

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГТУ В СОСТАВЕ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЯМИ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГТУ И ЕЕ ТЕХНИЧЕСКИМ СОСТОЯНИЕМ

УДК
622.691.4.052

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF A GAS-TURBINE PLANT FUNCTIONING
AS A PART OF A GAS-COMPRESSOR PLANT ON THE BASIS
OF THE STATISTICAL ANALYSIS OF INTERRELATIONS BETWEEN CHANGES
OF PARAMETERS OF GAS-TURBINE PLANT FUNCTIONING
AND ITS TECHNICAL CONDITION

Применение этого метода позволит определять эффективный КПД ГТУ в тех случаях, когда расчет его величины как отношения мощности на валу нагнетателя к подводимой теплоте в камере сгорания невозможен либо из-за того, что неизвестен расход топливного газа, либо из-за того, что неизвестна эффективная мощность.

Точное и оперативное определение показателей энергоэффективности работы газоперекачивающих агрегатов даст возможность организовывать эффективный режим работы компрессорной станции, и тем самым снизить затраты топлива при магистральном транспорте газа.

This method will allow to define effective efficiency of the gas-turbine plant when size calculation as a proportion of power on the supercharger shaft to the brought warmth in the combustor is impossible because of either the expense of fuel oil is unknown, or effective power is unknown.

Exact and operative definition of indicators of efficiency of a gas-turbine plant functioning will help to organize an effective operating mode of a compressor station, and will allow to reduce expenses of fuel during the main transport of gas.

А.Г. Ванчин

РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

A.G. Vanchin

**Russian state university of oil and gas
of name of I. M.Gubkin**

Ключевые слова: диагностика, транспорт природного газа, газотурбинная установка, техническое состояние, газоперекачивающий агрегат, эффективность работы, экспресс метод диагностики, статистическая модель.

Keywords: Diagnostics, transport of natural gas, gas-turbine plant, technical condition, gas-compressor plant, efficiency of functioning, proximate method of diagnostics, statistical model.

Общее описание метода

Математическая модель газотурбинного двигателя должна создаваться с учетом геометрических характеристик конкретного двигателя. В свою очередь, геометрические характеристики конкретного двигателя адекватно отражаются на индивидуальных стендовых термодинамических характеристиках конкретного двигателя. Поэтому одним из приемов, лежащих в основе разрабатываемого нами метода, является определение величин вспомогательных констант путем подстановки данных индивидуальных стендовых заводских характеристик конкретного двигателя в используемые формулы, чем достигается индивидуальная привязка метода к конкретному двигателю.

Разрабатываемый метод основывается на определении эффективного КПД двигателя и эффективной мощности на основе параметров работы двигателя с учетом их отклонений от результатов индивиду-

альных заводских стендовых испытаний ГТУ. Изложение метода приведено, в общем случае, для любого типа газотурбинного ГПА и более детально для ГПА-Ц-16, с привлечением показаний штатной САУ ГПА. При разработке метода определяется зависимость КПД ГТУ от изменений параметров работы ГПА при данной мощности, полученная путем статистического изучения индивидуальных стендовых характеристик ГТУ.

Результаты индивидуальных заводских стендовых испытаний, как правило, представляют собой графики зависимостей показаний штатной системы измерений ГПА (частот вращения валов компрессора низкого давления (КНД), компрессора высокого давления (КВД) и силовой турбины (СТ), расхода топливного газа, давления воздуха за осевым компрессором (ОК), температур цикловых газов до и после СТ и др.) от эффективной мощности, причем параметры представлены приведенными к стандартным внешним условиям.

Данный метод разрабатывается с применением при расчетах всех параметров в приведенном к стандартным внешним условиям виде. Далее по тексту параграфа, когда говорится о параметрах, слово «приведенный» не ставится, но подразумевается.

Суть метода заключается в следующем.

На основе формулы эффективного КПД двигателя как отношения мощности на валу нагнетателя к подводимой теплоте в камере сгорания

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_{нр} \cdot B} \quad (1)$$

выводится зависимость η_e от параметров (П), известных из показаний штатной системы измерений ГПА ($П_1, П_2, П_3, П_4 \dots$). В состав измеряемых параметров штатной системы измерений, как правило, входят частоты вращения валов КНД, КВД и СТ, давление воздуха за ОК, температура цикловых газов до СТ, давление и температура воздуха на входе компрессора и др. Данная зависимость может быть неточна в силу неизбежных допущений, сделанных при ее выводе:

$$\eta_e \approx f(P_1, P_2, P_3, P_4 \dots) \quad (2)$$

Далее правая часть соотношения (2) будет называться критерием и обозначаться буквой f .

Между f и η_e имеется качественное сходство: чем меньше f , тем меньше η_e при любых вариантах изменений технического состояния любого элемента ГТУ в силу вывода формулы f из формулы η_e .

Количественная зависимость f от η_e определяется путем обработки результатов индивидуальных заводских стендовых испытаний определенного количества двигателей данной марки, достаточного для получения достоверной модели.

Иначе говоря, в критерии f сгруппированы параметры работы ГПА таким образом, что сам этот критерий имеет адекватную корреляцию с величиной η_e в силу вывода формулы критерия из формулы эффективного КПД, а роль коэффициентов корреляции между каждым параметром и η_e выполняют коэффициенты в формуле критерия и сама структура этой формулы. Функциональная взаимосвязь между параметрами работы ГПА и η_e определяется в таком случае как зависимость критерия f от η_e в рабочем диапазоне эффективной мощности ГТУ с применением регрессионного анализа.

Данное статистическое исследование с применением регрессионного анализа необходимо для того, чтобы иметь возможность экстраполировать применение разрабатываемой модели в сторону больших отклонений технического состояния двигателей, чем исходные отклонения между результатами индивидуальных заводских стендовых испытаний.

Порядок формирования модели следующий.

Рассчитываются по формулам (1) и (2) по данным из стендовых испытаний величины η_e и f для дискретного ряда величин эффективной мощности N_e во всем диапазоне ее изменения для всех изучаемых заводских характеристик двигателей. В результате получаем массив точек в трехмерном пространстве с координатами (f, η_e, N_e). Результаты обобщаются в виде трехмерной полиномиальной регрессии. Данную процедуру позволяет осуществлять про-

грамма «Mathcad». Результаты вычислений в случае выбора полинома второй степени будут иметь вид:

$$\eta_e = a_0 + a_1 \cdot N_e + a_2 \cdot f + a_3 \cdot N_e \cdot f + a_4 \cdot f^2 + a_5 \cdot N_e^2 \quad (3)$$

Полученная таким образом формула (3) является моделью данного типа двигателей. Применить ее на практике можно таким образом:

1. Снять показания параметров ($П_1, П_2, П_3, П_4 \dots$) штатной системы измерений двигателя.
2. Рассчитать величину критерия f для данных значений параметров по формуле (2).
3. Рассчитать величину эффективной мощности по параметрам процесса сжатия в нагнетателе и расходу газа через него по стандартной методике.
4. Определить величину η_e по формуле (3), подставив в нее полученные значения N_e и f . (Коэффициенты $a_0 \dots a_5$ для данной марки двигателя должны быть заранее определены изложенным нами способом статистического исследования заводских характеристик).

Рассматриваемый метод применим и в случае отсутствия в стационарных условиях измерений по нагнетателю, достаточных для определения N_e , но есть возможность измерить расход топливного газа – B по каждому двигателю, и известна низшая теплота сгорания – $Q_{н.р.}$ топливного газа. При этом используется та же модель данного типа двигателей [см. формулу (3)], но ее применение происходит следующим образом. Подставив формулу (3) в (1), получим:

$$a_0 + a_1 \cdot N_e + a_2 \cdot f + a_3 \cdot N_e \cdot f + a_4 \cdot f^2 + a_5 \cdot N_e^2 = \frac{N_e}{Q_{нр} \cdot B} \quad (4)$$

Из формулы (4) по рассчитанному f и известной величине находим N_e . Структура критерия f и коэффициенты $a_0 \dots a_5$ будут те же, что и в предыдущем случае. Далее по формуле (1) находим искомый η_e .

Применение метода к приводному двигателю газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16

На рисунке 1 представлена схема ГПА-Ц-16 с доступными для измерения величинами.

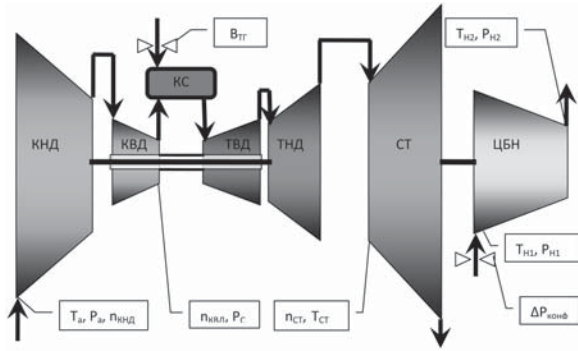


Рисунок 1. Схема ГПА-Ц-16 с доступными для измерения величинами.

Список параметров, показываемых штатной системой измерений на этом типе ГПА, и используемых в рамках разработки и проверки описываемого метода диагностики следующий:

- T_a — температура воздуха на входе в компрессор;
- P_a — давление воздуха на входе в компрессор;
- $n_{кнд}$ — частота вращения вала компрессора низкого давления;
- $n_{квд}$ — частота вращения вала компрессора высокого давления;
- P_c — давление воздуха на выходе компрессора;
- $n_{ст}$ — частота вращения вала силовой турбины;
- $T_{ст}$ — температура газов перед силовой турбиной;
- $T_{н1}$ — температура газа перед центробежным нагнетателем;
- $P_{н1}$ — давление газа перед центробежным нагнетателем;
- $T_{н2}$ — температура газа после центробежного нагнетателя;
- $P_{н2}$ — давление газа после центробежного нагнетателя;
- $\Delta P_{рк}$ — перепад давления газа на конфузоре центробежного нагнетателя;
- $V_{тр}$ — расход топливного газа.

Для газотурбинного двигателя НК-16СТ, входящего в состав газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16, в процессе исследования была выведена формула критерия:

$$a_0 + a_1 \cdot Ne + a_2 \cdot f + a_3 \cdot Ne \cdot f + a_4 \cdot f^2 + a_5 \cdot Ne^2 = \frac{Ne}{Q_{нр} \cdot B}, \quad (4)$$

где $\eta_{нк}$ – политропический КПД компрессора; T_a – температура на входе ОК; k – показатель адиабатического процесса сжатия в ОК; π_k – степень сжатия в ОК. P_c – давление после ОК; $\bar{n}_{к1}$ – относительная частота вращения КНД; $\bar{n}_{к2}$ – относительная частота вращения КВД; $T_{ст}$ – температура газов перед СТ; a и b – константы определяющие соотношение мощностей

КНД и КВД; X и Y – индивидуальные константы двигателя.

Значения X и Y для данного конкретного двигателя вычисляются путем подстановки в формулу (4) величин параметров из результатов стендовых испытаний этого двигателя на двух режимах (номинальном и минимальном) и решения получившейся системы из двух уравнений.

На рисунке 2 приведены типичные графики зависимостей критерия f , рассчитанного по формуле (4), и η_e от эффективной мощности ГТУ, полученные при проведении экспериментальной проверки путем подстановки значений параметров, взятых из заводской стендовой характеристики конкретного двигателя.

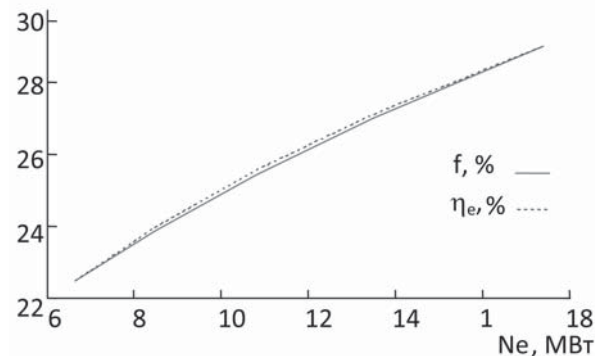


Рисунок 2. Графики критерия f и эффективного КПД ГТУ в зависимости от эффективной мощности ГТУ по заводской

Графики на рисунке 2 наглядно демонстрируют, что аналитический вид формулы критерия f выведен корректно, и может служить основой для статистического исследования. Графики подтверждают возможность принятия постоянства величин X и Y во всем диапазоне изменения мощности, а также других допущений, сделанных при выводе формулы критерия. Максимальная разница величин – 0,113, что соответствует относительной погрешности 0,0038.

Формирование и дальнейшее применение статистической модели производилось так, как было описано ранее для случая с неизвестным расходом топливного газа, но с известной эффективной мощностью. При этом используется выведенная формула критерия (4).

Формула (5) получена в результате исследования характеристик двигателей ГПА-Ц-16. Размерность величин: f – %, η_e – %, Ne – МВт.

$$f = \frac{Ne}{X \cdot P_c \cdot \sqrt{\frac{1}{T_{ст}}} \cdot \left[Y \cdot \left(a \cdot \bar{n}_{к1}^2 + b \cdot \bar{n}_{к2}^2 \right) - \pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \eta_{нк} \cdot T_a + T_{ст} \right]} \quad (5)$$

Следует отметить, что свободный член полученного полинома не равен нулю, несмотря на то, что, с точки зрения физики, при нулевой мощности КПД должен равняться тоже нулю. Этот факт объясняется тем, что исследование характеристик производилось только в рабочем диапазоне мощности от 6 до 18 мВт, и на значительном удалении от этого диапазона при нулевой мощности метод дает погрешность в определении КПД 1,22 % по абсолютной величине.

На рисунке 3 дан график этого полинома. Из графика видно, что при данной мощности увеличение f соответствует приблизительно такому же увеличению η_e , что соответствует нашим исходным понятиям об их соотношении, и тем самым подтверждает адекватность результатов статистического исследования предмету исследования.

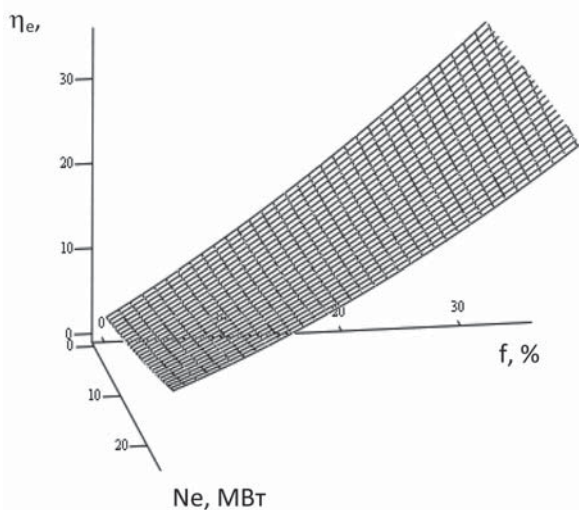


Рисунок 3. График полинома, полученного в результате исследования характеристик двигателей ГПА-Ц-16.

Были произведены экспериментальные проверки разработанного метода с целью выяснения точности полученной статистической модели путем подстановки величин параметров из заводской характеристики ГТУ, которая не использовалась в массиве данных при получении статистической модели. Проверка статистической модели производилась в характерном диапазоне изменения мощности ГПА-Ц-16 на основе данных из заводских характеристик ГТУ. В ходе проверки вычислялись значения эффективного КПД ГТУ во всем рабочем диапазоне эффективной мощности на основе расчета по величинам эффективной мощности и расхода топливного газа из заводской характеристики ГТУ, а после этого вычислялись значения эффективного КПД ГТУ во всем рабочем диапазоне эффективной мощности ГТУ на основе расчета по величинам параметров из заводской характеристики ГТУ с применением полученной статистической модели.

Проверка производилась с применением пятнадцати разных характеристик ГТУ.

На рисунке 4 представлены результаты проверки по одной из характеристик. Результаты проверки по остальным характеристикам идентичны данной.

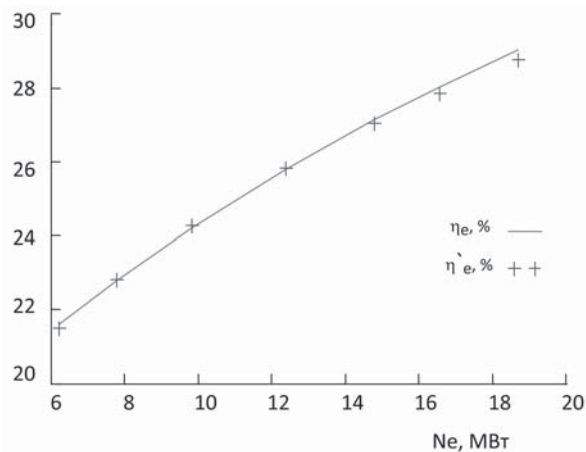


Рисунок 4. Результаты проверки полученной статистической модели.

Графики на рисунке 4 демонстрируют высокую точность полученной статистической модели. Максимальная разница величин 0,144, что соответствует относительной погрешности 0,0059. Это дополнительно подтверждает то, что аналитический вид формулы критерия, положенного в основу данной статистической модели, выведен корректно, а также свидетельствует о достаточности количества заводских стендовых характеристик двигателей НК-16СТ, которые были использованы при статистическом исследовании.

При проведении исследований было разработано программное обеспечение, позволившее создать исследовательскую базу данных, в которой использовались результаты заводских стендовых испытаний двигателей НК-16СТ, установленных на ряде КС ООО «Газпромтрансгаз Москва».

Для практического выполнения расчетов были разработаны три программы для Mathcad.

Первая программа предназначена для индивидуальной первичной обработки заводских стендовых испытаний двигателей НК-16СТ. В этой программе графики зависимостей параметров работы ГТУ от мощности описывались с помощью степенной регрессии. Далее для известного дискретного ряда величин мощности был вычислен эффективный КПД ГТУ по известным величинам расхода топливного газа, а также вычислена величина критерия, аналитический вид которого был обоснован в теоретической части данного исследования. Графически представленные зависимости эффективного КПД ГТУ и критерия от мощности позволили оценить степень корреляции между КПД и критерием (рисунок 2).

Во второй программе используются результаты индивидуальной первичной обработки заводских стендовых испытаний двигателей НК-16СТ, проведенной с помощью первой программы. В этой программе методом трехмерной полиномиальной регрессии определяются коэффициенты полинома второй степени, с помощью которого можно вычислять КПД по значениям мощности и критерия. Результаты расчетов коэффициентов полинома представлены в формуле (5) и в графическом виде на рисунке 3.

Третья программа предназначена для использования полученной статистической модели в целях оценки ГПА.

Проведена экспериментальная проверка разработанного метода и сравнение с уже существующими методами по результатам расчетов. Также проведен сравнительный анализ разработанного метода и уже существующих на предмет погрешности, которая связана с классом точности используемых измерительных средств при одних и тех же исходных режимных данных.

Для оценки погрешности, которая связана с классом точности используемых измерительных средств, были проведены варианты расчетов. При этом были рассчитаны максимальные и минимальные величины параметров работы ГТУ, которые варьировались в пределах, определяемых классами точности соответствующих измерительных средств. Далее, путем подстановки сначала максимальной, а затем минимальной величины по отдельности каждого из параметров в формулу, выяснялось, в какую сторону – увеличения или уменьшения – влияет он на изменение рассчитываемого параметра. В качестве рассчитываемых параметров в данном случае выступали эффективный КПД ГТУ и эффективная мощность ГТУ. После этого в формулу критерия подставлялись величины параметров, выбранные таким образом, чтобы получить минимальную величину рассчитываемого параметра. Затем в формулу критерия подставлялись величины параметров, выбранные таким образом, чтобы получить максимальную величину рассчитываемого параметра. По полученным таким образом максимальным и минимальным величинам рассчитываемого параметра далее была определена относительная погрешность метода, связанная с классом точности используемых измерительных средств.

В п.1 таблицы 1 даны результаты расчетов по параметрам работы ЦБН методом определения разности энтальпий, потенциальных функций и расхода технологического газа через ЦБН по перепаду давления на конфузоре. При этом использовались разработки кафедры термодинамики и тепловых двигателей Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина [1] и [2]. Были рассчитаны значения эффективного КПД ГТУ

и эффективной мощности ГТУ. Коэффициент технического состояния по эффективному КПД определялся как отношение вычисленного в этом пункте η_e к величине η_e из заводских характеристик каждой ГТУ при данной приведенной мощности (таблица 1, п.2).

Таблица 1. Результаты расчетов на основе измеренных параметров работы ГПА-Ц-16 №1, 2, 3, 4

№ п/п	Обозначение и размерность расчетного параметра	Величины расчетных параметров				Погрешность метода из-за погрешностей измерений %
		ГПА №1	ГПА №2	ГПА №3	ГПА №4	
1. Результаты расчетов при известном расходе топливного газа с определением мощности по параметрам работы ЦБН.						
1.1.	η_e , %	24,8	25,0	24,2	23,8	1,6
1.2.	N_e , МВт	11,96	11,86	11,94	12,2	1,4
1.3.	K_{η_e} , %	94,5	98,0	91,9	90,1	–
2. Результаты расчетов по заводским характеристикам ГТУ для величины мощности, взятой из п.1.2.						
2.1.	η_e , %	26,24	25,51	26,23	26,41	0,5
3. Результаты расчетов по параметрам работы ГПА с применением статистической модели при условии известной из п. 1.2. мощности и неизвестном расходе топливного газа.						
3.1.	η_e , %	23,85	24,17	25,67	24,70	1,5
3.2.	K_{η_e} , %	96,2	94,75	97,86	93,5	–
4. Результаты расчетов по параметрам работы ГПА с применением статистической модели при условии известного расхода топливного газа и неизвестной мощности.						
4.1.	η_e , %	23,15	23,26	24,31	23,10	0,5
4.2.	N_e , МВт	11,9	11,7	11,6	11,7	0,8

В п.2 таблицы 1 даны результаты определения по заводским характеристикам ГТУ значения эффективного КПД ГТУ для величины мощности, взятой из п.1.

В п.3 таблицы 1 даны результаты определения значения эффективного КПД ГТУ по параметрам работы ГПА с применением разработанного в данном параграфе метода статистической модели при условии известной из п.1. мощности и неизвестного расхода топливного газа. КТС по эффективному КПД определялся как отношение вычисленного в этом пункте η_e к величине η_e из заводских характеристик каждой ГТУ при данной мощности (таблица 1, п.2).

В п.4 таблицы 1 даны результаты определения значения эффективного КПД ГТУ и эффективной мощности ГТУ по параметрам работы ГПА с применением разработанного в данном параграфе метода статистической модели при условии известного расхода топливного газа и неизвестной мощности.

На рисунке 5 и рисунке 6 представлены диаграммы, построенные по данным из таблицы 1. По всем ГПА величина η_e , определенная по заводским

характеристикам ГТУ, больше, чем значения η_e , определенные остальными методами при том же уровне нагрузки двигателя (рисунок 5). Этот факт вполне предсказуем и объясняется потерями в связи с ухудшением технического состояния ГТУ в процессе эксплуатации и отличием эксплуатационных условий от стендовых заводских.

С учетом оцененных погрешностей используемых методов, результаты расчетов путем определения мощности по параметрам работы ЦБН и измерения расхода топливного газа близки результатам расчетов с использованием статистической модели по обоим предлагаемым вариантам применения этой модели (рисунок 5 и рисунок 6).



Рисунок 5. Результаты расчетов эффективного КПД газотурбинных двигателей ГПА-Ц-16.

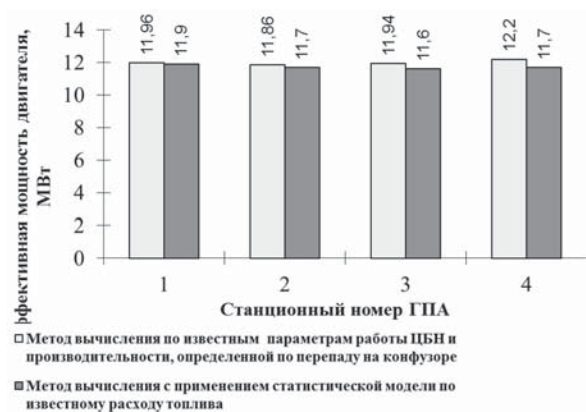


Рисунок 6. Результаты расчетов эффективной мощности газотурбинных двигателей ГПА-Ц-16.

При рассмотрении диаграмм на рисунке 5 и рисунке 6 прослеживается также то, что различия между рассчитанными величинами носят систематический характер и проявляются одинаково на всех ГПА. Существует возможность исключить эту систематическую погрешность. Для этого при оценке изменений эффективности работы ГТУ в процессе эксплуатации нужно сравнивать два состояния двигателя, расчеты по которым произведены одним и тем же методом. Систематическая погрешность не влияет на величину определенных таким образом относительных изменений расчетного параметра.

Выводы

1. Разработан на основе статистического анализа взаимосвязей между изменениями параметров работы ГТУ и ее техническим состоянием экспресс-метод оценки эффективности работы газотурбинных газоперекачивающих агрегатов авиационного типа с детальной проработкой ее применительно к конкретному типу машины – ГПА-Ц-16.

2. Созданы компьютерные программы, предназначены для первичной обработки заводских стендовых испытаний двигателей НК-16СТ, получения коэффициентов модели, использования полученной статистической модели, проведения проверки ее точности.

3. Результаты расчетов с применением разработанного метода статистической модели, в целом, согласуются между собой и с результатами расчетов известными традиционными методами.

4. Метод статистической модели демонстрирует приемлемую погрешность, связанную с классом точности штатных измерительных средств.

5. Разработанный метод статистической модели применим в ситуациях дефицита измерений, когда невозможно определить мощность по параметрам работы ЦБН или когда неизвестен расход топливного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лопатин А.С. Научные основы обслуживания системы диагностического обслуживания газотранспортного оборудования компрессорных станций: дисс. ... докт. техн. наук, М.: 1998. 336 с.

2. Лопатин А.С. Термодинамическое обеспечение энерготехнологических задач трубопроводного транспорта природных газов. М.: Изд. «Нефтяник», 1996. 82 с.

Vanchin A.G., doctor's degree candidate of chair «Thermodynamics and thermal engines», I.M. Gubkin's RSU of oil and gas

e-mail: alex_vanchin@mail.ru

Ванчин А.Г., докторант кафедры «Термодинамика и тепловые двигатели», РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина