УДК 620.9

**Нуждин Андрей Валентинович**

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловые электрические станции и теплотехника, Россия, Новочеркасск, телефон (8635) 25-52-27, e-mail: [nuzhdin\_av@npi-tu.ru](mailto:nuzhdin_av@npi-tu.ru)

**Курнакова Наталья Юрьевна**

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловые электрические станции и теплотехника, Россия, Новочеркасск, телефон (8635) 25-52-27, e-mail: [kurnatalya82@mail.ru](mailto:kurnatalya82@mail.ru)

**Янченко Илья Владимирович**

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловые электрические станции и теплотехника, Россия, Новочеркасск, телефон (8635) 25-52-27, e-mail: [vozhdvolgi@rambler.ru](mailto:vozhdvolgi@rambler.ru)

**Повышение энергетической эффективности ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76 за счет комплексного использования вторичных энергоресурсов**

**Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Россия обладает крупнейшими запасами природного газа в мире. Для доставки природного газа от места добычи к потребителям в нашей стране традиционно используются магистральные газопроводы. Сооружение, обслуживание и эксплуатация магистральных газопроводов требует значительных средств, поэтому уменьшение затрат на перекачивание природного газа за счет повышения энергетической эффективности газотурбинных установок при комплексном использовании вторичных энергоресурсов представляет значительный интерес.

**Материалы и методы.** Проведенные исследования выполнены с использованием известных методик термодинамического расчета цикла двигателя внутреннего сгорания, определения составляющих его теплового баланса и теплового расчета оборудования для утилизации вторичных тепловых энергетических ресурсов.

**Результаты.** После комплексного использования вторичных энергоресурсов проведен анализ расходной части энергетического баланса газотурбинной установки, который показал, что для привода газового компрессора используется 16000 кВт (41,7 %) тепловой энергии приходной части энергетического баланса, для привода компрессоров низкого и высокого давления – 9899 кВт (25,8 %), с продуктами сгорания отводится 11311 кВт (29,4 %), а потери в окружающую среду составляют 1152 кВт (3 %).

**Выводы.** По сравнению в базовой ГТУ потери теплоты с продуктами сгорания уменьшились на 65 %. Проведенные энергосберегающие мероприятия по использования вторичных энергоресурсов позволили уменьшить расход природного газа при работе ГТУ на номинальном режиме по сравнению с базовой ГТУ на 23 %. С учетом выработки электрической энергии за счет использования энергии избыточного давления топочного газа и тепла при нагреве сетевой воды системы теплоснабжения газоперекачивающей станции полезно использовано 35420 кВт или 92,2 % подведенной энергии.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, вторичные энергоресурсы, энергетическая эффективность, потери теплоты, расход природного газа.

**Andrey Valentinovich Nuzhdin**

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, telephone (8635) 25-52-27, e-mail: [nuzhdin\_av@npi-tu.ru](mailto:nuzhdin_av@npi-tu.ru)

**Natalya Yurievna Kurnakova**

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, telephone (8635) 25-52-27, e-mail: [kurnatalya82@mail.ru](mailto:kurnatalya82@mail.ru)

Ilya Vladimirovich Yanchenko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate

Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering Department, Russia, Novocherkassk, telephone (8635) 25-52-27, e-mail: [vozhdvolgi@rambler.ru](mailto:vozhdvolgi@rambler.ru)

**Increasing the energy efficiency of the gas turbine unit of the gas pumping unit GPA-Ts-16/76 through the integrated use of secondary energy resources**

**Abstract**

**Background.** Russia has the largest reserves of natural gas in the world. In our country, trunk gas pipelines are traditionally used to deliver natural gas from the extraction site to consumers. The construction, maintenance and operation of trunk gas pipelines require significant funds, so reducing the costs of pumping natural gas by increasing the energy efficiency of gas turbine units with the integrated use of secondary energy resources is of considerable interest.

**Materials and methods.** The conducted studies were carried out using known methods of thermodynamic calculation of the internal combustion engine cycle, determination of the components of its thermal balance and thermal calculation of equipment for the utilization of secondary thermal energy resources.

**Results.** After the comprehensive use of secondary energy resources, an analysis of the expenditure part of the energy balance of the gas turbine unit was carried out, which showed that 16,000 kW (41.7%) of the thermal energy of the incoming part of the energy balance is used to drive the gas compressor, 9,899 kW (25.8%) is used to drive the low- and high-pressure compressors, 11,311 kW (29.4%) is discharged with combustion products, and losses to the environment amount to 1,152 kW (3%).

**Conclusions.** Compared with the basic gas turbine unit, heat losses with combustion products decreased by 65%. The energy-saving measures taken to use secondary energy resources allowed to reduce the consumption of natural gas during the operation of the gas turbine unit in the nominal mode compared with the basic gas turbine unit by 23%. Taking into account the generation of electric energy due to the use of energy from excess pressure of the flue gas and heat during heating of the network water of the heat supply system of the gas pumping station, 35420 kW or 92.2% of the supplied energy was used usefully.

**Key words:** gas turbine unit, secondary energy resources, energy efficiency, heat loss, natural gas consumption.

**DOI:**

**Введение.** Россия обладает крупнейшими запасами природного газа в мире. По данным Минприроды России, извлекаемые запасы природного газа составляют порядка 47,7 трлн. м3 [1]. Доля газа в общем энергетическом балансе России находится в пределах 52 %, а при производстве электрической энергии превышает 49 % [1].

Для доставки природного газа от места добычи к потребителям в нашей стране традиционно используются магистральные газопроводы. Сооружение, обслуживание и эксплуатация магистральных газопроводов требует значительных средств, поэтому уменьшение затрат на перекачивание природного газа за счет повышения энергетической эффективности газотурбинных установок при комплексном использовании вторичных энергоресурсов представляет значительный интерес.

Газоперекачивающий агрегат ГПА-Ц-16/76 на базе авиационного привода НК-16СТ в блочно-контейнерном исполнении предназначен для перекачивания природного газа по магистральным газопроводам и спроектирован на рабочее давление нагнетателя 7,45 МПа.

Привод газового компрессора в ГПА-Ц-16/76 осуществляется газотурбинным двигателем НК-16СТ конструкции ОКБ Кузнецова, созданным на базе авиационного двухконтурного двигателя НК-8-2У семейства двигателей НК. Базовый двигатель применялся в качестве силовой установки самолета Ту-154. Конструктивно двигатель состоит из 2-х модулей – нагнетателя воздуха и силовой турбины. Нагнетатель осевого типа состоит из 10 ступеней сжатия. Первые 4 ступени составляют компрессор низкого давления, сжимающий воздух до 0,25 МПа. Остальные 6 ступеней составляют компрессор высокого давления, на выходе из которого давление воздуха достигает 1 МПа.

Принципиальная схема ГТУ ГПА-Ц-16/76 представлена на рис. 1.

Газотурбинная установка ГПА-Ц-16/76 выполнена по схеме с разрезным валом. Турбина газогенератора (ТГГ), состоящая из турбин высокого (ТВД) и низкого (ТНД) давления, служит для привода компрессора, включающего компрессоры низкого (КНД) и высокого (КВД) давления. Силовая турбина (СТ) служит для привода газового компрессора (ГК).

Номинальная мощность на приводном валу силовой турбины при стандартных атмосферных условиях составляет 16 МВт.

Топливом для газотурбинной установки является природный газ из газопровода Уренгой – Сургут – Челябинск. Состав газа в объемных % [2]: СН4 = 98,24 %, С2Н6 = 0,29 %, С3Н8 = 0,20 %, С4Н10 = 0,09 %, С5Н12 = 0,04 %, СО2 = 0,14 %, N2 = 1,00 %.

Низшая рабочая теплота сгорания природного газа составляет  35703 кДж/нм3, теоретический объем воздуха, необходимый для полного сгорания газа – *V*0 = 9,53 нм3/нм3, теоретический объем продуктов сгорания –  10,529 нм3/нм3. Коэффициент избытка воздуха при работе ГТУ ГПА-Ц-16/76 составляет α = 3,14. Показатель адиабаты продуктов сгорания *k* = 1,32.

Температура продуктов сгорания на входе в газовую турбину составляет 850 °С, на выходе турбины газогенератора – 620 °С, а на выходе силовой турбины – 370 °С.

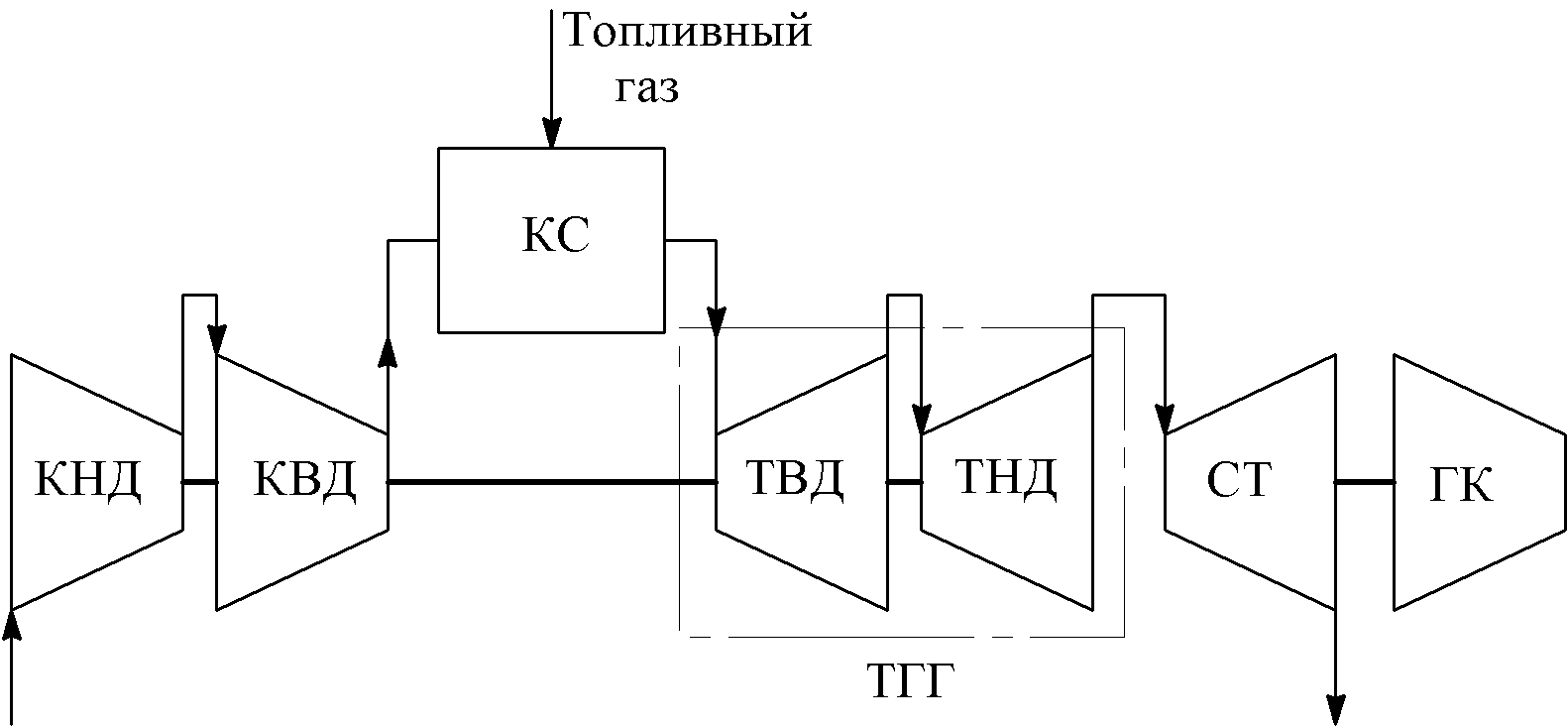


Рис. 1. Принципиальная схема ГТУ ГПА-Ц-16/76

Целью исследования является повышение энергетической эффективности газотурбинной установки за счет комплексного использования вторичных энергоресурсов в виде продуктов сгорания.

**Методы исследования.** Исследование системы утилизации теплоты газопоршневой установки выполнено с использованием известных методик термодинамического расчета цикла двигателя внутреннего сгорания, определения составляющих его теплового баланса и теплового расчета оборудования для утилизации вторичных тепловых энергетических ресурсов.

Расход топлива газовой турбины ГПА-Ц-16/76 определялся на основании уравнения ее топливно-энергетического баланса

,

где *Q*тр – располагаемая теплота топлива, кВт; *Q*т – теплота, внесенная с топливом, кВт; *Q*в – теплота, внесенная с воздухом, кВт; *Q*пи.ст – теплота полезно использованная в силовой турбине для привода газового компрессора и эквивалентная ее эффективной мощности, кВт; *Q*пи.гг – теплота, полезно использованная в турбине привода газогенератора, кВт; Δ*Q*ух – потери теплоты с продуктами сгорания, кВт; Δ*Q*окр – потери теплоты в окружающую среду, кВт.

Потери теплоты в окружающую среду в расчете принимались 3 % от подведенной теплоты.

Расход природного газа газотурбинной установки ГПА-Ц-16/76 при работе на номинальном режиме составил 1,2 м3/с.

Результаты расчета расходной части баланса ГТУ представлены на рис. 2.

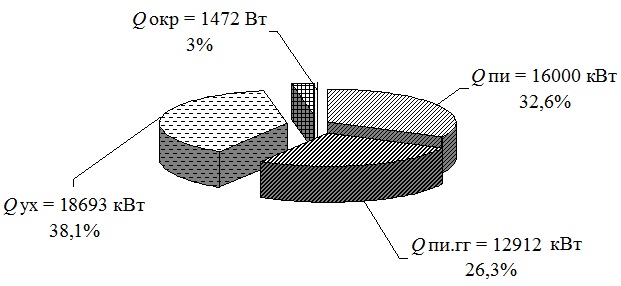


Рис. 2. Расходная часть баланса ГТУ до модернизации

Анализ расходной части энергетического баланса газотурбинной установки показал, что для привода газового компрессора используется 16000 кВт (32,6 %) тепловой энергии приходной части энергетического баланса, для приводов компрессоров низкого и высокого давления используется 12912 кВт (26,3 %), с продуктами сгорания отводится 18693 кВт (38,1%), а потери в окружающую среду составляют 1472 кВт (3%).

Согласно классификации тепловых потерь [3] продукты сгорания на выходе силовой турбины с температурой 370 °С относятся к среднепотенциальным тепловым вторичным энергетическим ресурсам.

Особенностью работы ГТУ на базе агрегата ГПА-Ц-16/76 является значительное давление отбираемого из магистрального газопровода природного газа. В соответствии с техническими характеристиками агрегата номинальное давление газа на входе в газовый нагнетатель составляет 5,17 МПа.

Понижение давления природного газа до давления дутьевого воздуха после компрессора высокого давления 1 МПа происходит за счет дросселирования в редукционных клапанах газораспределительного пункта станции. Снижение давления при дросселировании происходит без совершения работы, т.е. имеют место непроизводительные потери энергии.

Отбираемый из магистрального газопровода природный газ можно использовать в качестве вторичного энергоресурса повышенного давления.

Анализ технической литературы [4-10] показал, что в настоящее время проблеме повышения энергетической эффективности ГТУ на газоперекачивающих станциях за счет использования вторичных энергоресурсов уделяется большое внимание.

Для комплексного использования вторичных энергоресурсов ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76 предложена схема, представленная на рис. 3. В ней продукты сгорания после силовой турбины 10 направляются в регенератор 8, в котором происходит нагрев воздуха после компрессора высокого давления.

После регенератора 8 продукты сгорания направляются в подогреватель топливного газа 3 для его нагрева перед детандером 6 и предотвращения выпадение кристаллогидратов и повышения хрупкости проточной части детандера и газопровода.

В детандере 6 потенциальная энергия повышенного давления природного газа преобразуется в механическую работу на валу турбины. Вал турбины детандера 6 связан с валом электрогенератора 5, в котором вырабатывается электрический ток. Электрический ток направляется в электрическую сеть газоперекачивающей станции. Давление топливного газа после детандера составляет 1,2 МПа, дальнейшее понижение давления происходит в редукционных клапанах газораспределительного пункта станции.

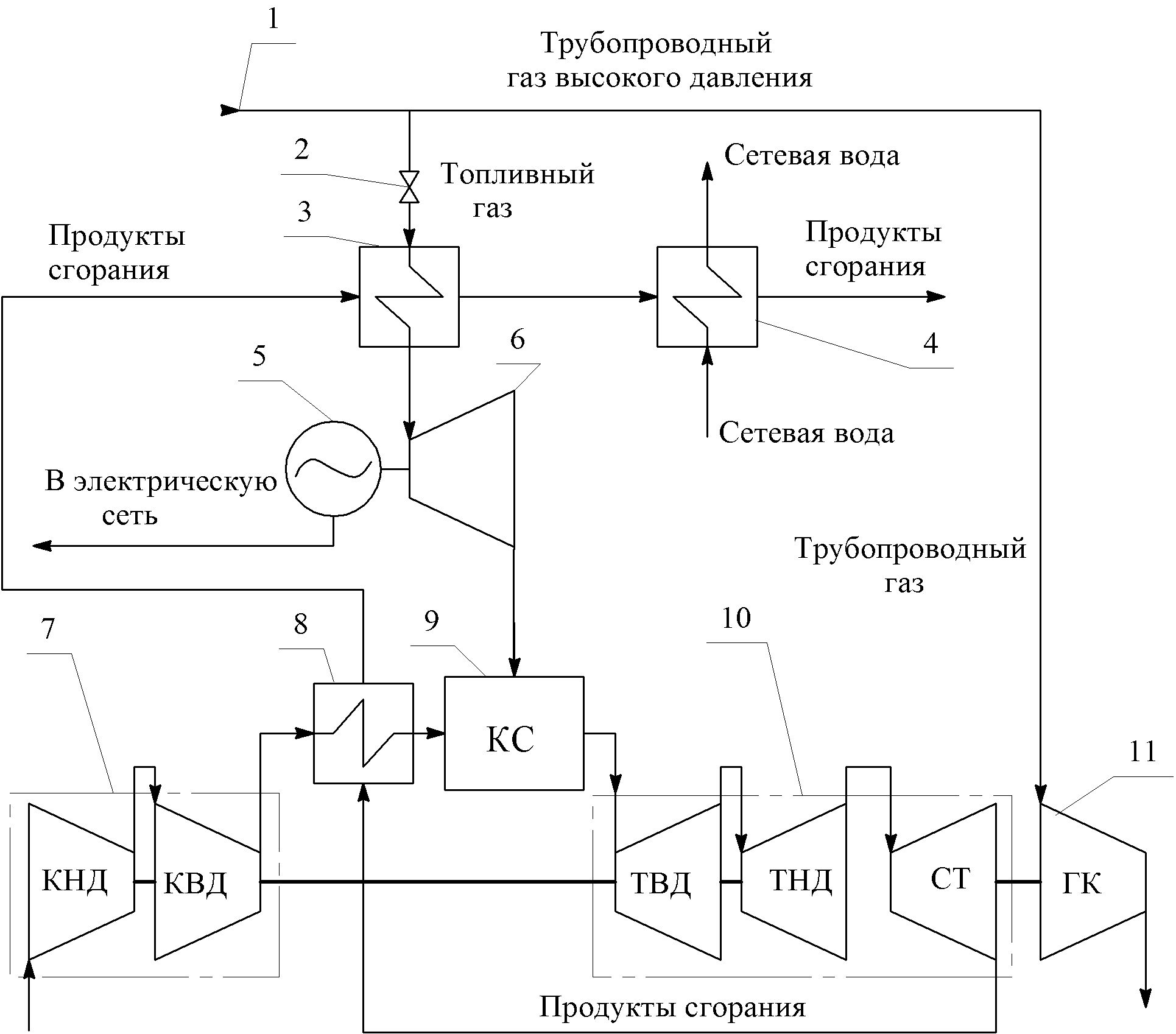


Рис. 3. Структурная схема комплексного использования вторичных энергоресурсов на ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76

Топливный газ после детандера 6 направляется в камеру сгорания 9 газотурбинной установки.

После подогревателя топливного газа 3 продукты сгорания направляются в подогреватель 4, в котором происходит нагрев сетевой воды системы теплофикации газоперекачивающей станции.

Для регенеративного подогрева дутьевого воздуха и подогрева топливного газа перед детандером используем трубчатые гладкотрубные подогреватели с многократным поперечным обтеканием труб продуктами сгорания.

Площадь поверхности теплообмена регенеративного подогревателя воздуха составила 3308 м2, температура продуктов сгорания на выходе подогревателя – 307 °С, а воздуха – 310 °С. Площадь поверхности теплообмена подогревателя топочного газа составила 153 м2, температура продуктов сгорания на выходе подогревателя – 296 °С.

Для подогрева сетевой воды используем трубчатый змеевиковый подогреватель с поперечным внешним обтеканием продуктами сгорания. Площадь поверхности теплообмена подогревателя сетевой воды составила 772 м2, температура продуктов сгорания на выходе подогревателя – 110 °С, а воды – 90 °С.

**Результаты исследования.** Полученные в результате проведенной модернизации ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76, включающего газотурбинный двигатель НК-16СТ мощностью 16 МВт, энергетические ресурсы представлены на рис. 4.

На рис. 4 обозначено: *Q*р = 3148 кВт – теплота, переданная в регенераторе дутьевому воздуху, *Q*п.г = 567 кВт – теплота, переданная в подогревателе топливному газу, *N* = 220 кВт – мощность на валу турбодетандера и *Q*п.в = 9301 кВт – теплота, переданная в подогревателе сетевой воде системы теплоснабжения.

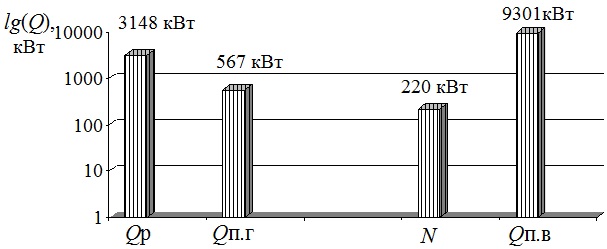


Рис. 4. Полученные в результате проведенной модернизации ГТУ газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76 энергетические ресурсы

Теплота, переданная дутьевому воздуху *Q*р и топливному газу *Q*п.г используется в самой ГТУ, а теплота, переданная сетевой воде *Q*п.в и мощность на валу турбодетандера *N* используется внешними потребителями.

Регенеративное (внутреннее) использования энергии вторичных энергоресурсов ГТУ составляет 28 %, а внешнее – 72 %.

Расход природного газа газотурбинной установкой ГПА-Ц-16/76 после комплексного использования вторичных энергоресурсов составил 0,92 м3/с.

Результаты расчета расходной части баланса ГТУ представлены на рис. 5.

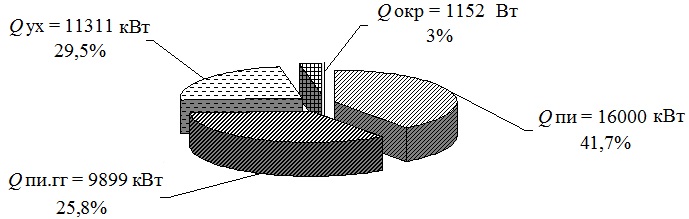


Рис. 5. Расходная часть баланса ГТУ после использования вторичных энергоресурсов

**Выводы.** Проведенные балансовые исследования перераспределения теплоты ГТУ за счет её ступенчатой утилизации, показали, что для привода газового компрессора используется 16000 кВт (41,7 %) тепловой энергии приходной части энергетического баланса, для привода компрессоров низкого и высокого давления – 9899 кВт (25,8 %), с продуктами сгорания отводится 11311 кВт (29,4 %), а потери в окружающую среду составляют 1152 кВт (3 %).

Потери теплоты с продуктами сгорания по сравнению с базовой ГТУ уменьшились с 18693 кВт до 11311 кВт или на 65 %.

Проведенные энергосберегающие мероприятия по внутреннему использования ВЭР позволили уменьшить расход природного газа при работе ГТУ на номинальном режиме по сравнению с базовой ГТУ с 1,2 м3/с до 0,92 м3/с или на 23 %.

С учетом выработки электрической энергии за счет использования энергии избыточного давления топочного газа и тепла при нагреве сетевой воды системы теплоснабжения газоперекачивающей станции полезно использовано 35420 кВт или 92,2 % подведенной энергии.

**Список литература.**

1. **Семикашев В.В., Гайворонская М.С.** Анализ состояния и перспектив развития российской газовой отрасли до и после 2022 г. // Научные труды: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. 2022 С. 108-127.
2. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Абрютин А.А., Карасина Э.С. и др. Издательство: «ВТИ» и НПО «ЦКТИ», 1998 - 258 с.
3. **Вторичные** энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. Куперман Л. И., Романовский С. А., Сидельковский Л.Н.- 2-е изд., перераб. и доп.- К. : Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 303 с.
4. **Динков В.А.** Повышение эффективности использования газа на компрессорных станциях/В.А. Динков, А.И. Гриценко, Ю.И. Васильев, П.М. Мужиливский. – М.: Недра, 1981. – 283 с.
5. **Никишин В.И.** Энергосберегающие технологии в трубопроводном транспорте природных газов/ В. И. Никишин. – М.: Нефть и газ, 1998. – 349 с.
6. **Поршаков Б.П., Апостолов А.А., Никишин В.И.** Газотурбинные установки: - М: ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2003. – 240 с.
7. **Равич М.Б.** и др. Расчет ресурсов вторичного тепла продуктов сгорания ГТУ КС // Экспресс-информация. Подготовка, переработка и использование газа. – М., 1987. – с.8-11.
8. **Рудаченко А.В.** Газотурбинные установки для транспорта природного газа / А.В. Рудаченко, Н.В. Чухарева; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 217 с.
9. **Широков В.А.** Установка комплексного использования газа для агротеплофикации на базе КС // Теплоснабжение и вентиляция агропромышленного комплекса: Сборник научных статей. – Ростов – на – Дону, 1988. – с.133 – 136.
10. **Юращик И.Л.** Утилизация теплоты приводных газотурбинных установок / И.Л. Юращик, Л.Ф. Глущенко, А.С. Маторин. - Киев: Тэхника, 1991. – 152 с.

**References**

1. **Semikashev V.V., Gaivoronskaya M.S.** Analysis of the state and prospects for the development of the Russian gas industry before and after 2022 // Scientific works: Institute of National Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences. 2022 pp. 108-127.

2. **Thermal** calculation of boiler units (Standard method). Abryutin A.A., Karasina E.S. and others. Publishing house: “VTI” and NPO “TsKTI”, 1998 - 258 p.

3. **Secondary** energy resources and energy-technological combination in industry. Kuperman L.I., Romanovsky S.A., Sidelkovsky L.N. - 2nd ed., revised. and additional - K.: Vishcha school. Head Publishing House, 1986. - 303 p.

4. **Dinkov V.A.** Increasing the efficiency of gas use at compressor stations/V.A. Dinkov, A.I. Gritsenko, Yu.I. Vasiliev, P.M. Muzhilivsky. – M.: Nedra, 1981. – 283 p.

5. **Nikishin V.I.** Energy-saving technologies in pipeline transport of natural gases / V. I. Nikishin. – M.: Oil and Gas, 1998. – 349 p.

6. **Porshakov B.P., Apostolov A.A., Nikishin V.I.** Gas turbine units: - M: State Unitary Enterprise Publishing House "Oil and Gas" Russian State University of Oil and Gas named after. I.M.Gubkina, 2003. – 240 p.

7. **Ravich M.B.** and others. Calculation of secondary heat resources of combustion products of gas turbine compressor plants // Express information. Preparation, processing and use of gas. – M., 1987. – p.8-11.

8. **Rudachenko A.V.** Gas turbine installations for natural gas transport / A.V. Rudachenko, N.V. Chukhareva; National Research Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2010. – 217 p.

9. **Shirokov V.A.** Installation of integrated gas use for agroheating on the basis of a compressor station // Heat supply and ventilation of the agro-industrial complex: Collection of scientific articles. – Rostov-on-Don, 1988. – pp. 133 – 136.

10. **Yurashchik I.L.** Utilization of heat from gas turbine drive units / I.L. Yuraschik, L.F. Glushchenko, A.S. Matorin. - Kyiv: Technology, 1991. – 152 p.