

## Подходы к дальнейшему прогнозированию развития холодильных компрессоров с применением анализа надсистемных требований

С.Л. Горобченко, к.т.н.,  
г. Санкт-Петербург

Как техническая система (ТС) компрессор родился на стыке двух основных требований: обеспечить перекачку рабочей среды и обеспечить требуемый уровень давления. Эти два надсистемных требования дали жизнь компрессору в качестве технической системы. Как отдельные требования, обслуживаемые отдельными элементами системы, несводимыми друг к другу, они создали ключевое противоречие в технической системе. Это основное противоречие при своем развертывании начало создавать и различные формы и виды компрессоров.

Имея две качественные части одного целого - производительность и давление - технической системе был дан толчок к развитию множества форм удержания этого содержания в рамках одной ТС - компрессора. В результате появилось множество видов компрессоров (рис.1).



Рис. 1. Структурная схема технической системы "компрессор"

В составе ключевого противоречия ТС компрессора его производительность отражает количественную сторону развития технической системы, тогда как уровень давления - качественную. Их взаимодействие и требование более высокого порядка - обеспечение потребностей надсистемы в перекачке разных объемов среды - создавало условия для развития ТС в целом, тогда как противоречивость взаимодействия двух различных характеристик самой технической системы (производительности и степени давления) создавала множество меняющихся форм компрессоров.

Собственно развитие количественной характеристики - производительности - раскладывается на две составляющие - объемную производительность, создаваемую за счет различных форм организации пространства давления в рабочем органе компрессора - объемной полости цилиндра - поршня, и динамическую, создаваемую скоростью движения того же поршня или лопатки в этом рабочем объеме. Таким образом, они неразделимы, но каждый из них дает свой вклад в общий ход развития компрессоров при устранении возникающих противоречий.

Диалектический метод предписывает нам начинать анализ с первой, непосредственной и простой формы вещи (технической системы) с целью выявления ее наиболее существенных черт и ее внутреннего самодвижения. Такой первой формой компрессора, в котором наиболее ясно начало проявляться противоречие между указанными выше двумя качествами производительности (объемной и динамической составляющей производительности), и, которое в дальнейшем подлежало развертыванию, стал поршневой компрессор. На его примере мы рассмотрим как происходило внутреннее движение характеристик, определяемых надсистемными требованиями роста производительности.

### ПРИМЕР. Поршневой компрессор

Рассмотрим, как требования надсистемы в развитии производительности отразились на развитии поршневых компрессоров (ПК). Теоретически производительность ПК ( $V_{км}$ ) можно повысить, увеличивая теоретический объем цилиндров ( $V_{ц}$ ) и число оборотов двигателя ( $n$ ):

$$V_{км} = V_{ц} \times n \quad (1)$$

Роста объемной производительности ( $V_{ц}$ ) можно добиться путем увеличения диаметра цилиндра ( $D_{ц}$ ), хода поршня ( $S$ ) и увеличением количества цилиндров ( $Z$ ):

$$V_{ц} = n \sqrt[4]{D_{ц}^2 \times S \times Z} \quad (2)$$

Но каждый из этих путей имеет свои ограничения, поскольку увеличение диаметра цилиндра и хода поршня приводят к росту протечек, увеличению габаритов компрессора и необходимости уменьшения скорости поршня из-за роста сил инерции, а рост числа цилиндров также ограничен из-за нетехнологичности таких компрессоров, трудностей сборки – разборки, больших габаритов и т.п.

Как видно, основные параметры могло быть увеличено лишь до определенного предела. Наиболее существенное увеличение производительности могло быть достигнуто в основном увеличением числа оборотов. Здесь мы впервые видим как начинает превалировать не статичная - объемная составляющая производительности, а динамическая, формируемая за счет роста скорости (числа циклов сжатия).

Но для ПК увеличение числа оборотов приводило к быстрому снижению надежности из-за большого роста инерционных сил и износа. Максимальная экономически обоснованная производительность ПК соответствует значению несколько выше 120кВт, средняя скорость поршня составляет 4м\с. Попытка увеличивать объем цилиндра, как единственного способа повышения производительности без повышения числа оборотов привела к появлению настоящих монстров – крейцкопфных компрессоров.

Таким образом, ни увеличивая теоретический объем цилиндров, ни повышая скорость поршня нельзя было добиться интенсивного роста производительности. Это начало тормозить дальнейшее развитие компрессоров и вошло в противоречие с общей тенденцией к росту их производительности. Необходимо было при увеличении производительности добиться более низкого давления всасывания и удовлетворительной работы клапанов ПК или полного отказа от собственно ПК, как одного из видов ТС компрессора, поскольку он исчерпал свои возможности.

Одним из важных следствий стало то, что впервые главным содержанием развития технической системы компрессора стало увеличение его производительности. Именно эта количественная характеристика начала преобладать над достаточно статичной второй качественной стороной - характеристиками давления. Рост скорости движения поршня, отражающий динамическую сторону производительности, в дальнейшем, уже внутри собственно характеристики производительности, начал довлеть над характеристиками повышения объема полости поршня. Причиной тому стали ограничения, связанные, в основном, с проявлением физических противоречий (вибрация, массивные фундаменты и пр.). Этот важный момент показывает, что система исчерпывает свои возможности, доходя до наиболее серьезных и непреодолимых ограничений - в нашем понимании физических противоречий (не технических). Как известно, преодолеть физические законы невозможно в рамках неизменяющихся систем.

Проведенный нами анализ последующих форм компрессоров (ротационно-поршневых, винтовых, центробежных и осевых) показал, что довлеющая роль динамической составляющей производительности - скорости движения поршня (винтов в винтовых компрессорах, лопастей центробежного компрессора, лопаток осевого компрессора) по сравнению со статичной составляющей - объемом полости поршня (объемной полости между винтами, объема сжатия в центробежных и осевых компрессорах) - проявилось и повторилось на всех последующих этапах развития компрессоров.

Эта довлеющая роль динамической составляющей производительности проявилась в действии законов, способствующих росту динамичности. Проявилось и явное противоречие. Система внутреннего саморазвития стала все более динамичной, и сам принцип объемного сжатия должен был все более соответствовать этому закону. Неравномерность развития частей системы должна была быть преодолена за счет динамизации собственно объемного принципа сжатия. Стало ясно, что для повышения производительности необходимо избавиться от присущих объемному сжатию недостатков, которые в целом являлись следствием наличия возвратно-поступательного движения.

Также в процессе анализа стало ясно, что исчерпание ресурсов развития одной формы ТС и переход к новым ее формам, за счет возникновения и проявления новых надсистемных потребностей в новых конструкциях компрессоров наиболее часто происходило при подходе ее к неразрешимым физическим, уже не техническим противоречиям.

Надсистема постоянно проявляла свое незримое влияние, подавляющее действие которой на развитие технической системы, например, на развитие винтовых компрессоров (ВК), проявилось в длительном сроке ввода их в жизнь. Так, показательно, что, несмотря на то, что принцип работы ВК был известен с 1878г., широкое использование ВК началось лишь с 40-х-50-х годов 20-го века, когда возникла реальная потребность в больших удельных объемах перекачки среды, а расчетные показатели можно было обеспечить дополнительными элементами, например, электроприводами. Таким образом, хотя предпосылки к появлению ТС были уже давно, реальная жизнь этой ТС началась только тогда, когда надсистема сказала "да" и были созданы соответствующие для возникновения ТС условия.

Наш анализ показал и следующее: надсистемные требования довлеют над собственным саморазвитием системы. Можно отметить, что обнаружилась более прямая корреляция надсистемных требований роста производительности с ведущей ролью динамической составляющей роста производительности внутри ТС (числа движений поршня ПК или скорости вращения роторов ВК) по сравнению с ростом производительности через увеличение объемной ее составляющей (объемной производительностью).

Таким образом, несмотря на то, что при диалектическом подходе мы должны исходить из развития внутренних противоречий ТС, обусловленных ее саморазвитием, самодвижением ее параметров, но в тоже время, как мы видим, истинное ее развитие в своей глубине обусловлено надсистемными требованиями. Так, переход к новым конструкциям компрессоров даже внутри одного объемного принципа сжатия происходил по ветке роста динамической производительности, обусловленного требованиями надсистемы. Так, этот толчок надсистемы оказался наиболее плодотворным при переходе от объемного к динамическому принципу сжатия, и проявился в новых поколениях компрессоров, полностью избавившихся от неразрешимых в принципе объемного сжатия таких проблем как вибрация, массивность фундаментов и пр.

### Кризис механического принципа сжатия

На этапе исчерпания возможностей развития ТС, разрешение проблемы, связанной с отставанием ТС от требований надсистемы, находят в усложнении обслуживаемых систем. Так, повышение скорости вращения привода компрессоров, может быть найдено в переходе к газу или паротурбинному приводу и отказу от электропривода. Это еще более усиливает зависимость компрессора от привода, сделав его лишь частью более общей системы «привод - компрессор». В этом случае развитие компрессора будет еще в большей степени зависеть от тенденций развития системы «привод - компрессор».

Физическими противоречиями, ставшими на пути развития компрессоров, стало достижение пределов прочности используемых материалов (даже для титановых лопаток - не более 450 м\с). Кроме того, внешней по отношению к ТС компрессора является проблема нецелесообразности превышения газом звукового барьера (ограничение по числу Маха), т.к. всецело зависит от газодинамических свойств рабочего вещества, а не от компрессора. Поэтому, в целом, применение какого-либо нового принципа сжатия на основе дальнейшего увеличения скорости ротора не приведет к коренному улучшению показателей ТС компрессора, его производительности, но еще более обострит проблемы, не зависящие от самого компрессора.

Наиболее точно «остановку» развития компрессоров можно увидеть на графике связи производительности компрессоров с окружной скоростью (рис. 2).

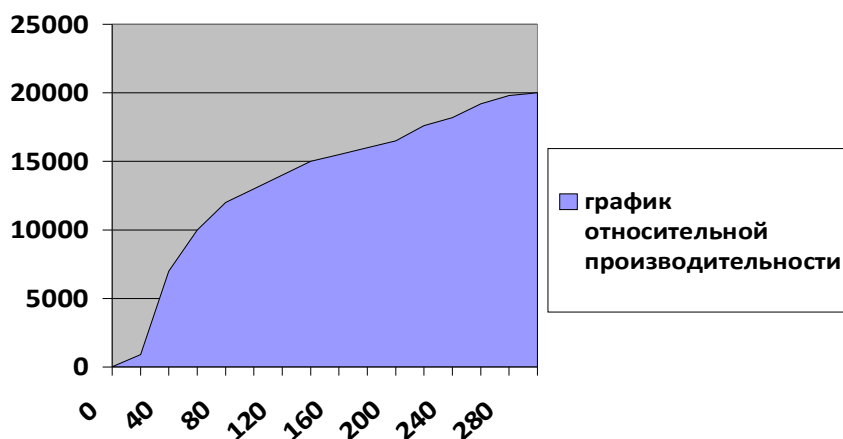


Рис. 2. Зависимость производительности компрессоров от окружной скорости вала: по оси x – окружная скорость, м\сек; по оси y – производительность, кВт

Если на первых порах соотношение производительности к окружной скорости росло высокими темпами, то при подходе к рубежу 200-300 м\с оно практически перестало расти. Таким образом, главный способ повышения производительности компрессоров близок к своему исчерпанию. Но ограничение скорости вращения ротора, повышение которой, как мы убедились, является основным

фактором развития «компрессорного» принципа сжатия, приводит к ограничению самого принципа сжатия, т.е. к его исчерпанию. После осевых компрессоров и их модификаций никаких революционных жизнеспособных конструкций компрессоров, основанных на объемном и динамическом принципах сжатия, не появилось.

Необходимость отказа от принципа сжатия рабочего вещества приводит в долгосрочной перспективе и к отказу от использования рабочего вещества и переходу к другим принципам работы. Начало решения этой проблемы было положено с появлением новых систем, заменяющих компрессор, например, при использовании термоэлектрического принципа охлаждения в холодильных машинах. Этот принцип позволил полностью отказаться от всякого механического вращения элементов. Тем самым компрессоры были избавлены от проблемы прочности используемых материалов и недостатков рабочих тел. Это знаменует собой переход к более высокому уровню непосредственного охлаждения в холодильных машинах, переходу с макро на микроуровень, а именно от рабочего вещества – газа к электронному газу.

Здесь интересно будет привести аналогию с развитием энергетических машин от поршневых двигателей до газовых турбин. По сути, энергетика является отраслью - лидером по отношению ко многим другим отраслям. Тенденции развития энергетических машин можно считать ведущими по отношению к компрессорным машинам и установкам. В настоящее время в этой отрасли пытаются найти переход от турбин к МГД – генераторам, рис.3.

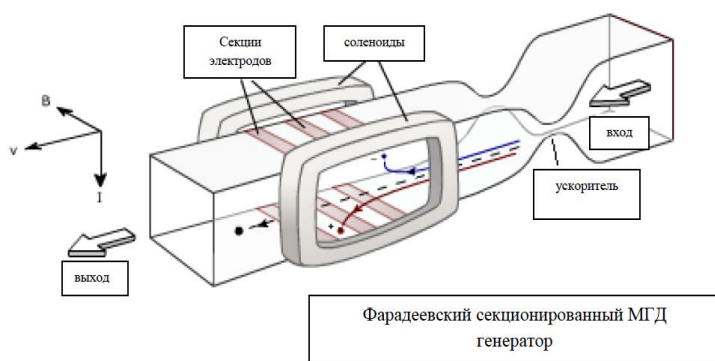


Рис. 3. Схема МГД генератора

Суть их так же, как и в переходе к термоэлектрическому охлаждению, состоит в непосредственном получении электроэнергии (холода в термоэлектрическом охлаждении) из другого ее вида (химической в энергетике и электроэнергии в термоэлектрическом охлаждении), минуя промежуточные стадии - турбину или компрессор. Понятно, что компрессор при этом как техническая система исчезает. Уже существуют конструктивные наработки МГД ускорителя, способного развить подачу газа до 25М, что равносильно первой космической скорости. Выдаваемая мощность при этом может составить до 1000 МВт. Расчетный КПД может составлять до 60%.

Перспективные конструкции на основе МГД принципа разрабатываются и для систем подачи газа. В них ионизированный газ будет разгонять частицы газа, и обеспечивать его сжатие. Прогнозируемые производительность и КПД также находятся на высоком уровне. Обратим внимание, что здесь произошел качественный скачок также от механического принципа сжатия газа (макроуровень) к использованию разгона газа ионизированными частицами этого же газа (переход на микроуровень).

Таким образом, основное влияние на изменение конструкций компрессоров оказывает растущая надсистемная потребность в перекачке больших объемов газа и соответствующая ей потребность в больших производительностях компрессоров. Именно производительность являлась движущей силой в переходе от одних принципов сжатия к другим и, в конечном итоге, также послужит и переходу от принципа механического сжатия к принципу магнитогидродинамического сжатия. Другие причины, такие как необходимость в росте КПД и других показателей эффективности, оказались важны для развития компрессоров только в рамках собственного типа сжатия (объемного или динамического).

Для целей нашего прогнозирования важным является исчерпание принципов механического сжатия и необходимость его замены на другие принципы, использующие большую энергию малых частиц. Обобщим тенденцию развития компрессоров (рис.4).

Изменение принципов сжатия, приведенное на схеме, также как и самодвижение внутри каждого отдельно взятого принципа сжатия и форм ТС компрессоров происходит закономерно. При приближении к границе возможностей той или иной конструкции, а вместе с ними и к границе более общего принципа сжатия происходит качественный скачок и переход к новым формам ТС, а в случае невозможности удовлетворить ими растущие потребности в производительности или холоде - к новым

принципам сжатия. Диалектический, скачкообразный (лестничный) характер развития, где исчерпание возможностей предыдущей формы ТС рождает необходимость и появление новых более совершенных ТС – налицо.

Как целое, компрессоры включают в себя ту или иную арматуру и, соответственно, определяют их развитие как своих подсистем. Мы выделили главную тенденцию развития компрессоров и их главную движущую силу – необходимость роста производительности, которая сопровождается скачкообразным изменением конструкций компрессоров. Эта же тенденция определила и основные пути развития арматуры для компрессоров, поскольку целое определяет и требования к частям или, другими словами: «всеобщее должно показать дорогу частному».

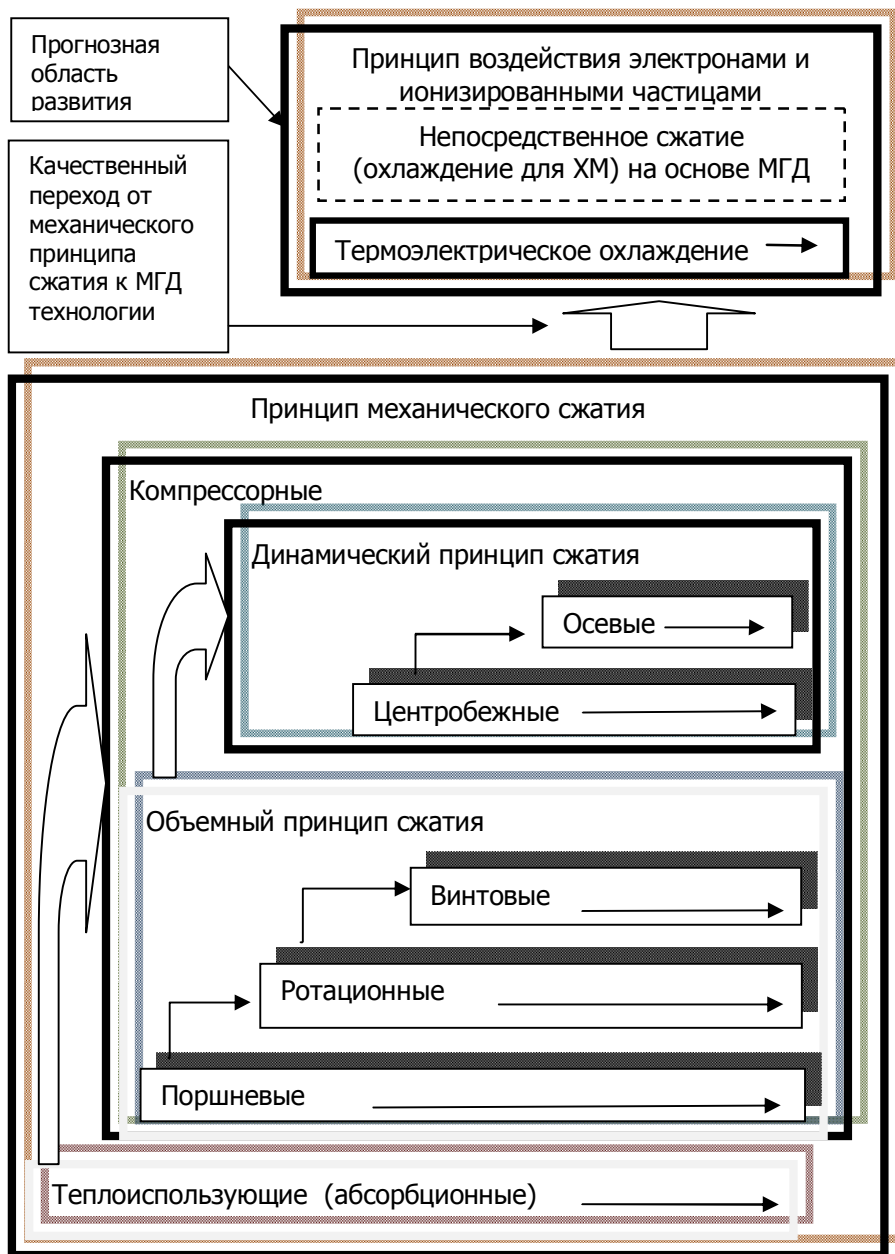


Рис. 4. «Лестница» развития компрессоров и переход к новым принципам сжатия. Стрелками показаны переходы и линии развития.

Обеспечение соответствия высокой производительности в компрессорах для арматуры в большей степени связано с требованием обеспечения высокой пропускной способности при ее больших номинальных диаметрах, как соответствующих большим расходам газа или большой производительности компрессоров. В большей степени этому отвечает полнопроходная поворотная арматура. Можно спрогнозировать, что при повышении производительности всегда будет ожидать переход от традиционных вентилях с малой пропускной способностью к полнопроходной арматуре с максимальной пропускной способностью. Это будет обеспечиваться в первую очередь полнопроходными шаровыми кранами.

Из нашего рассуждения можно сделать некоторые выводы:

1. Принцип компримирования на основе механического объемного или динамического сжатия исчерпал себя. За последнее время не появилось новых конструкций компрессоров, а развитие в основном получают подсистемы, служащие только внутреннему совершенствованию компрессоров, но не резкому росту их характеристик как технической системы в целом.
2. Главной движущей силой в развитии ТС компрессоров, одновременно являющейся и главным надсистемным требованием, является рост производительности. Именно она определяет изменение конструкций в соответствии с требованиями надсистемы. Остальные параметры относятся к внутреннему совершенству ТС, не влияющих на переходы от одной формы ТС компрессора к другим.
3. Диагностическим моментом перехода в надсистему является развитие обслуживающих систем, втягивающих в себя непосредственно рабочую систему как показано в примере перехода от главной роли компрессора к системе "турбинный привод - компрессор".
4. Общей схемой, отражающей ход развития ТС компрессора под давлением надсистемных требований роста производительности, является переход от объемного принципа сжатия к динамическому с одновременным переходом рабочих органов от макроуровня к микроуровню. Переходы отражают переход количественных характеристик в качественные - появление новых форм и видов компрессоров, довлеющую роль динамической составляющей при борьбе двух основных сторон производительности ТС и повторяемый характер появления рабочих органов на микроуровне в ТС компрессора.
5. Прогнозируемую максимальную эффективность в ТС сжатия газа в дальней перспективе будут занимать рабочие тела в виде ионизированных частиц газа по МГД технологии.
6. Истинные ограничения в развитии ТС компрессора происходили при подходе их к физическим противоречиям, неустранимым в рамках конкретного принципа сжатия. Форматы объемного и динамического сжатия создавали возможности для конструктивных исполнений в рамках одного принципа сжатия. Сам же принцип сжатия ограничен физическими законами, лежащими в его основе и возможностями материалов.
7. Как видно, наиболее сильные требования надсистемы в преобразованном виде добираются до такого достаточно удаленного от нее элемента, как арматура. По сути, именно эти требования стали истинной движущей силой развития всех подсистем компрессора.