

## Моделирование и оценка эффективности рабочего цикла стационарной ГТУ

### Аннотация

В документе показано применение **Chemical Workbench** для расчёта термодинамических циклов энергетических и двигательных установок на примере моделирования газотурбинной установки (ГТУ), работающей на смеси воздуха и метана.

### Введение

Рабочие процессы газотурбинного, турбореактивного и прямоточного воздушно-реактивных двигателей внутреннего сгорания, а также газотурбинных двигателей внешнего сгорания с замкнутым контуром газообразного (однофазного) рабочего тела описываются термодинамическим циклом Брайтона, который состоит из процессов:

- 1 Изозэнтропическое сжатие. (Компрессор)
- 2 Изобарический подвод теплоты. (Область сгорания топлива)
- 3 Изозэнтропическое расширение. (Турбина)
- 4 Изобарический отвод теплоты.

Известно, что увеличение температуры газа перед турбиной позволяет значительно увеличить удельную мощность и, следовательно, уменьшить габаритные размеры и массу газотурбинной установки. Одновременное повышение температуры и степени сжатия является наиболее эффективным способом повышения удельной работы цикла и КПД. Однако увеличение степени сжатия приводит к увеличению избытка воздуха с образованием оксидов азота.

**Chemical Workbench** является удобным инструментом расчёта термодинамических характеристик сложных установок.

### Постановка задачи

**Задача:** оценить эффективность работы газотурбинной установки. Для этого нужно рассчитать температуру газа на всех стадиях процесса, а также вычислить КПД термодинамического цикла установки.

**Условия расчёта:**

отношение топлива к окислителю (альфа смеси) меняется в диапазоне от 2 до 4;  
степень сжатия компрессора варьируется от 5 до 40

### Модель турбины

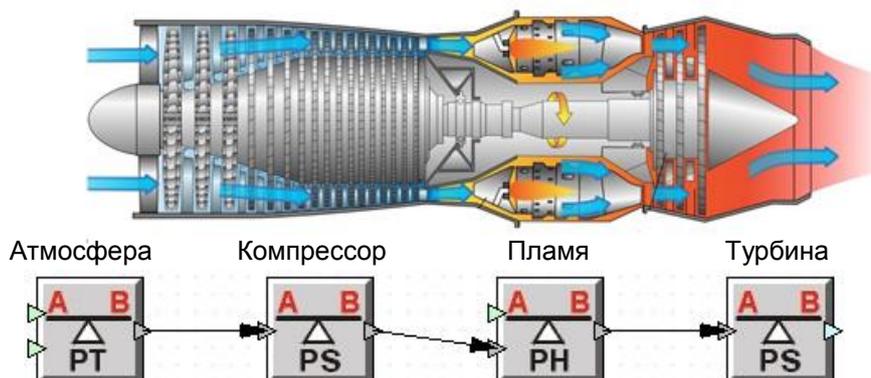
В программном пакете **Chemical Workbench** модель ГТУ строится из последовательности элементарных реакторов, описывающих процессы в различных зонах установки (стадии цикла Брайтона). Модель турбины состоит из следующих областей:

**Область внешней атмосферы**, откуда подаётся воздух – для расчёта *начальной энтальпии  $H_1$*  воздуха эта область моделируется термодинамическим реактором с постоянными давлением и температурой **PT**

**Компрессор** – адиабатически сжимает воздух – моделируется термодинамическим реактором с постоянными давлением и энтропией **PS**. В реакторе будет рассчитана *энтальпия воздуха после сжатия  $H_2$* .

**Область сгорания** – моделируется термодинамическим реактором **PH**. С помощью этого реактора рассчитывается *энтальпия газа после сгорания  $H_3$ , температура  $T_3$  и теплоёмкость  $C_3$*  газовой смеси.

**Турбина** – в ней газовая смесь адиабатически расширяется до 1 атм – моделируется термодинамическим реактором с постоянными давлением и энтропией **PS**. В реакторе будет рассчитана *энтальпия воздуха после расширения  $H_4$  и конечная температура  $T_4$* .



### Методика расчёта КПД ГТУ

Расчёт простой газотурбинной установки (ГТУ) открытого типа по циклу Брайтона выполняется по общепринятому алгоритму, в котором на первом этапе определяются параметры процесса сжатия воздуха в компрессоре, такие как температура за компрессором, энтальпии воздуха в начале и конце процесса сжатия.

Затем по значению температуры определяются значения энтальпий воздуха, продуктов сгорания и газовой смеси после турбины.

Работа расширения газа в турбине определяется по формуле:  $H_m = H_2 - H_3$

Работа, затрачиваемая на сжатие воздуха в компрессоре:  $H_k = H_1 - H_0$

Таким образом находится работа ГТУ на валу агрегата находится по формуле:  $H_e = H_m - H_k = (H_2 - H_3) - (H_1 - H_0)$

Тепло, образовавшееся в результате сгорания метана:  $Q = C_2 \cdot T_2 - C_1 \cdot T_1$

В заключение расчета определяется коэффициент полезного действия ГТУ: Расчёт КПД установки рассчитывается по следующей формуле

$$\eta = \frac{(H_3 - H_4) - (H_2 - H_1)}{C_{p2} \cdot T_2 - C_{p3} \cdot T_3} \cdot 100\%$$

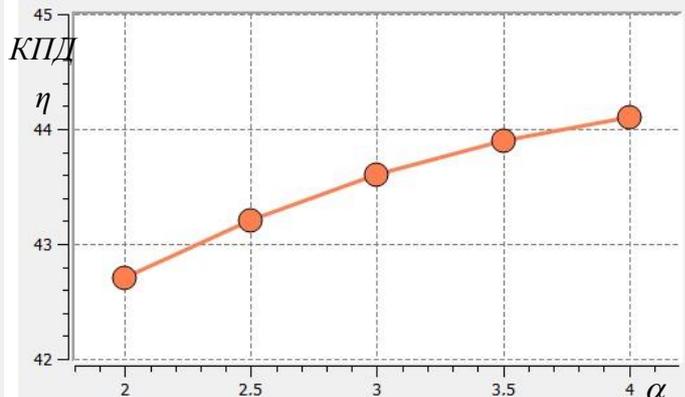
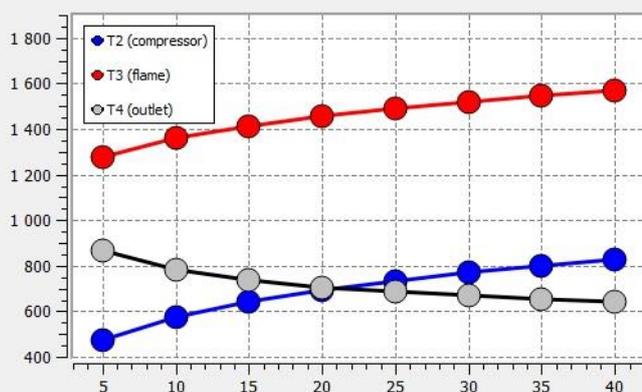
### Методика проведения расчёта в программе Chemical Workbench

Параметры установки рассчитывается следующим образом.

1. Используя библиотеку моделей, на рабочем столе строится последовательность реакторов (показано на рисунке)
2. Задаются параметры входных потоков воздуха и метана: расходы, температура, давление
3. Вводятся рабочие давления в реакторах (в зависимости от заданной степени сжатия от 5 до 40 атм)
4. В компрессоре в качестве рабочего газа задаётся смесь веществ CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, так как химических превращений не происходит. В реакторы пламени и расширения вводится список возможных продуктов сгорания (химический механизм).
5. Программа запускается на счёт

При вводе веществ программный комплекс автоматически загружает из встроенной базы данных рекомендованные значения полиномов термодинамических функций и свойства веществ с учётом неидеальности газа.

### Результаты моделирования ГТУ



На рисунке показаны температуры газа перед камерой сгорания **T2**, перед лопатками турбины **T3** и на выходе из турбины **T4**. Эти параметры могут быть использованы при подборе режимов работы, а также для вычисления параметров, необходимых для проведения гидродинамического моделирования.

В отличие от классических формул, расчёт на Chemical Workbench даёт непостоянную величину КПД – это связано с тем, что в программе автоматически учитывается неидеальность газа.

### Заключение

На примере моделирования газовой турбины продемонстрированы возможности программного пакета **Chemical Workbench** для расчёта термодинамических циклов и нахождения характеристик установок.

Преимущества использования **Chemical Workbench** при термодинамическом моделировании установок заключаются в том, что сложные многоступенчатые процессы представляются в виде последовательности простых реакторов. Вся необходимая информация передаётся между реакторами самостоятельно. Кроме того, термодинамические параметры веществ, в том числе их температурные зависимости, автоматически загружаются из встроенной базы данных.

Описанный частный подход к моделированию ГТУ может быть применён для широкого класса процессов и установок, использующих сгорание топлива для получения энергии.