

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Holmberg K., Erdemir A. et al Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry// Tribology International. – 2017. – vol. 115. – Pp. 116–139.
2. Hällgren O. Mine dewatering with submersible pump// World Pumps. – 2006. – vol. 2006. – no. 477. – Pp. 30–31.
3. Sahoo L. K., Bandyopadhyay S., Banerjee R. Water and energy assessment for dewatering in opencast mines//Journal of Cleaner Production. – 2014. – vol. 84. – Pp. 736–745.
4. Stemn E. Analysis of Injuries in the Ghanaian Mining Industry and Priority Areas for Research// Safety and Health at Work. – 2018. – vol. 10. – no. 2. – Pp. 151–165.
5. Мёд А.П., Оголубченко А.С. Исследование режимов работы энергоемких водоотливных установок и разработка системы мониторинга состояния и управления комплексом водоотлива шахты: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://masters.donntu.org/2013/fkita/myod/diss/index.htm> (Дата обращения 27.12.2020).
6. ГОСТ 28298-2016 Заземление рудничных электроустановок. Технические требования и методы контроля. – М.: Изд-во стандартов, 2017. – 7 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА УВЛАЖНЕННЫМ ВОЗДУХОМ

В.В. Беспалов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: vic@tpu.ru

## SIMULATION OF NATURAL GAS COMBUSTION PRODUCTS BY HUMIDIFIED AIR

V.V. Bepalov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050  
E-mail: vic@tpu.ru

***Annotation.** The report discusses the possibility of using humidified air simulating the of natural gas combustion products in laboratory experimental studies of water vapor condensation. An installation scheme and a method for calculating the preheating of the source air are proposed.*

При проведении экспериментов по утилизации тепла дымовых газов котлов на природном газе с конденсацией содержащихся в них водяных паров наиболее сложным является изучение процесса конденсации и определение коэффициента теплоотдачи. В лабораторных условиях университета не всегда возможно использование непосредственно продуктов сгорания природного газа в силу ряда причин, связанных с безопасностью. Однако при проведении таких исследований можно с достаточной степенью адекватности использовать увлажненный воздух [1].

Природный газ содержит в основном метан. Процесс его горения описывается формулой:  $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$ .

Кислород берется из дутьевого воздуха, а оставшийся азот проходит транзитом через камеру сгорания, не вступая во взаимодействие. Количество водяных паров здесь определяется составом сжигаемого топлива, его влажностью и коэффициентом избытка воздуха. Влагосодержание дымовых газов составляет 0,15 – 0,108 килограмм на килограмм сухих газов (кг/кг.с.г), в зависимости от коэффициента избытка воздуха ( $\alpha = 1\div 1,4$ ) [2]. Таким образом состав продуктов сгорания природного газа отличается от состава увлажненного воздуха замещением кислорода на углекислый газ, что не

повлияет на исследование процесса конденсации водяных паров на поверхности теплообмена теплоутилизатора.

На рисунке 1 показана схема установки получения увлажненного воздуха заданных параметров.

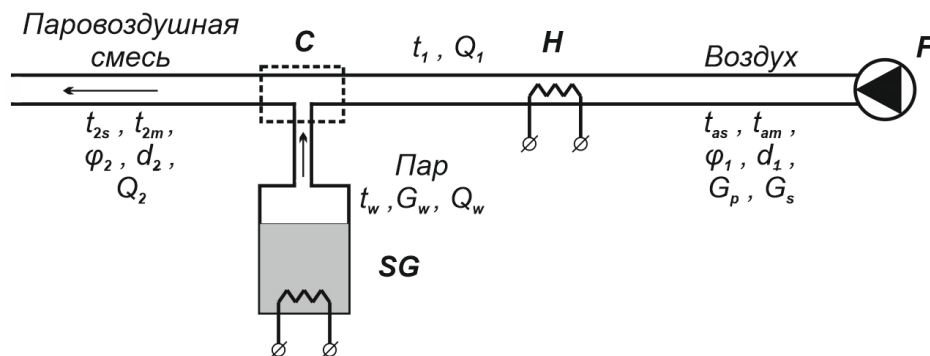


Рис. 1. Схема установки: *F* – вентилятор, *H* – электрический нагреватель воздуха, *C* – камера смешения, *SG* – электрический парогенератор

Начальные параметры воздуха (относительная влажность  $\phi_1$ , влагосодержание  $d_1$ ) измеряются психрометрическим методом по температуре сухого  $t_{as}$  и влажного  $t_{am}$  термометра. По скорости воздуха, измеряемой трубкой Пито, рассчитывается расход воздуха, а также расход сухого воздуха  $G_s$  и расход пара в исходном воздухе  $G_p$ . Количество подаваемого пара  $G_w$  регулируется реостатом электрического парогенератора. Мощность измеряется по показаниям амперметра и вольтметра. Влагосодержание смеси  $d_2$  рассчитывается исходя из влагосодержания исходного воздуха и количества воды, испаренной в парогенераторе.

Для экспериментальных исследований необходимо, чтобы водяные пары в смеси находились в состоянии насыщения. Это определяет температуру смеси. Влагосодержание и температура насыщенных водяных паров [3, 4] связаны между собой при атмосферном давлении зависимостью

$$d_n(t) = 0,622 \cdot \frac{10^b}{760 - 10^b}, \text{ где } b = \frac{156 + 8,12 \cdot t}{236 + t}.$$

Показания сухого  $t_{2s}$  и влажного  $t_{2m}$  термометра должны быть одинаковыми, относительная влажность  $\phi_2$  смеси 100%.

Неизвестной величиной является температура  $t_1$ , до которой нужно предварительно нагреть исходный воздух. Если эта температура окажется ниже, то при смешивании с паром возникнет туман или переохлаждение смеси. Если температура окажется выше, то водяные пары будут в перегретом состоянии ( $\phi_2 < 100\%$ ). Искомая температура определяется из теплового баланса

$$G_s \cdot c_{ps} \cdot t_2 + (G_w + G_p) \cdot H_{pw}(t_2) = G_s \cdot c_{ps} \cdot t_1 + G_p \cdot H_{pw}(t_1) + G_w \cdot H_w,$$

где  $H_w$  – энтальпия насыщенного пара при 100 °С,  $c_{ps}$  – теплоемкость сухого воздуха,

$H_{pw}(t_2)$  – энтальпия насыщенного пара при  $t_2$ ,  $H_{pw}(t_1)$  – энтальпия пара при  $t_1$ .

Учитывая, что

$$H_{pw}(t_1) = 2500 + 1,8 \cdot t_1$$

температуру  $t_1$  можно выразить и вычислить.

Таким образом для любого количества подмешиваемого пара (влагосодержания получаемой паровоздушной смеси) можно рассчитать необходимую температуру предварительного нагрева исходного воздуха. Результаты расчетов при расходе воздуха 0,00606 кг/с и исходном влагосодержании 0,01 кг/кг.с.г. сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Расход подмешиваемого пара $G_w$ (кг/с)	0	0,00024	0,00054	0,00084
Влагосодержание смеси $d_2$ (кг/кг.с.г.)	0,01	0,05	0,1	0,15
Температура паровоздушной смеси $t_2$ (°С)	14	40,5	52,7	59,8
Температура подогрева исходного воздуха $t_1$ (°С)	14	36,5	45,7	50,6

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В.В. Экспериментальное исследование конденсации водяных паров из парогазовой смеси на вертикальной стенке плоского канала // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по материалам XXX Международной научно-практической конференции. – М., 2019. – № 12(28). – С.32–36.
2. Стырикович М.А. Парогенераторы электростанций: учебное пособие. – М.: Энергия, 1966. – 384 с.
3. Бурцев С.И. Влажный воздух. Состав и свойства: учеб. пособие. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.
4. Сычев В.В. Термодинамические свойства воздуха. – ГСССД. Серия монографии. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 276 с.

### **ЦИФРОВЫЕ ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ ОБОРУДОВАНИЕМ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С РАСШИРЕННОЙ КОМПОНЕНТОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ РЕГУЛИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Е.П. Грабчак, Е.Л. Логинов

Министерство энергетики Российской Федерации,  
Россия, г. Москва, ул. Щепкина, д. 42, 107996

E-mail: loginovel@mail.ru

### **DIGITAL APPROACHES TO EQUIPMENT MANAGEMENT OF HEAT POWER PLANTS WITH AN EXTENDED COMPONENT OF INTELLECTUAL CONTROL OF PARAMETERS OF REGULATORY DEVICES**

E.P. Grabchak, E.L. Loginov

Ministry of Energy of the Russian Federation,  
Russia, Moscow, st. Shchepkina, 42, 107996

E-mail: loginovel@mail.ru

***Annotation.** The article discusses digital approaches to controlling the equipment of thermal power plants with an extended component of intelligent control of the parameters of regulatory devices.*

Требования к архитектуре управления оборудованием тепловых электростанций (далее – ТЭС) с расширенной компонентой интеллектуального управления параметрами регулирующих устройств базируются на принятых органами государственной власти решениях, касающихся вопросов информатизации, в т.ч. положениях ведомственной программы Минэнерго России «Цифровая трансформация электроэнергетики России». Необходимо сформировать информационную архитектуру риск-ориентированного управления с использованием интеллектуальных систем управления, привести его инфраструктуру и алгоритмы функционирования в соответствие с современным уровнем системы оценки технического состояния основного оборудования ТЭС в сфере эксплуатации и ремонта, решить проблемы унификации и стандартизации.