

Устимов К.В.<sup>1</sup>, Агапитов Е.Б.<sup>1</sup>, Михайловский В.Н.<sup>1</sup>, Семенов Е.А.<sup>2</sup>, Осколков С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

<sup>2</sup>ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

## ПОИСК ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОМ ПАРЕ ОХЛАДИТЕЛЕЙ КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ

В работе рассмотрена система пароснабжения металлургического предприятия на примере ОАО «ММК», описаны её элементы и проанализирована работа. Поставлена задача по оценке возможности увеличения выработки электроэнергии за счет повышения доли использования теплоты уходящих газов кислородных конвертеров. Проведен анализ работы турбогенераторов на низкопотенциальном паре. Выявлены причины неэффективной работы системы, предложены мероприятия по увеличению доли использования пара, стабилизации работы и увеличению выработки электроэнергии в системе утилизации низкопотенциального пара.

**Ключевые слова:** низкопотенциальный пар, паровые аккумуляторы, утилизация теплоты, конвертерный газ, система пароснабжения.

### ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в стратегии управления энергоресурсами играет синхронность работы нескольких производств и согласование объемов запрашиваемых и имеющихся в наличии энергоресурсов [1]. Яркой иллюстрацией этой проблемы является необходимость согласования совместной работы конвертерного производства и системы использования теплоты уходящих газов конвертеров для выработки пара и электроэнергии [2-5]. В конвертерном отделении ОАО «ММК» работают 3 конвертера по 375 т с котлами-охладителями конвертерных газов типа ОКГ-400-2М. Вырабатываемый за счет утилизации тепла конвертерного газа пар поступает в общий коллектор, откуда распределяется на 7 паровых аккумуляторов, предназначенных для сглаживания пульсаций давления и расхода пара и стабилизации его параметров для повышения эффективности дальнейшего использования в распределительных сетях (рис. 1).

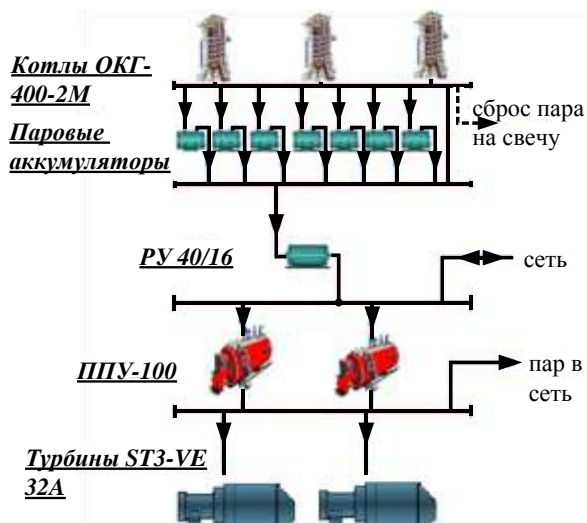


Рис. 1. Существующая схема утилизации пара ОКГ

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В период кислородной продувки конвертеров при пиковой производительности котлов ОКГ-400-2 в аккумуляторах накапливаются избытки пара, которые выдаются потребителям в периоды между кислородными продувками (при отсутствии выработки пара ОКГ). Редукционная установка РУ 4/1,6 состоит из двух ниток и обеспечивает снижение давления пара, поступающего от котлов ОКГ ККЦ и аккумуляторов, до 1,6 МПа в распределительной сети.

После редукционных установок РУ 4/1,6 пар поступает в коллектор, из которого подается в турбинный участок паросилового цеха, в котором установлены 2 турбины ST3 – VE32A фирмы Siemens, предварительно подогреваясь до требуемых параметров в пароперегревательной установке ППУ – 100, остальная часть поступает в паровые сети предприятия [6, 7].

Турбины ST3 – VE32A фирмы Siemens представляют собой конденсационные турбины с одним регулируемым отбором, рассчитанные на выработку 7460 кВт электроэнергии каждая при номинальных параметрах пара:  $P_{ном} = 1,2$  МПа;  $T_{ном} = 285^{\circ}\text{C}$ ;  $D_{ном} = 60$  т/ч.

Анализ проблем работы системы показал, что задача стабилизации параметров пара после паровых аккумуляторов является ключевой для экономии энергоресурсов, увеличения выработки электроэнергии и улучшения энергоэффективности всей системы пароснабжения предприятия. Эту задачу невозможно решить без разработки необходимой логики управления группами аккумуляторов, связанной с характеристикой работы конвертерного отделения и спецификой конструктивных особенностей существующей схемы пароснабжения.

В силу различных технологических причин (в том числе из-за соображений повышения надежности и сроков безремонтной работы газоотводящего тракта конвертера) давление пара в системе было понижено с 4,0 до 2,2 – 2,7 МПа путем перенастройки параметров сбросных свечей. Кроме того, из-за недопустимо высокого давления в зарядной линии паровых аккумулято-

ров, возникающего при одновременной работе всех конвертеров, была установлена перемычка между зарядной и разрядной линиями паровых аккумуляторов. Эти изменения привели к нестабильной работе пароаккумуляторов и снижению их аккумулирующей способности на 60 – 70 %, так как часть пара ОКГ стала проходить в обход паровых аккумуляторов [8, 9].

Все вышеперечисленные причины привели к тому, что после РУ 4/1,6 пар поступает к турбинам с постоянным давлением, но с нестабильным расходом. Компенсировать недостаток пара приходится за счет отборов из общекомбинатовской сети, а именно паром, вырабатываемым энергетическими котлами электростанций. Таким образом, неудовлетворительная работа системы утилизации пара котлов ОКГ негативно сказывается на выработке электроэнергии не только турбинами ST3-VE32A, но и станционными турбогенераторами. Характерный график работы турбин представлен на **рис. 2**.

Работа ступеней турбины в нерасчетных режимах приводит к ухудшению внутреннего относительного КПД. К еще большему понижению экономичности приводит изменение термического коэффициента полезного действия при понижении начальных параметров цикла.

При полном открытии всех регулирующих клапанов изменение расхода пара вызывает изменение начального давления. Данная зависимость подсчитывается по формуле

$$D_1 = D_0 \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_k^2}{p_0^2 - p_k^2}}, \quad (1)$$

где  $D_1$  – новый расход пара;  $D_0$ ,  $p_0$ ,  $p_k$  – расход, начальное и конечное давления пара при расчетном режиме;  $p_{01}$  – новое начальное давление.

В конденсационных турбинах величиной  $p_k^2$  можно пренебречь и записать формулу в упрощенном виде

$$D_1 = D_0 \frac{p_{01}}{p_0}. \quad (2)$$

По данным статистики, расход пара на турбины в процессе их работы может понижаться до 20 т/ч вместо расчетных 60 т/ч. При данном расходе значение начального давления составит

$$p_{01} = D_1 \frac{p_0}{D_0} = 20 \cdot \frac{1,2}{60} = 0,4 \text{ МПа}. \quad (3)$$

Мощность турбины при измененном начальном давлении без учета изменений внутреннего относительного КПД и расходов пара в регенеративные отборы запишется

$$N_1 = N_0 \cdot \frac{D_1}{D_0} \cdot \frac{H_1}{H_0}, \quad (4)$$

где  $N_0$ ,  $D_0$ ,  $H_0$  – мощность, расход пара и располагаемый теплоперепад турбины при расчетном режиме;  $N_1$ ,  $D_1$ ,  $H_1$  – мощность, расход пара и располагаемый теплоперепад турбины при изменившемся начальном давлении [10].

$$N_1 = 7460 \cdot \frac{20}{60} \cdot \frac{364,1}{386,7} = 2341 \text{ кВт}.$$

Как видно из формулы (4), изменение мощности турбины происходит за счет изменений как теплового перепада, так и расхода пара и снижается до 30 % от номинальной мощности.

Стоит отметить, что теоретически рассчитанная мощность в 2341 кВт является минимальной, до которой разгружаются турбины, и совпадает с опытными данными работы турбины (см. **рис. 2**).

В целом выработка электроэнергии на турбинах ST3-VE32A характеризуется крайней неравномерностью (см. **рис. 2**), что негативно сказывается как на экономичности турбоустановки, так и на надежности работы турбин. Кроме того, увеличивается износ отдельных узлов оборудования.

Анализ показал, что одним из путей решения проблемы стабилизации параметров пара ОКГ и, как следствие, увеличения выработки электроэнергии на турбинах может быть модернизация схемы пароснабжения с установкой современной паровой арматуры с улучшенными динамическими характеристиками.

Для оценки зарядной способности аккумулятора, снабженного современным быстродействующим клапаном, были проведены промышленные эксперименты с отключенным от сети аккумулятором, работающим на сброс в атмосферу с давлением сброса 1,2 МПа.

Для проведения исследований был проведен монтаж приборов учета и регистрации расходов и параметров пара на зарядку и разрядку аккумулятора; расходов и температуры подпиточной и дренируемой воды; уровня конденсата в баке ПА – в соответствии со схемой проведения экспериментов. Данные со всех датчиков поступают и регистрируются прибором Интеграф-1000. Схема обвязки экспериментального аккумулятора представлена на **рис. 3**.

После установки необходимого оборудования был проведен промышленный эксперимент по зарядке – разрядке аккумулятора от паровой сети при автоматическом поддержании давления пара после аккумулятора на уровне  $P=1,2$  МПа. Результаты эксперимента приведены на **рис. 4**. Расход менялся более плавно, чем в традиционной схеме, Амплитуда пульсаций давления разрядного пара не превысила 0,2 МПа. Расход разрядного пара от экспериментального пароаккумулятора в среднем составил 8,3 т/ч. Разрядка продолжалась даже в те моменты, когда выработки пара котлами ОКГ не было. Кроме того, было отмечено снижение давления зарядного пара во всех пароаккумуляторах. Экспериментальные работы показали, что при модернизации всей схемы создаются условия для снижения объемов сбросов пара на свечи, решается проблема стабилизации параметров пара ОКГ.

Анализ данных показал, что средний расход пара от 6 работающих на общую разрядную линию аккумуляторов в момент проведения экспериментов составил 39,7 т/ч. Принимая равными условия их работы, каждый из 6-ти пароаккумуляторов в стандартной схеме разряжался в среднем с расходом 6,7 т/ч с нестабильными характеристиками расхода (**рис. 5**). При этом экспериментальный пароаккумулятор обеспечил стабилизированный средний расход 8,3 т/ч.

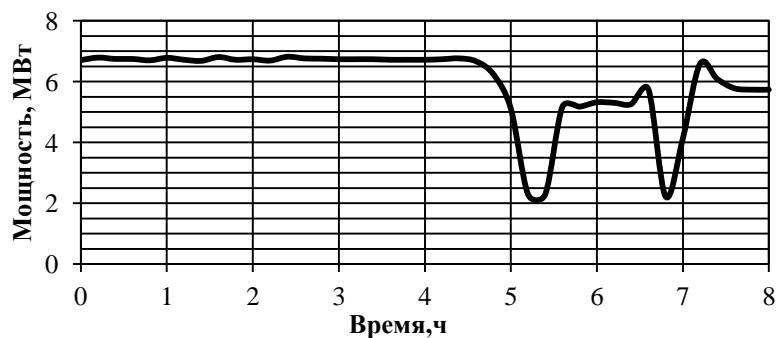


Рис. 2. Выработка электроэнергии на турбине ST3-VE32A

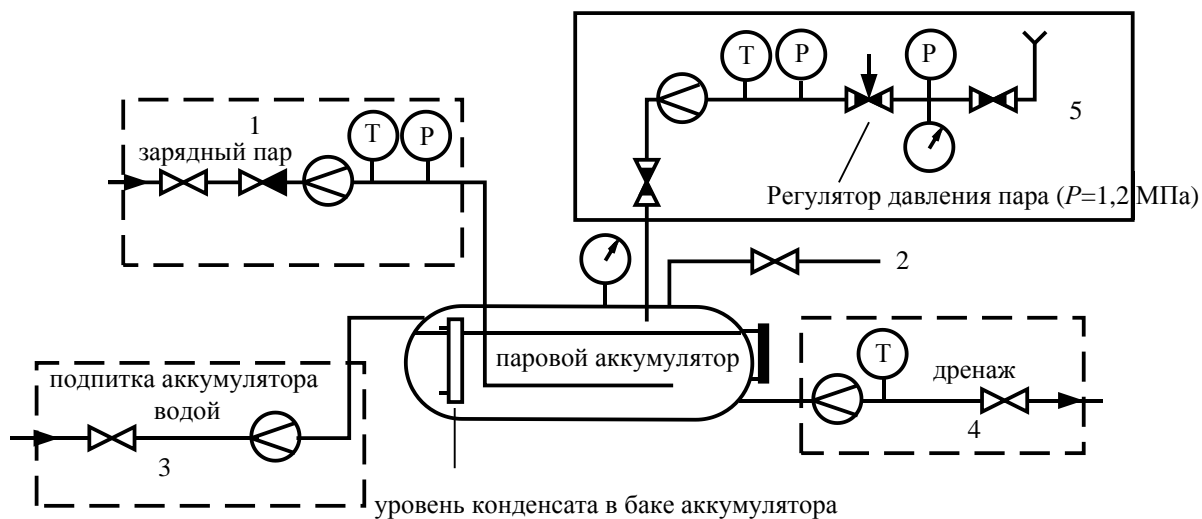


Рис. 3. Схема обвязки парового аккумулятора  
1-КИП зарядной линии; 2-КИП разрядной линии; 3-КИП подпитки;  
4-КИП дренажа; 5- временная схема управления разрядкой

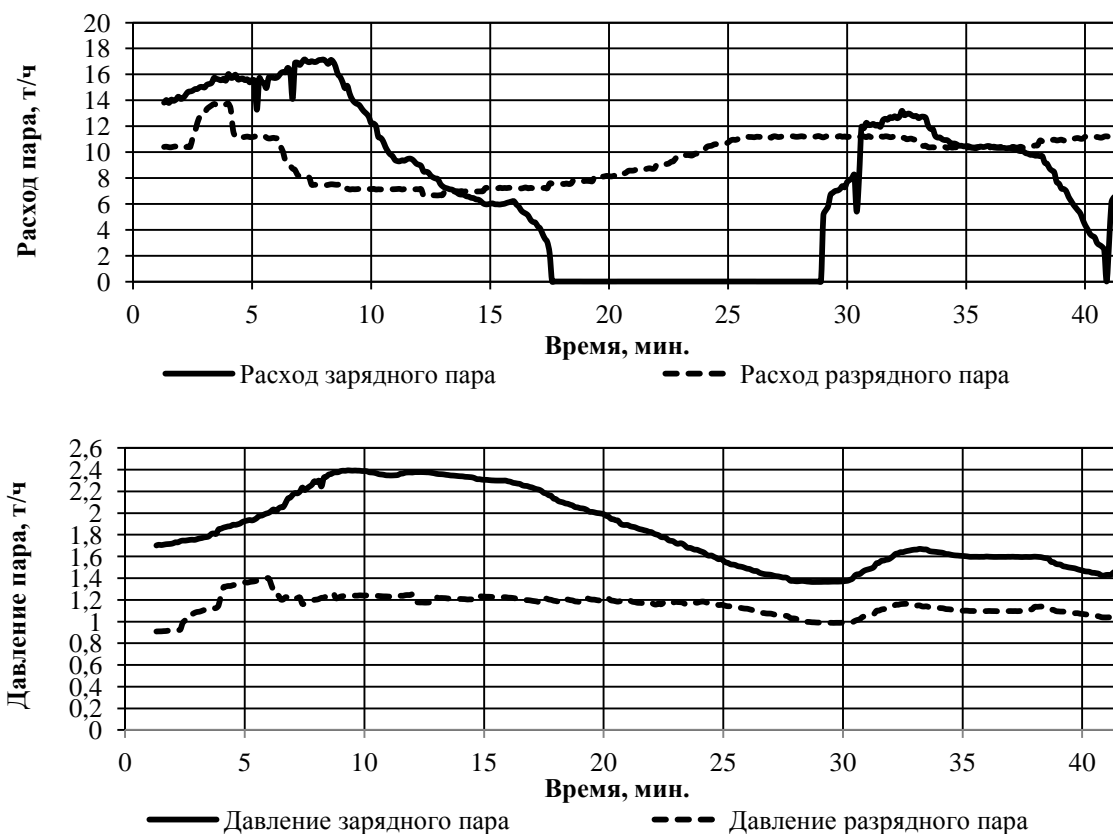


Рис. 4. Изменение параметров пароаккумулятора во время проведения серии экспериментов

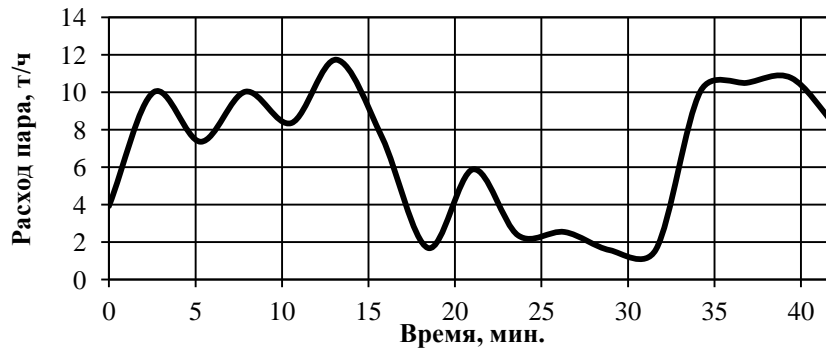


Рис. 5. Расход пара от пароаккумулятора, работавшего по стандартной схеме

На основании проведенных исследований было предложено несколько вариантов реконструкции системы пароснабжения:

- модернизация системы пароснабжения по предложенной схеме с обвязкой всех паровых аккумуляторов по одинаковому принципу;
- разделение пароаккумуляторов на 2 ступени по давлению.

Модернизация системы пароснабжения с обвязкой всех 7 пароаккумуляторов по той же схеме, что и при проведении экспериментов, позволит стабилизировать расход и давление отпускаемого пара. При этом ожидаемый средний суммарный расход пара составит  $8,3 \cdot 7 = 58,1$  т/ч.

При реализации схемы с разделением пароаккумуляторов предлагается выделить 2 из 7 в группу повышенного давления. Таким образом, 5 пароаккумуляторов будут отпускать пар с давлением 1,2 МПа, а оставшиеся 2 – с давлением 1,5 МПа. Оборудование при этом устанавливается то же, что и при проведении серии экспериментов, различна будет лишь настройка регулятора давления пара после пароаккумуляторов. При этом появляется возможность покрытия технологических нужд повышенного давления. Возможность работы системы в данном режиме была подтверждена в ходе серии экспериментов с разрядкой с  $P=1,5$  МПа. На турбины при данной схеме будет поступать  $8,3 \cdot 5 = 41,5$  т/ч пара с постоянным давлением.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обоих рассмотренных случаях модернизация системы пароснабжения приведет к увеличению доли использования, стабилизации давления и расхода низкопотенциального пара котлов ОКГ, снижению величины сбросов пара в системе. Максимальное использование пара ОКГ, вместо пара из общезаводской сети, позволит увеличить выработку электроэнергии на турбинах ST3 – VE32A, сгладить график изменения их нагрузки и снизить влияние на работу электростанций.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплоэнергетика металлургических заводов / Ю.И. Розенгарт, З.А. Мурадова, Б.З. Теверовский и др. М.: Металлургия, 1985. 303 с.
2. Баптизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов. Киев; Донецк: Вища школа, 1984. 343 с.
3. Цветков В.В. Организация пароснабжения промышленных предприятий. М.: Энергия, 1980. 206 с.
4. Сазанов Б.В., Ситас В.И. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.
5. Kapil A., Bulatov I., Kim J. K., Smith R. Exploitation of low-grade heat in site utility systems. In Chemical Engineering Transactions (Chem. Eng. Trans., vol. 21, pp. 367-372. doi: 10.3303/CET102101762
6. Вахромеев И.Е., Казаринов Л.С., Шнайдер Д.А. Метод упреждающего управления технологической паровой распределенной системой // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. №2(178). С.86-91.
7. Шнайдер Д. А. Оперативное управление потоками энергетических ресурсов в производственных сетях с учетом динамики их аккумулирования // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2008. №17(117). С.45-49.
8. Устимов К.В., Агапитов Е.Б., Осолков С.В. Повышение эффективности утилизации пара ОКГ переменных параметров с использованием паровых аккумуляторов на ОАО «ММК» // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сб. статей по результатам XX междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. М.: МЭИ, 2014. С.235.
9. Устимов К.В., Агапитов Е.Б. Оценка эффективности работы паровых аккумуляторов в системе утилизации низкопотенциального пара в условиях ОАО «ММК» // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник статей по результатам: Всерос. науч.-практич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С.214-215.
10. Капелович Б.Э. Эксплуатация паротурбинных установок. М.: Энергия, 1975. 288 с.

Поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### SEARCH FOR TECHNICAL SOLUTIONS TO INCREASE POWER GENERATION USING LOW-POTENTIAL STEAM OF CONVERTER GAS COOLERS

Konstantin V. Ustimov

Post-graduate student, the department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ustimov.k.v@yandex.ru

Evgeniy B. Agapitov

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department, Department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Vladimir N. Mikhaylovskiy

Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Evgeniy A. Semenov

Manager, Power department, OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Sergey V. Oskolkov

Assistant Professor, the Department of Heat and Electrical System Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article considers the steam supply system of a metallurgical plant using Magnitogorsk Iron and Steel Works as an example. Elements of this system were described and analyzed. The main task is to evaluate the possibility of increasing power output by raising the share of heat usage from converter gases. Operating characteristics of low-potential steam turbines were analyzed. The causes of the system inefficiency were identified. The suggested measures can be used to increase the proportion of low-potential steam usage, stabilize the operation and to increase power generation in the system of low-grade steam utilization.

**Keywords:** Low-potential steam, steam accumulators, heat utilization, converter gas, steam supply system.

#### REFERENCES

1. Rozengard Yu.I., Muradova Z.A., Teverovskiy B.Z., et al. *Teploenergetika metallurgicheskikh zavodov* [Heat Power Engineering of Metallurgical Enterprises]. Moscow, Metallurgy Publ., 1985. 303 p.
2. Baptizmanskiy V.I., Medzhibozhskiy M.Ya., Okhotskiy V.B. *Konvertirnyye protsessy proizvodstva stali. Teoriya, tekhnologiya, konstruktivnyy agregat* [Converter Processes of Steel Making. Theory, Engineering, Equipment Design]. Kiev, Donetsk, High School Publ., 1984. 343 p.
3. Tsvetkov V.V. *Organizatsiya parosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [Steam Supply at Industrial Enterprises]. Moscow, Energy Publ., 1980. 206 p.
4. Sazanov B.V., Sitas V.I. *Teploenergeticheskie sistemy goryshchennykh predpriyatiy: uchebnoye posobie dlya vuzov* [Heat and Power Systems for Industrial Enterprises. Textbook for Universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 304 p.
5. Kapil A., Bulatov I., Kim J. K., Smith R. Exploitation of low-grade heat in site utility systems. In *Chemical Engineering Transactions* Chem. Eng. Trans., vol. 21, pp. 367-372. doi: 10.3303/CET102101762
6. Vakhromeev I.E., Kazarinov L.S., Shnaider D.A. Method of Feed-forward Control of Manufacturing Steam Distribution System. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of South Ural State University. Series Computer technology, control, radio electronics], 2010, no.2(178), pp.86-91. (In Russian)
7. Shnaider D.A. Operational Control of Power Flows in Manufacturing Networks Taking into Account their Accumulation. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of South Ural State University. Series Computer technology, control, radio electronics], 2008, no.17(117), pp.45-49. (In Russian)
8. Ustimov K.V., Agapitov E.B., Oskolkov S.V. Improvement of Steam Utilization Efficiency of OKG with Variable Parameters Using Steam Accumulation System at the OJSC "MMK". *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: sbshchik statey po rezul'tatam XX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov* [Radio electronics and power engineering: collection of scientific articles of the Twentieth international scientific conference of students and post-graduate students], Moscow: MEI, 2014, pp.235. (In Russian)
9. Ustimov K.V., Agapitov E.B. Assessment of Heat Accumulation System Operation in the System of Low Parameter Steam Utilization at the OJSC "MMK". *Energo- i resursosberezhenie. Energoobespechenie. Netraditsionnye i obnovlyayemye istochniki energii: sbornik statey po rezul'tatam: Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Energy and resource saving. Power Supply. Nonconventional and renewable energy sources: collection of scientific articles of the All-Russian scientific conference of students, post-graduate students and young scientists], Yekaterinburg, UrFU, 2013. pp.214-215. (In Russian)
10. Kapelovich B.E. *Ekspluatatsiya paroturbinnnykh ustanovok* [Operation and Maintenance of Steam Turbine Plants]. Moscow, Energy, 1975. 288 p.

Устимов К.В., Агапитов Е.Б., Михайловский В.Н., Семенов Е.А., Осолков С.В. Поиск технических решений по увеличению выработки электроэнергии на низкопотенциальном паре охладителей конвертерных газов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №4(33). С.20-24. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-20-24

Ustimov K.V., Agapitov E.B., Mikhaylovskiy V.N., Semenov E.A., Oskolkov S.V. Search for Technical Solutions to Increase Power Generation Using Low-potential Steam of Converter Gas Coolers. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no.4(33), pp.20-24. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-20-24