

**А. Ю. КОЗЛОКОВ, В. Н. СТЕННИКОВ, В. Н. ГОЛОЩАПОВ, В. И. КАСИЛОВ,
О. В. КАСИЛОВ**

ПЕРЕТОКИ ВОЗДУХА И УХОДЯЩИХ ГАЗОВ В УПЛОТНЕНИЯХ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЯ

АННОТАЦИЯ Перетоки воздуха и уходящих газов в регенеративном воздухоподогревателе (РВП) при неудовлетворительной регулировке уплотнений приводят к снижению эффективной работы котлоагрегата. Для их определения при эксплуатации РВП разработана методика и выполнена оценка перетечек при заданной величине зазоров в уплотнениях. Опыт эксплуатации РВП показывает, что при недостаточно чёткой регулировке перетоки воздуха могут достигать ~30 % и более.

Ключевые слова: перетоки, газы, ротор, зазор, уплотнение, деформация.

A. KOZLOKOV, V. STENNIKOV, V. GOLOSHCHAPOV, V. KASILOV, O. KASILOV

EMITTED GAS AND AIR CROSS-FLOWS IN REGENERATIVE AIR HEATER SEALS

ABSTRACT The cross-flows of air and emitted gases that occur in the regenerative air heater (RAH) in the case of unsatisfactory adjustment of seals result in a reduction of the efficient operation of the boiler unit. Seal clearances put up the main resistance to the air cross-flows and this allowed us to present the hydraulic circuit of rotor seals for the RAH. To define the cross-flows we assumed that the power unit operates at nominal operating conditions. To define the geometric characteristics of the RAH we calculated the cross area of seal gaps. When the rotor and the regenerative air heater casing are exposed to thermal stresses a nonuniform circumferential change in peripheral and axial clearances will be observed during their cyclic heating and cooling. A method of mass balances was used as the computation model. Appropriate methods were developed to define the above change during the RAH operation and the cross-flows were estimated for the specified value of seal clearances. The experience gained in the RAH operation showed that the air cross-flows may reach ~30 % and higher in the case of insufficiently precise regulation. The main values of the cross-flow of air and heating emitted gases are observed in radial seals. Therefore, the attention should be paid to the precise regulation of the seals and the development of the methods used for the control of seal clearances during the hot-state RAH operation.

Key words: cross-flows, gases, rotor, clearance, seal and the strain.

Введение

Эффективность работы энергоблоков ТЭС и ТЭЦ зависит от протечек воздуха и газов во вращающихся регенеративных воздухоподогревателях (РВП), которые при эксплуатации достигают ~30% в зависимости от зазоров между ротором и статором [1, 2]. Поэтому вопросом уменьшения протечек воздуха через уплотнения РВП на электростанциях уделяют большое внимание.

Цель работы

Для оценки влияния протечек в РВП на эффективность подогрева воздуха необходимо создание методики их расчёта в зависимости от величины зазоров в конструкциях уплотнений РВП. Поэтому создание методики для определения перетоков воздуха и продуктов сгорания в РВП, которые определяют уровень нагрева воздуха, подаваемого в топку котла, является актуальной задачей.

РВП устанавливается на котельных агрегатах мощных энергоблоков ТЭС и ТЭЦ. Конструктивно он представляет вращающийся в кожухе ротор с нагреваемой и охлаждаемой набивкой. Уходящие из котлоагрегата газы нагревают набивку, которая при вращении ротора передаёт полученное тепло нагреваемому воздуху.

Наличие вращающегося ротора требует максимально уменьшить перетечки как воздуха в РВП. Для этого в конструкции РВП выполнены верхние и нижние радиальные 1 и 2, верхние и нижние периферийные 3 и 4, аксиальные 5 и центральные 6 уплотнения. Схема расположения этих уплотнений и их форма приведены на рис. 1. Они представляют собой пластины, отстоящие от элементов ротора на величину зазора S и создающие плоские щели протяжённостью h . Принятые обозначения позволяют построить расчётную модель перетоков воздуха в корпусе РВП.

В зависимости от регулировки этих зазоров обеспечивается надёжность работы РВП и его эффективность.

На энергоблоке №3 Харьковской ТЭЦ-5 эксплуатируются два РВП-98 (нитка А и нитка Б), которые обеспечивают нагрев воздуха от 30 °С до 320 °С при температуре газов 350 °С на входе и 110 °С на выходе.

Диаметр ротора РВП равен 9,864 м, общая высота ротора 3,4 м, поверхность нагрева составляет 71000 м², масса ротора с набивкой – 338 тонн.

Скорость вращения ротора – 2 об/мин. С учётом габаритов ротора РВП и температуры нагрева воздуха обеспечение минимальных зазоров при регулировке уплотнений является достаточно сложной задачей и требует высокой квалификации персонала. Опыт эксплуатации РВП показывает,

что при недостаточно чёткой регулировке переточки воздуха могут достигать ~ 30 % и более.

Перетокам воздуха основное сопротивление оказывают зазоры в уплотнениях, что позволило представить гидравлическую схему уплотнений ротора РВП, состоящей из их элементов.

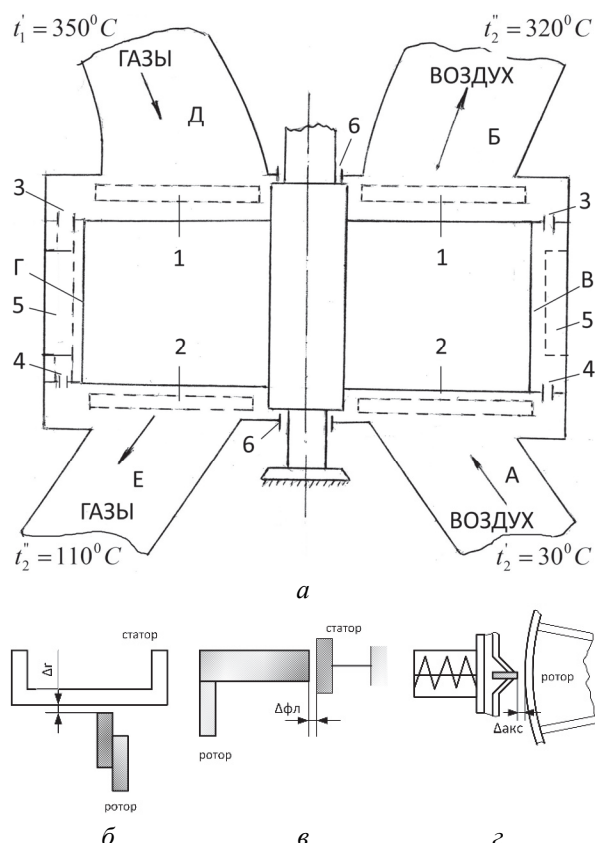


Рис. 1 – Схема расположения уплотнений РВП и их форма: а – схема расположения уплотнений; б – радиальные уплотнения; в – периферийные уплотнения; г – аксиальные уплотнения; А, Б – вход и выход нагреваемого воздуха; В – состояние воздуха в кожухе РВП перед аксиальным уплотнением; Г – состояние воздуха в кожухе РВП за аксиальным уплотнением; Д – уходящий газ из котла-агрегата; Е – выход из РВП в сторону дымососа; Уплотнения: 1, 2 – радиальные; 3, 4 – периферийные; 5 – аксиальные; 6 – центральные

Схема уплотнений для определения переточек воздуха и газа в пределах кожуха РВП представлена на рис. 2. На рис. 2а приведены параметры воздуха и уходящих газов на входе и выходе. Уровень давлений по тракту воздуха определяется дутьевым вентилятором, а по тракту горячего газа – дымососом. Основное сопротивление трактов воздуха и газа определяется как перепад давлений между входом и выходом и равно:

$$\Delta P_B = P_B^A - P_B^{BX} = 1770 - 1430 = 340 \text{ Па},$$

$$\Delta P_\Gamma = P_\Gamma^O - P_\Gamma^E = 920 - (-1430) = 520 \text{ Па}.$$

Расход воздуха и газа при заданном уровне давлений и температур определяется с учётом гидравлических сопротивлений. Движение воздуха и горячего газа при принятой скорости течения ($M_{\max} < 0,3$) рассматривается как движение несжимаемой среды.

$$M_{\max} = \frac{C_{\max}}{a} = 0,19 < 0,3,$$

где $C_{\max} = 67 \text{ м/с}$ – максимальная скорость воздуха в зазорах уплотнений; $a = 349 \text{ м/с}$ – максимальная скорость звука в воздухе при $t = 30 \text{ °C}$.

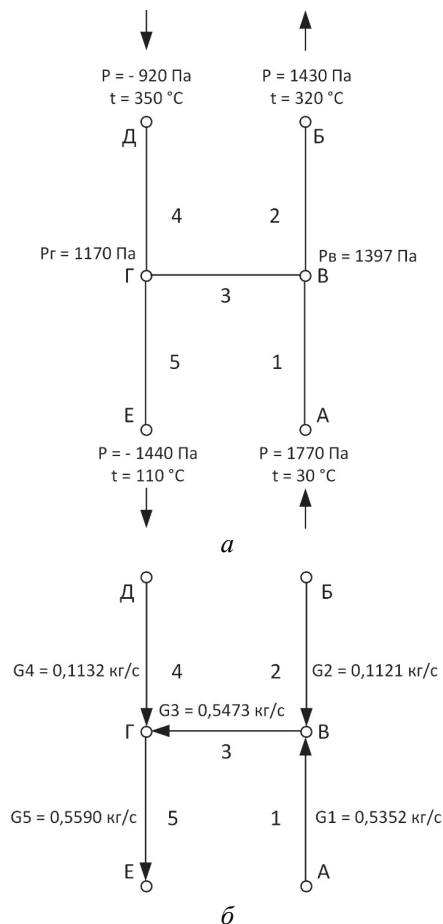


Рис. 2. – Параметры воздуха, газа и перетоки воздуха в кожухе РВП: а – величина давлений и температур; б – расходы воздуха и газов; А, Б – вход и выход воздуха; Д, Е – вход и выход газов; 1, 2 – сопротивление радиальных уплотнений для воздуха; 3, 5 – сопротивление радиальных уплотнений для газа, 3 – сопротивление 2-х аксиальных уплотнений

Уплотнения выполнены в виде плоских коротких каналов, для которых ($h/S < 10$) (рис. 1б–г) и учитывают сопротивление входа $\zeta_{вх}$ и сопротивление трения $\zeta_{тр}$ короткого канала [3]. Расход рабочей среды в этом случае для каждого канала уплотнения определяется как

$$G = f_{\text{упл}} \sqrt{\frac{2\rho\Delta P}{1 + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{тр}}}} = \mu \sqrt{2\rho\Delta P} = \mu f_{\text{зав}},$$

где $\mu = \sqrt{\frac{1}{1 + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{тр}}}}$ а $f_{\text{упл}}$ – площадь зазора в

уплотнении, $\zeta_{\text{вх}} = 0,68$, $\zeta_{\text{тр}} = \frac{\chi}{\text{Re}^{0,25}} = \chi \frac{l}{d_r}$.

Значение коэффициента расхода в этом случае для щелей уплотнений составит $\mu = 0,80$. Для щелей при $h/S > 3$ коэффициент $\mu = 0,68$ [2, 36].

Число Рейнольдса для рассматриваемых каналов изменяется в диапазоне от 2200 до 4100 в зависимости от температуры среды (физические характеристики уходящих газов принимаются как характеристики воздуха). Для газов в зависимости от химсостава и коэффициента избытка воздуха после сжигания природного газа коэффициент кинематической вязкости практически равен коэффициенту вязкости чистого воздуха.

В РВП уплотнения разделяют рабочие среды (воздух и уходящие газы) на два сектора. Протечки воздуха и газа в полости между обечайкой ротора и корпуса в зависимости от размера зазоров в уплотнениях происходят через периферийные уплотнения и, могут быть направлены как в сторону «холодного», так и в сторону «горячего» патрубков РВП, на что существенно влияют зазоры в аксиальных уплотнениях.

Расчётная схема протечек через зазоры в уплотнениях РВП (рис. 2а) позволяет оценить как величину перетоков, так и их направление. Для определения перетоков принят номинальный режим работы энергоблока, которому для РВП (нитка А) соответствуют следующие параметры: 1) расход воздуха $G_{\text{в}} = 380000 \text{ м}^3/\text{ч} = 105,5 \text{ м}^3/\text{с}$; 2) расход уходящих газов $G_{\text{г}} = 418000 \text{ м}^3/\text{ч} = 116,1 \text{ м}^3/\text{с}$. Различия в объёмных расходах воздуха и уходящих газов достигает ~10 %. Параметры воздуха и газа приведены на рис. 2а. Для расчётного определения перетоков принята величина зазоров в уплотнениях, соответствующих технологической карте регулировки уплотнений РВП-98, равным $S = 2 \text{ мм}$ в горячем состоянии.

Для расчёта по геометрическим характеристикам РВП были определены проходные площади зазоров в уплотнениях. В качестве расчётной модели был принят метод массовых балансов в ветвях схемы (рис. 2а) в точках В (воздух) или в точке Г (газ). Расход рабочей среды через периферийные уплотнения определялся по перепаду давлений в точках А и В, В и Б – для воздуха, в точках Д и Г, Г и Е для газа. Для двух аксиальных уплотнений при условии равенства зазоров в них расход воздуха определялся по перепаду давлений в точках В и Г с учетом возможного повышения температуры воздуха в пространстве кожуха. Невязка расходов по их балансу в точке Г или В определялась по задаваемому давлению в одной из этих

точек. Для определения невязки был использован метод итераций до получения невязки менее 5 % от расхода в ветви 3 (расход G_3 воздуха через аксиальные уплотнения).

Результат расчёта перетоков в корпусе РВП, приведен на рис. 2б.

Невязка расхода в точке Г составила 0,025 кг/с воздуха или 3,9 %, что допустимо для расчёта перетоков в корпусе РВП.

Определение перетоков в верхнем и нижнем радиальных уплотнениях при условии, что зазор формируется одной пластинкой сектора набивки РВП показала, что при принятых зазорах и $S = 2 \text{ мм}$ переток воздуха в верхних уплотнениях составит $G_{\text{в}} = 0,614 \text{ кг/с}$ при средней скорости воздуха в зазорах $C_{\text{ш}} = 89,6 \text{ м/с}$ и в нижних уплотнениях $G_{\text{н}} = 1,012 \text{ кг/с}$. Общий переток воздуха в уходящий газ через радиальные уплотнения будет равен $G_{\text{б}} = 1,626 \text{ кг/с}$.

Через центральные (нижние и верхние) уплотнения происходит утечка воздуха в атмосферу, которая в принятой конструкции уплотнения может составить $G_{\text{ц,у}} = 0,503 \text{ кг/с}$. Суммарные потери воздуха (протечки воздуха в уходящие газы и в атмосферу) при работе РВП равна: 1) через аксиальные уплотнения, которые затем попадают в уходящие газы $G_{\text{г}} = 0,647 \text{ кг/с}$; 2) через радиальные уплотнения $G_{\text{р,у}} = 1,626 \text{ кг/с}$; 3) через центральные уплотнения $G_{\text{ц,у}} = 0,503 \text{ кг/с}$. Общие потери воздуха в РВП $\Delta G_{\text{б}} = 0,647 + 1,626 + 0,503 = 2,776 \text{ кг/с}$, что при объёмном расходе воздуха $V_{\text{в}} = 105,5 \text{ м}^3/\text{с}$, его плотности $\rho_{\text{в}} = 1,165 \text{ кг/м}^3$ и массовом расходе $G_{\text{в}} = 122,91 \text{ кг/с}$ составят

$$\Delta \bar{G}_{\text{б}} = \frac{\Delta G_{\text{б}}}{G_{\text{в}}} = \frac{2,776}{122,91} = 0,023$$

или 2,3 % от массового расхода воздуха, направляемого в топку котла.

В условиях тепловой деформации ротора и кожуха при их циклическом нагревании и охлаждении будет происходить неравномерное по окружности изменение периферийных и аксиальных зазоров. Увеличение этих зазоров примерно в два раза повысит протечки воздуха до ~2,8 %. Основные величины перетоков воздуха происходят в радиальных уплотнениях, причём в нижнем протечки в ~1,65 раза больше, чем в верхнем. Поэтому следует обратить внимание на правильность регулировок уплотнений и создание методики контроля зазоров в уплотнениях при работе РВП в горячем состоянии.

Выводы

Предложен методологический подход к определению перетоков воздуха и газа в зависимости от величины зазоров в уплотнениях РВП и показан (на примере) их ожидаемый уровень при минимальной величине зазоров.

Список литературы

- 1 **Губарев, А.Ю.** Совершенствование конструкций вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов : дис. ... канд. техн. наук / **Губарев А. Ю.** – Иваново, 2016. – 187 с.
- 2 **Прохоров, В. Б.** Снижение аэродинамического сопротивления газового тракта котлов за счёт реконструкции регенеративных воздухоподогревателей / **В. Б. Прохоров С. Л. Чернов, В. С. Киричков** // Энергосбережение и Водоподготовка, – № 6(98). –2015. – С. 3–10. – ISSN 1992-4658.
- 3 **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / **И. Е. Идельчик.** – Москва : Машиностроение, 1975. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Gubarev, A. Ju.** (2016), "Sovershenstvovanie konstrukcij vrashhajushhihsja regenerativnyh vozduhopodogrevatelej jenergeticheskikh kotlov", Ph.D. Thesis, Ivanovo.
- 2 **Prohorov, V. B., Chernov, S. L., Kirichkov, V. S.** (2015), "Snizhenie ajerodinamicheskogo soprotivlenija gpzovo-go trakta kotlov za schjot rekonstrukcii regenerativnyh vozduhopodogrevatelej", *Jenergoberezhenie i Vodopodgotovka [Energysaving and watertreatment]*, No. 6(98), pp. 3–10, ISSN 1992-4658.
- 3 **Idelchik, I. E.** (1975), *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam [Handbook of hydraulic resistance]*, Mashinostroenie, Moscow, Russian.

Сведения об авторах (About authors)

Козлоков Александр Юрьевич – кандидат технических наук, главный инженер, ПАО «Харьковская ТЭЦ-5», г. Харьков, Украина

Kozlov Aleksandr Jur'evich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Chief engineer, PJSC "Kharkiv CHPP-5", Kharkiv, Ukraine.

Стенников Виктор Николаевич – начальник лаборатории наладки и испытания оборудования, ПАО «Харьковская ТЭЦ-5», г. Харьков, Украина

Stennikov Viktor Nikolayevich – Chief laboratory setup and testing equipment, PJSC "Kharkiv CHPP-5", Kharkiv, Ukraine.

Голощанов Владимир Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, старший научный сотрудник отдела моделирования и идентификации тепловых процессов; г. Харьков, Украина; e-mail: paramonova@ipmach.kharkov.ua.

Goloshchapov Vladimir – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Department for Modeling and Identification of Thermal Processes, A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems (IPMach) NAS of Ukraine, Kharkov, Ukraine.

Касилов Виктор Иосифович – кандидат технических наук, доцент, кафедра парогенераторостроения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: prof.viktor.kasilov@gmail.com, ORCID 0000-0001-7739-8537.

Kasilov Viktor Iosifovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department of steam generator buildings, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Касилов Олег Викторович – кандидат технических наук, доцент, кафедра системы информации, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; e-mail: o.kasilov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8524-2345.

Kasilov Oleg Viktorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Department of information system, National of Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Козлоков, А. Ю. Перетоки воздуха и уходящих газов в уплотнениях регенеративного воздухоподогревателя / **А. Ю. Козлоков, В. Н. Стенников, В. Н. Голощанов, В. И. Касилов, О. В. Касилов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 41–44. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.06.

Please cite this article as:

Kozlov, A., Stennikov, V., Goloshchapov, V., Kasilov, V. and Kasilov, O. (2017), "Cross-flows of air and stack gases in the gaps of regenerative air heater", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 11(1233), pp. 41–44, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.06.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Козлоков, О. Ю. Перетоки повітря та димових газів в ущільненнях регенеративного повітропідігрівника / **О. Ю. Козлоков, В. М. Стенников, В. М. Голощанов, В. Й. Касилов, О. В. Касилов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 11(1233). – С. 41–44. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.11.06.

АНОТАЦІЯ Перетоки повітря та димових газів у регенеративному воздухопідігрівачі (РВП) при незадовільному регулюванні ущільнень призводять до зниження ефективної роботи котлоагрегату. Для їх визначення при експлуатації РВП розроблена методика і виконана оцінка за забороною величиною зазорів в ущільненнях. Досвід експлуатації РВП показує, що при недостатньо чіткому регулюванні перетоки повітря можуть досягати ~30 % та більше.

Ключові слова: перетоки, ущільнення, гази, ротор, зазор, деформація.

Поступила (received) 08.02.2017