

Применение математической модели центробежной ступени при проектировании и обработке экспериментальных данных

Ю.В. Дроздов, А.Т. Лунев (ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»)

Разработан программный комплекс, позволяющий проектировать компрессор, максимально соответствующий требованиям технического задания, в том числе при работе на нерасчетных режимах. Расчет параметров проточной части проводится с учетом реальных свойств сжимаемого газа. В разработанной программе использован математически обоснованный алгоритм минимизации. Параметры сменной проточной части, полученные при испытаниях, практически полностью совпали с расчетными на заданных режимах.

Ключевые слова: математическая модель, центробежная компрессорная ступень, сменная проточная часть, программный комплекс.

Application of a mathematical model of a centrifugal stage to design and processing of experimental data

Yu.V. Drozdov, A.T. Lunev

A program complex was developed that allows designing a compressor maximally corresponding to the technical assignment demands, including those relating to non-standard regimes. The parameters of the flow part are calculated taking into account the real properties of the compressed gas. The program uses a mathematically based minimization algorithm. The replaceable flow part parameters achieved at the tests, practically coincide with the calculated for the basic regimes.

Key words: mathematical model, centrifugal compressor stage, replaceable flow part, program complex.

При проектировании центробежных компрессоров и анализе экспериментальных данных в ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» применяется программный комплекс [1], который позволяет создавать компрессор, максимально соответствующий всем требованиям технического задания, в том числе при работе на нерасчетных режимах. Структура программного комплекса приведена на рис. 1.

Как правило, проектирование компрессора заключается в выполнении проектировочного расчета на одном режиме. В то же время совершенство компрессора нередко оценивают согласно требованиям к форме его характеристики [2]. В процессе проектирования имеется возможность относительно произвольного выбора ряда данных, определяющих конструкцию компрессора. К таким данным относятся число ступеней, диаметры и типы рабочих колес и т.п. Различное сочетание этих факторов в значительной степени определяет параметры компрессора на нерасчетных режимах, т.е. его характеристику. Одновременно это означает возможность выбора наилучшего сочетания параметров компрессора, т.е. создания оптимального, с точки зрения выполнения требований конкретного технического задания, компрессора.

Обоснованный выбор методов автоматизированного решения задачи оптимального проектирования компрессора подразумевает рациональное использование как формальных методов нелинейной оптимиза-



Рис. 1. Структура программного комплекса проектирования ступеней

ции, так и возможностей анализа вариантов непосредственно проектировщиком. Целесообразно, чтобы проектировщик имел подготовленное с помощью оптимизации более узкое поле параметров и принимал решения с учетом дополнительных факторов, которые трудно учесть в формальных алгоритмах.

Вместо выполнения проектировочного расчета на расчетном режиме программный комплекс предусматривает итерационную процедуру, заключающуюся в



последовательном решении ряда взаимосвязанных задач синтеза и анализа.

Задачи синтеза сводятся к выбору наилучшего варианта. Обычно требованиям, оговоренным в техническом задании, соответствует множество компрессоров. Получение точных количественных данных при нахождении оптимального решения связано с анализом большого числа вариантов и решением сложной задачи выбора при нескольких критериях качества. Такие задачи можно сформулировать как задачи нелинейной оптимизации. Постановка задачи оптимизации может быть различной. Так, исходя из анализа конкретных требований к параметрам компрессора, можно в качестве функции цели принять один из основных параметров компрессора, а все остальные контролируемые параметры в виде соответствующих условий отнести к функциональным ограничениям. В техническом задании может указываться желаемый вид характеристики. В этом случае в качестве функции цели выбирается критерий соответствия характеристики проектируемого компрессора и характеристики, определенной в задании на проектирование.

В общем случае оптимизация размеров проточной части центробежной ступени выполняется при соблюдении условий получения заданных параметров на нескольких режимах. Можно выполнять оптимизацию и на одном (расчетном) режиме. Например, можно обеспечить максимальный КПД ступени при заданных коэффициентах расхода и напора, а также при требуемом запасе устойчивой работы.

Программный комплекс предоставляет значительную свободу в постановке задач оптимизации проточной части, что позволяет максимально учесть требования конкретного технического задания на проектирование. Переменными при оптимизации могут быть все параметры, входящие в исходную информацию и описывающие проточную часть компрессора. Конкретный набор функциональных ограничений и функций цели определяется пользователем исходя из формулировки задачи оптимизации.

В программном комплексе предусмотрены три алгоритма оптимизации. Первый из них основан на методе Гаусса–Ньютона, использующем частные производные. Два других (алгоритм Нелдера–Мида [3] и статистического поиска [4]) не используют производные. Эти алгоритмы обладают разными свойствами. Выбор используемого алгоритма определяется пользователем исходя из анализа получаемых результатов.

Задачи анализа сводятся к изучению параметров проектируемого компрессора. К этим задачам относится расчет параметров компрессора на заданном режиме его работы или расчет характеристики во

всем диапазоне эксплуатационных режимов. Кроме того, по указанной программе может быть выполнен также одномерный анализ, который позволяет определить характер влияния отдельных размеров проточной части и (или) констант модели компрессора на его выходные параметры.

При расчете отдельных режимов необходимо задать условия, при которых требуется вычислить параметры компрессора. Режим работы компрессора определяется заданием четырех режимных параметров (температура и давление газа на входе, частота вращения ротора, массовый расход). Вместо давления на входе в компрессор может быть задано давление газа на выходе из него, вместо массового расхода – любой параметр, вычисляемый по математической модели (давление на выходе, отношение давлений, различные коэффициенты расхода и т.п.). Массовый расход при смене режимного параметра уточняется в процессе итераций.

При определении поля характеристик задают температуру и давление газа на входе в компрессор, число рассчитываемых веток и соответствующие частоты вращения. Вместо давления на входе в компрессор также может быть задано давление газа на выходе из него.

В обоих вариантах расчета вычисляются параметры компрессора и заполняется массив результатов, в который в соответствии с указаниями пользователя заносятся необходимые для анализа параметры компрессора. Использование сводного массива и системы выбора параметров объясняется тем, что общее число газодинамических параметров, рассчитываемых по математической модели центробежной ступени, достаточно велико, в результате чего их непосредственный анализ весьма затруднителен. Выбранные параметры затем могут быть проанализированы в виде графиков или числовых таблиц.

На экран могут быть выведены графики взаимных зависимостей любых параметров компрессора, рассчитанных по модели, в любых сочетаниях. К ним относятся все основные параметры компрессора в целом и его ступеней, а также параметры потока в контрольных сечениях. Большое число рассчитываемых параметров позволяет подробно анализировать процессы, происходящие в проточной части во всем диапазоне рабочих режимов. Возможность подобного анализа представляется очень важной, поскольку проектировщик не может ограничиваться знанием только суммарных характеристик, а должен достаточно полно представлять, что происходит в каждом элементе компрессора на каждом режиме.

Для решения перечисленных выше задач необходимо иметь достаточно универсальную математичес-

кую модель центробежной ступени. Такая модель может быть построена на основе методики поэлементного поверочного расчета. Основное отличие заключается в том, что методика применима для задач определенного типа, в то время как предлагаемая модель рассчитана на достаточно широкий класс решаемых задач. Математическая модель, предназначенная для решения задач проектирования и доводки, должна обеспечить расчет всех параметров компрессора, которые можно получить при его испытаниях, т.е. модель должна представлять собой информационный аналог компрессора.

В общем случае программный комплекс позволяет рассчитать многовальный многоступенчатый компрессор. При этом каждая ступень может состоять из произвольного числа различных элементов, таких, как входной патрубок, рабочее колесо и т.д. Используемая поэлементная математическая модель позволяет рассчитать параметры компрессора заданной геометрии на произвольном режиме, т.е. решить прямую задачу газодинамики. Отметим, что модель позволяет получить не только параметры компрессора в целом, но и все параметры потока на среднем диаметре в контрольных сечениях за каждым элементом проточной части, что позволяет достаточно полно анализировать процессы, происходящие в проточной части компрессора.

Расчет параметров компрессора выполняется с учетом реальных свойств сжимаемого газа методом Ли–Кесслера, что существенно расширяет возможности программного комплекса [5]. При расчете процесса сжатия по поэлементной модели реальный политропный процесс сжатия в проточной части компрессора аппроксимируется кусочно-политропным процессом. Коэффициенты полезного действия и соответствующие значения показателей политропы для каждого элемента различны и зависят от режима его работы.

В математической модели компрессора наряду с определенными теоретическими представлениями используются результаты обобщения экспериментальных данных по отклонению потока и коэффициентам потерь от газодинамических и геометрических параметров решеток. Для подобных математических моделей, основанных на том или ином упрощенном описании реальных процессов в проточной части, в принципе характерна ограниченная точность расчета характеристик. Имея соответствующий экспериментальный материал, можно построить среднестатистическую модель, однако точность расчета характеристик любых компрессоров в широком диапазоне параметров невысока. Приемлемую точность можно получить, корректируя среднестатистическую модель по результа-

там испытаний той или иной группы ступеней. Основой такого подхода к построению и применению математической модели является идея придания модели определенной гибкости – возможности адаптироваться к конкретным условиям.

Отметим, что основная задача идентификации поэлементной модели по результатам испытаний – не просто получение соответствия расчетной и экспериментальной характеристики ступени или компрессора в целом, а уточнение характеристик элементов компрессора по имеющейся экспериментальной информации. Следует подчеркнуть, что задачи коррекции математической модели по экспериментальным данным (параметрическая идентификация) очень чувствительны даже к небольшим изменениям входных данных. Объясняется это относительным недостатком экспериментальной информации и одновременно значительным числом степеней свободы. Это означает, что объективно существует целое множество решений (т.е. наборов искомых переменных), практически одинаково описывающих имеющиеся экспериментальные данные.

При обработке результатов стендовых испытаний и подробном измерении давлений в сечениях проточной части точность получения характеристик элементов, безусловно, существенно выше, чем при измерении давления в начале и в конце ступени. Однако даже при ограниченном объеме измерений математически обоснованный алгоритм идентификации позволяет получить приемлемые оценки характеристик элементов компрессора.

Известно достаточно большое число методов решения задачи поиска минимума отклонения функций от данных эксперимента, к которой обычно сводится идентификация модели по результатам замеров. Все методы минимизации делят на методы прямого поиска, которые используют только значения функции цели (к ним относятся, например, метод покоординатного спуска, метод случайного поиска и др.), и методы, использующие производные первого или второго порядков. Методам, не использующим производные, как правило, присущее меньшее быстродействие. Методы второго порядка наиболее эффективны, однако требуют дополнительных затрат на вычисление производных.

В используемой программе применяется эффективный и математически обоснованный алгоритм минимизации, обеспечивающий вполне надежное решение данной специфической задачи. Основу алгоритма минимизации составляет метод Гаусса–Ньютона. Необходимые производные определяются численным методом. Отметим, что, поскольку на практике методы



минимизации, основанные на производных, часто оказываются весьма чувствительными к ошибкам вычисления частных производных, при программировании математической модели большое значение имеет обеспечение равномерности протекания всех основных газодинамических процессов в компрессоре.

Реализованный алгоритм содержит ряд усовершенствований, улучшающих сходимость процесса минимизации. Например, введены пределы изменения варьируемых переменных модели. Матрица нормальных уравнений (МНУ) масштабируется, что позволяет в определенной степени выровнять влияние переменных. Решение, полученное после обращения МНУ, уточняется одномерным поиском, основанным на использовании чисел Фибоначчи. Алгоритм поиска минимума дополнен так называемым «овражным» алгоритмом, суть которого состоит в повторении локальных спусков и постепенном продвижении вдоль узких «оврагов». В случае решения плохо обусловленных задач большую роль играет регуляризация решения, которая обеспечивается введением в исходную функцию цели дополнительной компоненты, величина которой пропорциональна удалению от начального приближения. Как и невязки между расчетными и измеренными параметрами, эта дополнительная компонента входит в исходную функцию со своим «весом». Найденные значения исходных переменных оцениваются с точки зрения погрешности их определения. Переменные, вычисляемые с погрешностью выше заданной, не изменяют своих значений («вычеркиваются»).

Набор варьируемых переменных модели в конкретной задаче идентификации определяется пользователем. В качестве экспериментальных данных используются осредненные результаты измерений параметров потока в контрольных сечениях проточной части. Соответствующие расчетные значения параметров модели, используемые при вычислении невязок, считаются из массивов-результатов, заполняемых после просчета по модели.

Среднестатистическая модель получена обобщением экспериментальных данных, охватывающих следующие диапазоны основных безразмерных параметров: $M_u \leq 1,2$; $Re_u \geq 10^4$; $\Phi_0 = 0,01 \dots 0,15$; $\psi^* = 0,35 \dots 0,65$. Максимальная погрешность расчета характеристики по исходной среднестатистической модели не превышает обычно 3–5% по напору. В процессе идентификации модели по результатам испытаний конкретного компрессора величина этой погрешности может быть снижена до 1–2%.

Примером применения программного комплекса может служить проектирование сменной проточной части (СПЧ) 16/76-1,36, предназначеннной для модер-

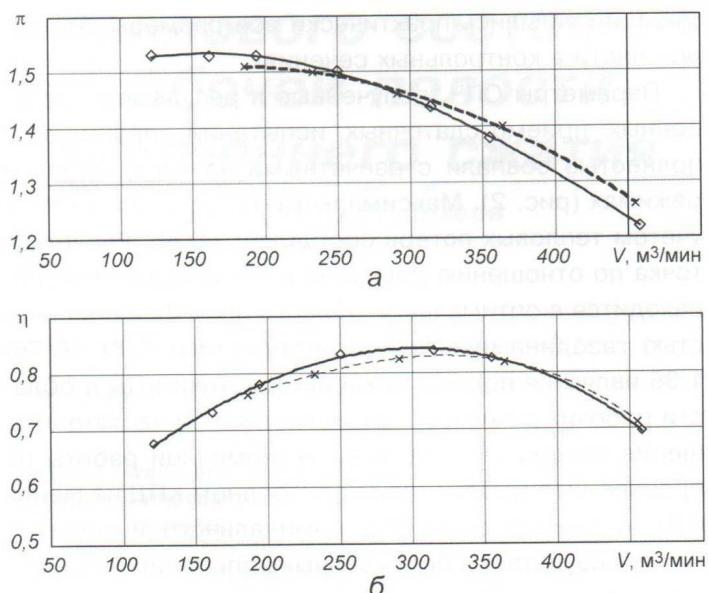


Рис. 2. Характеристики СПЧ 16/76-1,36 на воздухе при $t_h = 20^\circ\text{C}$; $p_h = 0,1 \text{ МПа}$; $n = 4472 \text{ об/мин}$:
а – $\Pi = f(V_h)$; б – $\eta = f(V_h)$; — — расчет; - - - эксперимент

низации центробежного нагнетателя мощностью 16 МВт (короткий корпус) производства ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» для компрессорной станции «Верхне-Кызылская» ООО «Тюменьтрансгаз»[6].

Техническим заданием были определены требования к параметрам нагнетателя одновременно на трех режимах его работы: зимнем, номинальном и летнем. Для каждого режима были заданы начальное и конечное давление газа, температура на входе в СПЧ и минимально допустимый уровень КПД. Кроме того, на номинальном режиме была задана частота вращения ротора и значение потребляемой мощности. На дополнительных режимах были ограничены значения частоты вращения ротора и соответственно максимальные потребляемые мощности. Ко времени разработки СПЧ был спроектирован ряд ступеней для нагнетателей газоперекачивающих агрегатов, имеющих рабочие колеса с пространственными лопатками. Эти ступени были экспериментально исследованы и имели достоверные характеристики, что позволило выполнить идентификацию математической модели. Уточненная модель была использована при поиске оптимальных размеров ступеней.

Как упоминалось, программный комплекс представляет значительную свободу в постановке задач оптимизации проточной части. В данном случае оптимизация размеров проточной части выполнялась при соблюдении всех условий получения требуемых параметров СПЧ одновременно для трех заданных режимов и обеспечении необходимых запасов устойчивой работы. Варьируемыми параметрами при опти-

мизации являлись практически все размеры проточной части в контрольных сечениях.

Параметры СПЧ, полученные в результате проведенных приемо-сдаточных испытаний, практически полностью совпали с расчетными на всех заданных режимах (рис. 2). Максимальный политропный КПД с учетом тепловых потерь составляет ~0,85. Расчетная точка по отношению давлений и производительности находится в оптимальной области по КПД. Особенностью газодинамической характеристики СПЧ 16/76-1.36 является пологость характеристики КПД в области рабочих режимов. При номинальной частоте вращения ротора ширина зоны экономичной работы по производительности (при политропном КПД не менее 0,8) составляет около 50% номинального значения.

По результатам проведенных испытаний и при пересчете их на реальные условия можно констатировать, что СПЧ-16/76-1.36 соответствует своему назначению и обеспечивает все заданные режимы эксплуатации.

Данный программный комплекс реализует, по нашему мнению, весьма универсальный подход к проектированию компрессоров и представляет удобный инструмент проектировщика. Предполагается дальней-

шее развитие комплекса и, в первую очередь, совершенствование математической модели центробежной ступени на основе результатов экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Афанасьев Б.В., Дроздов Ю.В., Лунев А.Т., Солтеев П.В. Методы исследования многовальных многоступенчатых компрессоров с помощью математической модели в процессе проектирования//Компрессорная техника и пневматика. 2002. № 1.

2. Завальный П.Н., Ревзин Б.С., Тарасов А.В. К оптимизации характеристик нагнетателей природного газа для компрессорных станций газопроводов//Труды 4-го междунар. симпоз. «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования». СПб.: СПбГТУ, 1998.

3. Химмельбаум Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975.

4. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979.

5. Дроздов Ю.В., Лунев А.Т. Учет реальных свойств сжимаемого газа в поэлементной модели центробежной ступени//Проектирование и исследование компрессорных машин: Сборник науч. трудов. ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». Вып. 5. Казань: 2004.

6. Афанасьев Б.В., Дроздов Ю.В., Лунев А.Т., Хисамеев И.Г., Хуснутдинов И.Ф. Особенности газодинамических расчетов смешных проточных частей для газодинамических агрегатов с отношением давлений 1,36//Труды XIV Междунар. науч.-техн. конф. по компрессорной технике. Т. II. Казань: Издво «Слово», 2007.



Девятая международная специализированная выставка **Криоген-Экспо**

9-11 ноября 2010, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР», пав. 5

Организатор:



ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ:

- Криогенное оборудование
- Гелиевое оборудование
- Вакуумное оборудование
- Холодильное и компрессорное оборудование
- Микрокриогенная техника
- Сжиженный природный газ
- Промышленные и редкие газы
- Применение криогенных технологий в промышленности
- Системы безопасности
- Водородные технологии
- Применение криогенных технологий в медицине и биологии, научно-технических исследованиях
- Емкости для хранения и транспортировки
- Метрология и средства измерения при низких температурах
- Комплектующие, вспомогательное оборудование, системы управления и программное обеспечение
- Сертификация и технические регламенты в криогенной отрасли
- Система образования и кадровое обеспечение

Проводится при содействии:

- Международного института холода
- Международной академии холода
- Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»

В рамках выставки проводятся СПЕЦИАЛЬНЫЕ САЛОНЫ:

- ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГАЗЫ
- ГЕЛИЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА

7-я международная научно-практическая конференция: «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития»

2-ой семинар: «Опыт учебной работы Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана по подготовке инженеров в области криологии»



Дирекция 115533, Москва, пр. Андропова, 22

выставки: Тел./факс: 8 499 618-05-65, 8 499 618-36-88

E-mail: info@cryogen-expo.ru | Сайт: www.cryogen-expo.ru

КРИОГЕН-ЭКСПО НА РУССКОМ:

www.cryogen-expo.ru

CRYOGEN-EXPO IN ENGLISH:

www.cryogen-expo.com



CRYOGEN-EXPO IN ENGLISH:

www.cryogen-expo.com

CRYOGEN-EXPO IN ENGLISH:

www.cryogen-expo.com