

УДК 621.512



Д-р техн. наук, проф.
П.И. ПЛАСТИНИН

Исследование поршневых компрессоров на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника»

Исследования и разработка поршневых компрессоров на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» (Э5) проводились под руководством профессоров В.Д.Лубенца и П.И.Пластинина. В статье рассмотрены только результаты научно-исследовательских работ, выполненных впервые в России (СССР), которые имеют научную новизну и принципиальное значение для развития компрессоростроения.

Данная обзорная публикация, приуроченная к 40-летию кафедры Э5 МГТУ им. Н.Э.Баумана, является логическим продолжением юбилейной статьи К.Е.Демидова и П.И.Пластинина «Подготовка специалистов и научные школы кафедры», опубликованной в журнале «Холодильная техника» № 2 за 2001г.

Сильфонные поршневые компрессоры стали первой научно-исследовательской разработкой в этой области после выделения кафедры Э5 из кафедры «Холодильные и компрессорные машины и установки» в 1961 г. (А.Н.Волчков). Работа носила пионерский характер, так как микромашин подобного типа тогда не существовало. Был проведен анализ основных электромагнитных и механических схем герметизации рабочей полости цилиндра, который показал, что наиболее эффективно герметизацию на существовавшем уровне развития техники и технологии можно осуществить при помощи сильфона. Были созданы экспериментальные установки, позволившие исследовать основные потери в поршневом микрокомпрессоре, связанные с утечками через поршневое уплотнение, потери на механическое трение и потери от дросселирования газа в органах распределения. В результате предложена оригинальная конструкция компрессора с сильфонной схемой герметизации и создан поршневой микрокомпрессор К-1 с сильфонным уплотнением рабочей полости. В ходе этой работы был уточнен метод расчета гидроформованного сильфона с учетом переменной толщины стенки и усовершенствован расчет торообразных оболочек методом степенных рядов, проведено экспериментальное исследование напряженного состояния тонкостенного металлического сильфона в специфических для микрокомпрессоров условиях работы. Компрессор К-1 был внедрен в производство на Сумском насосном заводе.

Математическая модель поршневого компрессора была разработана впервые в СССР в конце 60-х — начале 70-х годов П.И.Пластининым и А.К.Твалчрелидзе. Модель описывала работу многоступенчатого компрессора с цилиндрами двойного действия и впервые позволила смоделировать индикаторные диаграммы действительного компрессора, а также получить зависимости производительности, потребляемой мощности и удельного расхода энергии от его основных размеров и параметров. С ее помощью была решена задача оптимизации основных геометрических размеров многоступенчатых поршневых компрессоров и определены принципиально новые положения:

- с увеличением числа оборотов коленчатого вала оптимум удельного расхода энергии становится более ярко выраженным;
- оптимальные значения отношения хода поршня к диаметру цилиндра двух- и многоступенчатых компрессоров значительно отличаются от значений таковых для одноступенчатых машин.

Эти положения обусловили развитие конструкций поршневых компрессоров на несколько десятилетий не только в СССР, но и за рубежом. Разработанная математическая модель многоступенчатого поршневого компрессора используется до сих пор.

Дальнейшие исследования поршневых компрессоров на кафедре были в основном связаны с совершенствованием математических моделей происходящих в них процессов и с созданием уникальных конструкций.

Регенеративный характер теплообмена между газом и стенками цилиндра был принят при разработке математической модели поршневого компрессора, что позволило принципиально по-новому подойти к проектированию быстроходных поршневых компрессоров, а именно выполнить цилиндры без охлаждения.

Межступенчатое охлаждение газа исследовалось с точки зрения взаимодействия ступеней сжатия и межступенчатых теплообменников. Была разработана математическая модель поршневого компрессора общего назначения, позволявшая имитировать «входные» и «выходные» параметры межступенчатого теплообменника и определить их влияние на экономичность компрессора. При помощи численного эксперимента на модели была выявлена зависимость между удельным расходом энергии в компрессоре и основными параметрами работы межступенчатого теплообменника. По разработанной методике был спроектирован и изготовлен новый холодильник для серийно изготавливавшегося компрессора 2ВМ4-24/9.

Влияние коротких трубопроводов на работу поршневых компрессоров было изучено в связи с отсутствием методов их расчета и невозможностью использовать в этом случае разработанные методы газодинамики неустановившихся потоков. Предложена методика расчета колебания давления в полостях, соединенных коротким трубопроводом, основанная на инерционном движении столба газа в этом трубопроводе.

Оценка ненаблюдаемых параметров работы компрессора была следующей областью применения разработанных на кафедре математических моделей поршневых компрессоров. Известно, что коэффициенты расхода и теплоотдачи в ходе рабочих процессов меняются. Методика определения значений этих величин в динамике отсутствовала. На кафедре был проведен комплекс исследований по

оценке значений динамических коэффициентов расхода и теплоотдачи от газа к стенкам цилиндра, получаемых из математической модели путем идентификации динамики рабочего процесса. Разработка принципиально новой математической модели с использованием динамических коэффициентов позволила с достаточной степенью точности моделировать изменение температуры газа внутри рабочей полости цилиндра.

Экспериментальное определение полей температур рабочих полостей поршневых компрессоров с цилиндрами двойного действия диаметром от 125 до 620 мм позволило задавать граничные условия при разработке математических моделей для компрессоров этого типа.

Неплоскопараллельное движение пластины кольцевых клапанов впервые в России было исследовано на кафедре Э5. Трехмерная модель движения пластины кольцевого клапана как системы с распределенными параметрами позволила исследовать влияние неоднородностей как внутренних (неоднородности самого клапана), так и внешних (неоднородности потока) на движение клапанной пластины. Было доказано, что пластина кольцевого клапана может двигаться неплоскопараллельно. При таком движении возникает эффект «хлыста», значительно увеличивающий скорость удара пластины о седло. Кроме того, наклонное движение пластины может привести к увеличению запаздывания закрытия клапана, т.е. к ухудшению объемных и энергетических характеристик компрессора.

Исследование объемных компрессоров с внутренним теплоотводом (с впрыском жидкости) было проведено совместно кафедрой Э5 и Омским политехническим институтом. Математическая модель рабочих процессов поршневого компрессора с впрыском жидкости как в рабочую полость, так и во всасывающий трубопровод позволила определять изменение термодинамических параметров газовой и жидкостной фаз рабочего тела. Были получены основополагающие для последующего развития машин этого типа выводы:

- увеличение количества впрыскиваемой жидкости, уменьшение ее дисперсности и температуры уменьшают индикаторную мощность, но увеличивают потери мощности в газораспределительных органах и затраты мощности на впрыск жидкости, что обуславливает наличие оптимальных соотношений между параметрами впрыскиваемой жидкости;

- уменьшение производительности компрессора при впрыске жидкости непосредственно в цилиндр вызвано увели-

чением продолжительности процесса расширения, несмотря на интенсивное охлаждение всасываемого газа;

- экономичность компрессора увеличивается при впрыске жидкости, имеющей прежде всего низкую плотность и затем высокую теплоемкость и теплоту парообразования;

- интенсивное охлаждение сжимаемого газа путем впрыска жидкости позволяет увеличить относительное повышение давления в ступени компрессора до 8–9, при этом индикаторный изотермический КПД имеет максимальное значение;

- с увеличением частоты вращения коленчатого вала эффективность впрыска жидкости уменьшается.

В связи с этим была разработана методика расчета оптимальных количеств впрыскиваемой слабоиспаряющейся жидкости, обеспечивающих максимальную производительность и КПД компрессора, а также общая методика расчета поршневого компрессора с внутренним теплоотводом. Впоследствии эти исследования были положены в основу докторской диссертации В.Е.Щербы.

Исследования технического уровня компрессорных машин, проводившиеся на кафедре, позволили разработать методы объективной оценки эффективности и качества компрессоров, не зависящие от субъективного выбора аналога. Эти методы дают возможность сравнивать компрессоры различных типов и определять области наиболее эффективного применения компрессорных машин конкретного типа. Разработанная на этой основе методика аппроксимации неизвестной формы взаимосвязи переменных на ЭВМ используется в настоящее время для решения многих инженерных и экономических задач. Были предложены также методики определения параметрической совместимости компрессорных машин и принципиально новый метод вероятностной комплексной оценки технического уровня с учетом всех известных, выпускаемых в мире компрессорных машин. Это позволило установить обоснованные сроки переаттестации компрессоров.

Система разработки математических моделей объемных компрессоров с использованием библиотек каркасов и модулей, предложенная П.И.Пластиным и Ф.Н.Смирновым, отвечает требованиям безболезненности изменения структур и составляющих модулей. При этом понимается, что изменения программного продукта безболезненны, если они не нарушают работоспособности отлаженных ранее версий программы, сопроводительной документации и не влекут за со-

бой необходимости изменения окружения (существующих текстов программ и других первичных документов). Предусмотрено, что сборка программы для конкретной математической модели будет осуществляться посредством диалога пользователя с так называемым конфигуратором программ, во время которого пользователь задает исходные данные для расчета, а конфигуратор предлагает набор необходимых модулей и каркасов с учетом их совместимости и после одобрения пользователем — компоновку программы. В рамках этих работ был предложен язык образования идентификаторов физических величин и модулей. Исследования по созданию системы продолжаются.

Автоматизированная система измерений, сбора, хранения и обработки параметров поршневого компрессора (АСИ ПК), созданная на кафедре, была первой в России. АСИ ПК соответствует требованиям ГОСТа и норм ISO. Она дает возможность автоматизировать экспериментальное исследование быстроменяющихся давлений в рабочих полостях компрессора и динамики движения запорных органов самодействующих клапанов. Контроль параметров осуществляется с дистанционного пульта управления, расположенного в отдельном помещении. Разработанное программное обеспечение позволяет использовать АСИ ПК в составе сети ЭВМ. Параметры компрессора могут быть выведены на экран монитора и представлены в виде мнемосхемы, протокола, графиков и диаграмм.

Исследования поршневых компрессоров с управляемым законом движения поршня показали принципиально новое направление их совершенствования. Предсказанный ранее путь в этом направлении (разработка новых механизмов движения), был реализован русским изобретателем В.А.Конюховым. Исследования, проведенные на кафедре, показали, что существуют такие законы движения поршня, при которых значительно снижаются потери энергии в клапанах, и что имеются пути дальнейшего повышения КПД компрессора с управляемым законом движения поршня.

Более подробную информацию о приведенных в статье исследованиях и разработках, а также о библиографических источниках, в которых опубликованы их результаты, можно получить в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре «Вакуумная и компрессорная техника» по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, факультет «Энергомашиностроение», кафедра Э-5. Тел. (095) 263-68-75.