

3. M. Carboni, C.W. Abney, Sh. Liu, W. Lin, W. Li. Highly porous and stable metal-organic frameworks for uranium extraction // Chem. Sci.-2013.- N 4, pp. 2396–2402.
4. N. Seko, A. Katakai, Sh. Hasegawa, M. Tamada, N. Kasai, H. Takeda, T. Sugo, K. Saito. Aquaculture of uranium in seawater by a fabric-adsorbent submerged system // Nucl. Technol.-2013.- N 144.- pp. 274–275.

Научный руководитель: С.В. Лавриненко, старший преподаватель каф АТЭС ЭНИН ТПУ.

## **ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПГУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ**

А.А. Уваров, А.М. Антонова  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТЭС

Парогазовая установка с противодавленческой паровой турбиной (ПГУ-П) позволяет реализовать когенерационный комбинированный цикл. Авторами в работе [1] проведен анализ влияния экономичности отдельных узлов установки на тепловую эффективность ПГУ-П. При проектировании ПГУ-П для достижения ее высокой эффективности необходимо иметь оптимальные значения термодинамических параметров, расходов рабочего тела и сетевой воды, наиболее выгодное соотношение электрической и тепловой мощностей. Целью данного исследования является установление зависимостей между перечисленными факторами при заданных параметрах и характеристиках ГТУ. При этом ввиду взаимозависимости различных факторов не все из показателей управляемы. Исследование проводилось на математической модели ПГУ-П.

### **1 Моделирование тепловой эффективности ПГУ-П**

Результаты расчетного исследования эффективности ПГУ-П

Тепловая эффективность ПГУ-П характеризуется значениями полного КПД, величиной электрической мощности паровой турбины и соотношением электрической и тепловой мощностей; чем выше это отношение, тем выше тепловая эффективность ПГУ-П. Модель основана на балансовом методе и представляет собой систему уравнений материальных и энергетических балансов парогазовой установки и отдельных ее элементов.

Особенность данного исследования заключается в том, что в качестве проектного режима принята работа ПГУ-П при температуре наружного воздуха  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (расчетная температура для проектирования отопления в условиях г. Томска). Основные показатели ГТУ рассчитываются с учетом ее энергетической характеристики; учтен подогрев воздуха до температуры  $3,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , который осуществляется путем рециркуляции воздуха на выходе из компрессора. За основу ПГУ-П принята ГТУ Siemens SGT5-4000F, имеющая в режиме работы ГТУ при температуре наружного воздуха минус  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , показатели:

- электрический КПД –  $35,37\%$ ;

- электрическая мощность – 247,6 МВт;
- температура отработавших газов – 594,8 °С;
- расход отработавших газов – 644,9 кг/с.

В соответствии с рекомендациями [2] приняты значения ряда величин:

- температурный напор на холодном конце И – 10 °С;
- недогрев до температуры насыщения в СП – 5 °С;
- температурный напор на холодном конце ГСП – 10 °С;
- давление сетевой воды – 2 МПа.

Для паровой части ПГУ значения показателей в базовом варианте приведены в таблице 1.

Табл. 1. Основные показатели паровой части ПГУ-П и КПД установки для базового варианта

№	Характеристика	Значение
	Начальное давление пара, МПа	5,0
	Начальная температура пара, °С	540
	Электрическая мощность, МВт	68,51
	Тепловая мощность, МВт	302,9
	Температура прямой сетевой воды, °С	110
	КПД котла-утилизатора	0,828
	Полный КПД ПГУ	0,885
	Сумм. капитальные вложения, млн. USD	156,3
	Чистый дисконтированный доход (ЧДД), млн. USD	547,9

Модель реализована в среде MathCad и протестирована с помощью специального программного комплекса «THERMOFLEX».

В данном исследовании суммарные капитальные вложения не могут служить критерием выбора решения, поскольку значительно изменяется электрическая мощность паровой турбины. Поэтому для выбора оптимального варианта необходимо использовать чистый дисконтированный доход или его прирост относительно базового варианта [3].

## 2. Результаты расчетного исследования эффективности ПГУ-П

Проведены расчетные исследования влияния на тепловую эффективность ПГУ-П следующих факторов: температура прямой сетевой воды; температура обратной сетевой воды; начальное давление пара; начальная температура пара.

### 2.1 Влияние температуры прямой сетевой воды

Результаты расчетов паровой части ПГУ-П, проведенных при различных значениях температуры прямой сетевой воды, представлены на рис.1. Начальные параметры пара: 5,0 МПа и 540 °С; температура прямой сети 110 °С.

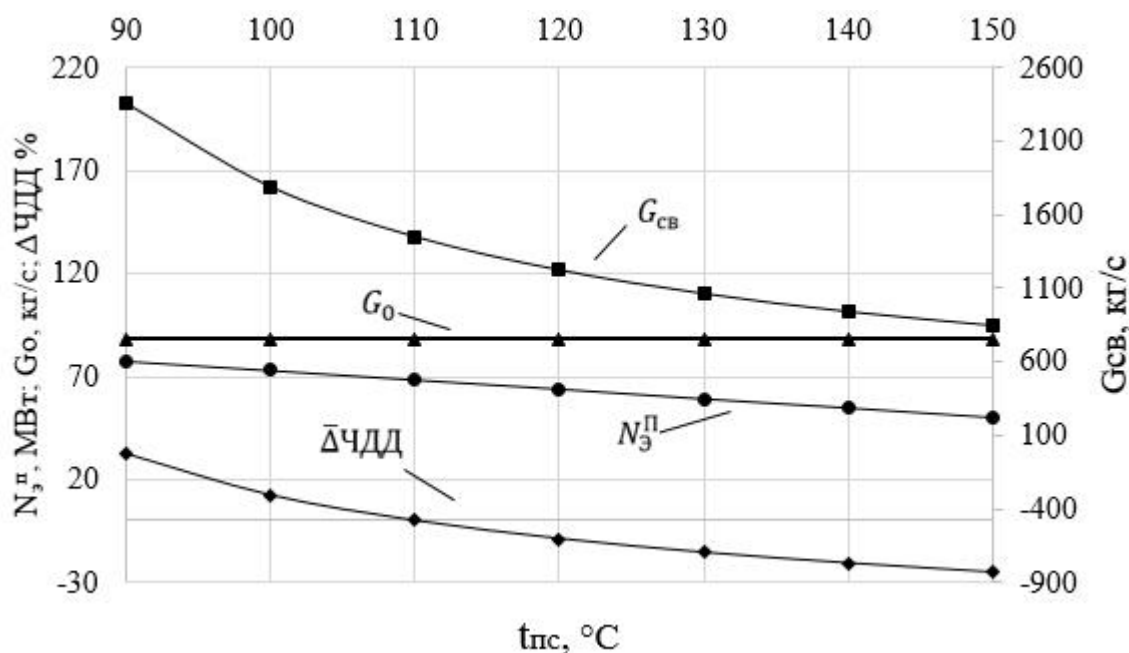


Рис.1 – График зависимости показателей ПГУ-П от температуры прямой сетевой воды

### 2.2 Влияние температуры обратной сетевой воды

Результаты расчетов, проведенных при различных значениях температуры обратной сетевой воды, представлены на рис.2. Начальные параметры пара: 5,0 МПа и 540 °С; температура прямой сети 110 °С.

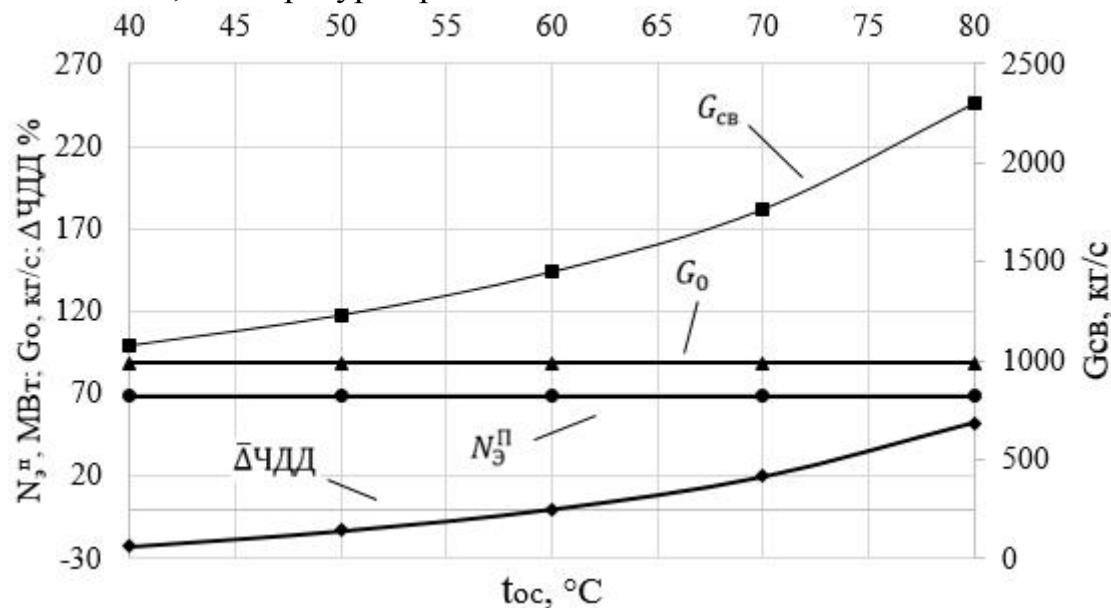


Рис.2 – График зависимости показателей ПГУ-П от температуры обратной сетевой воды

### 2.3 Влияние начальных параметров пара на эффективность ПГУ-П

Результаты расчетов при различных значениях начальных параметров пара, представлены на рис.3. Значение температуры прямой сетевой воды составило 110 °С, температура обратной сетевой воды имеет значение 60 °С.

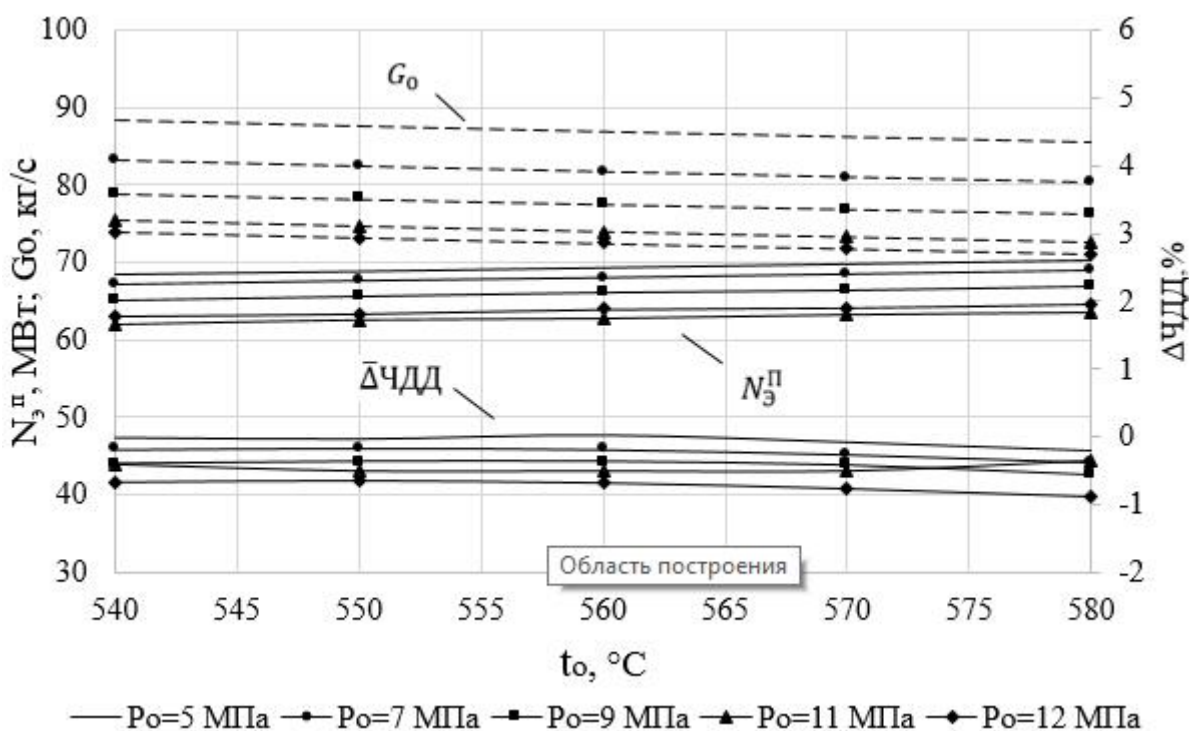


Рис.3 – График зависимости показателей ПГУ-П от начальной температуры пара при различных начальных давлениях

### Выводы

1. Значения КПД ПГУ-П и КПД котла-утилизатора не зависят от температуры прямой сетевой воды, поскольку не меняется полезная мощность КУ ввиду постоянства значений температуры газов на входе и выходе из котла-утилизатора. С уменьшением температуры прямой сети эффективность инвестиций в проект растет, что наглядно показывает изменение прироста чистого дисконтированного дохода  $\Delta\text{ЧДД}$ . По этому критерию эффективность установки тем выше, чем ниже температура прямой сетевой воды (чем ниже противодействие).
2. При повышении температуры обратной сетевой воды от 40 °C до 80 °C происходит уменьшение КПД КУ на 7%, что сокращает количество отпускаемого тепла на 8,5% и понижает КПД ПГУ на 4,3%. Также с ростом температуры происходит изменение чистого дисконтированного дохода  $\Delta\text{ЧДД}$  на 74,8%.
3. Рост начальной температуры в рассматриваемом диапазоне (на 7,4 %) в зависимости от начального давления приводит к снижению расхода свежего пара. Электрическая мощность, независимо от уровня начального давления, с ростом начальной температуры увеличивается незначительно. Прирост мощности составляет 1,6 – 1,9 МВт. При этом  $\Delta\text{ЧДД}$  относительно базового варианта во всех случаях имеет несущественное отрицательное значение, а его величина практически не меняется с ростом начальной температуры пара.
4. При повышении начального давления пара уменьшается теплота, воспринятая каждой поверхностью нагрева котла-утилизатора, кроме ГСП. Вследствие этого уменьшается расход пара на турбину и проис-

ходит снижение электрической мощности. Суммарные капитальные вложения с ростом давления практически не меняются: при увеличении давления в рассмотренном диапазоне - уменьшаются на 0,75 % – 0,73%. Прирост ЧДД не наблюдается.

5. Исходя из вышеизложенного, следует отметить, что технико-экономическая эффективность ПГУ-П в наибольшей степени определяется температурным графиком теплосети – температурами прямой и обратной сетевой воды. Изменение начальных параметров пара оказывает незначительное влияние на показатели ПГУ-П.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Антонова А.М., Уваров А.А. Анализ тепловой эффективности ПГУ с противодавлением методом малых отклонений. - Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы». - Томск, 2016.
2. Паровые и газовые установки электростанций: учебное пособие для вузов / А.Д. Трухний. - М.: Издательский дом МЭИ, 2013. - 648 с.
3. Девянин А.В. Оптимизация параметров тепловых схем трехконтурных парогазовых установок Москва. 2009 г. - 20 с. Автореферат дисс. на соискание уч.степени канд.техн.наук.

Научный руководитель: А.М. Антонова, к.т.н., доцент кафедры АТЭС ТПУ.

### **АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПГУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ МЕТОДОМ МАЛЫХ ОТКЛОНЕНИЙ**

А.М. Антонова, А.А. Уваров  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, АТЭС

Парогазовые установки (ПГУ), позволяющие значительно повысить эффективность и экологическую безопасность тепловой энергетики, в последние годы активно реализуются в мировой энергетике. Наиболее эффективны бинарные ПГУ утилизационного типа на базе современных высокотемпературных газотурбинных установок (ГТУ) [1]. Такие ПГУ значительно превосходят традиционные паротурбинные энергоблоки по термодинамической эффективности и экологическим показателям. Стремление еще более повысить эффективность ПГУ приводит к необходимости рассмотрения установок на когенерационном парогазовом цикле с применением противодавленческой паровой турбины (ПГУ-П) [2]. Они и являются объектом данного исследования.

В ПГУ-П утилизация теплоты отработавших газов ГТУ в котле-утилизаторе (КУ) происходит на двух участках теплофикационного цикла: при получении перегретого пара и при нагреве обратной сетевой воды в хвостовых