

УДК 69.027.1

**Володин Ю.Г.** – кандидат технических наук, доцентE-mail: [Yu.g.volodin@mail.ru](mailto:Yu.g.volodin@mail.ru)**Ханнанов Р.Р.** – аспирант**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### Математическое моделирование рабочего процесса в газозвушном тракте котлового агрегата ТГМ-84

#### Аннотация

В статье приведена математическая модель турбулентного течения дымовых газов в газозвушном тракте котла ТГМ-84. Расчеты выполнены с использованием программного комплекса ANSYS. При математическом моделировании рабочего процесса в газозвушном тракте реализована идея дросселирования потока дымовых газов в районе отводящего газового патрубка за РВП. Получены оптимальные размеры дроссельной заслонки. Выполненные измерения присосов воздуха на работающем котле до и после установки заслонки показали заметное снижение присосов воздуха в газовый тракт.

**Ключевые слова:** присосы воздуха, математическая модель, дроссельная заслонка, котел ТГМ-84, воздухоподогреватель РВП-54, газозвушной тракт.

Научно-технический прогресс стимулирует развитие и совершенствование различных отраслей, в том числе и энергоемких, в промышленном комплексе. Освоение новых месторождений полезных ископаемых, расширение масштабов добычи на действующих площадках требует формирования соответствующей инфраструктуры для жизнедеятельности персонала, что в итоге приводит к строительству новых или расширению площадей уже существующих населенных пунктов. Все вместе взятое нуждается в немалых количествах электрической и тепловой энергии. Этим объясняется не только введение новых мощностей в энергетическом комплексе страны, но модернизация действующих агрегатов и совершенствование технологических процессов. Одним из актуальных направлений в теплоэнергопроизводящей промышленности является энергоресурсосбережение при эксплуатации технологического оборудования.

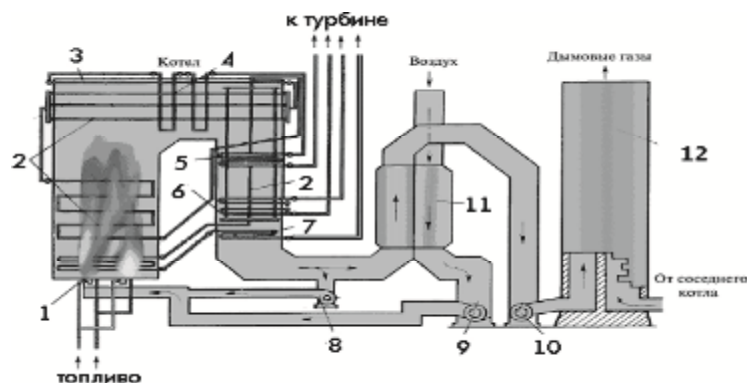


Рис. 1. Технологическая схема ТЭС (фрагмент). Основные элементы парового котла:  
1 – газовые горелки; 2 – экраны труб, для подогрева питательной воды;  
3, 4, 5 – потолочный, ширмовый, конвективный пароперегреватель; 6, 7 – экономайзер;  
8 – линия рециркуляции; 9 – дутьевой вентилятор; 10 – дымосос;  
11 – регенеративный воздухоподогреватель (РВП); 12 – дымовая труба

Тепловую электрическую станцию (ТЭС) образует комплекс оборудования и устройств, основными из которых являются котельная установка, производящая пар высоких параметров, турбинная или паротурбинная установка, преобразующая теплоту пара в механическую энергию ротора турбоагрегата, и электрические устройства

(электрогенератор, трансформатор и т.д.), обеспечивающие выработку электроэнергии (рис. 1). Основным элементом в котельной установке, производящей пар, является котел. Котел выглядит в виде П-образной конструкции с газоходами прямоугольного сечения. В левую часть, называемую топкой, подается смешанный с подогретым воздухом газ. Воздух подогревается путем рециркуляции дымовых газов, вышедших из котла. Подогревается воздух в регенеративном воздухоподогревателе (РВП) дымовыми газами. Частично охлажденные дымовые газы дымососом ДС подаются в дымовую трубу. Через дымовую трубу продукты сгорания (дымовые газы) выталкиваются в верхние слои атмосферы и рассеиваются. Кроме того, дымовая труба необходима для создания разрежения в топке и газоходах котла.

Одним из паровых котлов, которые в настоящее время эксплуатируются на ТЭС, является ТГМ-84 (ТГМ-84А, ТГМ-84Б), в газозвоздушном тракте которого устанавливается регенеративный воздухоподогреватель РВП-54 (или РВП-68). Во время функционирования происходят присосы (перетоки) воздуха (рис. 2) из воздушного тракта в газовый, что снижает полезную работу вращающегося РВП. Эксплуатационный опыт показывает, что более 20 % воздуха попадает в газовый тракт, не совершая работы. Соответственно ухудшается показатель по присосам воздуха. Данное обстоятельство приводит к увеличению нагрузки на дымососы и дутьевые вентиляторы, заметному ухудшению по величине такого показателя как удельный расход электроэнергии на тягу и дутье и в итоге к перерасходу топлива.

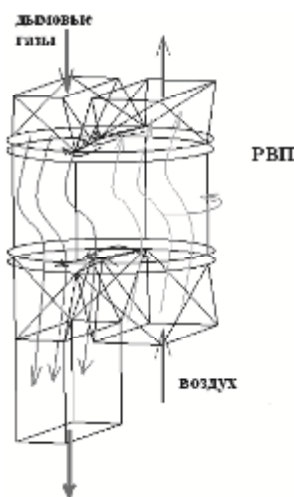


Рис. 2. Иллюстрация движения дымовых газов, воздуха и присосов воздуха в РВП

Для снижения присосов воздуха в газовый тракт котла имеется большое количество разнообразных конструкторских решений: установка промежуточных радиальных полос, войлочных пластин на прижимные планки, максимальное уплотнение щелей и зазоров в конструкции РВП и т.п. Реализация таких решений является эффективной и приводит к снижению присосов воздуха в РВП до 10 %, вместо 15-20 %. Однако, все они обладают одним недостатком – механическим износом.

Вопрос снижения присосов воздуха в газовый тракт котла можно решить путем дросселирования дымовых газов (рис. 3) в хвостовой части газохода РВП. Для этого необходимо установить дросселирующее устройство. Известно [1, 2], что при прохождении потока через дросселирующее устройство, происходит местное сжатие потока. Согласно закону сохранения энергии суммарная энергия движущейся среды может уменьшиться только на величину потерь, следовательно, часть потенциальной энергии потока преобразуется в кинетическую энергию. Давление потока на стенки трубопровода несколько возрастает за счет подпора перед сужающим устройством и далее понижается до некоторого минимума за дросселем. Таким образом, разогнав поток и снизив давление на стенки газозвоздушного тракта, можно достичь снижения присосов воздуха.

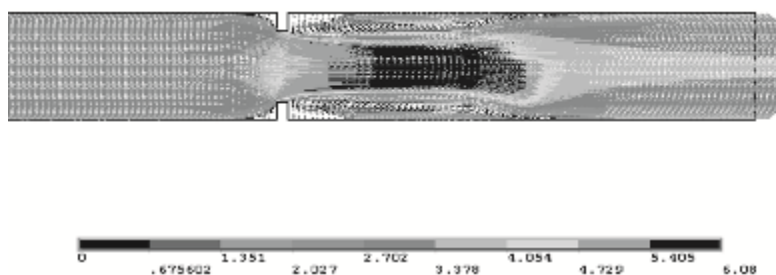


Рис. 3. Дросселирование газового потока

Течение неизотермического газового потока, в том числе, и при его ускорении исследовалось в работах [3-6]. Общеизвестно, что при сужении канала формируется отрицательный продольный градиент давления, под воздействием которого профиль скоростей становится более заполненным, относительный коэффициент трения по величине увеличивается, увеличивается и скорость течения газового потока. Неизотермичность при тепловом потоке, направленном от более нагретых дымовых газов к стенкам газоздушного тракта, также способствует большей заполненности профиля скоростей, увеличению относительного коэффициента трения и скорости течения дымовых газов.

При турбулентном режиме течения рабочего тела поля актуальных значений скоростей, давлений и температур в потоке представляют собой сложную структуру. Причиной такой структуры является нерегулярность или случайность характера изменений названных параметров в пространстве и во времени. Поэтому при математическом описании турбулентных течений все подходы, включая прямое моделирование турбулентности, прямое моделирование крупномасштабных структур и так называемый моментный подход Рейнольдса, основаны на нестационарных трехмерных уравнениях динамики вязкого газа – система уравнений Навье-Стокса, а также на выполнении операций статистического осреднения, которое реализуется на одном из этапов при формировании постановки задачи либо при ее решении. Когда выполняют прямое моделирование турбулентности на основе трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса, то статистическое осреднение делают после интегрирования этих уравнений. Осреднение преследует основную цель, заключающуюся в удобстве традиционной формы практического анализа.

Когда используется моментный подход Рейнольдса, то на начальном этапе постановки задачи выполняется операция статистического осреднения. При таком подходе сначала осредняются статистически уравнения динамики вязкого газа, затем проводится интегрирование после предварительного полуэмпирического замыкания. Операция осреднения выполняется по всем масштабам одновременно. Поэтому здесь утрачивается универсальность и эти методы остаются востребованными при анализе узкого диапазона гидродинамических процессов.

Когда проводится прямое моделирование, то статистическое осреднение уравнений выполняется на этапе постановки задачи. При этом охватываются не все масштабы, так как полуэмпирическое моделирование турбулентности необходимо проводить только на подсеточных масштабах, т.е. на масштабах явлений, которые меньше чем размеры статистической ячейки. Таким образом, во всех случаях получается система уравнений Навье-Стокса, осредненная по Рейнольдсу. Это означает, что любая газодинамическая величина в турбулентном потоке представляется в виде суммы осредненных и пульсационных составляющих. Причем, при определении средних значений осреднение выполняется по некоторому интервалу времени, т.е. временное осреднение. Кроме такого осреднения существуют и другие способы – статистического осреднения по объему (пространственное осреднение), статистическое осреднение по ансамблю.

Классический подход статистического осреднения по некоторому интервалу времени (по Рейнольдсу) в основном применяют при решении уравнений, которые описывают течение рабочего тела с постоянной плотностью – несжимаемые жидкости. Когда речь идет об описании турбулентных течений сжимаемого газа, то чаще пользуются комбинированным способом осреднения. Здесь давление и плотность газа

осредняют по времени (по Рейнольдсу), а другие параметры потока вводят по так называемым средневзвешенным значениям. Этот способ осреднения называют методом средневзвешенных параметров или осреднением по Фавру. Его главным преимуществом является то, что система уравнений турбулентного движения оказывается более компактной по сравнению другими подходами.

При описании турбулентного течения газового потока, в том числе, и в дымовых трубах ТЭС, система уравнений включает в себя уравнения количества движения, уравнение неразрывности, уравнение энергии и уравнения  $k-\epsilon$  модели турбулентности, т.е. при трехмерной постановке в декартовой системе координат имеем:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \tag{1}$$

Уравнение количества движения в проекции на ось X:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (ru)}{\partial x} + \frac{\partial (rv)}{\partial y} + \frac{\partial (rw)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0. \tag{2}$$

Уравнение количества движения в проекции на ось Y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (ruv)}{\partial x} + \frac{\partial (rvv)}{\partial y} + \frac{\partial (rvw)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial y} = 0. \tag{3}$$

Уравнение количества движения в проекции на ось Z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial (ruw)}{\partial x} + \frac{\partial (rvw)}{\partial y} + \frac{\partial (rww)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial w}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \tag{4}$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты,  $t$  – время,  $u, v, w$  – проекции вектора скорости на оси  $x, y, z$  соответственно,  $p$  – давление,  $m$  – коэффициент эффективной вязкости,  $\rho$  – плотность рабочего тела.

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho hu)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho hv)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho hw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m}{\rho} \frac{\partial h}{\partial z} \right), \tag{5}$$

где  $Pr$  – число Прандтля,  $Pr_T$  – турбулентное число Прандтля,  $h$  – энтальпия:

$$h = \sum_a Y_a \left( Dh_a^0 + \int_0^T C_{p_a}(T) dT \right), \tag{6}$$

где  $Y_a$  – массовая доля компонента  $a$ , а  $T$  – температура.

Уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации:

$$\frac{\partial (rk)}{\partial t} + \frac{\partial (rku)}{\partial x} + \frac{\partial (rkv)}{\partial y} + \frac{\partial (rkw)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m_t}{\rho} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m_t}{\rho} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m_t}{\rho} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + rG - r\epsilon \tag{7}$$

$$\frac{\partial (r\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (r\epsilon u)}{\partial x} + \frac{\partial (r\epsilon v)}{\partial y} + \frac{\partial (r\epsilon w)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{m_\epsilon}{\rho} \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m_\epsilon}{\rho} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{m_\epsilon}{\rho} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \right) + r(C_{\epsilon 1} G - C_{\epsilon 2} \epsilon). \tag{8}$$

Для замыкания системы осредненных уравнений используется  $k-\epsilon$  модель, генерация турбулентности за счет сдвиговых напряжений:

$$G = \frac{m_t}{\rho} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial v}{\partial y} + 2 \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \tag{9}$$

$$\frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial \epsilon}{\partial z} + \frac{m_\epsilon}{\rho} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

Турбулентная вязкость определялась по формуле Колмогорова-Прандтля:

$$m_t = C_m \rho \frac{k^2}{\epsilon}, \tag{10}$$

а эффективная вязкость по формуле:

$$m = m_t + m_{mol}, \tag{11}$$

где  $\mu_{mol}$  – молекулярная вязкость. Значения констант принимались равными  $C_\mu=0,09$ ,  $C_{\epsilon 1}=1,30$ ,  $C_{\epsilon 2}=1,92$ ,  $C_{\epsilon 1}=1,30$ ,  $\sigma_k=1,0$ ,  $\sigma_\epsilon=1,3$ ,  $Pr_T=0,7$ ,  $Sc_T=0,7$ .

Плотность  $\rho$  определялась из уравнения состояния:

$$P = \frac{\rho R_0 T}{M}, \tag{12}$$

где  $R_0$  – универсальная газовая постоянная, а давление  $P$  полагали равным атмосферному.

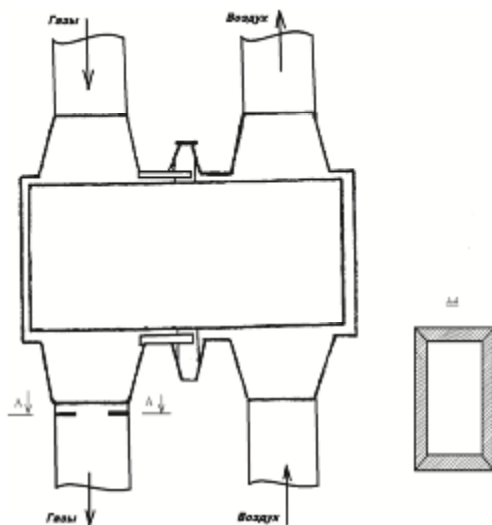


Рис. 4. Вращающийся регенеративный воздухоподогреватель

Таблица

	Давление на воздушной стороне перед РВП Р(В), кПа	Давление на газовой стороне за РВП Р(Г), кПа		Разность давлений $\Delta P$ , кПа		Объем присосов $V$ , м <sup>3</sup>		Процент снижения присосов, %
		До	После	До	После	До	После	
1	7	-0,29	0,74	7,29	6,26	0,0729772	0,06763	7,333362939
2	6,86	-0,37	0,54	7,23	6,32	0,0726762	0,06795	6,504783741
3	6,84	-0,4	0,373	7,24	6,467	0,0727265	0,06873	5,489045915
4	6,94	-0,3	0,62	7,24	6,32	0,727265	0,06795	6,569374572
5	7,05	-0,34	0,4	7,39	6,65	0,073476	0,0697	5,138802348

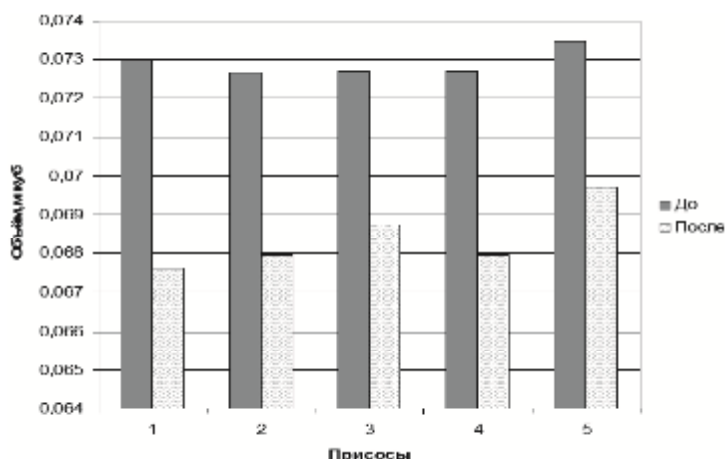


Рис. 5. Изменение объема присосов

Моделирование течения дымовых газов в хвостовой части газохода РВП выполнено с использованием программного комплекса ANSYS. Все размеры газохода соответствуют технической документации на конструкцию РВП, а именно: высота шахты 5,0 м, глубина 5,076 м, ширина 2,493 м. Сужающее устройство представляет собой

дроссельную заслонку [7, 8]. В результате математического моделирования течения дымовых газов в хвостовой части газохода определены оптимальные параметры – высота выступа (рис. 4) дроссельной заслонки  $(0,1-0,17) \times d_{\text{экв}}$  (эквивалентный диаметр отводящего газового патрубка) и место ее расположения в газовом тракте. Увеличение давления на 1-2 мм вод. ст. приводит к выравниванию давлений за РВП потока дымовых газов с давлением воздуха в подводящем воздушном патрубке.

Дроссельная заслонка была установлена на РВП-54 котлоагрегата ТГМ-84Б. В процессе эксплуатации были проведены измерения присосов воздуха. Сравнительные результаты приведены на рис. 5.

Вывод. Путем математического моделирования спрогнозирован рабочий процесс в газоздушном тракте за РВП-54. Дросселирование дымовых газов за счет перераспределения потенциальной и кинетической энергии потока позволяет получить эффект снижения присосов воздуха. Реализация данного подхода в производственных условиях позволила реально снизить объем присосов воздуха в газовый тракт.

### Список библиотечных ссылок

1. Володин Ю.Г., Богданов А.Н. Технические измерения и приборы. Расчет сужающих устройств. Учебное пособие. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2007. – 63 с.
2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
3. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Математическое моделирование пусковых режимов энергетических установок. – СПб.: Инфо-да, 2007. – 128 с.
4. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Расчет коэффициентов трения и теплоотдачи при нестационарном неизотермическом течении несжимаемого газа в осесимметричных каналах // Известия ВУЗов. «Машиностроение», 2007, № 3. – С. 21-26.
5. Володин Ю.Г., Марфина О.П. Расчет нестационарного неизотермического течения несжимаемого газа в осесимметричных каналах энергетических установок // Известия ВУЗов. «Машиностроение», 2007, № 5. – С. 39-42.
6. Володин Ю.Г., Марфина О.П., Цветкович М.С. Газодинамические характеристики отводящих стволов дымовых труб // Известия КГАСУ, 2015, № 4 (34). – С. 236-242.
7. Вращающийся регенеративный воздухоподогреватель: пат. 2324114 Рос. Федерация. № 2006127340/06; заявл. 17.07.06; опубл. 10.05.08. Бюл. № 13. – 4 с.
8. Володин Ю.Г., Ханнанов Р.Р. Повышение эффективности работы котлоагрегатов типа ТГМ-84 путем дросселирования газового потока в регенеративный воздухоподогреватель // Приволжский научный вестник, 2014, № 6. – С. 21-23.

**Volodin Yu.G.** – candidate of technical science, reader

E-mail: [Yu.g.volodin@mail.ru](mailto:Yu.g.volodin@mail.ru)

**Hannanov R.R.** – post-graduate student

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Mathematical modeling of the worker process in gas canal for the boiler aggregate TGM-84

#### Resume

One of the current trends in the energy-producing industry is the heat energy and resource saving in the operation of the technological equipment.

The article presents the mathematical model of the turbulent flow of the flue gases in the gas canal of the boiler TGM-84. The calculations realization at utilization of the program complex ANSYS showed. Mathematical modeling of the worker process in the gas canal bases on the three-measuring unsteady-state equations Navier-Stokes. At modeling realized an idea of the throttling flow of the smoke gases in the seat for the deferent gas piping over RVP. By the

redistribution of potential and kinetic energy flow received the local increase of the pressure in deferent gas piping. The optimal position of the throttle screen and its optimal size identified. The measured air suction on the working boiler before and after installing the throttle screen showed a marked reduction of the inflow air into the gas canal.

**Keywords:** the inflow air, the mathematical model, the throttling screen, the boiler TGM-84, the economizer of air RVP-54, the gas canal.

### Reference list

1. Volodin Yu.G., Bogdanov A.N. Technical measurement and instrumentation. Calculation of narrowing devices. Study book. – Kazan: Kazan. Gos. Energy. Un-t, 2007. – 63 p.
2. Krevlevskii P.P. Flowmeters and counters of amounts. – L.: Mashinostroenie, 1989. – 701 p.
3. Volodin Yu.G., Marfina O. P. Mathematical modeling of starting modes of power plants. – SPb.: Info-da, 2007. – 128 p
4. Volodin Yu.G., Marfina O. P. Calculation of the coefficient of friction and heat transfer in unsteady flow of an incompressible non-isothermal gas in axisymmetric channels // *Izvestija VUZov «Mashinostroenie»*, 2007, № 3. – P. 21-26.
5. Volodin Yu.G., Marfina O. P. Calculation of non-stationary non-isothermal flow of incompressible gas in axisymmetric channels of power plants // *Izvestija VUZov «Mashinostroenie»*, 2007, № 5. – P. 39-42.
6. Volodin Yu.G., Marfina O.P., Tsvetkovich M.S. Gas dynamic characteristics efferent trunks chimneys // *Izvestija KGASU*, 2015, № 4. – P. 236-242.
7. The rotary regenerative air heater: – pat. 2324114 Ros. Federatsia. № 2006127340/06; zaiavl. 17.07.06; publ. 10.05.08. Bul. № 13. – 4 p.
8. Volodin Yu.G., Hannanov R.R. Improving the efficiency of boiler units TGM-84 by throttlng the gas flow in the regenerative air heater // *Privolzhskii nauchnii vestnik*, 2014, № 6. – P. 21-23.