

**VI Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
103-1  
17-23 ноября 2023 года**

---

УДК 621.181

Е.В. БОГДАН, аспирант (БНТУ)  
Научный руководитель Н.Б. КАРНИЦКИЙ, д.т.н., профессор (БНТУ)  
г. Минск

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ РАСХОДОВ ТОПЛИВА НА  
ВЫРАБОТКУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПГУ ПРИ РАБОТЕ В РЕЖИМАХ  
С СИСТЕМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАГРУЗКИ**

Процесс эксплуатации оборудования в условиях, характеризуемых систематическими изменениями нагрузки и остановами в резерв в ночное время с последующим пуском, представляет не только потенциальную угрозу долговечности элементов блока, но и связан со значительными потерями тепла и энергии. Целесообразность привлечения конкретных единиц оборудования к регулированию нагрузок должна оцениваться с экономической точки зрения, для чего предложено пользоваться таким показателем, как удельный расход условного топлива (УРТ) на выработку электроэнергии при выбранном режиме эксплуатации. Такой подход позволяет избежать значительных колебаний, характерных сегодня для стоимостных показателей (в особенности для топлива).

Проведем расчет УРТ на конкретном примере блока ПГУ, представляющего собой парогазовую установку одновальной конструкции номинальной электрической мощностью 400 МВт в составе 1 ГТУ, 1 котел-утилизатор, 1 ПТУ и 1 генератор. Зададимся режимом работы энергосистемы, при котором необходимо набрать в часы пикового потребления нагрузки 400 МВт мощности. Длительность выдачи в сеть требуемой нагрузки - два часа с последующим отключением блока в резерв и ежесуточного пуска из неостывшего состояния.

Для каждого этапа пуска блока ПГУ указаны основные операции по переключениям в технологической схеме, а также указана нормативная длительность его прохождения при пусках из соответствующих начальных тепловых состояний: холодного, неостывшего и горячего. В рассматриваемом случае для пуска из неостывшего состояния имеем минимальную длительность основных этапов:

# VI Международная молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

103-2

17-23 ноября 2023 года

Таблица 1

Длительность этапов пуска

	От розжига горелок до выхода на частоту 3000 об/мин	Синхронизация, включение в сеть и набор 50 МВт – выход на горячую отмывку	Горячая отмывка	Набор нагрузки до 200 МВт с подключением паровой турбины	Набор нагрузки до 400 МВт
Время	15 мин	10 мин	1,5 ч	1 час	15 мин

Таким образом, при нахождении в сети только 2 часа, ПГУ не успеет набрать номинальную нагрузку. Из неостывшего состояния минимальное расчетное время набора нагрузки 400 МВт составляет 3 часа. Соответственно работа ПГУ-400 с номинальной нагрузкой в течение двух часов в сутки будет сопровождаться дополнительной выработкой электроэнергии.

Для расчета расхода условного топлива за пуск пользуемся фактическими трендами расхода газа штатной АСК. Полученные диапазоны расходов газа для каждого этапа пуска приведены в таблице 2.

Таблица 2

Фактические данные по расходу газа

	От розжига горелок до выхода на частоту 3000 об/мин	Синхронизация, включение в сеть и набор 50 МВт – выход на горячую отмывку	Горячая отмывка	Набор нагрузки до 200 МВт с подключением паровой турбины	Набор нагрузки до 400 МВт
Расход газа, м <sup>3</sup> /ч	4000-22000	22000-28000	28000	28000-43000	43000-76000

Формула для расчета расхода условного топлива имеет вид:

$$B_{\text{пуск}} = \sum_{i=1}^5 G_i \tau_i \frac{Q_{\text{газ}}^p}{Q_{\text{н.у.м.}}^p} 10^{-3} (1)$$

где  $B_{\text{пуск}}$  – расход условного топлива за пуск, т у.т.;

$G_i$  – средний расход газа за этап пуска, м<sup>3</sup>/ч;

$\tau_i$  – длительность этапа пуска, ч;

$Q_{\text{газ}}^p$  – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, принято 8100 ккал/кг;

$Q_{\text{н.у.м.}}^p$  – низшая рабочая теплота сгорания условного топлива, 7000 ккал/кг.

# VI Международная молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

103-3

17-23 ноября 2023 года

Подставляя значения в формулу (1) получаем величину расхода топлива за пуск 117,102 т у.т. Результаты расчета времени на пуск и расхода условного топлива на проведение пусковых операций сведены в таблицу 3.

Таблица 3  
Результаты расчетов пуска

Параметры	От розжига горелок до выхода на частоту 3000 об/мин	Синхронизация, включение в сеть и набор 50 МВт	Горячая отмывка	Набор нагрузки до 200 МВт	Набор нагрузки до 400 МВт с подключенiem паровой турбины	Итого
Время	15 мин	10 мин	1,5 ч	1 час	15 мин	3ч 10мин
Нагрузка, МВт	0	0-50	50	50-200	200-400	-
Выработка, МВт·ч	0	5	75	130	75	<b>285</b>
Потребление на собственные нужды, МВт·ч	2,2	1,5	13,5	9	2,5	<b>28,7</b>
Отпуск электроэнергии, МВт·ч	-	3,5	61,5	121	72,5	<b>256,3</b>
Расход газа, м <sup>3</sup> /ч	4000-22000	22000-28000	28000	28000-43000	43000-76000	-
Расход газа за этап пуска, м <sup>3</sup>	4500	4500	42000	36000	14200	101200
Расход условного топлива за этап пуска, т у.т.	5,207	5,207	48,600	41,657	16,431	<b>117,1</b>

В общем случае удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию (г у.т./кВт·ч) определяется по формуле:

$$b_s = \frac{B_s}{\varTheta_{om}} 10^3 = \frac{B_s}{\varTheta - \varTheta_{ch}} 10^3 (2)$$

# VI Международная молодежная научно-практическая конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»

103-4

17-23 ноября 2023 года

где  $b_e$  – удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию, г.у.т./кВт·ч;

$B_e$  – общий фактический расход условного топлива, т.у.т.;

$\mathcal{E}_{om}$  – отпуск электроэнергии, МВт·ч.

Для выбранного режима работы общий фактический расход условного топлива за сутки будет складываться из расхода топлива, затраченного на резерв и пусковые операции до розжига горелок  $B_{rez}$ , расхода топлива непосредственно на пуск  $B_{пуск}$  и расхода топлива на работу с нагрузкой 400 МВт в течение двух часов. С учетом затрат электроэнергии на пусковые операции до розжига горелок, остановов и содержание в резерве и затрат пара на пуск, средняя часовая потребляемая мощность на собственные нужды на содержание в резерве составит порядка 6 МВт. Расход пара от пиковой резервной котельной на охлаждение ЦНД 75 т (30 т/ч за 2,5 ч), что эквивалентно  $B_{rez} \approx 5$  т.у.т. Результаты расчета удельного расхода топлива на выработку электроэнергии при работе ПГУ 5 ч в сутки сведены в таблицу 4.

Таблица 4  
Работа ПГУ 5 ч/сутки

Параметры	Резерв и пусковые операции до розжига горелок	От розжига горелок до 400 МВт	Работа с нагрузкой 400 МВт	Сутки
Время	18 ч 50 мин	3 ч 10 мин	2 ч	24 ч
Выработка, МВт·ч	0	285	800	1085
Потребление на СН, МВт·ч	115	28,7	18	161,7
Отпуск электроэнергии, МВт·ч	0	256,3	782	923,3
Расход условного топлива, т.у.т.	5	117,1	173,6	295,7
Удельный расход условного топлива, г.у.т./кВт·ч	828,8		222,0	320,3

Таким образом, при варианте останова блока ПГУ на ночь с последующим пуском и работой на номинальной нагрузке в часы пиков потребления электроэнергии будет происходить потеря экономичности. Расчеты удельного расхода топлива на выработку электроэнергии показали, что для выбранного режима эксплуатации удельный расход топлива на выработку электроэнергии для энергоблока ПГУ-400 МВт

**VI Международная молодежная научно-практическая  
конференция «ЭНЕРГОСТАРТ»  
103-5  
17-23 ноября 2023 года**

---

---

составит 320,3 г у.т./кВт·ч. Однако в рамках энергосистемы останов ПГУ позволит не снижать нагрузку более экономичных теплофикационных блоков и сбалансировать суточный график нагрузок согласно требованиям энергосистемы. Дополнительно требуется проведение испытаний для определения влияния переменного режима нагрузки на продолжительность эффективной эксплуатации энергоблока в таком режиме, а также требуемых затрат на поддержание оборудования, используемого в таком режиме в работоспособном состоянии.

**Список литературы:**

1. Газопаровой комбинированный циркулирующий блок M701F. Инструкция по эксплуатации централизованного управления.
2. Инструкция по эксплуатации газовой турбины типа SGT5-4000F компании Siemens. Китайская машиностроительная инженерная корпорация «СМЕС».

**Информация об авторах:**

Богдан Елена Валерьевна, аспирант, БНТУ, 220013, г.Минск, пр-т Независимости, 65, [elenabohdan95@gmail.com](mailto:elenabohdan95@gmail.com)

Карницкий Николай Борисович, д.т.н., профессор, БНТУ, 220013, пр-т Независимости, 65, [tes\\_bntu@tut.by](mailto:tes_bntu@tut.by)