

УДК 622.691.4.052

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА СОВМЕСТНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ

Ванчин А. Г.

ФПСЭСТТ РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина

alex\_vanchin@mail.ru

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены особенности режимов совместной параллельной работы газоперекачивающих агрегатов. Предложены соотношения для поиска оптимальных режимов работы в общем виде. Изучены отдельно варианты совместной работы однотипных и разнотипных агрегатов. На основе обнаруженных закономерностей предложен вариант простого способа определения оптимального режима совместной работы. Даны рекомендации по практическому использованию результатов данного исследования.

**Ключевые слова:** диагностика, транспорт природного газа, характеристика газотурбинной установки, техническое состояние, газоперекачивающий агрегат, сдвиг характеристик, располагаемая мощность, экспресс метод диагностики

### **Особенности режимов совместной параллельной работы ряда газоперекачивающих агрегатов**

В состав газотранспортного узла, как правило, входят несколько компрессорных цехов, которые могут эксплуатироваться отдельно каждый на свой магистральный газопровод (МГ), но практика работы реальных газотранспортных предприятий показывает, что в основном, МГ одинаковых проектных рабочих давлений объединяются в единый газотранспортный коридор с помощью технологических перемычек. В результате возникает ситуация параллельной работы разнотипных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в разном техническом состоянии. В этой ситуации требуется решение вопроса оптимального распределения нагрузки между ГПА с целью снижения затрат. Трудность в решении этого вопроса состоит в том, что ГПА является сложной системой с целым рядом условий и ограничений, состоящей из отдельных блоков, таких как ГТУ и ЦБН, которые в свою очередь имеют свои характеристики, на которые оказывают влияние текущее техническое состояние, режим эксплуатации, условия внешней среды и другие факторы. Поэтому для правильного решения задачи распределения нагрузки между ГПА требуется получение актуальных расходно-затратных характеристик ГПА с учетом всех указанных факторов вариативности. Понятием «расходно-затратные

характеристики ГПА» в данной работе называется зависимость расхода топливного газа в ГПА от расхода технологического газа через нагнетатель этого ГПА, рассчитанных для данного ГПА с учетом его технического состояния, текущих эксплуатационных, технологических и атмосферных условий.

Для примера расходно-затратных характеристик ГПА можно рассмотреть показанные на рисунке 1 графики зависимостей расхода топливного газа ГПА-Ц-16 и ГТК-25ИР от расхода газа через нагнетатель, рассчитанных для конкретных и одинаковых эксплуатационных, технологических и атмосферных условий. По рисунку 1 можно отметить, что расходно-затратные характеристики ГПА имеют вид простых кривых, монотонно возрастающих во всем диапазоне расходов газа через нагнетатель.

Рабочие (физически возможные) диапазоны мощности для данного случая были рассчитаны и составляют для ГПА-Ц-16 от 7,1 до 18,4 МВт, а для ГТК-25ИР от 7,3 до 22,8 МВт. Соответствующие диапазоны расходов газа через нагнетатели составляют для ГПА-Ц-16 от 22 до 52 млн н.м<sup>3</sup>/сут., а для ГТК-25ИР от 23 до 68 млн н.м<sup>3</sup>/сут.

В этих рабочих диапазонах расходно-затратные характеристики рассматриваемых ГПА являются практически прямыми пропорциональными зависимостями.

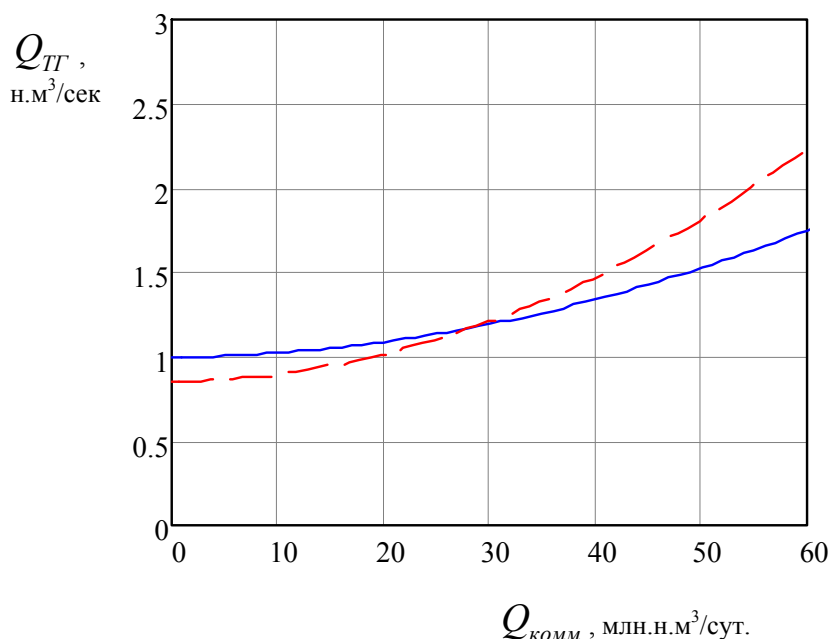


Рисунок 1. Расходно-затратные характеристики ГПА-Ц-16 (пунктирная линия) и ГТК-25ИР (сплошная линия).

Минимальный расход газа через нагнетатели определялся в соответствии с положением границы помпажных режимов работы ЦБН. Максимальный расход газа через нагнетатели определялся по располагаемой мощности ГПА.

На рисунке 2 показано графическое решение задачи определения максимального расхода газа через нагнетатель для ГТК-25ИР. Искомый режим находится в точке пересечения графиков эффективной мощности и располагаемой мощности.

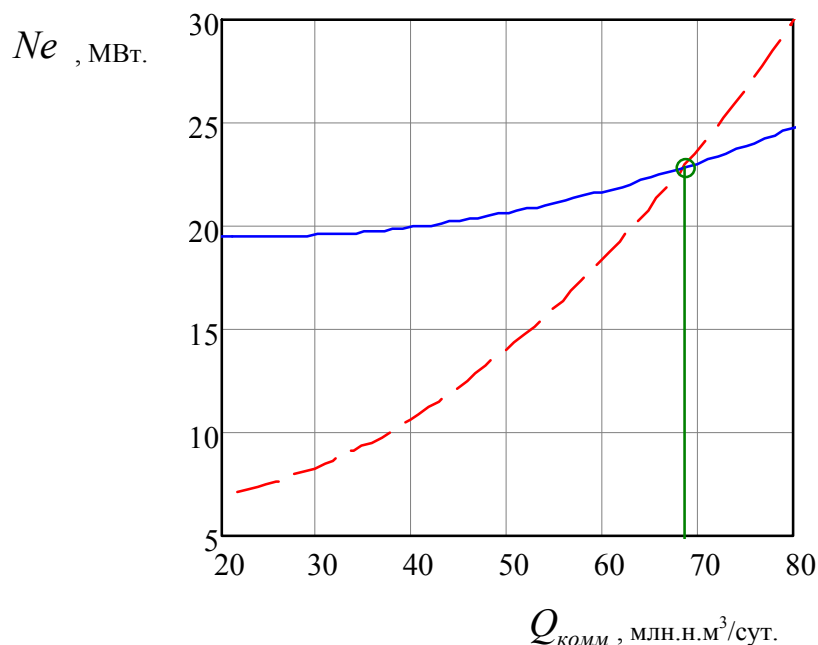


Рисунок 2. Графики эффективной мощности (пунктирная линия) и располагаемой мощности (сплошная линия) для ГТК-25ИР в зависимости от коммерческого расхода газа через нагнетатель.

На рисунке 3 показано графическое решение задачи определения максимального расхода газа через нагнетатель для ГПА-Ц-16.

Величины эффективной и располагаемой мощности для графиков на рисунке 2 и рисунке 3 определялись с использованием заводских характеристик ГПА по методикам, изложенным в [1, 2, 3, 4, 5].

Убывание или возрастание графика располагаемой мощности ГПА определяется в каждом случае положением исследуемого диапазона режимов работы ГПА соответственно справа или слева от линии оптимальных режимов на характеристике ГТУ ([4, 5]).

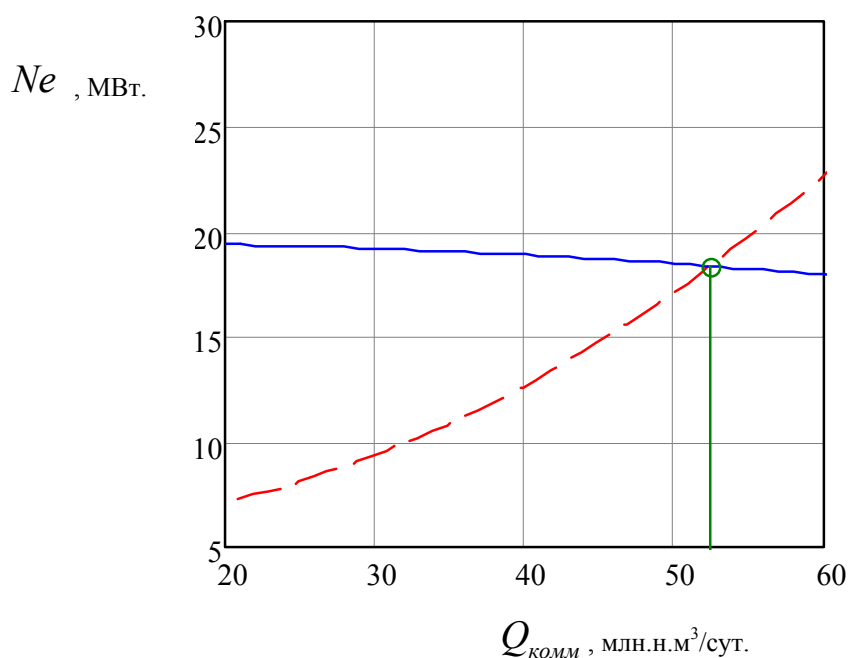


Рисунок 3. Графики эффективной мощности (пунктирная линия) и располагаемой мощности (сплошная линия) для ГПА-Ц-16 в зависимости от коммерческого расхода газа через нагнетатель.

Для анализа совместной параллельной работы двух ГПА и поиска оптимальных решений, целесообразно расходно-затратные характеристики этих ГПА представлять на одной диаграмме в виде графиков зависимостей расхода топливного газа от расхода технологического газа через нагнетатель одного из этих ГПА при неизменном суммарном расходе газа через нагнетатели обоих ГПА. На диаграмму также наносится график суммы затрат по обоим ГПА с отмеченной точкой минимума затрат. Такой вид диаграмм в дальнейшем будет называться «диаграммой совместной работы ГПА».

В качестве примера диаграммы совместной работы ГПА на рис. 2 показана диаграмма для ГПА-Ц-16 и ГТК-25ИР, расходно-затратные характеристики которых были представлены на рисунке 1.

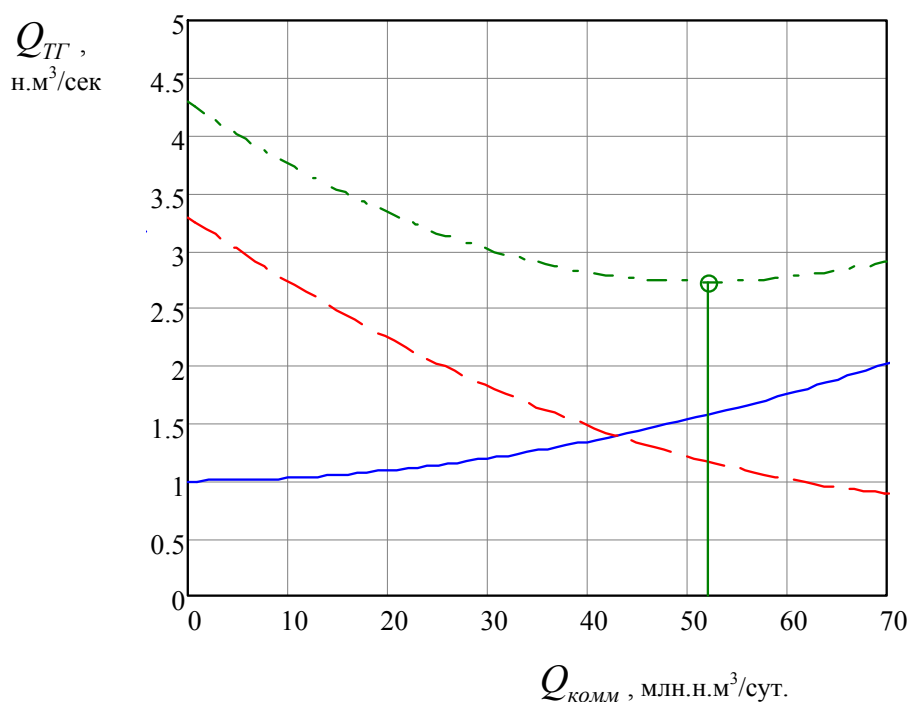


Рисунок 4. Диаграмма совместной работы ГПА-Ц-16 (пунктирная линия) и ГТК-25ИР (сплошная линия) от расхода газа через нагнетатель ГТК-25ИР при неизменном суммарном расходе газа через нагнетатели обоих ГПА, равном 80 млн.н.м<sup>3</sup>/сут. График суммы затрат по обоим ГПА (штрих-пунктирная линия) с отмеченной точкой минимума (отрезок с маркером).

По диаграмме на рисунке 4 видно, что для представленного частного случая не являются оптимальным вариантом ни режим с равным расходом технологического газа, ни режим с равными затратами, ни режим с максимальной загрузкой более эффективного ГПА. В свою очередь, простой расчет показывает то, что при оптимальном варианте режима в рассматриваемом случае не равны удельные затраты по ГПА, то есть затраты, отнесенные к расходам технологического газа.

Получив такой результат для частного случая, можно утверждать и в общем, что не могут являться критерием оптимизации совместной параллельной работы двух разнотипных ГПА равенство расходов технологического газа, равенство затрат, равенство удельных затрат, и максимальная загрузка более эффективного ГПА.

При разных вариантах распределения нагрузки существенно меняется величина общих затрат. Так, например, для случая, представленного на рисунке 4 суммарные затраты топливного газа для оптимального режима составляют 2,729 н.м<sup>3</sup>/сек, для режима с минимальной загрузкой ГПА-Ц-16 суммарные затраты топливного газа составят 2,747 н.м<sup>3</sup>/сек, а для режима с минимальной загрузкой ГТК-25ИР – 3,201 н.м<sup>3</sup>/сек. Из этих цифр видно, что неправильно выбранный

режим распределения нагрузки между параллельно работающими ГПА в рассматриваемом случае может привести к неоправданным дополнительным затратам топлива до 17% по сравнению с оптимальным распределением.

### Общий вид решения задачи поиска оптимального режима совместной параллельной работы ряда ГПА

В общем виде решение задачи поиска оптимального режима совместной параллельной работы ряда ГПА, при котором затраты минимальные из возможных, сводится к решению системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, 3 \dots n \\ Z_i = f_i(Q_i) \\ Z \min_i = f_i(Q \min_i) \\ Z \max_i = f_i(Q \max_i) \\ Z \min_i \leq Z_i \leq Z \max_i \\ Z_\Sigma = \sum_{i=1}^n Z_i \\ Q_\Sigma = \sum_{i=1}^n Q_i \\ Z_\Sigma = \min(Z_\Sigma) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $i$  - номер ГПА;  $n$  - количество работающих ГПА;  $Z_i = f_i(Q_i)$  - расходно-затратная характеристика  $i$ -го ГПА;  $Z_i$  - затраты на работу  $i$ -го ГПА;  $Q_i$  - расход технологического газа через ЦБН  $i$ -го ГПА;  $Q \min_i$  - минимально допустимый расход технологического газа через ЦБН этого ГПА;  $Z \min_i$  - затраты на работу  $i$ -го ГПА на минимально допустимом расходе технологического газа через ЦБН этого ГПА;  $Q \max_i$  - максимально допустимый расход технологического газа через ЦБН этого ГПА;  $Z \max_i$  - затраты на работу  $i$ -го ГПА на максимально допустимом расходе технологического газа через ЦБН этого ГПА;  $Z_\Sigma$  - суммарные затраты на работу всех ГПА;  $Q_\Sigma$  - суммарный расход технологического газа через ЦБН всех ГПА;  $Z_{\text{optim}_\Sigma}$  - оптимальные суммарные затраты на работу всех ГПА.

Затраты на работу ГПА могут быть представлены в величинах расхода топливного газа за единицу времени или в финансовых расходах за единицу времени.

В системе уравнений отражено то, что при поиске оптимального режима совместной параллельной работы ряда ГПА необходимо учесть их расходно-затратные характеристики, ограничения по максимальным и минимальным

допустимым расходам технологического газа через ЦБН каждого ГПА, и при этом должна быть соблюдена заданная величина суммарного расхода технологического газа через ЦБН всех ГПА.

Ограничения по минимальным допустимым расходам технологического газа через ЦБН ГПА связаны с условием недопущения работы ЦБН в зоне помпажа и с установленным заводом-изготовителем ограничением на минимальную загрузку ГПА для предотвращения потери «самоходности» ГТУ. Определение ограничения по минимально допустимому расходу технологического газа через ЦБН для конкретного ГПА сводится к расчету режима работы ЦБН в текущих условиях по условию загрузки ГПА на величину минимально допустимой мощности.

Ограничения по максимальным допустимым расходам технологического газа через ЦБН ГПА связаны с установленным заводом-изготовителем ограничениями на максимальную загрузку ГПА для предотвращения поломок из-за перегрузки. Ограничение по максимально допустимой загрузке ГПА может возникнуть по одному из целого ряда параметров работы ГПА в зависимости от заданных уставочных значений по этим параметрам, а так же от условий эксплуатации и технического состояния ГПА. Эффективная мощность ГПА при максимально допустимой величине загрузки называется располагаемой мощностью. Определение ограничения по максимально допустимому расходу технологического газа через ЦБН для конкретного ГПА сводится к расчету режима работы ЦБН в текущих условиях по условию загрузки ГПА на величину располагаемой мощности.

Однако, даже когда определены текущие расходно-затратные характеристики и ограничения всех работающих ГПА, решение системы уравнений (1) может представлять определенные сложности, касающиеся прикладной математики. Причина этого состоит в том, что величина оптимальных суммарных затрат на работу всех ГПА являются функцией переменных, количество которых равно количеству работающих ГПА минус один (благодаря уравнению суммарного расхода технологического газа). Поиск экстремумов функции более двух переменных не представлен в доступных современных программных средствах.

Для устранения указанных сложностей с решением системы уравнений (1) требуется нахождение дополнительных закономерностей с целью снижения количества независимых переменных, участвующих в оптимизационном расчете.

### Рассмотрение случая совместной работы двух ГПА одного типа

В этих целях для начала рассмотрим случай совместной работы двух ГПА одного типа.

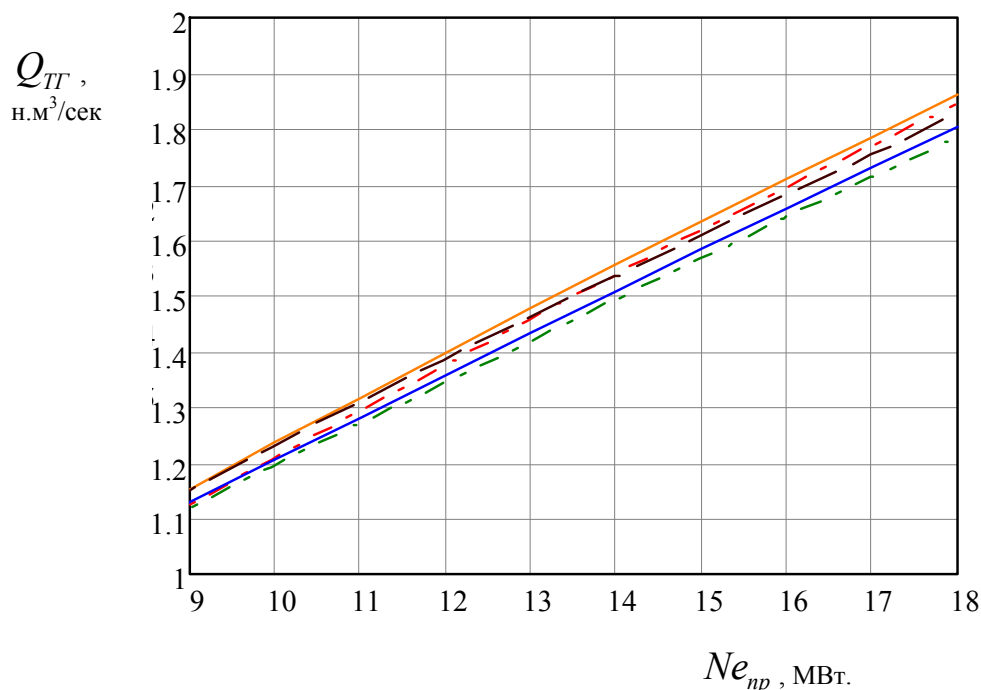


Рисунок 5. Графики зависимостей приведенного расхода топливного газа от приведенной мощности, для ГПА-Ц-16 в разном техническом состоянии по данным стендовых испытаний.

На рисунке 5 показаны графики зависимостей приведенного расхода топливного газа от приведенной мощности, для пяти ГПА-Ц-16 в разном техническом состоянии по данным стендовых испытаний. Максимальное различие между графиками достигает 4.6%. Можно заметить, что в целом просматривается тенденция пропорционального «расслоения». То есть, из одного графика можно получить другой умножением на константу во всем рабочем диапазоне мощности ГПА. Так же, в окрестностях любого значения мощности из одного графика можно получить другой простым прибавлением константы.



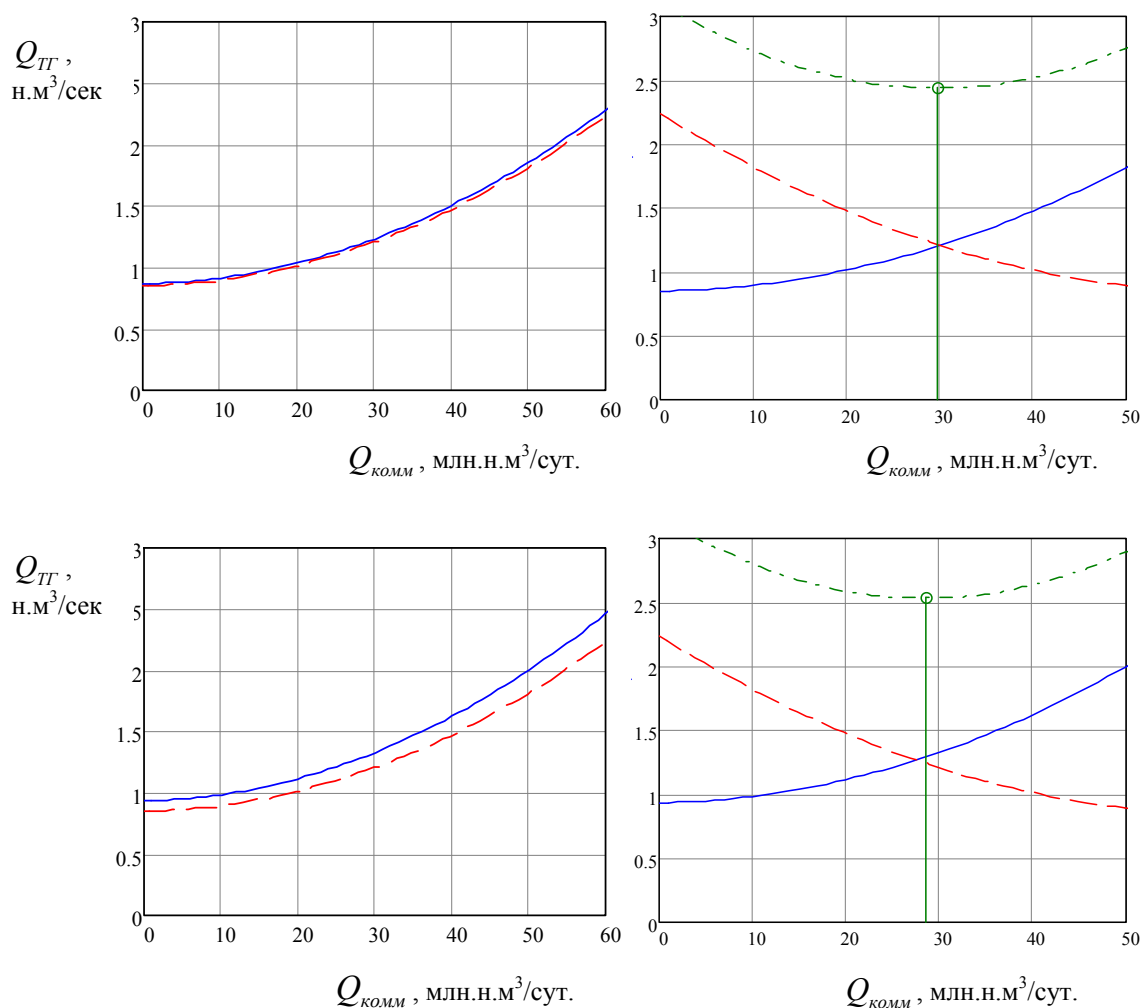


Рисунок 6. Расходно-затратные характеристики двух ГПА-Ц-16 (слева) и соответствующие диаграммы их совместной работы (справа) для неизменного суммарного расхода газа через нагнетатели обоих ГПА 60 млн.н.м<sup>3</sup>/сут. Вверху: Графики для двух ГПА-Ц-16 в приблизительно исходном техническом состоянии. Внизу: графики для случая, когда один ГПА-Ц-16 в исходном техническом состоянии (пунктирная линия) а другой ГПА-Ц-16 в сниженном на 10% техническом состоянии (сплошная линия).

На рисунке 6 показаны расходно-затратные характеристики двух ГПА-Ц-16 и диаграммы их совместной работы для двух вариантов технического состояния ГПА.

Для случая совместной работы двух ГПА-Ц-16 в приблизительно одинаковом техническом состоянии оптимальным является режим с равными расходами газа через нагнетатели обоих ГПА.

В случае совместной работы двух ГПА-Ц-16, когда один ГПА в исходном техническом состоянии, а другой ГПА в сниженном на 10% техническом состоянии, оптимальным оказался режим весьма близкий к режиму с равными

расходами газа через нагнетатели обоих ГПА. Этот факт является простым математическим следствием описанной выше закономерности сдвига топливной характеристики ГПА. В окрестностях любого значения расхода газа через нагнетатель, расходно-затратные характеристики двух ГПА-Ц-16 в разном техническом состоянии практически эквидистантны. К тому же, график суммарных затрат в окрестностях минимума при изменении расхода газа через нагнетатель в диапазоне  $\pm 10\%$  имеет очень незначительные изменения на 0.27% .

Отличие в расходе топлива на 10% при одинаковой нагрузке для двух ГПА одного типа, больше предельного отклонения технического состояния ГПА, обычно наблюдаемого практически в межремонтный период эксплуатации.

Подводя итог рассмотрения случая совместной работы двух ГПА одного типа можно констатировать то, что критерием оптимизации для них с допустимой точностью является равенство расходов газа через нагнетатели обоих ГПА.

### **Рассмотрение случая совместной работы двух ГПА разного типа**

Далее рассмотрим случай совместной работы двух ГПА разного типа.

На рисунке 7 показаны диаграммы совместной работы ГПА-Ц-16 и ГТК-25ИР для четырех разных значений суммарного расхода газа через нагнетатели обоих ГПА - 100, 80, 70 и 60 млн.н.м<sup>3</sup>/сут.

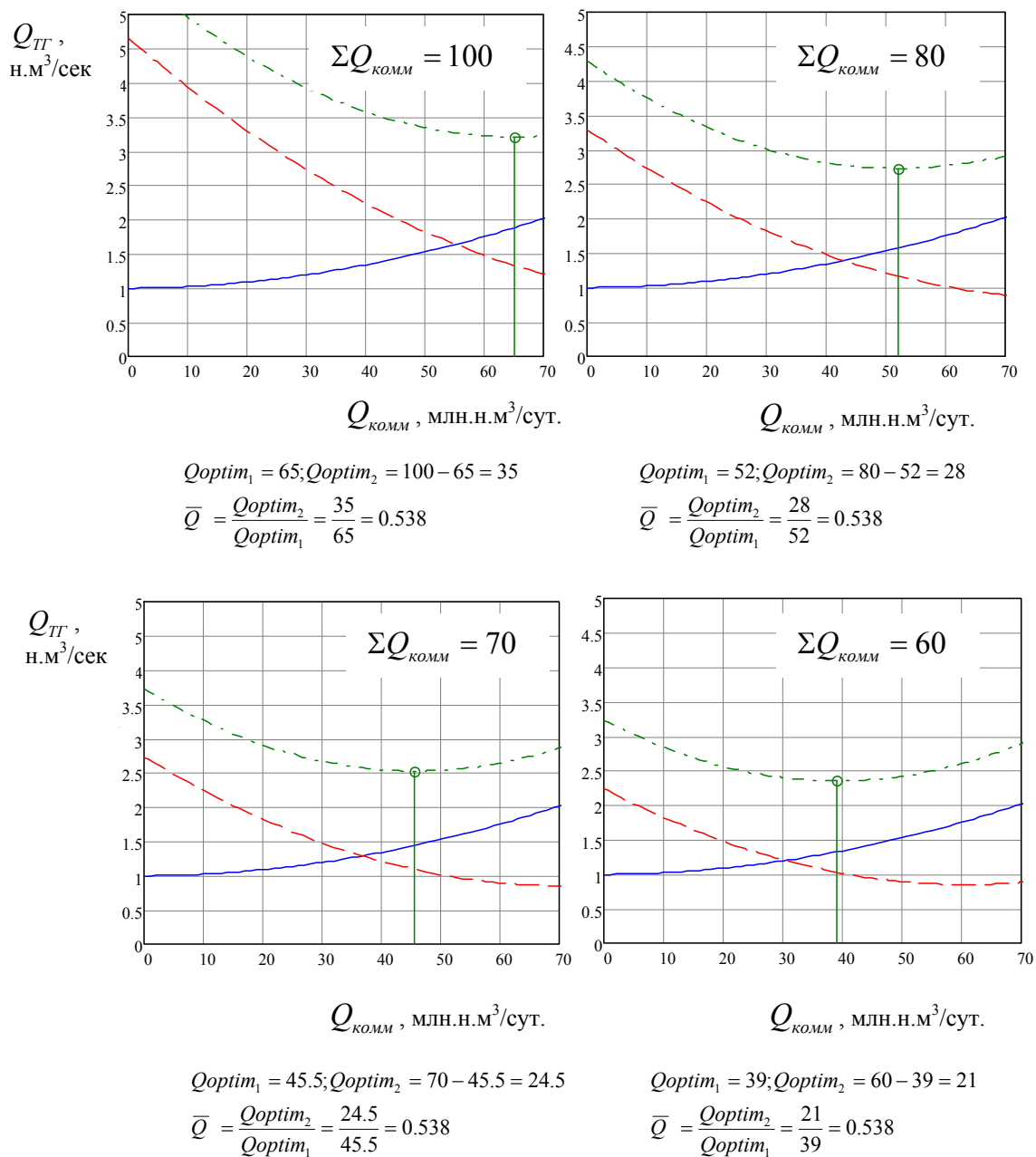


Рисунок 7. Диаграммы совместной работы ГПА-Ц-16 (пунктирная линия) и ГТК-25ИР (сплошная линия) для четырех разных значений суммарного расхода газа через нагнетатели обоих ГПА. График суммы затрат по обоим ГПА (штрих-пунктирная линия) с отмеченной точкой минимума (отрезок с маркером).

На диаграммах на рисунке 7 для всех четырех разных значений суммарного расхода газа через нагнетатели обоих ГПА, покрывающих значительный диапазон регулирования, отношение оптимальных расходов технологического газа через ЦБН остается без изменений. Этот факт является прямым математическим следствием отмеченной выше простоты кривых расходно-затратных характеристик ГПА в рабочем диапазоне.

Как и в рассмотренном выше случае, график суммарных затрат в окрестностях минимума имеет очень незначительные изменения.

### Простой способ определения оптимального режима совместной работы ГПА

Отмеченные факты дают основания предлагать вариант более простого способа определения оптимального режима совместной работы ГПА. Нахождение оптимальных расходов технологического газа через ЦБН можно определить, решая систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, 3 \dots n \\ Q_i = Q_1 \cdot \bar{Q}_i \\ Q_\Sigma = \sum_{i=1}^n Q_i \end{array} \right. , \quad (2)$$

где  $\bar{Q}_i$  - отношение оптимального расхода технологического газа через ЦБН  $i$ -го ГПА и 1-го ГПА при совместной работе этих двух ГПА.

С учетом преобразований:

$$Q_\Sigma = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n (Q_1 \cdot \bar{Q}_i) = Q_1 \cdot \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i \Rightarrow Q_1 = \frac{Q_\Sigma}{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_i} , \quad (3)$$

система уравнений (2) представляется в виде последовательно решаемых уравнений:

$$Q_1 = \frac{Q_\Sigma}{\sum_{i=1}^n \bar{Q}_i} \quad \text{и} \quad Q_i = Q_1 \cdot \bar{Q}_i . \quad (4)$$

В качестве первого ГПА может быть принят любой из работающих ГПА.

Величины  $\bar{Q}$  определяются для каждого типа работающих ГПА заранее до начала определения оптимального режима совместной работы всех ГПА, и в систему уравнений (2) включаются в качестве известных констант.

Пример графического способа определения величины  $\bar{Q}$  был показан на рисунке 7. Аналитический расчет величины  $\bar{Q}$  для каждого типа совместно работающих ГПА производится с помощью системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 \\
 3 \min_1 = f_1(Q \min_1) \\
 3 \max_1 = f_1(Q \max_1) \\
 3 \min_1 \leq 3_1 \leq 3 \max_1 \\
 3 \min_2 = f_2(Q \min_2) \\
 3 \max_2 = f_2(Q \max_2) \\
 3 \min_2 \leq 3_2 \leq 3 \max_2 \quad , \\
 3_1 = f_1(Q_1) \\
 3_2 = f_2(Q_2) \\
 3_{\Sigma} = 3_1 + 3_2 \\
 3_{\Sigma} = \min(3_{\Sigma}) \\
 \bar{Q} = \frac{Q_2}{Q_1}
 \end{array} \right. \quad (3)$$

Для ГПА того же типа, что и первый величина  $\bar{Q}$  может быть принята равной единице, что уже было показано при рассмотрении случая совместной работы двух ГПА одного типа.

Оптимизация при использовании системы уравнений (2) будет происходить только по одной переменной отдельно по каждой паре ГПА при решении соответствующей системы уравнений (3). Поиск экстремумов функции одной переменной имеется в доступных современных программных средствах, а значит оптимизация с использованием систем уравнений (2) и (3) практически осуществима.

Стоит отметить, что исходные посылки этого исследования изначально были упрощены в целях облегчения изложения материала.

Для более полной картины в систему уравнений оптимизации требуется внести еще учет изменений гидравлических сопротивлений технологических трубопроводов и оборудования, такого как установка очистки и установка охлаждения технологического газа при перераспределении загрузки между параллельно работающими компрессорными цехами.

Максимальную же пользу от предлагаемого алгоритма оптимизации совместной работы ГПА можно получить при включении его в общий расчет всего газотранспортного узла, включающий кроме компрессорных цехов со всем оборудованием также и магистральные газопроводы.

## Выводы

Решение вопроса оптимального распределения нагрузки между совместно работающими ГПА имеет большое значение для решения задачи снижения затрат на транспорт природного газа, так как разница затрат между разными вариантами загрузки при сохранении общих объемов поставок может достигать 17%.

Для случая совместной параллельной работы двух ГПА одного типа критерием оптимизации для них с допустимой точностью является равенство расходов газа через нагнетатели обоих ГПА.

Решение в общем виде задачи поиска оптимального режима совместной параллельной работы ГПА в количестве более 3 шт. имеет сложности прикладного математического характера.

В данной работе предложен способ устранения указанных сложностей прикладного математического характера при решении задачи в общем виде. Для этого используются выявленные в ходе исследования закономерности, учитывающие газодинамические термодинамические и характеристики газотранспортного оборудования.

## Литература

1. Ванчин А.Г. Экспресс-метод оценки располагаемой мощности ГТУ и коэффициента технического состояния по мощности на основе закономерностей сдвига характеристик ГТУ при изменении ее технического состояния. // Электронный научный журнал "Нефтегазовое дело". 2012. №5. С.
2. Ванчин А.Г. Метод оценки технического состояния и располагаемой мощности ГТУ на основе закономерностей сдвига характеристик ГТУ // Наука – XXI веку: тез. докл. 4-ой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, докторантов и молодых ученых. Майкоп: Изд-во МГТИ, 2003. С. 227-231.
3. Ванчин А.Г. Экспресс-метод оценки располагаемой мощности и коэффициента технического состояния ГТУ. //Газотурбинные технологии. №3. 2005. С. 30-32.
4. Ванчин А.Г. Определение изменений показателей работы газотурбинной установки в составе газоперекачивающего агрегата при отклонении характеристики нагрузки. // Магистральные и промышленные трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт: науч.-техн. сб. М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. 2011. 78 с.
5. Ванчин А.Г. Методы оценки технического состояния и прогнозирования показателей работы газоперекачивающего агрегата ГТК-25ИР. // Магистральные и промышленные трубопроводы: проектирование, строительство, эксплуатация, ремонт: науч.-техн. сб. М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. 2011. 78 с.

## OPTIMIZATION OF THE MODE OF PARALLEL COLLABORATION OF GAS-DISTRIBUTING UNITS

A.G. Vanchin

I.M.Gubkin Russian state university of «Oil and gas»

e-mail: alex\_vanchin@mail.ru

**Abstract.** This article analyzes features of modes of joint parallel operation of gas-distributing units and offers ratios for search of optimum operating modes in a general view. The author of the article studies separately options of collaboration of the same and polytypic units and offers option of a simple way of definition of an optimum mode of collaboration on the basis of the found regularities. The article provides recommendations about the practical use of the results of this research.

**Keywords:** diagnostics, transport of natural gas, the characteristic of a gas-turbine plant, technical condition, a gas-compressor plant, a shift of characteristics, available power, a proximate method of diagnostics.

### References

1. Vanchin A.G. Rapid method for estimating the available capacity of gas turbines and the technical condition of the coefficient for power based on the characteristics of shift patterns GTU changing its condition. // Electronic scientific journal "Oil and Gas Business." 2012. Number 5.
2. Vanchin A.G. Method of assessing the technical condition and the available capacity on the basis of the laws of GTP shift characteristics GTU // Science - XXI Century: Proc. Reports. 4th All-Russian scientific-practical conference of students, post-doctoral students and young researchers. Maikop: Izd MGTI, 2003. Pp. 227-231.
3. Vanchin A.G. Rapid method for estimating the available capacity and the coefficient of the technical condition of GTU. // Turbine technology. Number 3. 2005. Pp. 30-32.
4. Vanchin A.G. Determination of changes in the performance of the gas turbine in the pumping unit in rejection characteristics of the load. // Main and field pipelines: design, construction, maintenance, repair: scientific and engineering. Sat Moscow: State Oil and Gas University. Gubkin. 2011. 78.
5. Vanchin A.G. Methods of assessment of technical condition and forecasting performance of pumping unit SCC-25IR. // Main and field pipelines: design, construction, maintenance, repair: scientific and engineering. Sat Moscow: State Oil and Gas University. Gubkin. 2011. 78.

### **Сведения об авторе**

Ванчин А. Г., главный инженер филиала ООО «Газпром трансгаз Москва» Курское ЛПУМГ, докторант кафедры термодинамики и тепловых двигателей РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, (4712)328844, 8-961-167-22-11

Alex G.Vanchin, chief engineer branch of LLC "Gazprom Transgaz Moscow" Kursk LPUMG, doctoral student of thermodynamics and heat engines State Oil and Gas University. Gubkin,  
e-mail: alex\_vanchin@mail.ru