

## О ЗАДАЧЕ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ ТУРБОКОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДУХА В ПРОИЗВОДСТВЕ АММИАКА И НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ЕЁ РЕШЕНИЯ

**А.Ф. Рубинчик («ГИАП»), С.П. Сергеев («АЛВИГО»)  
В.З.Семаков, В.Е. Евдокимов (НПФ «Энтехмаш»)**

Повышение производительности компрессоров технологического воздуха в сочетании с другими мероприятиями по реконструкции технологического оборудования в настоящее время является актуальной задачей для увеличения производства аммиака по технологиям ТЕС и ГИАП.

В производствах ТЕС применяются импортные компрессоры типа 2MCL1006+2MCL456 с промежуточными аппаратами воздушного охлаждения (АВО) с приводом от паровой турбины с вакуум-вытяжкой воздушного охлаждения, а в производствах ГИАП – отечественные компрессоры типа К1290 с водяным промежуточным охлаждением и приводом от паровой турбины К-15, оснащённой конденсатором водяного охлаждения.

Кроме конструктивных отличий, у каждой из турбомашин имеются важные особенности. Во-первых, паспортная производительность компрессора К1290 больше, чем у импортного аналога (соответственно  $Q_{0,760} \approx 61500 \text{ нм}^3/\text{ч}$  и  $\sim 56500 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ), а во-вторых, приводная паровая турбина К-15 имеет большой запас мощности ( $N_{\text{НОМ}}=12 \text{ МВт}$ ,  $N_{\text{МАКС}}=15 \text{ МВт}$ ), который отсутствует в импортной турбине ( $N_{\text{НОМ}}=10,8 \text{ МВт}$ ,  $N_{\text{МАКС}}=11,29 \text{ МВт}$ ). Отмеченные особенности вынуждают искать несколько разные пути решения задачи по повышению производительности компрессора в том и другом случае.

Основная суть вариантов модернизации турбокомпрессорного агрегата технологического воздуха в производстве ТЕС, предложенных различными фирмами, состоит в следующем:

- Замена паротурбинного привода турбиной повышенной мощности ( $N_{\text{МАКС}} \approx 14,7 \text{ МВт}$ ,  $N_{\text{НОМ}} \approx 13,5 \text{ МВт}$ ), реконструкция штатной проточной части компрессора для повышения производительности ( $Q_{0,760} \approx 62000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ).
- Реконструкция проточной части турбины для повышения её мощности (до  $N \approx 14 \text{ МВт}$ ) в штатном корпусе, а также проточной части ступеней компрессора ( $Q_{0,760} \approx 63000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ).
- Модернизация проточной части ЦНД и ЦВД компрессора без должной реконструкции АВО ( $Q_{0,760} \approx 55000\text{-}56000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ) при сохранении штатной турбины.
- Повышение давления на входе в компрессор с помощью наддува вентилятором (бустером). При этом теоретически можно ожидать повышения производительности компрессора со штатной турбиной и существующими АВО на величину  $\sim 5\%$ . С учётом дополнительных затрат мощности на электропривод вентилятора ( $\sim 2\%$ ) эффективность бустерного варианта применительно к производству ТЕС в целом представляется весьма скромной, не говоря о риске снижения эксплуатационной надёжности агрегата.
- Модернизация проточной части ступеней ЦНД и ЦВД компрессора и блока АВО (для достижения  $Q_{0,760} \geq 63000 \text{ нм}^3/\text{ч}$ ) при сохранении паровой турбины в штатном исполнении ( $N_{\text{МАКС}}=11,29 \text{ МВт}$ ).

Каждый из перечисленных вариантов может иметь опции, такие как установка сухих пластинчатых муфт, демпферных подшипников, уплотнений из полиэфирных материалов, увеличение диаметров трубопроводов и другие.

Нетрудно заметить, что последний вариант является наиболее привлекательным, так как обеспечивает максимальное энергосбережение, то есть существенное повышение производительности компрессора при минимальном расходе пара на турбину. Этот вариант уже реализован на 3-х российских предприятиях, осенью 2008 г. будут пущены в строй ещё два модернизированных агрегата. Успехи внедрения данного технического решения связаны с обеспечением высоких политропных КПД ступеней компрессора, благодаря научной школе профессора В.Ф.Риса [1], проточным частям ЦКМ, обработанным экспериментально на моделях [2], а также улучшенным тепловым и аэродинамическим характеристикам секций АВО [3], а также некоторым другим, менее значимым мероприятиям.

Известные технические предложения по модернизации турбокомпрессорного агрегата технологического воздуха К1290-121-1 для увеличения выпуска аммиака в производстве ГИАП внешне не кажутся слишком разнообразными. Они сводятся в основном к модернизации проточной части ступеней компрессора, увеличению мощности турбины за счёт дополнительного расхода пара. Однако способы решения данной задачи разными авторами и результаты отличаются по параметрам назначения и эффективности. Кроме того, в производстве аммиака по технологии ГИАП имеется единичный случай использования бустерного варианта.

Прежде чем дать оценку вариантам модернизации К1290, необходимо сделать некоторые важные пояснения.

Турбокомпрессорный агрегат, состоящий из центробежного компрессора К1290 и паровой турбины К15-41-1, был спроектирован в Ленинграде на Невском заводе в 1970-м году, то есть 38 лет тому назад, при участии одного из авторов этих строк. Руководителями проекта турбокомпрессорного агрегата были главный конструктор компрессорных машин В.Ф. Рис и главный конструктор паровых турбин В.В. Звягинцев. Секции компрессора были тщательно отработаны экспериментально на моделях в лаборатории, руководимой профессором Г.Н. Деном, и имели политропные КПД секций, превышающие показатели аналогов до 7-8%. Достигнутые в то время политропные КПД и поныне превосходят показатели известных аналогов компрессора К1290 на величину до 5,5-6% относительных. Этот высокий результат был подтверждён стендовыми заводскими испытаниями и последующими испытаниями на местах эксплуатации.

Однако компрессор К1290 не был лишён недостатков, по крайней мере два из них явились следствием некорректно заложенных в техническом задании параметров: 1) необоснованно задана чрезмерно высокая температура в нагнетании компрессора ( $t_k \geq 230^\circ\text{C}$ ), что привело к неоптимальному распределению отношения давлений по секциям ( $\varepsilon_1=2,3$ ;  $\varepsilon_2=2,3$ ;  $\varepsilon_3=2,2$ ;  $\varepsilon_4=3,8$ ) со всеми вытекающими отсюда негативными последствиями; 2) завышена расчётная величина производительности компрессора (по ТЗ  $Q_{0,760} \approx 61500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), что не требовалось для обеспечения проектной производительности технологической установки по аммиаку (1360 т/сутки). Первое может быть устранено путём нового проектирования ЦВД: штатное число ступеней 3-й и 4-й секций  $X_3+X_4=2+4$  полезно заменить на 3+3. Кроме того, для обеспечения дополнительного эффекта энергосбережения целесообразно, чтобы в распределении отношения давлений по секциям участвовал также ЦНД компрессора К1290 по аналогии с компрессором 2MCL1006+2MCL456. Завышение расчётной производительности компрессора КЕ1290 привело в своё время к необходимости выброса большого количества воздуха в атмосферу во избежание помпажа. Для устранения этого недостатка, лопатки диффузоров ряда ступеней были повернуты в сторону уменьшения входных углов для смещения газодинамических характеристик в сторону меньшей производительности. Такое решение рассматривалось как паллиативное, поскольку оно приводило к рассогласованию характеристик рабочих

колёс и диффузоров и снижению политропных КПД по сравнению с проектными величинами.

Третьим крупным недостатком агрегата является недостаточно высокая частота вращения приводной турбины К-15 ( $n_{\text{макс}} = 3400$  об/мин), которая не создавалась специально для данных условий, а в целях унификации была заимствована из проекта, разработанного ранее для чёрной металлургии. Это относится как к первоначальному варианту К-15, созданному на базе АКВ-18, так и к варианту более поздней реконструкции на базе АКВ-12.

В процессе 30-летней эксплуатации были выявлены и другие недостатки. Трубные пучки воздухоохладителей с овальными трубками и паяными ребрами не обеспечивали стабильность характеристик компрессора. Промежуточный воздухоохладитель после ЦНД был мал и не обеспечивал необходимые параметры на входе в ЦВД. Центровка диафрагм ЦВД с помощью штифтов на периферии и недостаточное уплотнение разъемов диафрагм ЦВД приводило к повышенным потерям из-за протечек. Высокие температуры воздуха в нагнетании компрессора снижают надёжность работы опорно-упорного вкладыша подшипника ЦВД. Эти недостатки довольно успешно устраняются во всех случаях, когда Заказчики проявляют заинтересованность. В ряде случаев мероприятия по ремонту, устранению протечек, установке новых более надёжных вкладышей и «сухих» пластинчатых муфт именуется «модернизацией», хотя по существу это следует называть ремонтом с реконструкцией отдельных узлов. Такие мероприятия полезны, они повышают надёжность, несколько улучшают характеристики, но при этом не меняют кардинально параметры назначения компрессора ( $Q_g$  и  $p_k$ ), поэтому их желательно использовать в качестве опций при модернизации агрегата с целью увеличения производительности.

Переходя к оценке эффективности известных вариантов модернизации К1290+К15, остановимся на бустерном варианте. Выше на примере компрессора типа 2MCL1006+2MCL456 производства ТЕС показано, какие результаты следует ожидать от повышения давления на входе в компрессор с помощью наддува вентилятором. В случае отечественного агрегата (с ЛД) эффективность бустерного варианта будет ещё меньшей, потому что КПД секций на режимах повышенной производительности очень низок из-за выполненного ранее рассогласования характеристик рабочих колёс и лопаточных диффузоров. По крайней мере, даже восстановление штатной проточной части намного эффективнее вентиляторного наддува.

Наконец, представляют интерес результаты модернизации К1290+К15, выполненной в ОАО «Азот», г. Кемерово [4]. Путём реконструкции проточной части (новые роторы ЦНД и ЦВД, новые диффузоры) получена производительность на всасывании  $Q_{20,760} = 78000$   $\text{м}^3/\text{ч}$  и конечное давление  $p_k = 32$   $\text{кгс}/\text{см}^2$  абс. при предельной для привода частоте вращения  $n=3400$  об/мин и потребляемой мощности  $N_{\text{потр}} \approx 14,3$  МВт. Судя по представленным в [4] характеристикам, случае  $p_k = 36$   $\text{кгс}/\text{см}^2$  абс. (как предусмотрено в ТЗ) производительность будет существенно меньше ( $Q_{20,760} \approx 76000$   $\text{м}^3/\text{ч}$ ), а потребляемая мощность выше  $N_{\text{потр}} \approx 14,7$  МВт. Столь высокое значение потребляемой мощности нельзя объяснить иначе, как низкими политропными КПД секций. По крайней мере, косвенным свидетельством тому является применение в первой ступени рабочего колеса с прямыми лопатками. Экспериментальные исследования Невского завода и ЦКТИ показали, что ступени с такими колёсами неэкономичны, поэтому их следует применять только в крайних случаях, когда величиной политропного КПД можно пренебречь. Модернизация энергоёмкого компрессора К1290 к такому случаю не относится. Правда, авторы перечисляют 21 мероприятие «по устранению изначальных недостатков штатной проточной части», большинство из которых, по нашему мнению, являются либо спорными, либо малоэффективными, о чём свидетельствует результат

модернизации. К тому же утверждение об «изначальных недостатках проточной части», как показано выше, является некорректным.

Для сравнения заметим, что разработки НПФ «Энтехмаш» свидетельствуют о готовности провести модернизацию компрессора K1290 по собственному проекту и обеспечить (в случае необходимости) параметры назначения  $Q_{20,760} = 78000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (на входе),  $p_k = 36 \text{ кгс/см}^2$  абс. при мощности, потребляемой на муфте привода  $N_{\text{потр}} = 13,5 \text{ МВт}$ . Такой эффект достигается за счёт внедрения высокоэкономичных проточных частей ступеней компрессора, тщательно отработанных экспериментально на моделях. Экономия удельных затрат мощности по сравнению с кемеровским вариантом составит при этом свыше 12%. Экономия расхода пара составит  $\sim 7,5 \text{ т/ч}$ . Это позволяет сэкономить дополнительно более 20 млн. рублей в год.

Заметим также, что заданная выше производительность компрессора (в нагнетании  $Q_{0,760} \approx 70000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) не является, бесспорно, необходимой для обеспечения выпуска аммиака в количестве 1700 т/сутки. Согласно расчётному материальному балансу «АЛВИГО» и «ГИАП» для этого достаточно расхода воздуха на технологию  $Q_{0,760} \approx 63000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Следовательно, даже с учётом отборов воздуха на КИП и другие технологические нужды, величина  $70000 \text{ м}^3/\text{ч}$  является завышенной, а это чревато неоправданным перерасходом энергии. Превышение потребляемой мощности на муфте привода при этом составит  $\Delta N \approx 2200 \text{ кВт}$ , что соответствует повышенному расходу пара на  $\sim 11 \text{ т/ч}$ . В денежном выражении потери предприятия при такой модернизации могут составить более 30 млн. рублей в год.

### **Заключение**

Анализ вариантов модернизации компрессоров технологического воздуха в производстве аммиака показывает, что повышение производительности любой ценой неприемлемо. Оптимальным следует считать вариант, обеспечивающий необходимые параметры назначения с минимальными энергетическими затратами на производство аммиака.

При составлении планов реконструкции производств аммиака необходимо очень аккуратно подходить к выбору параметров назначения турбокомпрессорных агрегатов. Для этого требуется тщательное обследование всего технологического оборудования, расчётный анализ материальных балансов компетентными проектными организациями и получение от них рекомендаций по проведению реконструкции агрегатов [5].

### **Список литературы**

1. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. Л.: «Машиностроение», 1981.
2. Евдокимов В.Е. Банк экспериментальных данных по модельным ступеням и их элементам для проектирования ЦКМ // Турбины и компрессоры. 1997. №3,4.
3. Семаков В.З., Смагоринский А.М., Шамеко С.Л., Гамбургер Д.М. Усовершенствование турбокомпрессорного оборудования – основное направление деятельности НПФ «Энтехмаш»//Труды четырнадцатого международного симпозиума «Производители-потребители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб.,2008.
4. Ковалевский Н.И., Кузьмин В.Е., Спиринов Н.Ю., Чернявский Л.К. Увеличение на 25% производительности компрессора K1290-121-1, задействованного в крупнотоннажных производствах аммиака // Труды четырнадцатого международного симпозиума «Производители-потребители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб.,2008.
5. Рубинчик А.Ф. 70 лет в азотной промышленности // Сборник статей ОАО «ГИАП». М.: «КАЛВИС», 2001.