

Седельников Г. Д., Ширяев В. Н.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Седельников Г. Д., Ширяев В. Н.

G. D. Sedelnikov, V. N. Shiryayev

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

ACCOUNTING STUDY EFFICIENCY OF THE COMBINED STEAM AND GAS TURBINE POWER PLANTS



Седельников Геннадий Дмитриевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; 8(4217)241-155. E-mail: ido@knastu.ru

Mr. Gennady D. Sedelnikov - Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Heat&Power Plants, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave.; phone: + 4217 241155. E-mail: ido@knastu.ru.



Ширяев Владимир Николаевич – студент магистратуры Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27; 8(4217)241-155. E-mail: ido@knastu.ru

Mr. Vladimir N. Shiryayev – Master of Science student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University Russia, city of Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin Ave.; phone: + 4217 241155. E-mail: ido@knastu.ru.

Аннотация. Данная работа посвящена вопросам, связанным с анализом эффективности выработки электроэнергии комбинированными парогазовыми установками. Рассмотрены бинарные установки различных схем и компоновок, комбинированные установки с впрыском пара в газовый тракт (STIG), с паровым приводом компрессора, с утилизационными котлами одного и двух давлений. Представлены результаты параметрической и схемной оптимизации и электрические КПД таких установок.

Summary. The paper is concerned with the problems arising from analysis of efficiency of combined steam and gas turbine power plants. Considered are binary power plants based on different circuit designs and arrangements, such as plants with steam injection into the gas turbine (STIG), plants with a steam-driven compressor, plants equipped with exhaust gas boilers of single and dual pressures. Presented are the results of parametric and circuital optimization; data on the electric efficiency of such power plants are provided.

Ключевые слова: газотурбинная установка, комбинированная парогазовая установка, утилизационный котел, электрическая мощность, паропроизводительность, электрический КПД, оптимизация.

Key words: gas turbine power plant, combined steam and gas turbine power plant, exhaust gas boiler, electric output, steam production capacity, electric efficiency, optimization.

УДК 621.438

Комбинированные бинарные установки, сочетающие в себе преимущества газотурбинных и паротурбинных установок, в последние годы все чаще становятся предметом исследований и оптимизации [1; 2; 3; 4]. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. предусматривает замещение традиционных паротурбинных энергоблоков, работающих на природном газе, на парогазовые установки (ПГУ). Среди различных типов комбинированных установок наиболее перспективными считаются бинарные ПГУ с утилизационными котлами (УК) и

ПГУ с впрыском пара в газовый тракт газотурбинной установки (ГТУ). Первые имеют наибольший КПД по выработке электроэнергии, а вторые – улучшенные экологические показатели и возможности существенной форсировки мощности при приемлемом КПД.

В данной работе исследована эффективность именно таких перспективных ПГУ. Рассматривались следующие варианты установок: бинарная ПГУ, ПГУ с паротурбинным приводом компрессора, ПГУ с впрыском пара в газовый тракт (ПГУ-STIG). Во всех вариантах рассчитывались схемы с УК одного и двух давлений.

Для решения поставленной задачи был использован метод математического моделирования процессов, происходящих в газотурбинной и паротурбинной частях комбинированной установки [2; 5]. В основу расчета УК положена система из уравнений, записанных для следующих его элементов высокого давления (ВД) и низкого давления (НД): пароперегревателей (ППВД и ППНД), испарителей (ИВД и ИНД), сепараторов пара (СВД и СНД), экономайзера (ЭВД), подогревателя конденсата и др. Математические модели и программы реализованы для перечисленных вариантов парогазовых установок, сформированных на базе газотурбинного двигателя ГТУ-110 производства НПО «Сатурн».

При исследовании эффективности ПГУ решалась также задача оптимизации параметров генерируемого в УК пара. Расчеты показали, что температура перегретого пара незначительно влияет на паропроизводительность котла при практически неизменной мощности паровой турбины. С другой стороны, понижение температуры пара дает рост его влагосодержания в конце процесса расширения в турбине (т.е. больше допустимых 12 – 13 %). Поэтому была принята постоянная температура перегретого пара 540 °С.

Как известно, давление пара, производимого УК, оказывает неоднозначное влияние на мощность паровой турбины. По результатам расчетов установки с одноконтурным УК представлен характер изменения адиабатного теплоперепада в турбине H_a , паропроизводительности котла $G_{ук}$ и мощности турбины $N_{пт}$ при изменении давления пара (см. рис. 1). Оптимальное давление пара УК составило около 5 МПа, что соответствует наибольшим значениям мощности паровой турбины, всей ПГУ (154 МВт) и ее КПД (51 %).

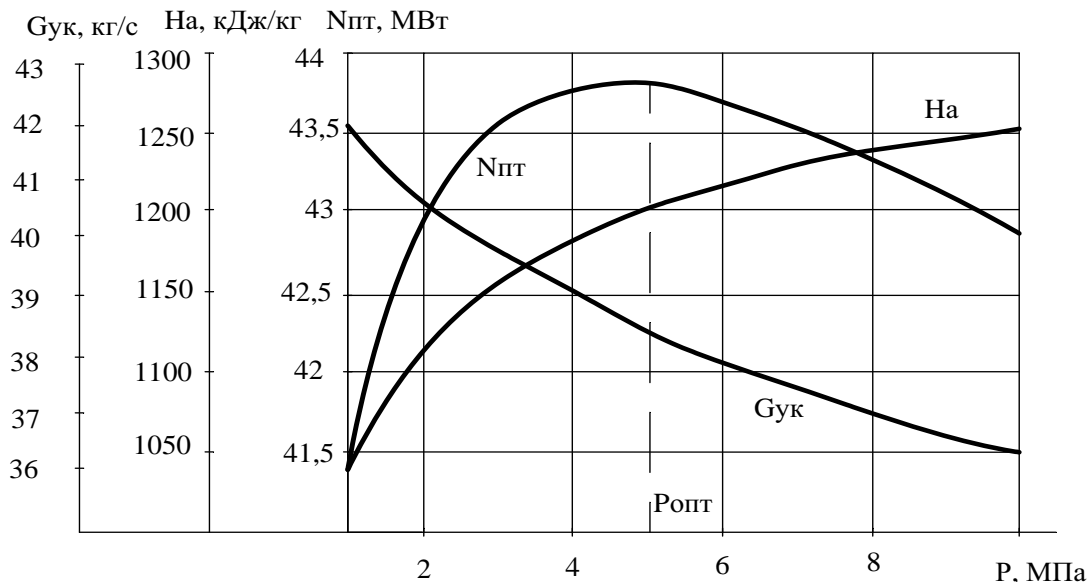


Рис. 1. Результаты оптимизации давления пара одноконтурного УК

Для ПГУ с двухконтурным УК было рассмотрено несколько принципиальных схем расположения тепловоспринимающих поверхностей (см. рис. 2). Схемы *a*, *б* и *в* рассмотрены с целью повышения температуры пара контура НД по сравнению с последовательной схемой (см. рис. 2, *з*). Расчеты показали, что наибольшую эффективность имеет схема ПГУ с после-

довательной компоновкой УК (см. рис. 3), несмотря на то что температура перегретого пара НД в этом варианте имеет наименьшее значение. Это объясняется тем, что при данной конструкции УК основная часть теплоты уходящих газов отдается контуру ВД, а оставшаяся часть утилизируется в контуре НД. Это снижает температуру уходящих в атмосферу газов, дает прирост паропроизводительности УК по сравнению с другими вариантами компоновки котла. Для этого – лучшего – варианта оптимальные параметры пара ВД/НД составили 11/0,15 МПа и 540/200 °С, при которых мощность ПГУ достигает 157 МВт, а ее электрический КПД составляет 52,6 % (см. рис. 3).

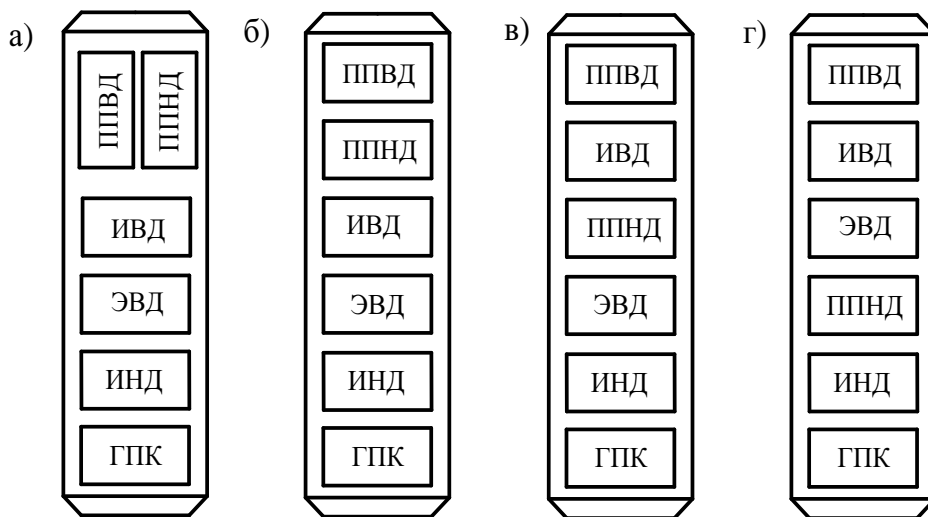


Рис. 2. Принципиальные схемы компоновки УК двух давлений:

- а – ППВД и ППНД в одной температурной зоне; б – ППНД после ППВД;
- в – ППНД после ИВД; г – последовательное расположение контуров ВД и НД

Дальнейшее развитие парогазовых установок связано не только с повышением начальных параметров и увеличением числа контуров УК, но и другими схемными решениями, в частности, с впрыском пара УК в газовый тракт ГТУ (ПГУ-STIG). Пар, впрыскиваемый в камеру сгорания, принято называть экологическим (снижаются выбросы оксидов азота), а в ступени газовой турбины – энергетическим. Основным преимуществом ПГУ-STIG является значительно больший прирост мощности относительно исходной ГТУ, чем в бинарной ПГУ. Этот прирост мощности достигается увеличением расхода рабочего тела (без увеличения мощности на привод компрессора), исключением значительной части расхода сжатого воздуха на охлаждение лопаток и камеры сгорания ГТУ.

В данной работе были рассмотрены несколько вариантов ПГУ-STIG. Это комбинированная установка, работающая по циклу Ченя [3], когда весь генерируемый в УК пар направляется на впрыск в камеру сгорания ГТУ, а также два варианта ПГУ-STIG с предварительным расширением пара в отдельной паровой турбине с котлом одного и двух давлений пара соответственно.

Результаты оптимизации параметров и расчета эффективности ПГУ-STIG с котлом одного и двух давлений пара представлены на рис. 4 и 5.

Уменьшение давления генерируемого пара сопровождается ростом паропроизводительности УК, что повышает КПД парогазовой установки, работающей по циклу Ченя (см. рис. 4). При этом наименьшее давление пара должно быть достаточным для впрыска в камеру сгорания ГТУ. Для ПГУ-STIG по циклу Ченя при параметрах пара 2 МПа и 540 °С и расходом впрыскиваемого пара 4,7 кг на 1 м³ природного газа электрическая мощность получилась 110 МВт и КПД 42 %.

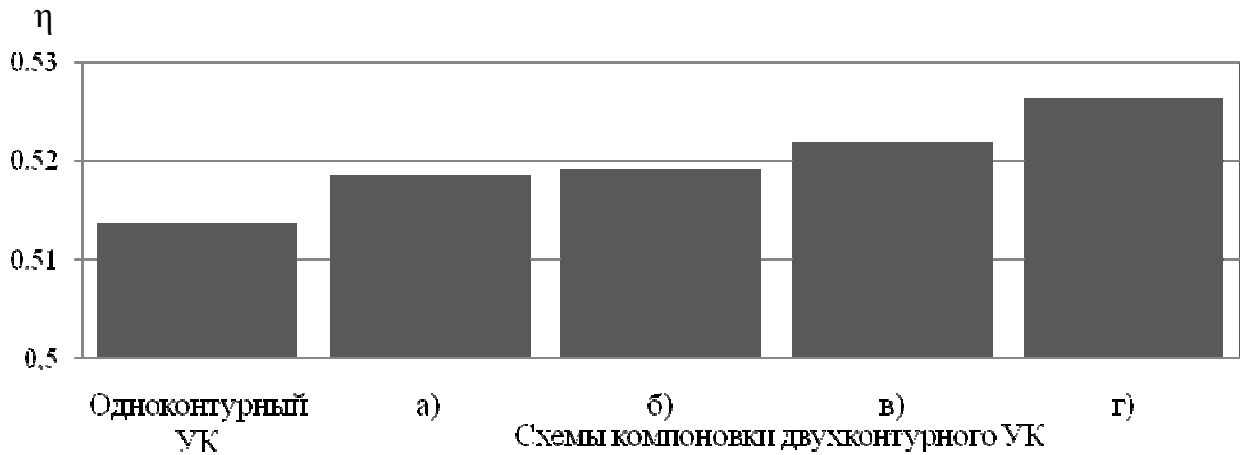


Рис. 3. КПД по выработке электроэнергии бинарных ПГУ:
 а – ППВД и ППНД в одной температурной зоне; б – ППНД после ППВД;
 в – ППНД после ИВД; г – последовательное расположение контуров ВД и НД

В ПГУ-STIG с предварительным расширением вырабатывается дополнительная мощность в паровой турбине, после чего пар впрыскивается в камеру сгорания ГТУ. По этой причине КПД по выработке электроэнергии получается существенно выше и имеет выраженный максимум по давлению пара. Для рассматриваемых условий оптимальное давление пара составило около 9 МПа, что соответствует оптимальному впрыску 3,5 кг пара на 1 м³ природного газа (см. рис. 4). При этом мощность ПГУ достигает 120 МВт.

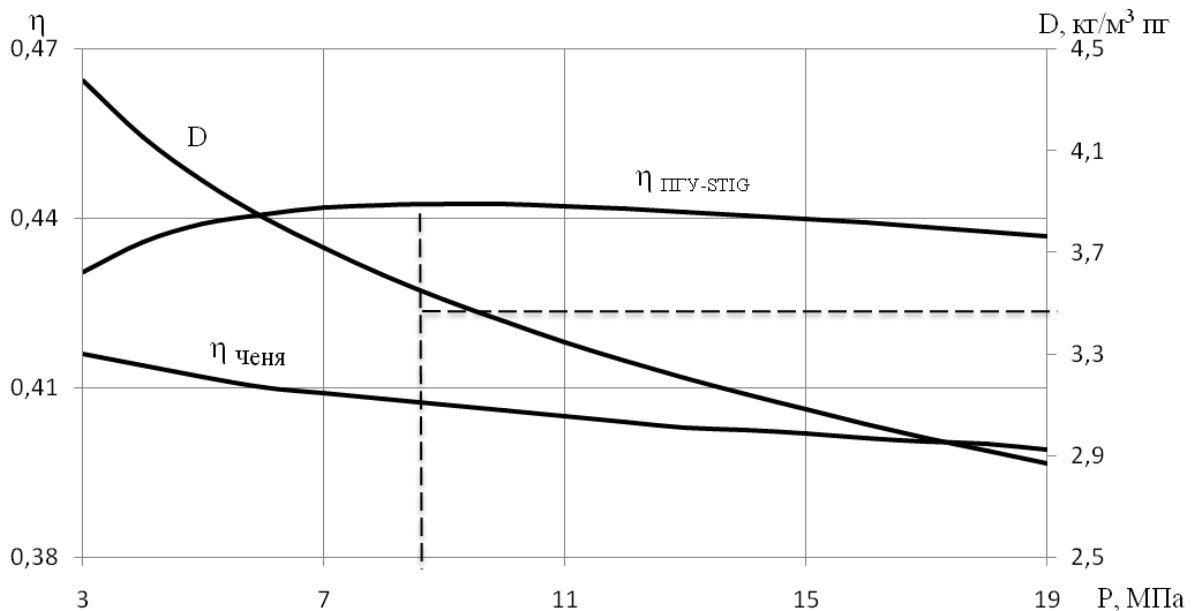


Рис. 4. Электрический КПД, оптимальное давление и оптимальный впрыск пара в ПГУ-STIG с одноконтурным УК

В ПГУ-STIG с котлом двух давлений паровой контур НД работает также на привод паровой турбины. Это увеличивает выработку электроэнергии и повышает КПД до 47 % (см. рис. 5). Оптимальные параметры пара ВД/НД для данной установки составили 20/0,3 МПа и 540/300 °С, при которых мощность ПГУ достигает 128 МВт.

Последней из рассмотренных схем была ПГУ с приводом компрессора от паровой турбины, работающей на паре УК одного и двух давлений. Основные преимущества такой схемы сводятся к следующему: мощность газовой турбины полностью используется для привода электрогенератора; блок «паровая турбина-компрессор» может быть выполнен быстроходным с существенным снижением его массы и габаритов.

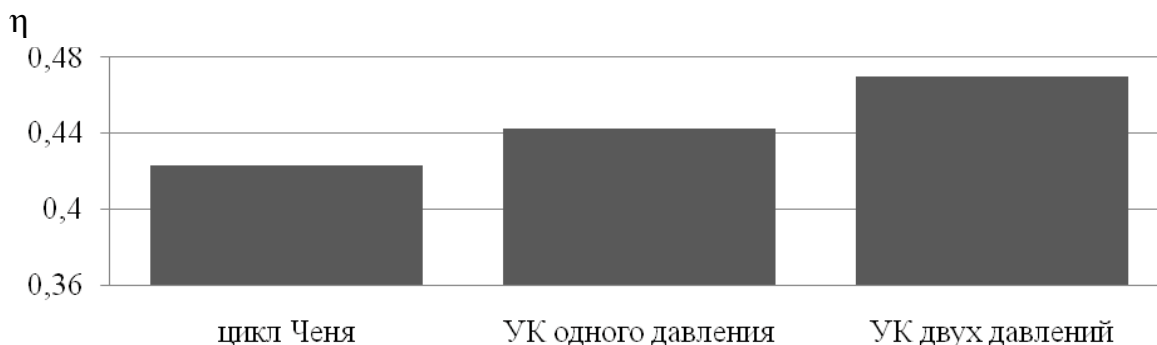


Рис. 5. КПД по выработке электроэнергии ПГУ-STIG

Расчеты показали, что мощности паровой турбины недостаточно для привода компрессора с прежней степенью повышения давления воздуха, т.е. как в исходной ГТУ. Поэтому подбирались различные значения этой степени при различных давлениях пара УК исходя из баланса мощностей компрессора и паровой турбины. Оптимальное давление пара составило около 9 МПа при допустимой влажности пара 13 % в конце процесса расширения пара в турбине (степень сухости $x = 0,87$ – см. рис. 6). При данном давлении и температуре пара 540 °С мощность ПГУ составляет 110 МВт, а ее электрический КПД 49 % (см. рис. 6).

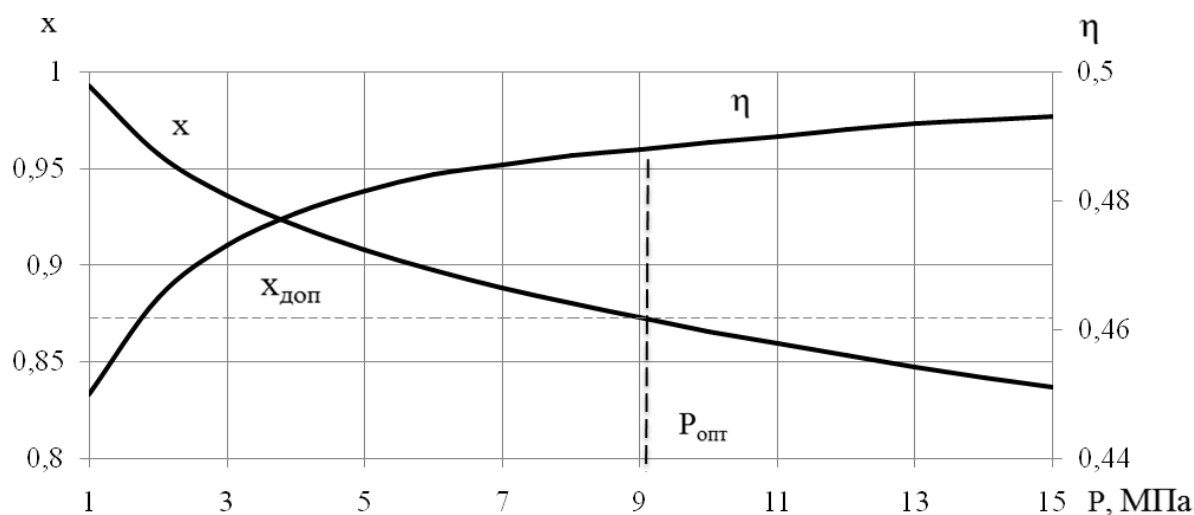


Рис. 6. Влияние давления пара на КПД ПГУ с паровым приводом компрессора

Для варианта с двухконтурным УК при прежней мощности ПГУ оптимальные параметры пара ВД/НД составили 11/0,15 МПа и 540/140 °С, а электрический КПД составил 50 %.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для рассмотренных ПГУ на базе газотурбинного двигателя ГТУ-110 определены оптимальные параметры пара УК одного и двух давлений.
2. Наибольший КПД по выработке электроэнергии из всех исследованных вариантов имеет бинарная ПГУ с двухконтурным УК и последовательным расположением его трубных



элементов высокого и низкого давления. КПД достигает 52,6 %, что превышает эффективность исходной установки ГТУ-110 на 46 % относительных.

3. Комбинированные установки с приводом компрессора от паровой турбины и с впрыском пара в газовый тракт ГТУ уступают бинарным ПГУ по эффективности выработки электроэнергии на 3 – 6 %. Однако у таких установок имеются другие важные преимущества, в частности, у ПГУ-STIG есть возможность форсировки по мощности на 50 – 70 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парогазовые установки с паротурбинным приводом компрессора / А. Е. Зарянкин, С. В. Арианов, В. А. Зарянкин, С. К. Сторожук // Газотурбинные технологии. – 2007. – № 7(58). – С. 18-24.
2. Мордасова, М. В. Оптимизация степени повышения давления воздуха в газотурбиной и парогазовой установках / М. В. Мордасова, Г. Д. Седельников // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 7. – С. 160-162.
3. Морозенко, М. И. Исследование эффективности контактной когенерационной ГТУ / М. И. Морозенко, А. В. Землянский, В. Г. Григорьев // Газотурбинные комбинированные установки и двигатели: материалы XII Всерос. межвузовской науч.-технической конф. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – С. 32-34.
4. Нечитайло, Т. П. Угольный бинарный паротурбинный энергоблок для северных регионов / Т. П. Нечитайло, С. А. Скоморовский // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре гос. техн. университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № III-1(4). – С. 38-42.
5. Цанев, С. В. Расчет на ЭВМ тепловых схем газотурбинных установок в составе парогазовых установок тепловых электростанций / С. В. Цанев, И. М. Чухин. – М.: МЭИ, 1986. – 40 с.