

Анализ применения впрыска водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки на базе двигателя НК-37

Кудинов А. А., доктор техн. наук, Горланов С. П., аспирант

ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ)

Предложено применять впрыск водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки ГТУ-25 на базе авиационного двигателя НК-37. Описаны его преимущества и ограничения, приведены графические зависимости основных показателей эффективности работы газотурбинной установки от расхода впрыскиваемого водяного пара в камеру сгорания.

Ключевые слова: газотурбинная установка, впрыск, водяной пар, камера сгорания, КПД, эффективность работы.

Во всем мире прогресс в теплоэнергетике связывают с решением задач повышения надежности, эффективности, экологичности, снижения материал- и капиталоемкости и улучшения эксплуатационных свойств энергетических установок. В последнее время одним из признанных направлений реализации этих задач является широкое внедрение в энергетику комбинированных парогазовых установок (ПГУ) [1, 2].

Современные ПГУ характеризуются низким уровнем вредных выбросов в атмосферу. Выработка значительной доли мощности газотурбинной установкой (ГТУ) обеспечивает меньшие потребности ПГУ в охлаждающей воде и сокращение теплового загрязнения окружающей среды по сравнению с паротурбинными установками (ПТУ) равной мощности. Комбинация циклов Брайтона и Ренкина позволяет повысить тепловую экономичность комбинированной установки. С этой целью параметры рабочего тела ГТУ постоянно повышаются. Одновременно используются другие возможности увеличения экономичности и удельной мощности установок (промежуточное охлаждение воздуха в компрессоре, повторный подогрев рабочего тела ГТУ перед силовой турбиной, впрыск водяного пара и воды в газовый тракт установки и др.).

Сегодня ГТУ с впрыском пара получают все более широкое распространение во многих странах. Хорошие результаты могут быть достигнуты при использовании ГТУ с впрыском пара в составе комбинированных установок, что позволяет увеличить удельную мощность и КПД установки, уменьшить количество вредных выбросов, а также повысить общий коэффициент использования теплоты топлива. Уже сейчас КПД ГТУ с впрыском пара достигает 50 – 52 %, а коэффициент использования теплоты топлива —

90 % [1, 3]. В данной статье представлены результаты термодинамического расчета ГТУ-25 на базе авиационного двигателя НК-37 с учетом конкретных характеристик всех его узлов.

Ведущие фирмы — производители энергетических ГТУ используют впрыск воды или водяного пара в установки преимущественно для поддержания концентрации оксидов азота в выходных газах в пределах нормы. Такой впрыск оказывает влияние и на энергетические показатели установки [4]. При выполнении вариантных расчетов за основу была принята ГТУ-25, установленная на Безьянской ТЭЦ. Ниже приведены исходные данные для теплового расчета ГТУ:

Параметры окружающей среды:

температура воздуха t_n (средняя за отопительный период в Самаре), °С	–4,5
давление воздуха p_n , кгс/см ²	1,0332
Частота вращения ротора низкого давления $n_{н.д.}$, мин ⁻¹	5103
Низшая теплота сгорания топлива (природного газа) при 20 °С	
Q_n^p , МДж/кг	50,03
Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания топлива L_0 , кг/кг	16,711

Для определения параметров ГТУ при ее работе как с применением впрыска пара в камеру сгорания, так и без него выполнен расчет с использованием численного эксперимента. Методика, на основе которой проводили исследования, представлена в [5]. В ходе работы она была переработана и преобразована для ГТУ исследуемого типа, разработана компьютерная программа для упрощения процесса расчета. Основные результаты расчета приведены в таблице (КНД, КСД, КВД и ТНД, ТСД, ТВД — компрессоры и турбины низкого, среднего, высокого давлений; СТ — свободная силовая турбина).

Показатель	Значение показателя при расходе впрыскиваемого пара $G_{п}$, % (от расхода воздуха, поступающего в КС)				
Действительный расход воздуха через КНД $G_{в\text{НД}}$, кг/с	113,108				
Мощность компрессоров, МВт:					
$N_{\text{КНД}}$	9,105				
$N_{\text{КСД}}$	15,262				
$N_{\text{КВД}}$	29,914				
Суммарная степень сжатия компрессоров $\pi_{\text{КС}}$	25,89				
Расход топлива в КС $G_{\text{Т}}$, кг/с	1,868				
Расход впрыскиваемого пара $G_{\text{п}}$, кг/с	–	0,885	1,769	2,655	3,539
Коэффициент избытка воздуха α в КС	2,834				
Расход газов $G_{\text{Г}}$ на выходе из КС, кг/с	90,357	91,242	92,126	93,012	93,896
Количество теплоты $Q_{\text{КС}}$, подводимой в КС, МВт	90,134	92,441	94,748	97,055	99,362
Мощность турбин, МВт:					
$N_{\text{ТВД}}$	30,217				
$N_{\text{ТСД}}$	15,262				
$N_{\text{ТНД}}$	9,105				
КПД ТВД $\eta_{\text{ТВД}}$	0,85				
КПД ТСД $\eta_{\text{ТСД}}$	0,892	0,896	0,898	0,897	0,898
КПД ТНД $\eta_{\text{ТНД}}$	0,91	0,908	0,908	0,912	0,911
Эффективная мощность СТ N_e , МВт	30,95	31,04	33,99	34,64	36,07
Эффективный КПД ГТУ η_e	0,343	0,336	0,359	0,357	0,363
Расход газов в КУ $G_{\text{КУ}}$, кг/с	112,14	113,03	113,91	114,80	115,68
Количество теплоты $Q_{\text{КУ}}$, переданной в КУ, МВт	42,93	45,35	45,12	46,96	48,11
Электрическая мощность ГТУ N_g , МВт	30,181	30,268	33,149	33,779	35,168
Коэффициент полезной работы ϕ	0,363	0,363	0,385	0,389	0,399
Удельный расход топлива d , кг/(кВт · ч)	0,2228	0,2222	0,2029	0,1991	0,1912

Впрыск водяного пара в камеру сгорания (КС) ГТУ может осуществляться следующим способом: первоначально пар пропускают через специальный фильтр, затем он направляется в зону активного горения через топливные форсунки. Топливо (природный газ) поступает по внутреннему каналу форсунки, а пар — по ее наружному кольцевому каналу. При впрыскивании пар смешивается с потоком воздуха после компрессора. Пар также может смешиваться с воздухом, охлаж-

дающим корпус КС. При впрыске в огневую зону водяной пар прогревается до температуры газов. На подогрев пара затрачивается часть теплоты вследствие более высокой удельной теплоемкости пара, чем у продуктов сгорания. В результате температура в зоне реакции снижается, чем обеспечивается меньшая эмиссия оксидов азота NO_x . Для каждой ГТУ и разных конструкций КС существуют свои предельные объемы впрыска пара, которые не следует превышать, чтобы

не разрушить систему сжигания топлива и не повредить газовую турбину (ГТ).

Вводимый в КС пар позволяет получить дополнительное количество высокоэнтальпийного рабочего тела. Благодаря снижению теоретической температуры горения и улучшению кинетики процесса обеспечивается существенное подавление процесса образования оксидов азота. Выполненные в Институте высоких температур РАН расчеты показали, что при отношении расходов пара и природного газа, равном примерно 2, образование NO_x во фронте пламени уменьшается более чем на порядок. Это происходит при совместной подаче пара и топлива через соответствующие форсунки. Вместе с тем чрезмерное уменьшение температуры газов в стехиометрических зонах горения приводит к образованию продуктов неполного сгорания топлива в виде оксида углерода и др. Впрыск пара может существенно повысить мощность установки вследствие увеличения массового расхода рабочего тела, хотя при этом возможно снижение экономичности ГТУ [1, 6].

На рисунке показано влияние впрыска пара на характеристики ГТУ-25. Расход впрыскиваемого пара $G_{\text{п}}$ обычно не превышает 5 % общего объема воздуха, сжимаемого компрессором. На рисунке, *а – ж* приведены зависимости соответственно КПД турбин среднего $\eta_{\text{ТСД}}$ и низкого $\eta_{\text{ТНД}}$ давлений, свободной силовой турбины $\eta_{\text{СТ}}$, эффективного η_e ГТУ, а также коэффициента ϕ полезной работы, электрической мощности N_e и удельного расхода топлива d от количества впрыскиваемого пара. Расход подаваемого в КС водяного пара представлен в процентном отношении от расхода поступающего в КС воздуха.

Анализируя графики на рисунке, следует отметить следующее:

с увеличением расхода впрыскиваемого в КС ГТУ водяного пара возрастает КПД ТСД;

КПД ТНД в малой степени зависит от $G_{\text{п}}$;

КПД СТ уменьшается при увеличении расхода пара;

эффективный КПД ГТУ значительно возрастает, но наблюдается некоторое его уменьшение при относительном расходе водяного пара $G_{\text{п}} = 1$ %;

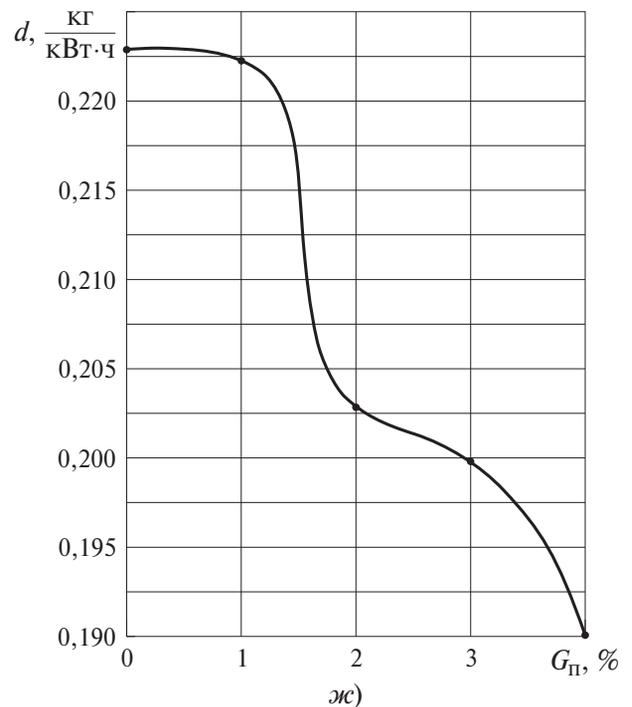
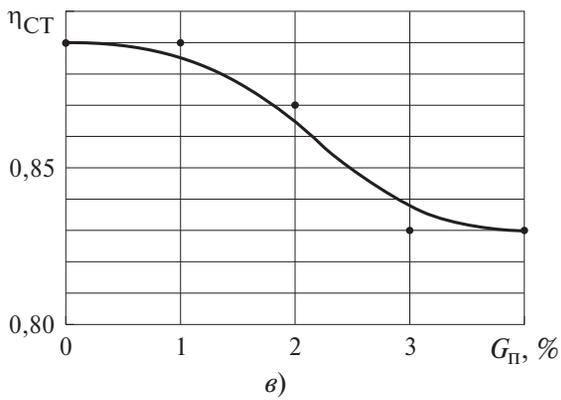
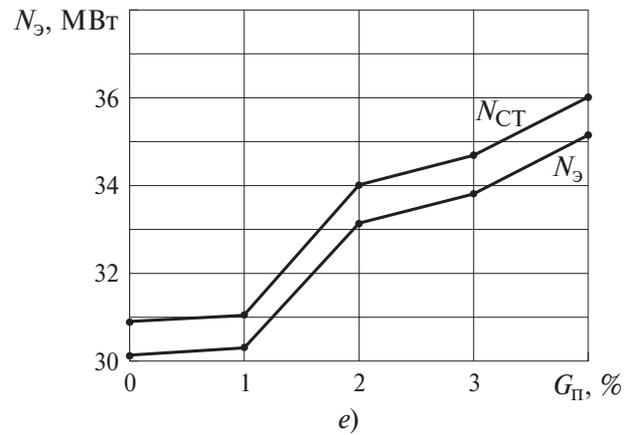
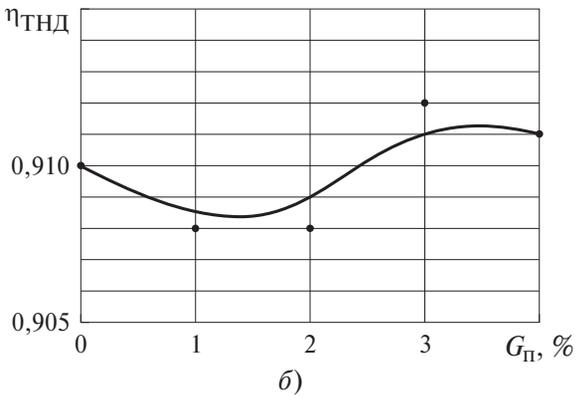
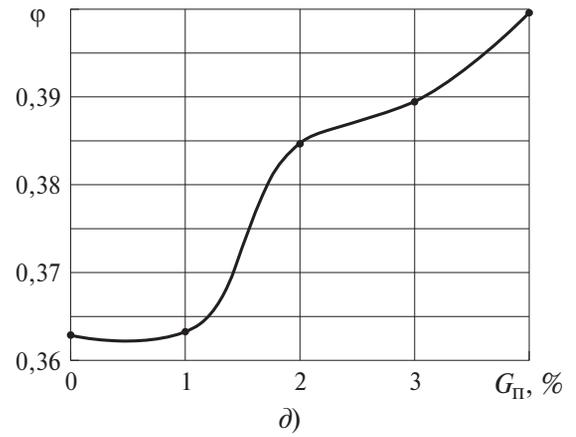
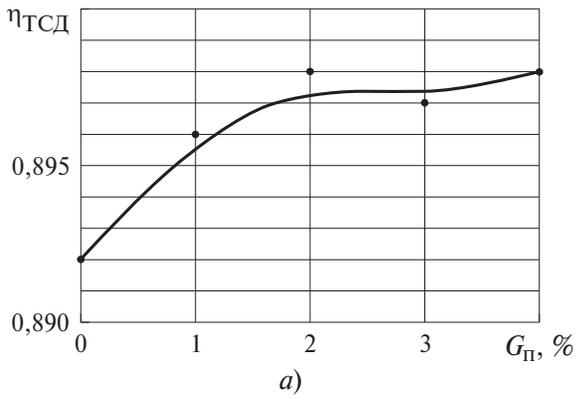
коэффициент полезной работы установки при $G_{\text{п}} > 1$ % резко повышается;

применение впрыска пара в КС обуславливает уменьшение удельных расходов топлива на выработку электроэнергии.

Газотурбинные установки, в которые впрыскивается вода или водяной пар, должны быть рассчитаны на некоторое увеличение эффективного сечения проточной части ГТ. Кроме того, превышение допустимого уровня впрыска может уменьшить запас устойчивости компрессора по помпажу. Одно из отличий энергетических ГТУ с впрыском воды или водяного пара в КС от обычных ГТУ состоит в существенном изменении соотношения расходов рабочих тел, проходящих через компрессор и ГТ, что приводит к необходимости соответствующего увеличения площади проходных сечений проточной части ГТ. Альтернативное решение — увеличение скорости рабочего тела в проточной части ГТУ и уменьшение КПД [6].

При эксплуатации ГТУ на жидком топливе целесообразно использовать впрыскиваемый водяной пар в качестве распыляющего агента, что позволяет улучшить качество распыления топлива, снизить содержание оксидов азота в отработавших газах, а также уменьшить дымление. Однако наряду со снижением эмиссии NO_x ввод в зону горения воды или водяного пара приводит к ряду негативных явлений, заметно влияющих на другие характеристики КС. Это касается интенсивности и полноты выгорания топлива, что связано в основном со снижением температуры в факеле. Возрастает концентрация продуктов недожога углеводородов (прежде всего СО) в уходящих газах. Подача в КС воды или водяного пара влияет и на устойчивость процесса горения. Вероятность вибрационного горения при этом увеличивается, а диапазон режимов устойчивой работы КС существенно снижается.

Вероятность вибрационного горения при впрыске водяного пара или воды особенно сильна при работе КС на природном газе. Колебания динамического давления (пульсации) происходят во всех КС с диффузионным пламенем и генерируются процессом горения. Эти колебания могут взаимодействовать с акустическими колебаниями в КС и усиливаться, что ускоряет износ конструкции или преждевременное ее разрушение. Впрыск воды обычно вызывает более сильные колебания динамического давления, чем впрыск пара. При поступлении в КС пар лучше перемешивается с воздухом, чем вода, и вследствие этого слабее гасит пламя в циркулирующем потоке. Поэтому при впрыске в КС воды или водяного пара ограничивают как массовый расход воды (пара), так и пределы



колебаний динамического давления. Если рассматривать в целом реализацию впрыска воды или пара в ГТУ, следует учесть и значительное повышение трудозатрат на строительство и эксплуатацию системы. Это объяс-

няется тем, что кроме усложнения конструкции собственно ГТУ возникает потребность в дорогостоящих очистных сооружениях, так как впрыскиваемая вода должна быть очищена от примесей.

Выводы

1. Ведущие фирмы – производители энергетических ГТУ используют впрыск воды или водяного пара в установки преимущественно для поддержания концентрации оксидов азота в выходных газах в пределах нормы. Одновременно впрыск воды или водяного пара оказывает влияние и на энергетические показатели установки: приводит к росту мощности ГТУ, что позволяет снизить удельный расход топлива на выработку электроэнергии.

2. Термодинамический расчет ГТУ на базе авиационного двигателя НК-37 показал, что при применении впрыска водяного пара в камеру сгорания эффективность работы установки повышается. При впрыске водяного пара в количестве 4 % от объема воздуха, подаваемого в камеру сгорания, электрическая мощность ГТУ возрастает с 30,2 до 35,2 МВт (на 5 МВт), а эффективный КПД — с 0,343 до 0,363 (на 2 %). При этом удельный рас-

ход газового топлива снижается с 222,8 до 191,2 г/(кВт·ч), т. е. на 31,6 г/(кВт·ч).

Список литературы

1. **Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. — М.: Изд-во МЭИ, 2002.
2. **Кудинов А. А.** Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование. — М.: ИНФРА-М, 2012.
3. **Морозенко М. И.** Исследование эффективности ГТУ с впрыском пара и водогрейным котлом: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 2002.
4. **Хоменок Л. А.** Создание горелочных устройств камер дожигания котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭЦ. — Теплоэнергетика, 2007, № 9.
5. **Термогазодинамический** расчет газотурбинных силовых установок / В. М. Дорофеев, В. Г. Маслов, Н. В. Первышин и др. — М.: Машиностроение, 1973.
6. **Абуд Нуреддин Атьяла Эль-фазаа.** Совершенствование энергетических газотурбинных установок, используемых в Ливии, для повышения выработки электрической энергии: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. СПб., 2009.

tes@samgtu.ru