

коэффициент гидравлического сопротивления в гладких отверстиях, отнесенный к самому узкому сечению струи, составляет 1—1,2, т.е. теряется только динамический напор. Скорость струи будет в 1,4—1,7 раза больше;

сужение струи в последовательно пересекающихся каналах зависит от угла и порядкового номера поворота (в справочниках одно значение, различие в сумме может достигать 25%);

приведенные результаты позволяют создавать регуляторы расхода АЭС на высокие параметры теплоносителя, обеспечивающие устойчивую надежную работу при пусковом, нормальном и аварийном режимах ЯЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ионайтис Р.Р. Нетрадиционные средства управления ЯР. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1992. 231 с.
2. Ионайтис Р.Р., Чеков М.Е. Интенсификация дросселирования проточной части регуляторов расхода среды. — Атомная энергия, 2012, т. 112, вып. 5, с. 263—269.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
4. Фомичев М.С. Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1989. 248 с.
5. Ионайтис Р.Р., Сердюк Н.М. Визуализация картин течения потока в проточной части ТПА. — Трубопроводная арматура и оборудование, 2012, № 5(62), с. 31—35.

Поступила в Редакцию 13.03.13

УДК 621.039:621.1.01

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКОЙ ЯЭУ С ГАЗОТУРБИННОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Солдатов В.А., Солдатов А.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

В связи с расширением перспективных космических задач — глобальные системы связи, защита от астероидной опасности, создание долговременной лунной базы, очистка околоземного пространства от космического мусора, пилотируемые полеты на Марс и др. в последнее время вновь возник интерес к разработке мощных энергетических установок с ядерным источником энергии. Примером может служить разрабатываемый в настоящее время транспортно-энергетический модуль на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса [1]. Одно из наиболее перспективных направлений связано с использованием газотурбинных установок (ГТУ), работающих по замкнутому циклу и обладающих высокими технико-экономическими показателями [2].

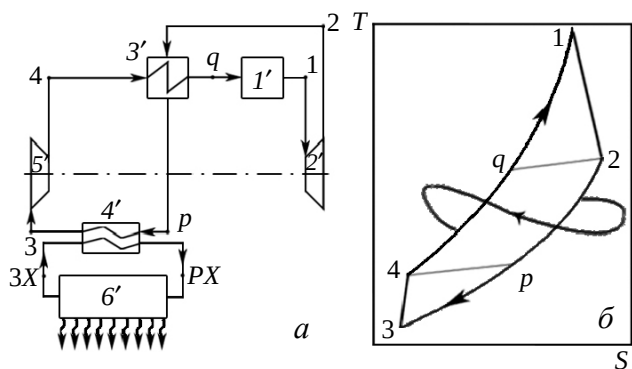
Существенным недостатком космических ГТУ является большая площадь поверхности холодильника-излучателя, что связано с необходимостью сброса непреобразованного тепла при относительно низкой температуре излучения из-за специфики термодинамического цикла. Здесь обычно возникает дилемма между получением максимального к.п.д. преобразования энергии и минимизированием габаритов холодильника-излучателя, в значительной степени определя-

ющего массогабаритные характеристики ЯЭУ и транспортно-энергетического модуля в целом.

Окончательное решение этого вопроса невозможно без детальной конструкторской проработки всех элементов установки. Тем не менее на предварительном этапе можно оценить основные показатели установки (к.п.д. и площадь поверхности холодильника-излучателя), а также оптимизировать параметры цикла, опираясь только на термодинамический анализ протекающих в системе процессов. Этому и посвящена настоящая работа.

В качестве рабочего тела ГТУ рассматривается одноатомная смесь газов, например, гелия—ксенона, обладающая свойствами идеального газа с постоянной изобарной теплоемкостью в обычно принятом диапазоне температуры и давления.

Термодинамический цикл установки. Основные расчетные соотношения. Принципиальная схема и термодинамический цикл — цикл Брайтона ГТУ с одноступенчатыми процессами сжатия и расширения показаны на рис. 1. Условно цикл Брайтона можно считать состоящим из двух изобар (точка 4—1, 2—3) и двух адиабат (точка 3—4, 1—2). Тепло к рабочему телу подводится на участке $q=1$ непосредственно в ядерном реакторе либо в тепло-



Р и с. 1. Принципиальная схема (а) и термодинамический цикл (б) ГТУ с одноступенчатыми процессами сжатия и расширения: 1' — нагреватель (реактор); 2' — турбина; 3' — регенератор; 4' — холодильник; 5' — компрессор; 6' — холодильник-излучатель

обменнике первого контура, отводится — на участке $p-3$ в конечном теплообменнике-холодильнике. На участке $4-q$ возможен регенеративный подогрев рабочего тела за счет тепла, отбираемого от отработавшего в турбине газа. Процессы 1—2 и 3—4 соответствуют расширению и сжатию рабочего тела в турбине и компрессоре.

Температура рабочего тела в характерных точках цикла Брайтона связана между собой известными соотношениями [3]

$$T_4 = T_3(\beta + 1); T_2 = T_1(1 - \gamma); T_q = T_4 + \rho(T_2 - T_4);$$

$$T_p = T_2 - \rho(T_2 - T_4), \quad (1)$$

где $\beta = (X - 1) / \eta_k$; $\gamma = \eta_T(1 - 1/Y)$ — комплекс; $X = \pi_k^{(k-1)/k}$; $Y = \pi_T^{(k-1)/k}$; $\pi_k = P_4/P_3$; $\pi_T = P_1/P_2$ — степень повышения давления в компрессоре и понижения в турбине соответственно; k — показатель изэнтропы; η_k, η_T — адиабатический (внутренний) к.п.д. компрессора и турбины соответственно; ρ — степень регенерации. Условие замыкания цикла по давлению записывается в виде $\pi_T = \pi_k \sigma$ или $Y = X \sigma_k$, где σ — коэффициент восстановления полного давления по контуру установки; $\sigma_k = \sigma^{(k-1)/k}$.

Отводимое тепло передается в конечном холодильнике теплоносителю холодильника-излучателя и, в конечном счете, сбрасывается в окружающее пространство.

Для оценки эффективности теплообмена в конечном холодильнике введем коэффициент $\rho_X = (T_{PX} - T_{3X}) / (T_P - T_{3X})$, где T_{3X}, T_{PX} — температура теплоносителя на входе и выходе из конечного холодильника. Температура теплоносителя

на входе в конечной холодильник T_{3X} определяется заданным минимальным перепадом температуры δT_X между рабочим телом ГТУ и теплоносителем холодильника-излучателя: $T_{3X} = T_3 - \delta T_X$.

На основе распределения температуры по контуру установки можно определить мощность отдельных элементов оборудования ГТУ и термодинамическую эффективность цикла. С учетом постоянства удельной изобарной теплоемкости рабочего тела c_p окончательное выражение для электрического к.п.д. установки (без учета затрат энергии на собственные нужды) будет иметь вид [4]

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_p} = \eta_r \eta_t =$$

$$= \eta_r \frac{T_1 \gamma - T_3 \beta}{T_1 [(1 - \rho) + \rho \gamma] - T_3 (1 - \rho)(\beta + 1)}, \quad (2)$$

где N_e — электрическая мощность установки; Q_p — тепловая мощность реактора; η_r — к.п.д. генератора, учитывающий электрические, механические и вентиляционные потери в электрогенераторе; η_t — термодинамический (внутренний) к.п.д. цикла.

Наряду с критерием (2) важное значение для космической ГТУ имеет площадь поверхности холодильника-излучателя, существенным образом влияющая на массогабаритные характеристики всей установки. Пренебрегая термическим сопротивлением стенки и перепадом температуры в теплоносителе в процессе теплоотдачи ($\lambda \rightarrow \infty, \alpha \rightarrow \infty$), запишем уравнение для суммарной удельной площади поверхности холодильника-излучателя по отношению к полезной электрической мощности космической ЯЭУ в следующем виде [3, 4]:

$$\bar{F}_{X\Sigma} = \frac{F_{X\Sigma}}{N_e} = \left(\frac{1}{\eta_e} - 1 \right) \frac{\Phi(T_{PX}, T_{3X}, T_S)}{4\epsilon \eta_p \sigma T_S^3 (T_{PX} - T_{3X})}, \quad (3)$$

$$\text{где } \Phi(T_{PX}, T_{3X}, T_S) = \ln \left(\frac{T_{3X} + T_S}{T_{3X} - T_S} \frac{T_{PX} - T_S}{T_{PX} + T_S} \right) +$$

$$+ 2 \left(\arctg \frac{T_{3X}}{T_S} - \arctg \frac{T_{PX}}{T_S} \right); \epsilon — \text{степень черноты}$$

поверхности холодильника-излучателя; η_p — эффективность оребрения, учитывающая в том числе эффекты самооблучения поверхности холо-

дильника-излучателя; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана—Больцмана; T_S — равновесная температура поверхности панелей холодильника-излучателя при внешнем, главным образом, солнечном облучении [3].

При записи уравнения (3) полагали, что тепло от генератора во вспомогательном холодильнике-излучателе отводится при той же температуре, что и от основного.

Дальнейшая задача формально заключается в поиске таких параметров цикла, которые обеспечили бы максимально возможный к.п.д. установки или минимальную удельную площадь поверхности холодильника-излучателя:

$$\eta_e \rightarrow \max (\eta_t \rightarrow \max); \bar{F}_{\lambda\lambda} \rightarrow \min.$$

При фиксированных верхней температуре цикла T_1 , показателе изэнтропы k , а также параметрах η_k , η_T , ρ , σ , характеризующих совершенство протекания процессов в отдельных элементах контура ГТУ, термодинамический к.п.д. установки является функцией всего двух переменных: нижней температуры цикла T_3 и степени повышения давления в компрессоре π_k (или X). То же самое относится и к удельной площади поверхности холодильника-излучателя, если считать параметры ϵ , η_p , ρ_k , δT_X , а также температуру T_S известными.

Поведение исследуемых функций внутри области оптимизации. Выясним прежде всего ограничения, которые должны быть наложены на оптимизируемые параметры исходя из физических соображений. Самостоятельная работа установки возможна лишь в случае положительного баланса мощности турбины и компрессора: $N_T \geq N_k$. Учитывая, что $N_T = Gc_p(T_1 - T_2)$, $N_k = Gc_p(T_4 - T_3)$, где G — массовый расход рабочего тела ГТУ, получим с учетом выражения (1) уравнение для определения нижней и верхней границы степени повышения давления:

$$X^2 - (\xi + 1)X + \frac{\xi}{\sigma_k} = 0; \quad \xi = \eta_T \eta_k \frac{T_1}{T_3}. \quad (4)$$

При фиксированной нижней температуре цикла T_3 допустимые значения X лежат в интервале $[X_{\min}, X_{\max}]$, где $X_{\min}$, $X_{\max}$ — меньший и больший корень уравнения (4).

Для регенеративной установки имеется еще одно ограничение $T_2 \geq T_4$, которое приводит к уравнению

$$X^2 - \left(\frac{\xi}{\eta_T} - \xi + 1 - \eta_k \right) X - \frac{\xi}{\sigma_k} = 0. \quad (5)$$

Большой корень уравнения (5) характеризует предельно допустимую степень повышения давления X_R , выше которой регенерация становится невозможной.

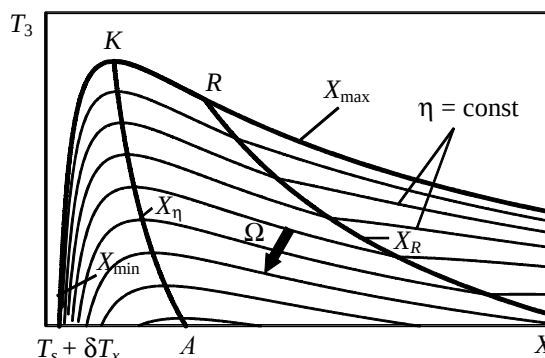
Полученные уравнения наряду с неравенством $T_3 \geq T_S + \delta T_X$ определяют границы области оптимизации Ω (рис. 2). Левая граница Ω соответствует минимальной степени повышения давления $X_{\min}$, правая — максимальной степени повышения давления $X_{\max}$. Область оптимизации регенеративного цикла ограничена справа наименьшей из величин $X_{\max}$ и X_R .

При некоторой критической нижней температуре цикла $T_3 = T_{3k}$ минимальная и максимальная степени повышения давления совпадают: $X_{\min} = X_{\max}$ (точка K на рис. 2). Температуру T_{3k} можно найти, приравняв нулю дискриминант уравнения (4):

$$\xi^2 - 2 \left(\frac{2}{\sigma_k} - 1 \right) \xi + 1 = 0.$$

Если $T_3 > T_{3k}$, то уравнение (4) не имеет действительных корней и, следовательно, не существует такой степени повышения давления, при которой мощность турбины была бы достаточна для привода компрессора.

Исследуем поведение термодинамического к.п.д. η_t внутри области оптимизации Ω . Проинтегрировав функцию (2) по X и приравняв производную $\partial \eta_t / \partial X$ нулю, получим уравнение



Р и с. 2. Область оптимизации Ω и характерное расположение линий условных максимумов термодинамического к.п.д. для регенеративной ГТУ

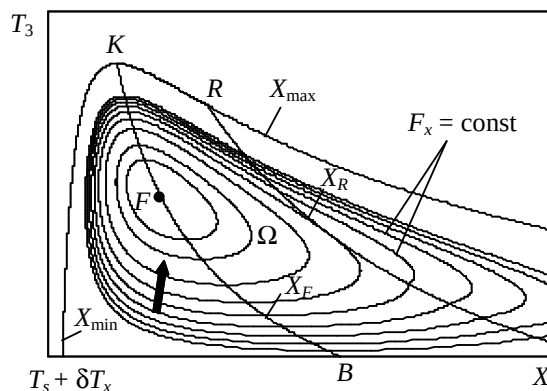
$$\sigma_k \left[(1-2\rho) + (1-\rho) \left(\frac{\eta_k}{\xi} - \frac{1}{\eta_r} \right) \right] X^2 - 2(1-2\rho)X + (1-\rho) \left(\frac{\xi}{\eta_r} - \eta_k \right) + (1-2\rho) = 0. \quad (6)$$

Решения уравнения (6), принадлежащие области оптимизации Ω , являются геометрическим местом точек (линией) условных максимумов термодинамического к.п.д. цикла вдоль изотерм $T_3 = \text{const}$ (линия X_η на рис. 2). Характерное расположение линии условных максимумов X_η для регенеративной ГТУ с достаточно высокой степенью регенерации ($\rho > 1/2$) показано на рис. 2. Для полноты картины там же нанесена сетка линий постоянного к.п.д.: $\eta_t = \text{const}$ (стрелкой отмечено направление возрастания функции η_t на изолиниях $\eta_t = \text{const}$). Понятно, что линия X_η пересекает линии постоянного к.п.д. в их точках максимума.

Нетрудно видеть также, что к.п.д. термодинамического цикла η_t всегда возрастает с понижением температуры T_3 (при фиксированной степени сжатия X), поэтому абсолютный максимум к.п.д. цикла Брайтона будет расположен на нижней границе Ω в точке А (см. рис. 2). Таким образом, в целях повышения к.п.д. нижнюю температуру цикла целесообразно уменьшать до минимально возможного уровня $T_3 = T_s + \delta T_x$, определяемого равновесной температурой солнечного облучения T_s и минимальным температурным напором δT_x в концевом холодильнике.

Иная картина наблюдается в отношении удельной площади поверхности холодильника-излучателя. Как показывает численный анализ выражения (3), при фиксированной нижней температуре цикла ($T_3 = \text{const}$) также существует оптимальная степень повышения давления, при которой удельная площадь поверхности холодильника-излучателя достигает минимального значения (характерный вид линии условного минимума X_F функции $\bar{F}_{X\Sigma}$ вдоль изотерм $T_3 = \text{const}$ показан на рис. 3).

В то же время в отличие от предыдущего случая поведение функции $\bar{F}_{X\Sigma}$ вдоль линии X_F не носит монотонный характер и в некоторой точке (точка F на рис. 3), расположенной внутри Ω , $\bar{F}_{X\Sigma}$ достигает минимального значения. Эта точка и является точкой абсолютного минимума



Р и с. 3. Область оптимизации Ω и характерное расположение линии условных минимумов удельной площади поверхности холодильника-излучателя для регенеративной ГТУ

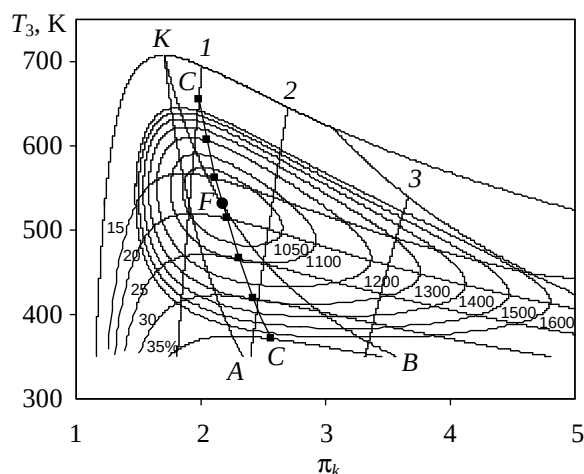
$\bar{F}_{X\Sigma}$ внутри области оптимизации. Изолинии $\bar{F}_{X\Sigma} = \text{const}$ здесь имеют вид замкнутых кривых, стягивающихся к точке F . Понятно, что линия X_F пересекает изолинии $\bar{F}_{X\Sigma} = \text{const}$ в точках горизонтального касания. Предельная изолиния $\bar{F}_{X\Sigma} \rightarrow \infty$ совпадет с границей области оптимизации ($X_{\min}, X_{\max}, T_s + \delta T_x$).

Таким образом, имеется противоречие в выборе оптимальных параметров цикла с точки зрения $\eta_e \rightarrow \max$ и $\bar{F}_{X\Sigma} \rightarrow \min$, поскольку в первом случае оптимальные параметры T_3, π_k должны находиться в точке А (см. рис. 2), во втором — в точке F .

В качестве примера рассмотрим вариант установки со следующими характеристиками:

Температура газа на входе в турбину, К . . .	1500
Адиабатический к.п.д. компрессора . . .	0,8
Адиабатический к.п.д. турбины . . .	0,87
Степень регенерации . . .	0,92
Коэффициент восстановления полного давления по контуру . . .	0,91
К.п.д. генератора . . .	0,9
Показатель изэнтропы рабочего тела . . .	1,67
Степень черноты поверхности холодильника-излучателя . . .	0,8
Коэффициент эффективности оребрения холодильника-излучателя . . .	0,7
Эффективность концевой холодильника . . .	0,8
Равновесная температура солнечного облучения, К . . .	250
Минимальный перепад температуры в концевом холодильнике, К . . .	10

Область оптимизации для такой установки показана на рис. 4. Электрический к.п.д. указан в %, удельная площадь поверхности холодильника-излучателя на линиях постоянного уров-

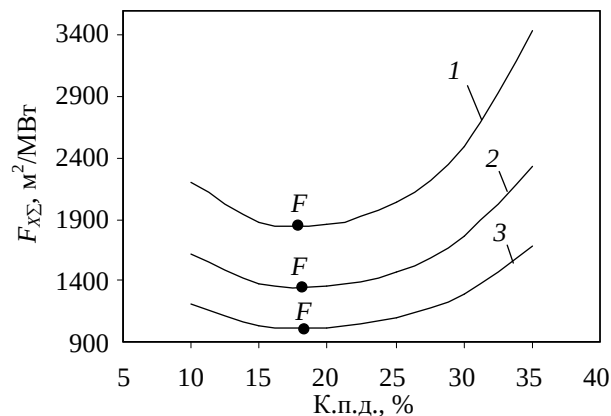


Р и с. 4. Структура области оптимизации и основные показатели ГТУ с одноступенчатыми процессами сжатия и расширения: 1—3 — $T_q = 1200, 1100, 1000$ К соответственно

ня — $\text{м}^2/\text{МВт}$. Кривые 1—3 соответствуют постоянной температуре газа на входе в реактор T_q , имеющей важное значение для определения теплогидравлических характеристик активной зоны реактора (для одноконтурной схемы), в частности, температуры оболочки твэлов. При увеличении температуры T_q возрастает расход рабочего тела через активную зону реактора, что приводит к повышению относительных потерь давления в реакторе и контуре установки в целом. Температура оболочки твэлов при этом немного снижается.

Наряду с определенными ранее условными экстремумами X_η и X_F на рис. 4 нанесена еще одна линия $C—C$, полученная из условия $(\partial \bar{F}_{x\Sigma} / \partial X)_\eta = 0$. Фактически это означает, что в каждой точке этой линии удельная площадь поверхности холодильника-излучателя достигает минимального значения при фиксированном к.п.д. установки или к.п.д. установки достигает максимального значения при заданной удельной площади поверхности холодильника-излучателя. Графически линия $C—C$ определяется как геометрическое место точек касания изолиний $\bar{F}_{x\Sigma} = \text{const}$ и $\eta_e = \text{const}$.

Выбор параметров цикла на линии $C—C$, точнее, на ее нижнем участке $F—C$ в большей степени соответствует смысловому содержанию оптимизационной задачи — нахождение компромисса между максимальным к.п.д. установки и минимальной площадью поверхности холодильника-излучателя. Именно на этой линии или, по крайней мере, вблизи нее должны выби-



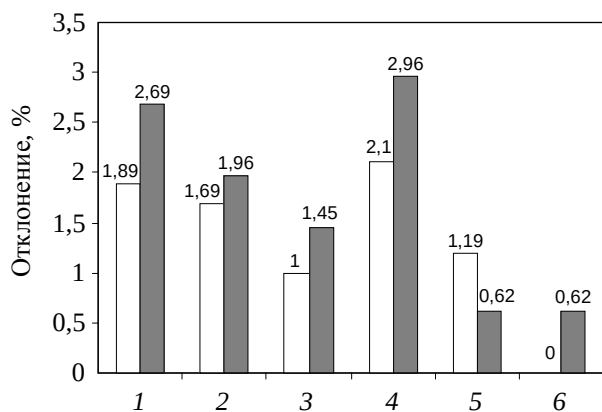
Р и с. 5. Зависимость удельной площади поверхности холодильника-излучателя от к.п.д. ГТУ

раться оптимальные параметры цикла при анализе возможных вариантов установки.

Результаты количественной оценки возможной удельной площади поверхности холодильника-излучателя в зависимости от электрического к.п.д. установки для различной температуры газа на входе в турбину T_1 показаны на рис. 5. Точка F соответствует абсолютному минимуму функции $\bar{F}_{x\Sigma}$ (см. рис. 4).

Как видно, в диапазоне температуры газа перед турбиной $T_1 = 1300—1500$ К минимальная площадь поверхности холодильника-излучателя достигается при к.п.д. установки 18—20%. При этом степень повышения давления в компрессоре $\pi_k \sim 2,2$, нижняя температура цикла находится в диапазоне $T_3 = 440—520$ К в зависимости от температуры T_1 . Столь низкий к.п.д. является неоправданно высокой платой за стремление получить минимальные габариты холодильника-излучателя, поэтому проектное значение должно выбираться на основе комплексного анализа массогабаритных показателей космической ЯЭУ с учетом возможностей вывода на орбиту Земли с помощью имеющихся и перспективных ракет-носителей. Ориентиром может служить к.п.д. 30—35%, что примерно соответствует к.п.д. современных газотурбинных энергоустановок большой мощности [5].

Влияние степени необратимости процессов на показатели космической ЯЭУ. Количественные оценки к.п.д. и удельной площади поверхности холодильника-излучателя существенным образом зависят от термодинамической эффективности протекающих в отдельных элементах контура процессов, характеризующейся коэффициентами $\eta_k, \eta_T, \rho, \sigma, \eta_r, \rho_X$, поэтому



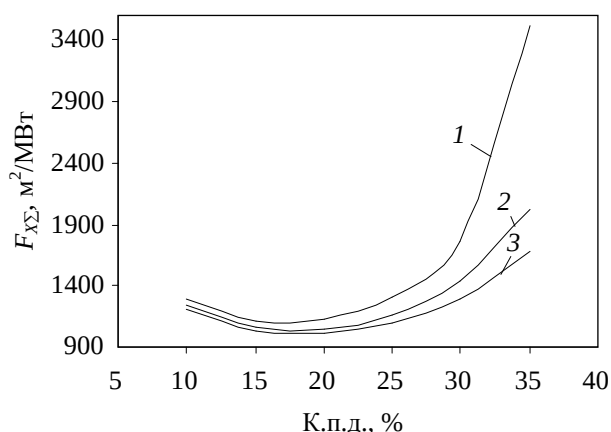
Р и с. 6. Относительное отклонение к.п.д. (□) и удельной площади поверхности холодильника-излучателя (■) от базовых значений при относительном изменении отдельных параметров на 1%: 1 — η_T ; 2 — η_k ; 3 — η_r ; 4 — σ ; 5 — ρ ; 6 — ρ_x

представляется целесообразным исследовать влияние этих параметров на основные показатели.

Результаты такого анализа в графическом виде показаны на рис. 6. Температура газа на входе в компрессор и степень повышения давления приняты постоянными: $T_3 = 418,5$ К, $\pi_k = 2,43$.

Как видно на рис. 6, наибольшее влияние на к.п.д. установки и площадь поверхности холодильника-излучателя оказывают коэффициент восстановления полного давления σ (гидравлические потери по контуру установки) и адиабатический к.п.д. турбины η_T , наименьшее — степень регенерации ρ и эффективность концевого холодильника ρ_x . Так, при снижении коэффициента восстановления полного давления до 0,87 к.п.д. установки снижается с 30 до 27,2%, удельная площадь поверхности холодильника-излучателя возрастает с 1291 до 1479 м²/МВт. Отсюда, в частности, следует необходимость тщательного подхода к выбору давления рабочего тела в контуре установки, поскольку относительные потери давления пропорциональны $\sim 1/P^2$, а также к проектированию проточного тракта ГТУ, в частности, активной зоны реактора, рекуператора и магистральных трубопроводов, вносящих наибольший вклад в суммарные гидравлические потери.

Помимо рассмотренных параметров, на площадь поверхности холодильника-излучателя существенное влияние оказывают также физические свойства поверхности излучения (ϵ), конструктивные особенности (η_p) и температура



Р и с. 7. Влияние температуры солнечного облучения 350 (1), 300 (2), 250 К (3) на удельную площадь поверхности холодильника-излучателя

солнечного облучения T_s , характеризующая ориентацию панелей холодильника-излучателя относительно потока солнечной радиации. Поскольку удельная площадь поверхности $\bar{F}_{x\Sigma}$ обратно пропорциональна произведению $\epsilon\eta_p$, то при относительном изменении ϵ или η_p на 1% $\bar{F}_{x\Sigma}$ также будет изменяться на 1%.

Влияние температуры солнечного облучения на площадь холодильника-излучателя может быть значительным, особенно при высоком к.п.д. установки вследствие более низкой температуры газа перед компрессором (рис. 7). Поэтому панели холодильника-излучателя необходимо ориентировать таким образом, чтобы угол между плоскостью панелей и направлением на Солнце был как можно меньше.

Заключение. На основе термодинамического анализа характеристик космической ЯЭУ с газотурбинной системой преобразования энергии можно сделать следующие выводы:

при ориентировании в перспективе на предельно высокую температуру газа на входе в турбину ~ 1500 К, в принципе, можно создать космическую ЯЭУ с высокими техническими показателями: к.п.д. $\sim 30\%$, удельная площадь поверхности холодильника-излучателя ~ 1300 м²/МВт;

снижение температуры газа перед турбиной до 1300 К приводит примерно к двукратному увеличению площади поверхности холодильника-излучателя при том же к.п.д. $\sim 30\%$, что может оказаться неприемлемым с точки зрения возможности его размещения в головной части ракетополетов типа «Русь-М» или «Ангара-5» (для установки электрической мощностью

~1000 кВт) и потребует перехода к принципиально новым системам сброса тепла, например, на основе капельного холодильника-излучателя;

оптимальная степень повышения давления в компрессоре ГТУ слабо зависит от температуры газа перед турбиной (верхней температуры цикла) и находится в диапазоне $\pi_k = 2,4—2,6$;

оптимальная температура газа на входе в компрессор (нижняя температура цикла) лежит в диапазоне 370—420 К для ГТУ с температурой газа перед турбиной $T_1 = 1500$ К и в диапазоне 320—360 К для ГТУ с температурой газа перед турбиной $T_1 = 1300$ К в зависимости от выбранного к.п.д. установки;

наибольшее влияние на к.п.д. установки и площадь поверхности холодильника-излучателя оказывают относительные потери давления в контуре установки, что накладывает жесткие ограничения на допустимое давление рабочего

тела и требует особого внимания при проектировании проточного тракта ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев И.Б.** Ядерный космос России. — Новости космонавтики, 2010, № 2, с. 44—47.
2. **Каревский А.В., Попов С.А., Семенов В.Ф.** Облик и характеристики газотурбинных преобразователей энергии для космических энергоустановок. — В сб.: Ядерная энергетика в космосе-2005. Москва—Подольск, 2005, с. 414—418.
3. **Фаворский О.Н., Фишгойт В.В., Янтовский Е.И.** Основы теории космических электрореактивных двигательных установок. М.: Высшая школа, 1978.
4. **Солдатов В.А., Солдатов А.В.** Оптимизация параметров космической ядерной энергетической установки с газотурбинной системой преобразования энергии: Препринт ИАЭ-6741/3, 2013.
5. **Манушин Э.А.** Газовые турбины: проблемы и перспективы. М.: Энергоатомиздат, 1986.

Поступила в Редакцию 10.06.13

УДК 621.039.53

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ГЛАВНОГО РАЗЪЕМА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ВВЭР-1000

*Алексеев П.В., Киселев А-др С., Киселев А-ей С., Крутько Е.С., Лоскутов О.Д., Тутнов А.А.
(НИИ «Курчатовский ин-т», г. Москва)*

Прочностная надежность корпуса реактора является одним из основных критериев безопасности АЭС с ВВЭР. В настоящее время разработаны методики и проведены расчетные исследования в обоснование надежности сварных соединений обечаек между собой, с днищем и фланцем [1—4]. Помимо сварных соединений, герметичность обеспечивается также фланцевым соединением корпуса реактора с крышкой (главный разъем). Следует отметить, что ввиду идентичности конструкции и параметров главного разъема результаты вероятностного анализа прочности корпуса ВВЭР-1000 применимы к реакторным установкам проекта АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ.

Особенность расчета надежности фланцевых соединений трубопроводов и сосудов давления заключается в том, что их прочность в отличие от сварных соединений обеспечивается множеством крепежных элементов. Поэтому фланцевое соединение следует рассматривать как систему взаимодействующих несущих элементов (шпилек), каждый из которых может

находиться в одном из двух состояний — целом или разрушенном. При разрушении части шпилек происходит перераспределение нагрузок на целые шпильки, плотность соединения ухудшается и возможно как возникновение течи, размер которой зависит от числа и взаиморасположения разрушенных шпилек, так и полный разрыв соединения. В настоящей работе на примере главного разъема ВВЭР-ТОИ рассмотрен метод и приведены результаты расчета вероятности образования течи в районе фланцевого соединения и отрыва крышки корпуса реактора в результате разрушения шпилек.

Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд, который состоит из днища, трех обечаек и фланца, соединенных между собой сваркой. Крышка реактора представляет собой штампованно-сварную конструкцию, состоящую из усеченного эллипсоида и фланца, которые также соединены между собой сварным швом (рис. 1). Все перечисленные элементы изготовлены из стали марки 15Х2НМФА или 15Х2НМФА-А. К корпусу