

Эволюция АГНКС

Продолжение цикла статей. Начало см. в № 1 (49) 2016 г.

АГНКС – это производственный объект с известным набором оборудования. Подбор этого оборудования определяется требуемой производительностью станции и ограничивается доступными ресурсами: давлением и выделенными лимитами газа, электрической мощностью, площадью участка и т.д. С другой стороны, владелец АГНКС заинтересован в повышении рентабельности станции. Оказывается, некоторые подсистемы АГНКС поддаются оптимизации, и путем принятия верных структурных решений можно получить заметный эффект.

5

Часть 2. Разработка оптимальной структуры

Я.А. Евдокимов, научный сотрудник НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА»,
Е.П. Лавров, начальник проектного отдела НПК «ЛЕНПРОМАВТОМАТИКА»

В статье описаны некоторые способы уменьшения затрат на сжатие газа компрессорами АГНКС, приведены достоинства и недостатки этих способов. Также показано, какие факторы необходимо учитывать при проектировании АГНКС и выборе оборудования для нее.

Ключевые слова:

автомобильная газонаполнительная компрессорная станция, компримированный природный газ, проектирование и строительство АГНКС.

Затраты энергии на подготовку КПП

В предыдущей статье мы рассмотрели особенности КПП как автомобильного топлива и показали достоинства современных методов заправки. Теперь рассмотрим другую сторону работы АГНКС, а именно, подготовку газа к заправке.

Напомним главное отличие газового топлива от жидкого – в баллоне автомобиля КПП хранится под высоким (около 20 МПа) давлением. Поступает газ на АГНКС под значительно меньшим давлением. Чтобы топливо попало в автомобильный баллон, необходимо поднять давление при помощи компрессора, на

это, разумеется, затрачивается электроэнергия. Основную часть эксплуатационных затрат АГНКС и составляет стоимость электроэнергии, использованной на сжатие газа, поэтому важно обратить внимание на энергоэффективность этой части технологического процесса.

Чтобы понять, как можно уменьшить затраты на электроэнергию для работы компрессоров, рассмотрим переходы энергии газа из одной формы в другую при его прохождении от входа АГНКС до баллона автомобиля (рис. 1).

Суммарная энергия газа состоит из потенциальной (энергия сжатия), кинетической (энергия движения)

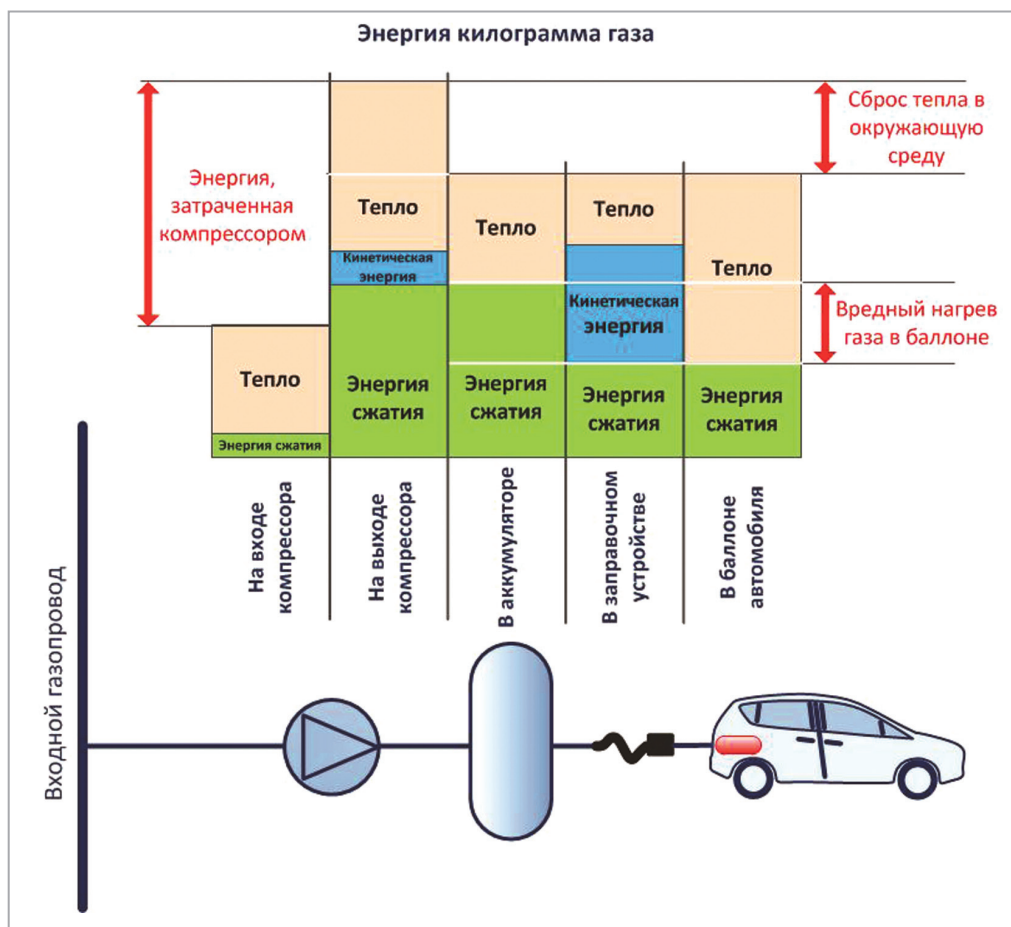


Рис. 1. Преобразование энергии газа при заправке

и теплосодержания. Для полноты картины надо добавить еще потенциальную энергию высоты над уровнем моря, но перемещения газа вверх–вниз при заправке столь невелики, что это можно не учитывать. Сумма указанных составляющих постоянна в силу закона сохранения энергии.

На входе АГНКС газ имеет достаточно низкое давление, а его теплосодержание определяется температурой входного газопровода. При работе компрессора энергия тратится на сжатие газа и его неизбежный нагрев. Соотношение полезного сжатия и вредного нагрева выражается политропическим КПД компрессора. Этот параметр характеризует конструктивное совершенство и важен при выборе компрессорного оборудования. Лишнее тепло сбрасывается в окружающую среду при помощи аппаратов

воздушного охлаждения (АВО), на их обдув вентиляторами также расходуется электроэнергия.

Газ, находящийся в баллонах-аккумуляторах АГНКС, покоится, то есть его кинетическая энергия равна нулю. Следовательно, энергия одного килограмма газа в аккумуляторах состоит из потенциальной составляющей, пропорциональной давлению, и тепловой составляющей, пропорциональной температуре. При заправке газ перемещается по трубе в баллон, причем при попадании из заправочного устройства непосредственно в баллон газ расширяется – сильно в начале заправки и слабее к ее окончанию. При этом газ охлаждается, теплосодержание переходит в кинетическую энергию струи, а потенциальная энергия падает. Затем разогнавшийся газ останавливается в баллоне, кинетическая энергия

«возвращается» в потенциальную. Но давление в заправляемом баллоне всегда ниже, чем в аккумуляторе (ведь иначе газ не будет двигаться в баллон), из-за чего остается избыток энергии, которая и переходит в тепло. В результате суммарное теплосодержание газа в баллоне выше, чем теплосодержание той же массы газа в аккумуляторе, а, значит, и температура газа выше.

$$\begin{aligned} E_{п_акк} + U_{акк} &= E_{п_запр} + U_{запр} + E_{к_запр} = \\ &= E_{п_балл} + U_{балл}. \end{aligned}$$

Из приведенной диаграммы видны два пути уменьшения суммарных затрат энергии:

1. применение компрессоров с максимальным КПД;
2. обеспечение минимально необходимого давления, лишь на небольшую величину превышающего давление заправки баллона.

Первый путь очевиден – характеристики компрессоров должны учитываться при проектировании строительства или модернизации АГНКС. Как и в других отраслях, низкая цена оборудования может обернуться высокими затратами в эксплуатации и наоборот.

На втором пути остановимся подробнее.

Медленная заправка

Минимально необходимые затраты энергии будут получены, если создавать компрессором давление, немного превышающее давление в баллоне. На практике

это означает, что заправка будет происходить очень медленно.

Такой способ существует, он получил название «медленной заправки» (рис. 2). Понятно, что применимость ограничена теми случаями, когда скорость заправки не критична. Там, где заправку можно организовать во время простоя автотранспорта (например, ночью), это решение может снизить эксплуатационные затраты АГНКС. При этом нет необходимости в баллонах-аккумуляторах, вполне достаточно небольших баллонов-депульсаторов на выходе компрессоров, что упрощает эксплуатацию АГНКС и удешевляет оборудование. Также в режиме медленной заправки нужно заправлять ПАГЗ. Это как раз тот случай, когда скорость заправки не критична, а вот расход энергии велик, и экономия от такого режима становится существенной.

С технической точки зрения для организации медленной заправки необходима отдельная линия от компрессора к колонке, не связанная с аккумуляторами. В некоторых случаях может оказаться целесообразной схема с подключаемым и отключаемым по надобности аккумулятором. Соответствующая технологическая схема должна быть принята при проектировании АГНКС с учетом планируемого режима работы станции.

Быстрая заправка

Медленная заправка обеспечивает минимальное потребление энергии компрессорами АГНКС, но пригодна

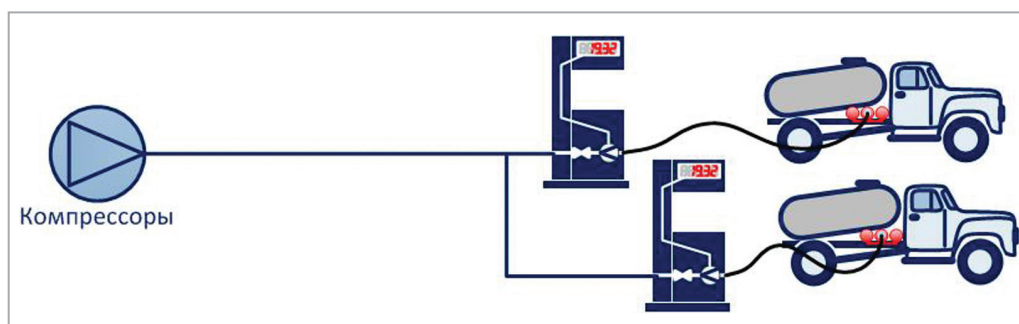


Рис. 2. Заправка по «медленной» схеме

только для автопарков. В большинстве случаев, когда строится или модернизируется АГНКС общего пользования, требуется обеспечить максимальную скорость заправки, о чем мы уже говорили в предыдущей статье. Для этого необходимо, во-первых, поднять давление существенно выше, чем давление заправки, а во-вторых, обеспечить хранение запаса газа для сглаживания неравномерного отбора (рис. 3). При этом возникают следующие проблемы:

- затраты энергии на закачку растут с увеличением давления в аккумуляторах;

- при падении давления в аккумуляторах ниже 20,5...21 МПа заправка становится неполной, так как баллон автомобиля не будет наполняться до необходимого давления. С другой стороны, при таком давлении аккумуляторы еще содержат значительную массу газа, на сжатие которой затрачена энергия. А уменьшить объем аккумуляторов не представляется возможным, чтобы не увеличивать частоту пусков компрессоров. В результате большой объем аккумуляторов увеличивает территорию, занимаемую АГНКС, усложняет, делает дороже техническое обслуживание и контроль состояния оборудования;

- как уже рассматривалось выше, часть энергии газа в аккумуляторах бесполезно тратится на нагрев газа в баллоне автомобиля, с другой стороны, высокое давление в аккумуляторах необходимо для закачки газа в баллон.

Разделение аккумуляторов на секции – что это дает?

Закачка газа из аккумуляторов в баллон автомобиля происходит под действием разности давлений. Скорость движения газа по трубам и заправочному устройству растет с увеличением перепада, но только до тех пор, пока не достигается скорость звука. Дальше рост перепада давлений не приводит к увеличению скорости газа. Кинетическая энергия, приобретенная газом при движении в баллон, превращается в теплоту в баллоне, то есть приводит к нагреву газа в баллоне – чем больше перепад, тем больше нагрев.

Слишком большой перепад давлений между аккумулятором и баллоном не имеет смысла и даже вреден. С другой стороны, для заправки баллона до 19,6 МПа необходимо иметь давление в аккумуляторах выше 20,5 МПа. Но в начале заправки оно в баллоне существенно ниже, то есть для перетекания газа достаточно и меньшего перепада давлений.

На этом основаны двух- и трехступенчатая схема заправки. Пустой баллон заправляется от аккумуляторов низкого, затем среднего давления, и только в конце заправки подключается секция аккумуляторов, в которой газ находится под высоким давлением. Перепад давлений между аккумулятором и баллоном при такой схеме ниже, следовательно, бесполезное расширение газа меньше,

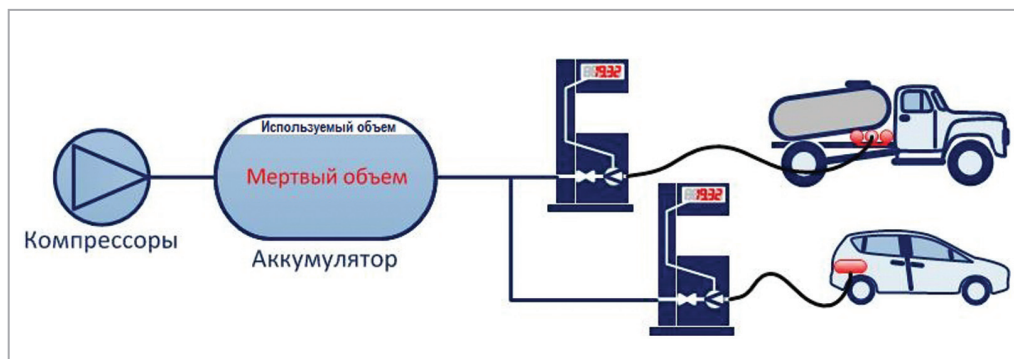


Рис. 3. Схема быстрой заправки

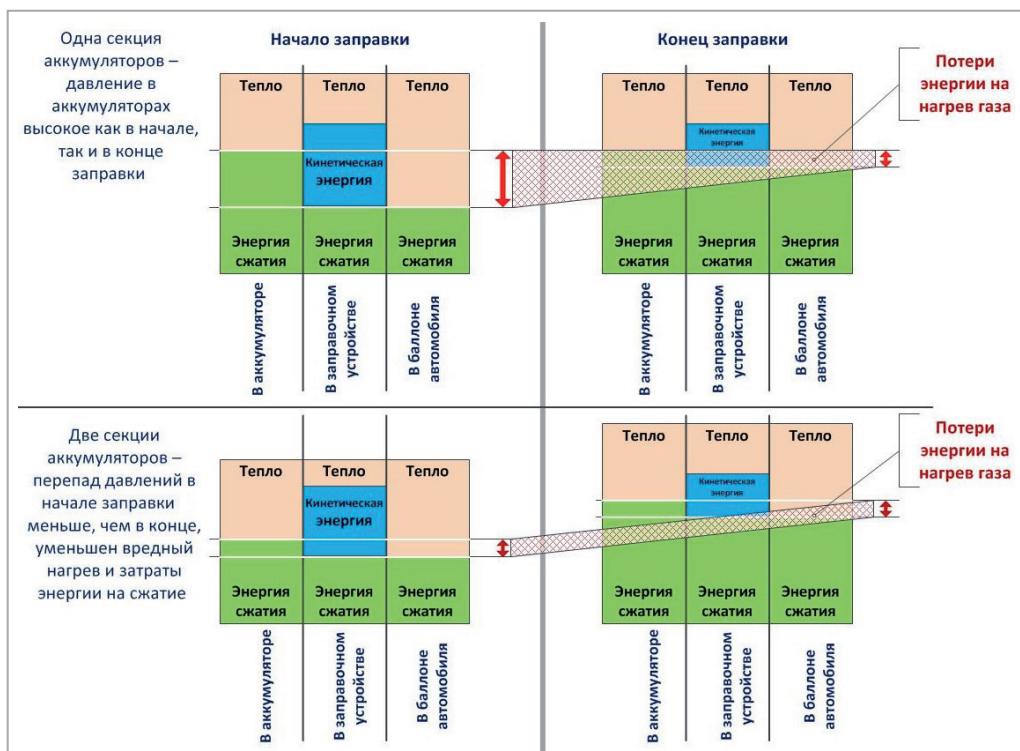


Рис. 4. Преобразования энергии газа при заправке с одной и двумя секциями аккумуляторов

а значит меньше и его нагрев. При этом потенциальная энергия килограмма газа, закачанного в аккумуляторы, в среднем ниже, соответственно ниже и затраты электроэнергии компрессорами на сжатие этого газа (рис. 4).

Тут надо предостеречь читателей от стремления оценивать энергопотребление по номинальной мощности привода компрессора и длительности его работы. Такая оценка дает очень приблизительный завышенный результат и может применяться только как «оценка сверху». Мощность, потребляемая компрессором, пропорциональна расходу (объемная производительность) и степени сжатия компрессора, причем от степени сжатия зависимость не прямая. Объемная производительность у поршневого компрессора неизменна при постоянной частоте вращения, а вот степень сжатия меняется существенно в процессе заполнения аккумуляторов.

Необходимо отметить, что секционированный аккумулятор используется

более полно, то есть такое же число заливок обеспечивается гораздо меньшим геометрическим объемом.

Рассмотрим это подробнее. Аккумуляторы работают без включения компрессоров до тех пор, пока давление позволяет заправлять автомобили.

Многоступенчатая схема (рис. 5) имеет несколько преимуществ:

- нагрев газа в баллоне уменьшается, поскольку перепад давлений в каждый момент заправки меньше, чем при заправке от одного аккумулятора;
- уменьшается энергия, затраченная компрессорами на сжатие, поскольку снижен избыток давления в аккумуляторах;
- благодаря разделению секций аккумуляторов к колонкам повышается пропускная способность АГНКС – автомобиль, подъехавший на заправку с пустым баллоном, заправляется вначале из секции низкого давления и не «отбирает» газ у автомобиля, одновременно заканчивающего заправку от секции высокого давления;

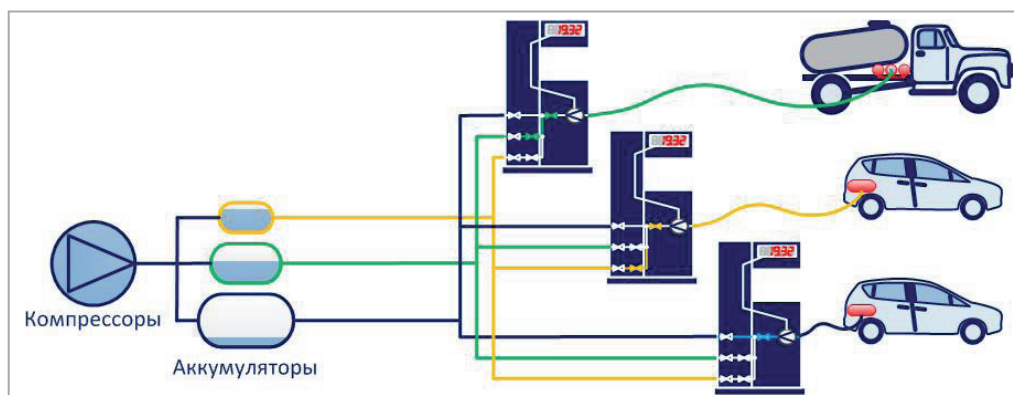


Рис. 5. Схема заправки с секционированными аккумуляторами

- объем аккумуляторов используется более полно, то есть при том же объеме существенно уменьшается частота включения компрессоров, а значит, меньше расходуется их ресурс, или при той же частоте включения компрессоров можно использовать аккумуляторы меньшего объема, а значит, сэкономить занимаемое место.

Расчет оптимального объема аккумуляторов достаточно сложен и может занять большую часть статьи. Возможно, мы еще вернемся к этой теме, а сейчас отметим только, что при одноступенчатой схеме заправки эффективный (используемый) объем аккумуляторов составляет около 10 % полного геометрического объема, а при двухступенчатой – примерно вдвое больше. Это означает, что можно вдвое уменьшить или объем аккумуляторов, или частоту пусков компрессоров.

Как уже отмечалось, мощность, потребляемая компрессором при заполнении аккумуляторов, зависит от степени сжатия. Чтобы было проще оценить потребление и сравнить различные варианты, введем показатель «среднее давление в аккумуляторах» $p_{\text{вых_сред}}$, как осредненное за большое время работы значение. При одинаковой производительности АГНКС среднее давление даст оценку мощности и потребляемого количества электроэнергии.

Рабочий процесс компрессора близок к адиабатному (политропический).

Работа сжатия одного килограмма газа в таком процессе рассчитывается как

$$l = -\frac{n}{n-1} \cdot \frac{R_0}{M} \cdot \left(E^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right),$$

где n – показатель политропы; R_0 – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса газа; E – степень сжатия.

Для анализа длительной работы будем использовать не мгновенное, а среднее значение степени сжатия, то есть

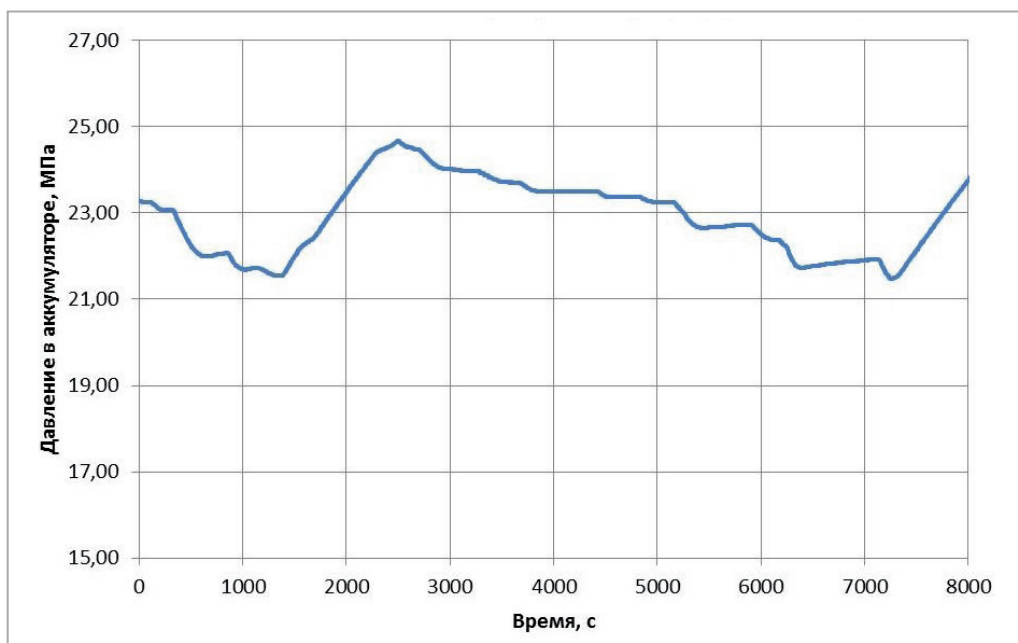
$$E = \frac{p_{\text{вых_сред}}}{p_{\text{вх}}}.$$

Соответственно, потребляемая мощность рассчитывается как $N=lG$, где G – массовый расход. Для вычисления потребляемой механической мощности на валу нужно учесть еще КПД процесса, который указан в паспортных данных компрессора. Для сравнения мощности в разных режимах работы достаточно получить отношение

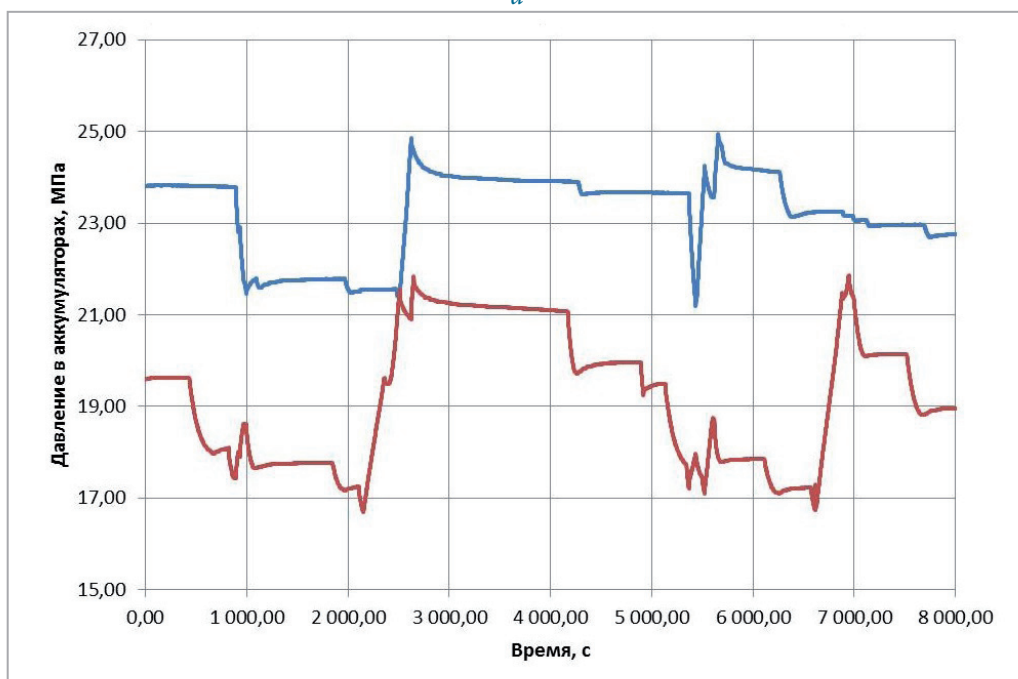
$$\frac{\left(E_2^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)}{\left(E_1^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)},$$

так как остальные параметры газа и его расход будут одинаковы.

Также для сравнения потребления электроэнергии введем показатель «относительное время работы компрессоров» как отношение времени их работы к исследуемому интервалу времени.



а



б

Рис. 6. Изменение давления газа в аккумуляторах при односекционной (а) и двухсекционной (б) схемах

Нами были проанализированы две АГНКС со сходными условиями работы и однотипными компрессорами, но отличающиеся схемой аккумуляторов – одноступенчатой и двухступенчатой. Данные, полученные за некоторое время работы, приведены на рис. 6 и в табл. 1.

Расчет средней мощности по приведенной выше формуле дает среднюю мощность в 1,75 раза больше в двухступенчатом варианте. Это объясняется тем, что несмотря на меньшее среднее давление степень сжатия на АГНКС № 2 намного больше из-за очень низкого

Таблица 1

Параметр	АГНКС № 1	АГНКС № 2
Схема аккумуляторов	Одноступенчатая	Двухступенчатая
Входное давление, МПа	1,13	0,25
Среднее выходное давление, МПа	23,12	21
Относительное время работы компрессоров	0,235	0,125
Средний период между пусками компрессоров, ч	1,5	1
Объем аккумуляторов, м ³	18	4,8

входного давления. Тем не менее видно, что необходимое выходное давление на второй АГНКС достигается при меньшей в 1,9 раза продолжительности работы компрессоров. Таким образом, общий расход электроэнергии на АГНКС с двухступенчатыми аккумуляторами составляет $1,75/1,9=0,92$ от расхода электроэнергии на первой АГНКС, то есть понижен на 8 % при приблизительно равной производительности.

Заметим, что в России при относительно дешевой электроэнергии экономия 8 % может оказаться несущественной в денежном выражении. Но у многоступенчатой заправки есть интересные преимущества, не лежащие на поверхности. Рассмотрим эти «побочные эффекты», которые могут где-то оказаться интереснее «основных».

1. Снижение необходимого объема аккумуляторов. При одноступенчатой заправке невозможно опускать давление в аккумуляторе ниже давления заправки, а значит, большая часть объема газа в аккумуляторе не используется. В многоступенчатом варианте можно опустошать аккумулятор низкого давления существенно больше, следовательно неиспользуемый объем снижается. Газ в аккумуляторе высокого давления

расходуется значительно медленнее в этом варианте, а значит, и объем может быть меньше. Все это приводит к уменьшению необходимого числа баллонов в аккумуляторах и соответственно их стоимости, места, занимаемого аккумуляторами, и количества арматуры для подключения баллонов. Помимо высвобождения площади на территории АГНКС, снижаются затраты на обязательную периодическую процедуру освидетельствования баллонов высокого давления.

2. Уменьшение среднего времени заправки. При одноступенчатой схеме все колонки обслуживаются одним трубопроводом, пропускная способность которого распределяется между всеми заправляемыми одновременно автомобилями. В многоступенчатой схеме заправки низким и высоким давлением происходят независимо, к тому же заполнение аккумуляторов занимает на много меньше времени из-за их малого объема. Все это повышает среднюю производительность заправки и делает ее продолжительностью стабильной и прогнозируемой.

Следует хорошо понимать, что многоступенчатая заправка требует более сложного и дорогого оборудования,

Таблица 2

Способ	Достоинства	Недостатки и ограничения
Использование медленной заправки	Существенная экономия затрат электроэнергии на заправку, а также на капитальных вложениях	Способ подходит только для хорошо планируемой заправки в течение длительного времени. Решение необходимо для заправки ПАГЗ
Секционирование аккумуляторов	Некоторое (5...9 %) снижение затрат электроэнергии. Существенное (в 1,5-2 раза) снижение частоты пусков компрессора или существенное (в 1,5-2 раза) уменьшение необходимого объема аккумуляторов	Увеличивает количество трубопроводов и кранов, требуются более сложные колонки. Необходим расчет экономического обоснования при проектировании

а также то, что преимущества многоступенчатой заправки будут полностью реализованы только при правильном выборе объема секций аккумуляторов (проектирование АГНКС) и заданных уровней поддержания давления в них (наладка и эксплуатация АГНКС). Бессмысленно подключать входы многоступенчатой колонки к одному общему аккумулятору. Нет смысла также поддерживать в аккумуляторах низкого давления такое же давление, как в аккумуляторах высокого давления.

Выводы об оптимизации подготовки КПП

В этой статье мы рассмотрели способы уменьшения затрат на сжатие газа компрессорами АГНКС. В табл. 2 приведены достоинства и недостатки обоих способов.

При проектировании АГНКС и выборе оборудования для нее необходимо учитывать следующие факторы.

1. Назначение и место установки АГНКС. Понятие и критерий «оптимальности» будет отличаться для АГНКС, обслуживающей постоянный автопарк с прогнозируемыми пробегами и про-

стоями, и АГНКС, установленной рядом с автомобильной дорогой для общего пользования.

2. Объем начальных вложений и постоянные эксплуатационные затраты в какой-то степени компенсируют друг друга. Необходимо осознанное и взвешенное решение о выборе того или иного оборудования со сбалансированными характеристиками.

3. Иногда при модернизации оптимальным решением будет использование части имеющегося оборудования несмотря на несколько повышенные эксплуатационные затраты. Именно поэтому в рассмотренном примере АГНКС № 1 была применена одноступенчатая схема, чтобы использовать имеющиеся аккумуляторы.

Мы рассмотрели АГНКС, подключенную к газопроводу. Но отнюдь не всегда есть возможность устройства такой станции. Если по каким-то причинам подвод газа осложнен, решением может стать использование передвижных газозаправщиков (ПАГЗ) и организация с их помощью так называемой «виртуальной трубы». Здесь тоже есть множество особенностей, которые мы рассмотрим в будущих публикациях.