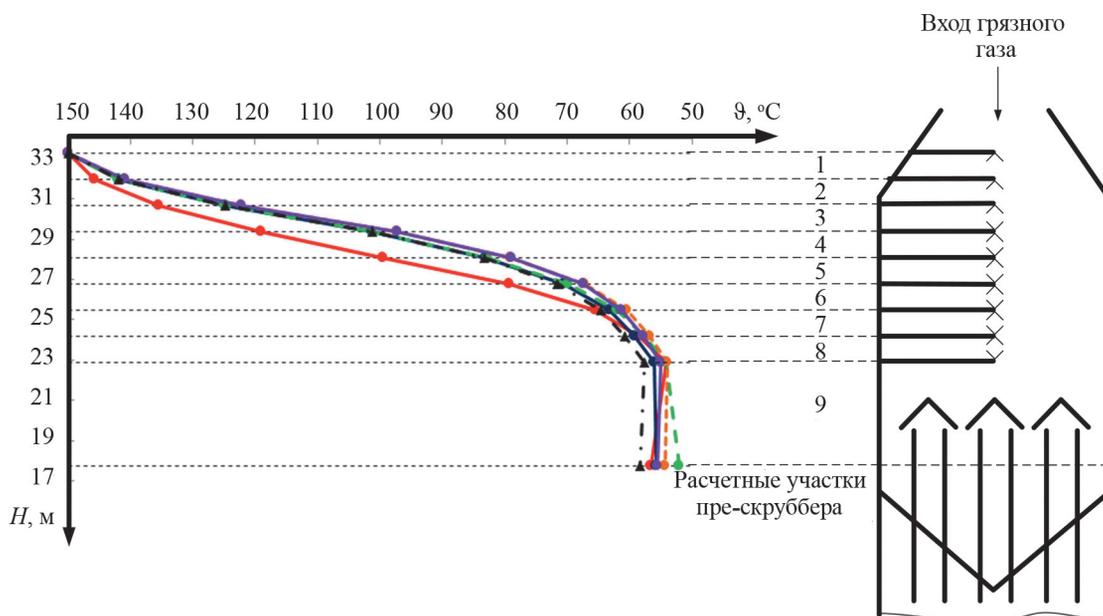
$$d_{i+1}^{д.г} = \frac{M_{i+1}^{H_2O}}{M_{сух}^{д.г}} \cdot 1000 = \frac{M_i^{H_2O} + (-) M^{исп(конд)}}{M_{сух}^{д.г}} \cdot 1000,$$

где  $M_{i+1}^{H_2O}, M_i^{H_2O}$  — массовый расход водяных паров, содержащихся в доменном газе, на выходе из конкретного расчетного участка пре-скруббера и входе в него, кг/с.

По результатам расчета процессов тепломассообмена в пре-скруббере системы мокрой газоочистки доменной печи № 7 ПАО «НЛМК» для каждого исследованного режима очистки и охлаждения газа построены графики изменения значений температуры и удельного влагосодержания доменного газа по высоте пре-скруббера (рис. 2, 3).

Исходя из данных, представленных на рис. 2, 3, можно сделать следующие выводы.

При режимах охлаждения и очистки доменного газа в пре-скруббере с более тонким качеством распыла для форсунок рециркуляционной технической воды (среднее значение диаметра каплей — 3 мм) по отношению к форсункам химически очищенной технической воды (среднее значение диаметра каплей — 4 мм) за счет



Обозначение	Среднее значение диаметра капель, мм		Температура капель, °C	
	рециркуляционная вода	химически очищенная вода	рециркуляционная вода	химически очищенная вода
<b>Действующая схема подачи технической воды</b>				
	3	4	50	35
	3	4	60	35
<b>Схема подачи технической воды с четырьмя форсунками рециркуляционной и пятью форсунками химически очищенной технической воды</b>				
	4	3	60	35
	3	4	60	35
	3	4	60	30
	3	4	50	35

Рис. 2. График изменения температуры доменного газа по высоте пре-скруббера

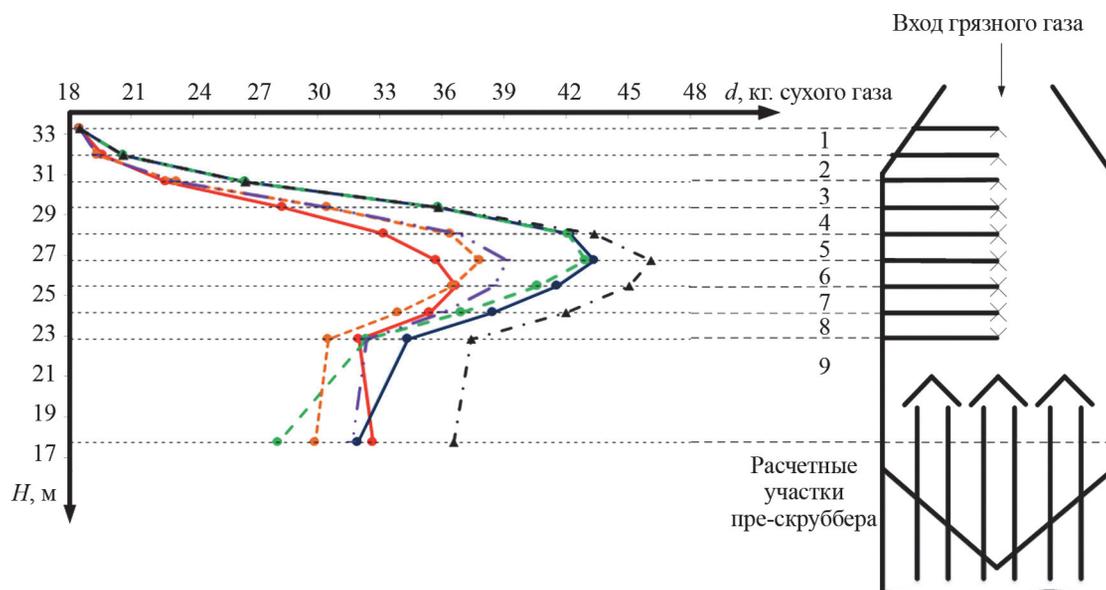
увеличения площади теплообмена (большее количество капель диспергированной технической воды) имеет место интенсивный процесс охлаждения доменного газа и испарения капель (насыщение водяными парами доменного газа), что приводит к снижению значения температуры и повышению величины удельного влагосодержания доменного газа на выходе из верхних расчетных участков пре-скруббера.

Для режимов работы пре-скруббера с более низким значением температуры рециркуляционной технической воды — 50 °C за счет увеличения величины температурного напора между запыленным потоком доменного газа и каплями распыленной технической воды процесс охлаждения доменного газа на верхних расчетных участках пре-скруббера протекает более интенсивно относительно режимов с температурой рециркуляционной воды 60 °C.

С учетом графика изменения удельного влагосодержания доменного газа по высоте пре-скруббера для

схемы подачи технической воды с пятью форсунками рециркуляционной воды по отношению к схеме с четырьмя форсунками (при равных значениях температуры рециркуляционной технической воды и диаметра капель) имеет место большее значение величины удельного влагосодержания доменного газа на выходе из верхних участков пре-скруббера. Данная закономерность обусловлена увеличением интенсивности насыщения водяных паров на четвертом расчетном участке пре-скруббера за счет большего количества капель с более высокой температурой (значение температуры капель прямо пропорционально величине плотности насыщения водяных паров).

Увеличение величины удельного влагосодержания доменного газа на выходе из верхней части пре-скруббера наблюдается при повышении значения температуры рециркуляционной технической воды. Данная закономерность обусловлена большей интенсивностью испарения капель рециркуляционной тех-



Обозначение	Среднее значение диаметра капель, мм		Температура капель, °С	
	рециркуляционная вода	химически очищенная вода	рециркуляционная вода	химически очищенная вода
<b>Действующая схема подачи технической воды</b>				
	3	4	50	35
	3	4	60	35
<b>Схема подачи технической воды с четырьмя форсунками рециркуляционной и пятью форсунками химически очищенной технической воды</b>				
	4	3	60	35
	3	4	60	35
	3	4	60	30
	3	4	50	35

Рис. 3. График изменения удельного влагосодержания доменного газа по высоте пре-скруббера

нической воды в верхней части пре-скруббера за счет большей величины температуры капель на входе и выходе из каждого верхнего расчетного участка пре-скруббера.

При снижении температуры химически очищенной технической воды (с 35 до 30 °С) имеет место большая интенсивность процесса конденсации водяных паров из потока очищаемого доменного газа за счет более низкого значения плотности насыщения водяных паров.

Относительно эффективности очистки доменного газа с точки зрения конденсации водяных паров на частицах колошниковой пыли, с последующей их коагуляцией и удалением из потока доменного газа, необходимо отметить следующие закономерности.

Для режимов работы пре-скруббера с более тонким распылом рециркуляционной воды и более грубым распылом химически очищенной технической воды по отношению к противоположному режиму распределения среднего значения диаметра капель по верхним и

нижним форсункам пре-скруббера имеет место более высокое расположение точки начала конденсации водяных паров по высоте пре-скруббера, что снижает качество очистки доменного газа за счет конденсации водяных паров из потока запыленного доменного газа.

При изменении схемы подачи технической воды на пре-скруббер расположение точки начала конденсации водяных паров из потока доменного газа по высоте пре-скруббера не меняется. С учетом этого можно сделать вывод, что при изменении схемы подачи технической воды при постоянных значениях температуры рециркуляционной и химически очищенной технической воды эффективность очистки доменного газа на нижних расчетных участках пре-скруббера остается прежней.

При изменении схемы подачи технической воды с учетом технологической схемы системы мокрой газоочистки ДП-7 сокращение расхода химически очищенной технической воды на орошение доменного газа, проходящего через элементы регулируемых кольцевых

зазоров, приведет к снижению эффективности тонкой очистки газа в ЭРКЗ. Кроме того, за счет уменьшения расхода химически очищенной воды на орошение ЭРКЗ сократится производительность рециркуляционного насоса, что приведет к снижению величины потребляемой электрической мощности данным агрегатом.

Таким образом, для увеличения эффективности работы системы мокрой газоочистки доменной печи № 7 ПАО «НЛМК» за счет повышения интенсивности конденсации водяных паров в нижней части пре-скруббера необходимо увеличить эффективность работы вентиляторных градилен оборотного цикла водоснабжения газоочистки с целью снижения температуры химически очищенной технической воды. Также обеспечение режима орошения доменного газа с более тонким качеством распыла для форсунок рециркуляционной технической воды и более грубым распылом для форсунок химически очищенной технической воды позволит добиться достаточно высокого расположения в пре-скруббере точки начала конденсации водяных паров из потока очищаемого доменного газа.

### Литература

1. Коршиков Г.В. и др. Об эффективности применения повышенного давления газов в доменной печи как способа интенсификации процесса плавки // *Металлург*. 2015. № 8. С. 37—44.
2. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Донсков А.Д. Газодутьевой режим и распределение газа в доменных печах // *Сталь*. 2014. № 3. С. 12—17.
3. Филатов С.В. и др. Доменное производство НЛМК: традиции, инновации, развитие // *Черная металлургия*. 2014. № 10 (1378). С. 30—34.
4. Рыжков А.Ф. и др. Повышение эффективности использования доменного газа на металлургических предприятиях России // *Металлург*. 2016. № 1. С. 26—34.
5. Старицкий В.И. Газовое хозяйство заводов черной металлургии. М.: Металлургия, 1973.
6. Старк С.Б. Пылеулавливание и очистка газов в металлургии. М.: Металлургия, 1990.
7. Сталинский Д.В., Каненко Г.М., Алхасова В.В. Результаты испытания новой системы очистки доменного газа // *Сталь*. 2009. № 5. С. 73—76.
8. Новожилов А. и др. Совершенствование очистки доменного газа на примере ОАО КМЗ // *Технадзор*. 2015. № 10 (107). С. 316—317.
9. Козлова С.А., Шалаев И.М., Раева О.В., Киселев А.В. Оборудование для очистки газов промышленных печей. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2007.
10. Сперкач И.Е. Новые технологические и технические решения по газоочистной системе доменной печи // *Сталь*. 2007. № 3. С. 97—103.
11. Сталинский Д.В., Каненко Г.М., Алхасова В.В. Решение проблем очистки доменного газа и энергосбережения // *Сталь*. 2008. № 6. С. 85—90.

12. Губарев В.Я., Юшков Н.В. Совершенствование систем газоочисток доменного газа // *Молодой ученый*. 2016. № 10. С. 166—169.

13. Ходакова Т.Д., Стареева М.О. Форсуночный скруббер для охлаждения и увлажнения доменного газа // *Глобализация науки: проблемы и перспективы: Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф.* 2015. Уфа: МЦИИ «Omega Science». С. 21—24.

14. Юдашкин М.Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии. М.: Металлургия, 1984.

15. Лобасова М.С., Финников К.А., Миловинова Т.А. Теплообмен. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2009.

16. Цветков О.Б., Лаптев Ю.А., Ширяев Ю.Н. Термодинамика. Теплообмен. Термодинамика и теплопередача. Прикладной теплообмен. СПб.: Изд-во ИТМО, 2009.

17. Щербакова Т.П., Леканова Т.Л., Казакова Е.Г. Теплообмен. Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского лесного ин-та, 2015.

18. Кологривов М.М., Бузовский В.П. Численное моделирование тепло- и массообмена в эжекционном аппарате // *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89. № 1. С. 158—169.

19. Арзамасцев А.Г., Губарев В.Я., Морева Ю.О. Особенности расчета теплообмена при течении водовоздушного потока в каналах с конденсацией пара на поверхности // *Инновационное развитие*. 2016. № 2 (2). С. 4—5.

20. Шиялев М.И., Толстых А.В., Герасименко К.В., Кузнецова А.А. Эффективность тепловлажностной обработки воздуха в барботажных аппаратах и оросительных камерах // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2014. № 3 (147). С. 70—73.

### References

1. Korshikov G.V. i dr. Ob Effektivnosti Primeneniya Povyshennogo Davleniya Gazov v Domennoy Pechi kak Sposoba Intensifikatsii Protsess Plavki. *Metallurg*. 2015;8:37—44. (in Russian).
2. Donskov E.G., Lyalyuk V.P., Donskov A.D. Gazodut'evoy Rezhim i Raspredelenie Gaza v Domennykh Pechakh. *Stal'*. 2014;3:12—17. (in Russian).
3. Filatov S.V. i dr. Domennoe Proizvodstvo NLMK: Traditsii, Innovatsii, Razvitie. *Chernaya Metallurgiya*. 2014;10 (1378):30—34. (in Russian).
4. Ryzhkov A.F. i dr. Povyshenie Effektivnosti Ispol'zovaniya Domennogo Gaza na Metallurgicheskikh Predpriyatiyakh Rossii. *Metallurg*. 2016;1:26—34. (in Russian).
5. Staritskiy V.I. Gazovoe Khozyaystvo Zavodov Chernoy Metallurgii. М.: Metallurgiya, 1973. (in Russian).
6. Stark S.B. Pyleulavlvanie i Ochistka Gazov v Metallurgii. М.: Metallurgiya, 1990. (in Russian).
7. Stalinskiy D.V., Kanenko G.M., Alkhasova V.V. Rezul'taty Ispytaniya Novoy Sistemy Ochistki Domennogo Gaza. *Stal'*. 2009;5:73—76. (in Russian).

8. **Novozhilov A. i dr.** Sovershenstvovanie Ochistki Domennogo Gaza na Primere OAO KMZ. Tekhnadzor. 2015;10 (107):316—317. (in Russian).

9. **Kozlova S.A., Shalaev I.M., Raeva O.V., Kiselev A.V.** Oborudovanie Dlya Ochistki Gazov Promyshlennykh Pechey. Krasnoyarsk: Izd-Vo Sibiskogo Federal'nogo Un-ta, 2007. (in Russian).

10. **Sperkach I.E.** Novye Tekhnologicheskie i Tekhnicheskie Resheniya po Gazoochistnoy Sisteme Domennoy Pechi. Stal'. 2007;3:97—103. (in Russian).

11. **Stalinskiy D.V., Kanenko G.M., Alkhasova V.V.** Reshenie Problem Ochistki Domennogo Gaza I Energoberezheniya. Stal'. 2008;6:85—90. (in Russian).

12. **Gubarev V.Ya., Yushkov N.V.** Sovershenstvovanie Sistem Gazoochistok Domennogo Gaza. Molodoy Uchenyy. 2016;10:166—169. (in Russian).

13. **Khodakova T.D., Stareeva M.O.** Forsunochnyy Skrubber dlya Okhlazhdeniya i Uvlazhneniya Domennogo Gaza. Globalizatsiya Nauki: Problemy i Perspektivy: Sb. Statey Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. 2015. Ufa: MTSII «Omega Science»:21—24. (in Russian).

14. **Yudashkin M.Ya.** Pyleulavlivanie i Ochistka Gazov v Chernoy Metallurgii. M.: Metallurgiya, 1984. (in Russian).

15. **Lobasova M.S., Finnikov K.A., Milovidova T.A.** Teplomasoobmen. Krasnoyarsk: Izd-vo Sibiskogo Federal'nogo Un-ta, 2009. (in Russian).

16. **Tsvetkov O.B., Laptev Yu.A., Shiryaev Yu.N.** Termodinamika. Teplomasoobmen. Termodinamika i Teploperedacha. Prikladnoy Teplomasoobmen. SPb.: Izd-vo ITMO, 2009. (in Russian).

17. **Shcherbakova T.P., Lekanova T.L., Kazakova E.G.** Teplomasoobmen. Syktyvkar: Izd-vo Syktyvkarskogo Lesnogo In-ta, 2015. (in Russian).

18. **Kologrivov M.M., Buzovskiy V.P.** Chislennoe Modelirovanie Teplo- i Massoobmena v Ezheksionnom Apparate. Inzhenerno-fizicheskiy Zhurnal. 2016;89; 1:158—169. (in Russian).

19. **Arzamastsev A.G., Gubarev V.Ya., Moreva Yu.O.** Osobennosti Rascheta Teploobmena pri Tehenii Vodovozdushnogo Potoka v Kanalakh s Kondensatsiey Para na Poverkhnosti. Innovatsionnoe Razvitie. 2016;2 (2):4—5. (in Russian).

20. **Shilyaev M.I., Tolstykh A.V., Gerasimenko K.V., Kuznetsova A.A.** Effektivnost' Teplovlazhnostnoy Obrabotki Vozdukha v Barbotazhnykh Apparatakh i Orositel'nykh Kamerakh. Santehnika, Otoplenie, Konditsionirovanie. 2014;3 (147):70—73. (in Russian).

---

#### Сведения об авторах

**Юшков Николай Владимирович** — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета, аппаратчик очистки газа газового цеха Новолипецкого металлургического комбината, e-mail: yushk.nikolai@yandex.ru

**Губарев Василий Яковлевич** — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета, e-mail: gv\_lipetsk@rambler.ru

---

#### Information about authors

**Yushkov Nikolay V.** — Ph.D.-student of Industrial Heat Power Engineering Dept., Lipetsk State Technical University, Operator of Gas Treatment Plant, Novolipetsk Metallurgical Plant, e-mail: yushk.nikolai@yandex.ru

**Gubarev Vasily Ya.** — Ph.D. (Techn.), Professor, Head of Industrial Heat Power Engineering Dept., Lipetsk State Technical University, e-mail: gv\_lipetsk@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 02.11.2017*