

661

3-34

К. С. ЗАРЕМБО

**СЖАТЫЕ
ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ**

ГОСТОПТЕХИЗДАТ 1945

661.9+

Д Е П

3-34

ГЛАВГАЗТОПРОМ при СНК СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ИСКУССТВЕННОГО ЖИДКОГО ТОПЛИВА И ГАЗА
ВНИГИ

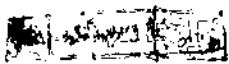
К. С. ЗАРЕМБО

СЖАТЫЕ ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ

Под редакцией
члена-корреспондента Академии наук СССР

А. Б. Чернышев

РЕПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕС-
КАЯ БИБЛИОТЕКА
БССР



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО БИБЛИОТЕКА
НЕФТЯНОЙ И ГОРНО-ТОПЛИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ БССР
Москва 1945 Ленинград



64344

016

АННОТАЦИЯ

Книга посвящена новой отрасли газового дела — производству жидких и сжатых горючих газов.

История развития и современное состояние промышленности жидких и сжатых горючих газов, оценка промышленных горючих газов с точки зрения их пригодности для этого производства и физико-химическая характеристика как самих горючих газов, так и их компонентов — составляют содержание первых трёх глав книги. В последующих главах даётся описание технологических принципов и технологических схем производства жидких и сжатых газов, конструктивных характеристик, применяемых для их хранения баллонов, и, наконец, проектные данные по сооружению газонаполнительных станций.

Автор поставил перед собой задачу дать в этой книге не только изложение в сокращённом виде накопленного обширного по этому вопросу материала и опыта, но и показать, что компримирование и сжижение промышленных горючих газов являются одной из форм их облагораживания; такое облагораживание горючих газов открывает пути их использования для самых разнообразных высококвалифицированных целей и в первую очередь как заменителей моторного топлива.

Основные главы книги сопровождаются перечнем иностранной и русской литературы.

Книга рассчитана на широкие круги инженерно-технических и научных работников газовой промышленности.

Инв.
1954 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Газовая промышленность, существующая около ста пятидесяти лет, знает уже много переломных моментов, знаменовавших собою этапы мощного технического и экономического прогресса. Введение новых технологических процессов производства искусственных горючих газов, изобретение и внедрение в практику новых приборов для использования газов в промышленности или быту, внедрение новых форм организации газового хозяйства и т. д. создавали целые эпохи развития газового дела.

Если бегло перелистать страницы истории развития газовой промышленности, то можно установить, что два фактора с особенной силой стимулировали её технический прогресс: первый—спрос на горючие газы со стороны промышленных и бытовых потребителей и второй—конкуренция со стороны других видов энергоносителей, в частности электричества.

Первый из этих факторов оказывал свое влияние на развитие газового дела как на заре его существования, в начале прошлого столетия, когда газ являлся наилучшим видом энергии для освещения улиц, зданий и квартир, так и в наши дни, когда газ нужен как топливо для промышленности и коммунального хозяйства, как химическое сырье и как заменитель нефтяных продуктов для двигателей внутреннего сгорания.

Второй фактор—конкуренция с электричеством—в конце прошлого и начале текущего столетия носил характер очень упорной борьбы за ведущие позиции в энергетике. Эта упорная борьба всегда кончалась и кончается одним итогом: „и электричество и газ“. Но, вместе с тем, наличие этого конкурирующего начала все время побуждает творческую техническую мысль работников обеих отраслей энергетического хозяйства искать лучшие формы производства и потребления как электричества, так и газа.

Последние годы ознаменовались еще одним фактом прогресса газовой техники, открывающим бесспорно новые страницы её истории, это—освоение и широкое промышленное внедрение процессов компримирования промышленных горючих газов и производства, в одних случаях сжиженных, а в других сжатых до высоких давлений газов.

Этот прогресс газовой техники совпадает с периодом общего расцвета новых идей в технике, направленных на поиски с помощью высоких потенциалов более совершенных форм концентрации вещества и энергии и интенсификации технологических процессов.

Внедрение высоких и сверхвысоких давлений в технологических процессах, внедрение высоких и сверхвысоких напряжений в электро-

технике, освоение высоких и сверхвысоких скоростей и т. д.— всё это звенья одной общей цепи, соединяющей технику прошлого с техникой будущего, техникой высоких потенциалов.

Компримирование горючих газов до высоких давлений и сжижение горючих газов, приводящее к увеличению в сотни раз теплотворности объемной единицы этих газов, является техническим достижением в том же направлении и того же порядка.

В последние годы газовая промышленность нашей страны ищет наиболее совершенные организационные формы. По своей технологической сущности газовая промышленность вообще глубоко специфична. Формы её построения и законы её развития содержат много индивидуальных черт, затрудняющих нахождение наиболее оптимальных путей и форм её организации. Огромные ресурсы естественных и искусственных горючих газов, размещенные на территории нашей великой страны, ещё в большей степени осложняют организационные задачи. Широкая осведомленность нашей технической общественности о новых направлениях и новых этапах прогресса газового дела является поэтому особенно важной.

Молодую отрасль газовой промышленности—компримирование промышленных горючих газов—пока нет оснований переоценивать, но не следует её и недооценивать, ибо она открывает совершенно новые методы производства и потребления, прежде всего, наиболее ценных высококалорийных горючих газов. При решении вопросов о том, где и как развивать производство высококалорийных газов и наиболее рационально их использовать, нельзя не считаться с этими новыми методами.

При развитии промышленности сжатых и сжиженных горючих газов особое внимание научных, технических и хозяйственных кругов должны привлечь три обстоятельства.

Первое—это успешное разрешение проблемы производства легковесных тонкостенных сосудов для хранения сжатых и сжиженных газов. За рубежом при решении этой проблемы достигнуты настолько существенные результаты, что их практическая применимость выходит далеко за пределы области компримированных горючих газов.

Второе—промышленность сжиженных и сжатых горючих газов открывает широкий путь для использования высококалорийных газов как заменителей моторного топлива. Значение этого обстоятельства не нуждается в пояснениях. Ещё до начала второй мировой войны в ряде капиталистических стран производилось с лихорадочной поспешностью строительство газораспределительных станций, наряду с интенсивными изысканиями новых ещё более совершенных форм и методов внедрения компримированных газов во все отрасли промышленного хозяйства, потребляющие моторное топливо. В период войны, приведшей в движение десятки тысяч автомашин, танков и самолётов, и тысячи морских кораблей и подводных лодок, эта проблема приобрела особую остроту.

И, наконец, третье—техника компримированных газов внесла глубокие коррективы в наши представления о методах и условиях хранения, транспорта и использования промышленных горючих газов. Приближаются дни, когда сотрутся грани между горючими

газами и горючими жидкостями. Сокращение объёмов в 350 раз при производстве сжатых газов и в 600 раз при производстве жидких газов стало реальностью. Превращение в промышленных масштабах природных горючих газов в жидкое состояние также стало реальностью. Какая новая красочная глава начинается в истории развития газовой промышленности!

Эта книга не охватывает всей области производства и потребления сжатых и сжиженных горючих газов; её содержание ограничено, в основном, только сжатыми (не сжиженными) газами; но в отдельных главах для полноты изложения затронут и вопрос о сжиженных газах.

Надеюсь, что данная книга своевременно и достаточно полно ознакомит широкие круги нашей научной и технической общественности, а также хозяйственников, с современным состоянием этой молодой отрасли промышленности и поможет им сделать выводы о её дальнейшем развитии в нашей стране.

К. С. ЗАРЕМБО

Кандидат технических наук

ГЛАВА I

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КОМПРИМИРОВАННЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Давление и низкие температуры — физические факторы, позволяющие изменять концентрации газообразных веществ в широких пределах и переводить их в жидкое состояние.

Это положение было известно ещё на заре развития газовой промышленности, и поэтому неудивительно, что первые попытки применения давления при промышленном использовании горючих газов относятся ещё к началу XIX столетия.

После неудачи изобретения Джона Барбера [1], предложившего в 1791 г. собирать газ, полученный при сухой перегонке твёрдого топлива, затем смешивать этот газ с воздухом, сжигать его в камере при постоянном давлении и направлять к лопаткам колеса газовой турбины, в 1801 г. появился патент Филиппа Лебона на газовый двигатель с электрическим запалом; двигатель состоял из цилиндра, аналогичного цилиндру паровой машины, и двух насосов, сжимавших светильный газ и воздух; воспламенённая электрической искрой сжатая смесь газа и воздуха должна была по замыслу изобретателя приводить в движение поршень машины.

В 20-х и 30-х годах прошлого столетия последовал ряд новых предложений по конструированию газовых двигателей (Сесиль, Броун, Райт). В 1838 г. Вильям Бернетт предложил двигатель, в котором смешение и сжатие газовой смеси осуществлялось в самом цилиндре; в газовом двигателе Ленуара, запатентованном в 1860 г., давление в цилиндре после взрыва газовой смеси составляло 5—6 ат. В двигателе Отто (1877 г.) с четырехтактным циклом давление в цилиндре было доведено уже до 11 ат; этот тип двигателей начал, как известно, быстро распространяться и завоевал область мелких силовых установок.

Широкое внедрение газовых двигателей в 70-х годах и последующие годы конца прошлого столетия, в основном, было достигнуто благодаря прогрессу металлургии чёрных металлов, обеспечившему производство стали высокой механической прочности.

Успехами металлургии была обеспечена во второй половине прошлого столетия и возможность применения как высоких давлений, так и низких температур при производстве промышленных газов, их хранении, транспорте и использовании у потребителей.

Практическое значение применения давления при работе с газообразными продуктами вполне очевидно. Объём газа уменьшается, примерно, пропорционально давлению. Таким образом, при давлении 300 ат объём газа сокращается, примерно, в 300 раз. Отсюда ясно, какая получается экономия в потребной ёмкости аппаратуры. Но ещё больший эффект достигается при превращении газа под давлением в жидкое состояние.

Так, для хранения 3000 м³ кислорода весом 4050 кг, в газообразном состоянии при давлении 150 ат требуется 500 сорокалитровых баллонов, вмещающих по 6 м³, общим весом в 38,5 т, в то время как для хранения того же количества кислорода в жидком состоянии требуется только один танк весом 1250 кг.

Для перевозки 3000 м³ кислорода в баллонах в газообразном состоянии требуется 8 пятитонных грузовых автомашин и трёхтонная машина, а для перевозки того же количества кислорода в жидком состоянии достаточно одного пятитонного грузовика.

Аналогичные соотношения имеют место и при работе с промышленными горючими газами. Превращение этих газов при компримировании и охлаждении в жидкое состояние даёт весьма значительный эффект. Промышленный опыт сжижения природного газа в США показал, что если при компримировании этого газа до 350 ат объём газа сокращается, примерно, в 350 раз, то при сжижении достигается сокращение объёма в 600 раз, т. е. 1 м³ жидкого природного газа эквивалентен 600 м³ этого же газа при нормальных температуре и давлении.

Громадные преимущества, получаемые при сжижении нефтяных газов, и возможность осуществления этого процесса при сравнительно низких давлениях привели к тому, что производство сжиженных газов за истекшее время значительно опередило производство сжатых газов, и только за последние несколько лет установки по компримированию горючих газов до высоких давлений (порядка 350 ат) начали интенсивно развиваться, создавая самостоятельную отрасль газовой техники — техники сжатых горючих газов.

В наши дни уже можно рассматривать отдельно производство сжиженных и сжатых горючих газов. Применением одних и тех же физических факторов — давления и соответствующего температурного режима — в зависимости от состава исходного газа может быть получен в одном случае жидкий продукт, во втором — газообразный. Технология процесса производства и физико-химические свойства получаемых продуктов в обоих случаях имеют индивидуальные черты.

Жидкие горючие газы

Производство жидких горючих газов зародилось на базе искусственных нефтяных газов, получаемых при термическом разложении нефти или нефтяных продуктов. Производство этих нефтяных газов уже в 70-х годах прошлого столетия получило развитие в ряде стран, в том числе и в России; газ применялся в городах для освещения и прочих коммунальных и бытовых нужд; упоминание об этом имеется в книге „Практическое руководство по нефти“, изданной в Лондоне в 1877 г. Но началом развития промышленности жидких нефтяных газов следует

считать 1904 год, когда Блау соорудил в г. Аугсбурге первую опытную установку по производству жидкого газа, получившего название „блаугаза“. В 1906 г. был построен первый завод для промышленного производства блаугаза; вскоре затем был построен второй завод в Фридрихсгафене.

Исходным продуктом для производства блаугаза служили минеральные масла. Блаугаз состоял на 80% из тяжёлых углеводородов и этана, остальное — метан и небольшие количества окиси углерода, водорода и азота. Теплотворность этого продукта 16 500 ккал/н.м³ (высшая) и 15 400 ккал/н. м³ (низшая); уд. вес жидкого блаугаза 0,40—0,45, уд. вес в газообразном состоянии (воздух = 1) 1,0—1,1. Находясь в баллонах под давлением 100 ат, блаугаз представляет собой жидкость, которая при понижении давления переходит в газообразное состояние.

Блаугаз первое время применялся исключительно для освещения. Для хранения его и транспорта применялись стальные баллоны ёмкостью на 10 кг, причём сам баллон весил 40 кг. В каждый баллон вставлялась сифонная трубка, доходившая до дна сосуда. Жидкость, поднявшись по этой трубке, поступала в редуктор, который снижал давление до 6,5 ат, и далее в испаритель; из испарителя, пройдя второй редуктор, понижавший давление до 35 мм вод. столба, газ поступал к месту потребления.

Существенным недостатком блаугаза, ограничивавшим области его применения, служила неоднородность состава газа; при расходе блаугаза в первую очередь в горелки потребителей попадают низкокипящие углеводороды, вследствие происходящей при испарении частичной ректификации продукта; таким образом, по мере расходования блаугаза, состав газа изменяется, отражаясь, соответственно, на работе горелок. По этой причине применение блаугаза для таких квалифицированных целей, как сварка металла, не могло быть достаточно удачным.

В 1907 г. блаугаз был ввезен в Америку, а в 1908 г. фирма „Нордвестерн Блаугаз Ко“ построила в Америке первый завод блаугаза. Одновременно велись опыты по получению жидких газов попутно с улавливанием газаolina из природных газов. В 1910 г. „Риверсайд Ойл Ко“ впервые получила на своих газополиновых заводах в промышленном масштабе жидкий газ, состоящий, в основном, из пропана и бутана; пропановая фракция получила наименование „газоиль“, бутановая — „газолайт“. Оба продукта были низкого качества вследствие наличия значительного количества тяжёлых фракций, и в зимнее время их использование представляло большие затруднения.

В 1911 г. в Фоллсанби (Зап. Виргиния) Петерсоном был построен газополиновый завод, где наряду с газополином было организовано более совершенное производство жидких нефтяных газов; установленный двухступенчатый компрессор на давление до 50 ат позволял отбор фракций с более узкими пределами кипения, насколько это было возможно без ректификационных колонн.

С этого времени начал расширяться круг потребителей жидких газов. С 1911 г. в США начали применять жидкий газ для резки металла; производились также опыты по сварке некоторых сплавов. В 1912 г. Петерсон совершил первый пробег по улицам Нью-Йорка на автомобиле, специально оборудованном для питания жидким газом.

В 1917 г. было начато изготовление усовершенствованных редукторов для баллонов жидких газов. Изготавливавшиеся до этого времени редуктор пропускали газ, так как пропан и бутан являются хорошими растворителями для многих прокладочных материалов, набивок и смазочных веществ.

С 1918 г. жидкий газ стал применяться и для рефрижерации; в Балтиморе Юргенс начал пользоваться им при производстве льда; фирма „Копленд Ко“ первая стала применять рефрижераторы с газом, состоящим преимущественно из изобутана, оказавшимся более эффективным, чем аммиак.

В этом же году на американском рынке появился жидкий газ под торговым наименованием „бутана“.

В 1919 г. Андерсоном была разработана конструкция паяльной лампы для жидкого газа; эти лампы нашли широкое применение для паяльных работ и лужения меди.

В 1920 г. фирмой „Юнион Карбид Ко“ были выпущены на рынок жидкие газы под названием: „пирофакс“ и „пироген“; первый предназначался для обогрева кухонных плит, второй—для резки металлов.

В эти же годы началось изготовление более легковесных баллонов, что позволило удешевить транспортировку жидких газов потребителям и облегчить условия пользования баллонами. В отличие от немецких установок американцы не снабжали баллоны сифонными трубками, а отбирали газ непосредственно из горловины баллона, что упрощало регулировку газа.

Все перечисленные основные этапы развития промышленности жидких газов в США говорят о том, что, начиная с 1910 г., в этой стране началось производство и использование жидких газов и был заложен прочный фундамент для развития этой новой отрасли газового дела. Но, несмотря на ряд существенных успехов, развитие новой отрасли промышленности происходило в те годы очень медленно. Ряд предприятий был закрыт, из-за ограниченности рынка сбыта. Недостаточно обеспеченная безопасность при пользовании жидкими газами, затруднения с их транспортом, дороговизна, большие расходы металла, низкое качество арматуры и другие причины служили существенным тормозом. При всех проводившихся в то время мероприятиях по внедрению на рынок жидких газов не было учтено, что само производство жидких газов является лишь незначительной частью этой новой отрасли промышленности. Хранение продукта, его транспорт и распределение по потребителям являются значительно более сложными операциями. Если на само производство затрачивалось всего около 15% от общих капитальных затрат, то на приобретение тары, перевозку и отпуск потребителям уходило до 80% общих затрат. Совершенно очевидно, что для развития этой отрасли промышленности максимум внимания надо было уделить не производству продукта, являющемуся сравнительно несложной операцией, а его сбыту.

Положение существенно изменилось с 1926 г., когда американской фирме „Филиппс Петролеум Ко“, как и ряду других фирм, в результате продолжительной и упорной научно-исследовательской и конструкторской работы удалось разработать безопасные методы хранения, транспорта и использования сжиженных газов, а также выявить пути использования этих газов у самых разнообразных категорий потребителей.

Благодаря изучению и внедрению технических усовершенствований, оказалось возможным безопасно транспортировать жидкие газы потребителям на большие расстояния не только в легковесных стальных баллонах, но и в крупных железнодорожных и автомобильных цистернах. При транспортировке в железнодорожных цистернах жидкие газы были приравнены по тарифам и правилам перевозки к светлым нефтяным продуктам, что значительно снизило стоимость их транспорта. Усовершенствование автоматической регулировочной и контрольно-измерительной аппаратуры значительно обезопасило производство и использование сжиженных газов. Были выработаны новые методы испытаний сжиженных газов и установлены стандарты, которым эти газы должны удовлетворять.

Усовершенствование техники ректификации позволило получать продукты требуемой степени чистоты, с узкими температурными интервалами кипения. Однородность продукта привела к снижению упругости паров и удобству пользования газом в горелках. Новые конструкции газовых горелок повысили экономичность использования газов при их сжигании. Поскольку компонентами жидких газов стали индивидуальные углеводороды: пропан, бутан, изобутан и пентан, на рынок начали выпускать жидкие газы с соответствующими торговыми наименованиями: „пропан-газ“, „бутан-газ“, „пропан-бутан-газ“ и другие, причём степень чистоты их стала весьма высокой. Химический состав смесей этих углеводородов диктовался требованиями потребителей. В отдельных случаях состав выпускаемых на рынок жидких газов изменялся фирмами-изготовителями не только применительно к категориям потребителей (обогревательные установки, холодильные установки, автотранспорт, резка металла и пр.), но и к сезонам года. Так, например, для снабжения автотранспорта в летние месяцы выпускается на рынок жидкий газ, состоящий из 80% бутана и 20% пропана, в зимние месяцы — из 35% бутана и 65% пропана.

Если подвести итоги эффективности всех этапов технического и экономического прогресса промышленности жидких газов как в США, так и в европейских странах за последние годы, и особенно после 1926 г., то общая характеристика современного состояния этой отрасли газового дела может быть очерчена в следующем виде.

Сырьевая база для производства жидких газов

В состав вырабатываемых жидких газов входят:

- 1) предельные углеводороды парафинового ряда — этан, пропан, н-бутан, изобутан и пентан;
- 2) непредельные углеводороды олефинового ряда — этилен, пропилен и бутадиен.

Преобладание предельных углеводородов характерно для торговых сортов жидких газов США; торговые сорта жидких газов европейских стран содержат и предельные и непредельные углеводороды.

Главнейшими производителями жидких газов в США являются газолиновые заводы, газотлаивающие установки и установки по стабилизации. Количество пропана и бутана, которое улавливается на газолиновых заводах США, могут характеризовать следующие цифры [2]: в

1940 г. на 148 газOLIновых заводах штата Тексас (в этом штате добывается свыше 35% общего количества природного газа) среднесуточная выработка газOLIна составляла 8 390 860 л (0,1108 см³ из 1 м³ газа) и пропан-бутанового газа — 1 919 870 л (или 0,0254 см³ из 1 м³ газа), часть которого была выпущена в продажу в виде торговых марок жидкого газа.

На страницах американской печати нередко указывается, что потенциальные ресурсы сжижаемых углеводородов в США во много раз превышают современные масштабы их производства. Ресурсы пропана и бутана в США, по данным Оберфельда [3], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование газа	Продано в виде жидкого газа	Использо- вано при производ- стве газOLIна	Ипользо- вано как топливный газ	Осталось в исходном газе	Итого
Пропан	492	2 839	6 132	8 516	17 979
Бутан	643	10 787	946	4 277	16 653
	1 135	13 626	7 078	12 793	34 632

Все цифры даны в тыс. м³ и относятся к 1942 г.

Из этой таблицы следует, что только 3% пропана и бутана были использованы в 1942 г. на американском рынке в виде жидкого газа, остальное количество частично переведено в состав газOLIна (40%), частично сожжено как газообразное топливо.

Главнейшими производителями жидких газов в европейских странах являются гидрогенизационные заводы, азотно-туковые заводы, работающие на базе коксовых газов, и нефтекрекинговые заводы. Углеводородные газы являются побочными продуктами при основных производственных процессах на этих заводах и содержат большое количество сжижаемых предельных и непредельных углеводородов.

Состав рыночных сортов жидких газов

Состав некоторых сортов вырабатываемых в США жидких газов приведен в табл. 2

Состав германских торговых марок жидких газов: „Рургазойль“, вырабатываемый на азотно-туковых заводах, содержит: пропилена и бутIлена—54%, пропана и бутана—17%, этилена—15%, этана—14%.

„Леуна-пропан“, вырабатываемый на гидрогенизационных заводах, содержит: пропана—95%, этана и бутана—5%.

„Леуна-бутан“ содержит: бутана—95%, пропана и пентана—5%.

Установленными стандартами ограничиваются не только колебания

процентного содержания углеводов, но и степень загрязненности жидких газов вредными примесями, в частности активными сернистыми соединениями.

Таблица 2

Наименование углеводорода	Торговый пропан США	Торговый бутан США
	в % по объему	
Этан	2,0	—
Пропан	97,25	5,0
Пропилен	—	—
Бутан	0,225	77,96
Бутилен	—	—
Изобутан	0,525	16,54
Изобутилен	—	—
Изопентан	—	0,50
	100,0	100,0

Транспорт жидких газов

В США в течение многих лет условия транспорта жидких газов к отдалённым потребителям в сильной степени ограничивали сбыт продукции. В настоящее время эта проблема может считаться разрешённой, и крупные и мелкие потребители жидких газов имеют теперь возможность получать их независимо от расстояния.

Современные способы транспорта жидких газов можно разбить на следующие группы:

1. Транспорт в баллонах. В США для этой цели применяются баллоны ёмкостью от 15 до 98,6 л. (по воде). Баллоны меньших ёмкостей, вмещающие 20—50 фунтов жидкого газа (9—23 кг), удобны для бытовых потребителей; с 1936 г. такую мелкую тару стали особенно широко использовать в американских городах. Более крупные баллоны применяются для снабжения центральных или промышленных установок. Перевозят баллоны на грузовиках или в железнодорожных вагонах.

2. Транспорт в танках-грузовиках. При транспорте жидких газов на небольшие расстояния получили широкое применение специальные грузовые автомашины с цистернами и прицепные платформы с цистернами. В условиях американской экономики этот метод перевозки жидких газов на расстояния до 800—1000 км обходится дешевле, чем по железной дороге. Грузоподъёмность таких перевозочных агрегатов достигает 5000 галл. жидкого газа (~19 000 л).

3. Транспорт в вагонах-цистернах. Цистерны ёмкостью от 38 000 до 42 000 л, специально оборудованные, служат для перевозки жидких газов по железным дорогам. В 1942 г. на железных дорогах США было в обращении свыше 2000 таких вагонов-цистерн. По тарифам стоимость перевозки жидких газов приравнена к стоимости перевозки бензина.

4. Транспорт в наливных судах. Учитывая высокие железнодорожные тарифы и достаточно разветвленную сеть водных

путей сообщения, перевозка жидких газов водным путём также широко развилась в США и в ряде случаев является самой предпочтительной.

5. Транспорт по трубопроводам. Развитие в США трубопроводного транспорта промышленных горючих газов имеет, как известно, не преувеличенные масштабы, и поэтому естественно, что транспорт пропан-бутановых углеводородов в газообразном виде также широко применяется. Но, наряду с этим, уже несколько лет назад возникла идея об использовании трубопроводов для транспорта этих углеводородов в жидком состоянии под высоким давлением; толстостенные трубы для транспорта жидкого пропана и бутана должны иметь очень небольшой диаметр и могут быть подвешены к мачтам электrorаспределительных сетей высокого напряжения. Успех реализации этой идеи обеспечит дополнительные возможности удобного и дешёвого транспорта жидких газов.

Таким образом, современные методы транспорта и снабжения потребителей жидкими газами фактически не отличаются от методов транспорта и снабжения обычными жидкими нефтепродуктами.

Потребители жидких газов

Многочисленные категории современных потребителей жидких газов могут быть объединены в отдельные группы, причём наиболее полную картину в этом отношении даёт опять-таки опыт США.

Сравнительно полный статистический учёт масштабов производства жидких газов и распределения их по потребителям начался в США с 1922 г. В табл. 3 приведены данные за истекшие 20 лет.

Цифровые данные указывают на резкий перелом в масштабах производства и сбыта продукции с 1926 г. Характерно, что рост промышленности жидких газов в США продолжается и в годы войны, несмотря на то, что в военное время условия транспорта, дефицитность ряда материалов, в частности импортных металлов, и финансовые затруднения оказывают свое отрицательное влияние.

Прежде чем перейти к характеристике потребления жидких газов, рассмотрим данные об общих масштабах потребления газов в США.

По данным за 1941 г. в США продано абонентам внутри страны 79 598 221 400 м³ природного газа; экспорт природного газа в Канаду составил 3 426 340 м³ и в Мексику — 207 863 500 м³. Суммарное количество проданного природного газа составило в 1941 г. 79 809 511 240 м³.

Продано природного газа внутри страны:

1) на промыслах	19	418	271	400 м ³ или	25%
2) домашним абонентам	12	510	496	100 » »	16 »
3) коммерческим абонентам	4	099	085	200 » »	5 »
4) на производство сажки	10	340	169	100 » »	13 »
5) для нагревательных процессов на нефтеперегонных заводах. . .	4	191	994	100 » »	5 »
6) электростанциям общего пользования	5	805	914	800 » »	7 »
прочим потребителям	23	232	290	700 » »	29 »

Итого 79 598 221 400 м³ или 100%

Таблица

Количество проданных жидких нефтяных газов в США

Год	Общее количество проданного газа, м ³	% роста	В т о м ч и с л е					
			бытовым потреби- телям, м ³	% роста	промышленным и другим по- требителям, м ³	% роста	газовым заво- дам, м ³	% роста
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1922	839	—	—	—	—	—	—	—
1923	1 048	24,4	—	—	—	—	—	—
1924	1 425	36,0	—	—	—	—	—	—
1925	1 528	7,2	—	—	—	—	—	—
1926	1 760	15,2	—	—	—	—	—	—
1927	4 129	134,6	—	—	—	—	—	—
1928	17 119	314,6	9 840	—	1 514	—	5 678	—
1929	37 588	119,6	22 330	126,9	5 678	275,0	9 463	66,7
1930	68 195	81,4	44 663	100,0	8 327	46,7	15 140	60,0
1931	108 992	59,7	57 890	29,6	27 175	226,0	23 858	57,6
1932	129 224	18,6	61 484	6,2	30 913	13,9	36 728	53,9
1933	151 138	14,1	62 928	2,3	52 941	71,3	31 485	-14,3
1934	213 576	44,9	66 923	6,3	122 817	132,0	23 838	-24,3
1935	290 896	36,2	80 923	20,9	181 280	47,6	28 695	20,4
1936	403 678	38,8	113 603	40,4	254 606	40,5	35 469	23,6
1937	535 200	32,7	154 515	36,0	338 388	32,9	42 298	1,3
1938	625 286	16,7	218 894	41,7	359 512	6,2	46 881	9,8
1939	846 250	35,3	331 300	51,3	456 528	27,0	58 420	24,6
1940	1 186 431	40,2	507 258	53,1	602 394	32,0	76 779	31,4
1941	1 751 895	47,7	835 433	65,0	820 872	35,8	95 590	24,4
1942	2 100 000	20,1	1 003 000	20,0	993 000	21,0	104 000	9,3

Примечания к табл. 3.

1. Во втором столбце указаны только количества проданных жидких углеводородов: пропана, бутана, их смесей и пентана.

2. В таблице не указаны количества этих продуктов, израсходованные на самих предприятиях: при производстве газолина, на полимеризацию, промывку и прочие нужды заводов-изготовителей.

В 1942 г. количество добытого природного газа превысило 3 трлн. куб. футов (85 млрд. м³).

Из современных потребителей жидких газов на первом месте следует поставить бытовых абонентов, расходующих около половины всей вырабатываемой и продаваемой в США продукции жидких газов.

1. Бытовые потребители. К концу 1942 г. количество бытовых потребителей жидкого газа в США составляло 1 825 000. Жидкие газы применяются в кухонных плитах, рефрижераторных установках, приборах для нагревания воды, отопительных установках, для освещения и пр. Жидкий газ доставляется потребителям в цельнотянутых стальных баллонах небольших ёмкостей, устанавливаемых в специальных железных шкафах около здания. Нагревательные приборы, конструктивно весьма совершенные, в большинстве случаев автоматизированы и приспособлены для работы как на пропан-бутановых газах, так и на нормальном светильном газе.

2. Химическое использование. Химическое использование углеводородов с каждым годом растёт. Из углеводородов, входящих в состав природных газов, можно получить свыше 100 химических продуктов, в том числе 24 спирта, 4 кетона, 23 эфира, 13 аминов, различные типы смол, искусственное волокно, искусственный каучук, высокооктановое моторное топливо и пр.

Углеводороды, входящие в состав жидких газов, используются, прежде всего, для производства высокооктановых моторных топлив. Изобутан идет на изготовление 100-октанового авиабензина. Получаемые при конверсии бутана бутadiены идут для изготовления синтетического каучука. Пропан применяется для производства нитропарафинов. Этан и пропан идут для производства стирола и дальше — синтетического каучука. При всем многообразии путей дальнейшей химической переработки этих углеводородов в настоящее время доминирует их использование для двух целей: производства авиабензинов и синтетического каучука.

3. Авиамоторы. По опубликованным данным [4], Научно-исследовательским авиационным комитетом Британского министерства авиации были проведены успешные опыты использования жидких газов для авиадвигателей высокой мощности. Расчёты показали, что вес наполненного жидким газом баллона специальной конструкции даже несколько легче соответствующего (по тепловому эквиваленту) бака с бензином. В США жидкие газы получили применение как заменители мототоплива для авиадвигателей на период разогревания моторов при пуске их в холодную погоду. Известно применение жидких газов для питания моторов дирижаблей, где установлены их ценные преимущества перед бензином.

4. Автомоторы. Применение жидких газов для питания моторов грузовых автомашин, автобусов, тракторов, подъёмных механизмов (в частности в горнорудной промышленности), железнодорожных дрезин, речных катеров и прочих видов передвижных или транспортных средств, а также стационарных двигателей развилось особенно широко, и, например, в западно-европейских странах эта область применения жидких газов стала основной. Следующие превосходные качества жидких газов, как мототоплива, вполне оправдывают их применение в качестве полноценных заменителей бензина: а) октановое число 100—115,

б) полнота сгорания, без дыма и запаха, без детонации, без образования нагара в цилиндре и на клапанах, в) безотказный запуск мотора в холодную погоду, г) отсутствие разжижения и загрязнения смазочного масла, д) некоторое увеличение мощности мотора.

5. Резка и сварка металлов. Наблюдаемый в настоящее время в США громадный спрос на ацетилен, значительно превышающий его производство, увеличивает применение жидкого пропана для резки стали; использование для этой цели ацетилена сведено к минимуму и областью применения ацетилена остается только сварка стали. Кроме замены ацетилена при резке стали, жидкие газы продолжают применяться при газосварочных работах (для цветных металлов и их сплавов), а также для нагревательных целей при лужении, пайке и пр.

6. Производство смазочных масел. В США в настоящее время больше половины всех смазочных масел вырабатывается с применением пропана, требуемого для очистки и депарафинизации масел. Производство смазочных масел является, таким образом, крупным потребителем жидкого пропана.

7. Обработка металлов. Металлообрабатывающая промышленность мирного и военного времени предъявляет большой спрос на жидкие газы, особенно для термической обработки. Жидкие газы особенно пригодны при производстве мелкокалиберных снарядов, оболочек бомб и при прочих квалифицированных термических процессах в военной промышленности.

8. Новые потребители военного времени. Удобство перевозки жидких газов на большие расстояния и их высокие качества, как горючего, создали в условиях военного времени новых потребителей. Можно привести следующие примеры из современной жизни США.

Один военный лагерь в Калифорнии, территориально удаленный от месторождений природного газа, потребляет для различных нагревательных процессов 20 000 галл. жидких газов в сутки. Много жидких газов требуют госпитали: для стерилизации, нагревания воды, варки пищи и т. п. Потребителями жидких газов явились военные корабли, где жидкий газ из баллонов идет для варки пищи. Военные предприятия предъявляют спрос на жидкие газы, как на резервное топливо на случай перебоев в снабжении природным или промышленным газом.

Эти примеры, подчеркивая ценные качества жидких газов, являются лучшей рекламой и обеспечивают дальнейшее расширение областей их применения.

9. Холодильные и рефрижераторные установки. Современные универсальные установки по поддержанию постоянной температуры в жилых помещениях, учреждениях, театрах, магазинах, ресторанах, ж.-д. вагонах и т. п. стали крупными потребителями жидких газов; газ в этих установках является и топливом для нагревательных процессов и хладогентом, с успехом заменяя аммиак и другие вещества. С таким же успехом жидкие газы применяются в качестве хладогента на установках по получению льда и в холодильниках, в том числе в вагонах-холодильниках. Автомобили с холодильниками применяют газ и для охлаждения, и как горючее для двигателей.

10. Газовые заводы. Наряду с природными газами, жидкие газы расходуются в больших количествах на газовых заводах для обо-

гащения низкокалорийных газов и в качестве резерва в часы пиковых нагрузок. Как показывают данные табл. 3, эта группа потребителей расходует в США 6—7% всего выпускаемого на рынок жидкого газа.

Таков перечень основных потребителей жидких газов в зарубежных странах и, в частности, в США, где эта отрасль газового дела получила особенно широкое развитие. Есть все основания предполагать, что в последующие годы как производство, так и самое разнообразное использование жидких газов получит дальнейшее развитие.

Промышленный опыт сжижения природного газа

Ещё в 1910—1911 гг. Кабот провел в США первые опыты по сжижению природного газа с помощью жидкого воздуха. В последующие годы эта идея неоднократно являлась предметом теоретических и экспериментальных изысканий, но только в 1938—39 гг. она была поставлена на практические рельсы. В Кливленде (Cleveland, Ohio) была сооружена полупромышленная установка, по показателям работы которой был построен и в 1941 г. сдан в эксплуатацию первый завод по производству жидкого природного газа.

Производительность этого завода 4000 000 куб. футов газа в сутки (113 267 м³). Более подробные данные о технологической схеме и отличительных особенностях первого промышленного предприятия по сжижению природного газа будут приведены в одной из последующих глав, здесь же, в историческом обзоре, необходимо подчеркнуть, что ввод в эксплуатацию этого завода является фактом несомненного научного, технического и экономического прогресса в газовом деле. Успех эксплуатации завода откроет новые возможности в деле добычи, переработки, хранения, транспорта природных газов и снабжения этими газами промышленных и бытовых потребителей.

Возможности развития производства жидких газов в СССР

В нашей стране вопрос о широкой организации производства жидких газов неоднократно был предметом детальных обсуждений и рассмотрений. Показательный опыт США и западно-европейских стран и громадные потенциальные ресурсы сжижаемых углеводородов в природных газах и газах нефтяной промышленности давно предопределяют успех и значение развития производства жидких газов в СССР.

Потенциальные ресурсы пропан-бутановых газов в СССР весьма велики.

Эти ресурсы складываются из пропан-бутановых фракций при добыче природных газов в многочисленных нефтегазовых районах страны, при улавливании отходящих газов на крекинг-заводах, на заводах по стабилизации легких нефтей и целом ряде других промышленных производств, отходящие газы которых богаты углеводородами.

Облагораживание этих газов методом сжижения и использование их в таком концентрированном транспортабельном виде в самых разнообразных отраслях народного хозяйства, где они могут явиться лучшим источником тепловой энергии или химическим сырьем, давно является актуальной задачей в нашей стране. Практическая реализация необходимых мероприятий на этом крайне отставшем участке нашей промышленности может дать ценные результаты.

Сжатые горючие газы

Если в истории развития производства жидких горючих газов решающую роль сыграл прогресс газолиновой промышленности, то в истории развития производства сжатых газов, которые при компрессии до 350 ат не переходят в жидкое состояние, решающую роль сыграло развитие промышленности синтетического аммиака на базе использования коксовых газов.

Производство жидких горючих газов впервые развернулось в США и отсюда распространилось на Европу, а производство сжатых (несжиженных) горючих газов возникло во Франции, вслед за которой промышленность сжатых газов стала развиваться и в других западно-европейских странах (в Англии, Германии, Голландии и др.).

Франция. Первые попытки компримирования светильного газа были сделаны во Франции еще в 1856 г., т. е., примерно, через 40 лет после зарождения в этой стране производства светильного газа. В Париже, который стал освещаться газом с 1816 г., был проведён опыт применения давления при передаче газа по городской сети, а в 1872 г. были проведены опыты по использованию светильного газа для городского транспорта.

Недостаточное развитие техники затормозило дальнейшие опыты и они возобновились только в 1915—1916 гг.; к этому периоду относятся попытки использовать для городского транспорта не только светильный, но и природный газ, причём объектом изучения стали автомобили современных конструкций. Но эти попытки вскоре также были оставлены и только в 1926 г. Парижское газовое общество (Société du Gaz de Paris), совместно с Парижским транспортным обществом (Société des Transports en Commun de la Région Parisienne), начали систематически и планомерно изучать это новое дело, выделив для экспериментальных наблюдений необходимое количество автомашин.

Поставленные с достаточной серьёзностью исследовательские работы вскоре дали весьма положительные результаты, причём техника и экономика перевода автотранспорта на сжатые газы получили надлежащее освещение. Выяснилась возможность и целесообразность перевода автомашин на светильный газ, природный газ и отбросный метан заводов синтеза аммиака. По разработанным проектам были сооружены газонаполнительные станции сначала в Париже, а затем в Камбрэ, Лионе и других городах.

Парижское газовое общество, работающее в этом направлении уже свыше 15 лет, построило не только первые, но и крупнейшие по своей производительности газонаполнительные станции. Парижская газонаполнительная станция до последнего времени оставалась самой мощной из всех существующих станций подобного рода. На этой станции установлено три компрессора: один—производительностью 200 м³/час, второй—40 м³/час и третий (резервный)—60 м³/час. Нормальная производительность этой крупнейшей станции составляет, таким образом, 240 м³/час, а при пуске резервного компрессора может быть доведена до 300 м³/час светильного газа. Все три компрессора соединены с помощью коллекторного газопровода высокого давления с шестью газосборниками высокого давления ёмкостью 500 л (по воде) каждый. При рабочем давлении

200 *ат* шесть газосборников, имеющие суммарную ёмкость (по воде) 3 м^3 , вмещают 600 м^3 газа.

Около этой станции установлено 5 газонаполнительных колонок; 5 автомашин могут одновременно наполнять свои баллоны сжатым газом.

Рабочее давление сжатого газа на этой станции, как и вообще, на первых газонаполнительных станциях, было принято в 200 *ат*, т. е. равнялось давлению, под которым сжатый газ наполняет автомобильные баллоны. При таком же давлении работала газонаполнительная станция в г. Лионе, построенная вскоре после парижской станции. На Лионской станции установлено 2 четырёхступенчатых компрессора вертикального типа с суммарной производительностью 270 $\text{м}^3/\text{час}$; компрессоры приводятся в движение электромоторами мощностью по 80 л. с. каждый. Газосборники этой станции рассчитаны на вместимость при давлении 200 *ат* 830 м^3 газа. Лионская станция сооружена для питания сжатым газом автобусов; имеющаяся у станции газонаполнительная колонка может получать сжатый газ или непосредственно от компрессоров или из газосборников.

Компрессорная станция в Камбрэ оборудована двумя компрессорами, из них один производительностью 200 $\text{м}^3/\text{час}$, второй—75 $\text{м}^3/\text{час}$; давление газа после компрессоров—275 *ат*.

Потребители компримированного газа расположены на расстоянии 50—80 км от станции. Транспорт газа на такие дистанции потребовал специальной конструкции автомашин. В начале предполагалось перевозить газ на прицепах к грузовикам, но более удобным оказалось использование для этой цели моноблочных грузовых автомашин с необходимой тарой, рассчитанной на высокое давление. На основании предварительных экономических подсчётов общество „Société Beihunoise“, эксплуатировавшее эту компрессорную станцию, приобрело 5-тонные автомашины с пятью баллонами по 0,7 м^3 ёмкостью каждый. При рабочем давлении 250 *ат* один такой грузовик с пятью баллонами вмещает, примерно, 850 м^3 светильного газа. Моторы автомашин питаются тем же сжатым газом. При пробеге на 100 км расходуется от 70 до 80 м^3 газа при теплотворности его 5500 $\text{ккал}/\text{м}^3$, что эквивалентно расходу 60 л жидкого горючего. Этим автотранспортом за 1936 г. было перевезено 700 000 м^3 светильного газа в компримированном состоянии. Среднесуточный пробег одной автомашины составил 130 км.

Опыт строительства и эксплуатации газонаполнительных станций в Камбрэ затронул, таким образом, одновременно очень существенный вопрос о том, где целесообразнее строить такие станции и каким методом транспортировать готовый сжатый газ потребителям для использования в автомашинах или для бытовых нужд. Этот вопрос возник впервые во Франции и за истекшее время подвергся детальному теоретическому и практическому изучению.

На шестидесятом газовом конгрессе во Франции, состоявшемся в июне 1937 г. в Париже, ряд докладов был посвящён вопросу о транспортировании светильного газа потребителям как по трубопроводам под повышенным давлением, так и в цистернах или баллонах в компримированном состоянии.

Насколько можно судить по опубликованным [6] конспективным обзорам зачитанных на конгрессе докладов, экономическая сторона этого

сравнительно нового вопроса была ещё недостаточно выяснена. Несомненно, что традиционный метод подачи газа потребителям по магистральным газопроводам и разветвлённым газораспределительным сетям низкого давления нуждается в настоящее время в пересмотре.

Один из докладчиков—М. Е. Карьер (Carrigère)—внёс предложение разделить потребителей газа, удалённых на то или иное расстояние от центрального источника газоснабжения, на три класса, по следующему принципу:

1. Группы потребителей газа, расходующие 200 000—400 000 м³ в год и удалённые от главной магистрали на расстояние до 15 км, и потребители, расходующие 50 000—200 000 м³ в год и расположенные на расстоянии до 5 км, могут рентабельно снабжаться газом от этой магистрали.

2. Потребителей, предъявляющих спрос на газ от 100 000 до 200 000 м³ в год и расположенных на расстоянии до 50 км от компрессорной станции, и потребителей, расходующих от 30 000 до 100 000 м³ в год газа и расположенных на расстоянии до 20 км от компрессорной станции, — им целесообразно подвозить газ в сжатом состоянии в резервуарах.

3. Мелких потребителей газа—до 30 000 м³ в год, удалённых от компрессорной станции на расстояние свыше 25 км, и потребителей газа—до 50 000 м³ в год, удалённых на расстоянии свыше 60 км; этой группе подавать газ невыгодно.

Магистральные газопроводы, подающие газ отдалённым крупным промышленным потребителям, прокладываются с учётом месторасположения этих основных потребителей. Кроме того, трасса газопроводов выбирается в непосредственной близости от узловых дорог, дабы в соответствующих пунктах можно было удобно расположить повысительные компрессорные станции для подачи газа из основной магистрали по ответвлениям к расположенным вблизи небольшим предприятиям, посёлкам и мелким потребителям.

Если мелкие потребители расположены в непосредственной близости от магистрального газопровода, то для подачи им газа достаточно установить в начале ответвления газопровода редуктор давления. Сооружение газгольдера в таких случаях излишне.

Потребители, отнесённые к первому классу и расположенные вдоль трассы магистрального газопровода на расстоянии 5—15 км от него, также могут получать газ в свои газораспределительные сети непосредственно из магистрального газопровода.

Мелкие потребители светильного газа, отнесённые к третьему классу и удалённые от магистрали на 25—60 км и выше, находятся в особо невыгодном положении. Подача им газа как по ветке газопровода, так и в баллонах обходится, по подсчётам докладчика, слишком дорого. Способ газоснабжения таких мелких, удалённых от источников газопроизводства, потребителей должен в каждом отдельном случае устанавливаться особо.

Отдельные участники конгресса, в частности М. Сёлье (M. Sellé), пессимистически оценивали современное состояние производства компримированных горючих газов во Франции. С особой остротой подчёркивалось, что если Франция является родиной производства сжатых до

высоких давлений горючих газов и если Франция создала конструкции легковесных баллонов, фактически предпрививших успех внедрения этого нового производства в широкую промышленную практику, то по масштабам развития производства сжатых газов она в настоящее время занимает одно из последних мест. В Германии ещё в 1937 г. намечалось довести производство сжатых газов до 300 млн m^3 в год, что эквивалентно 144 тыс. t моторного топлива. По мнению М. Сёлье, развитие производства сжатых горючих газов—крупнейшая задача, стоящая перед промышленностью Франции, разрешение которой связано с национальной обороной страны.

Заслуга французских научных и промышленных кругов заключается в том, что они не ограничились внедрением сжатых горючих газов в автомобильный транспорт и среди других категорий потребителей, а в результате упорной многолетней работы разрешили весьма существенную и сложную проблему—создание конструкций легковесных баллонов.

Производство легковесных баллонов во Франции началось в 1930 г., затем оно развернулось в Англии и в Германии. Бурный рост промышленности синтетического аммиака и появление на рынке легковесных баллонов стимулировали развитие производства сжатых газов и применение их, в первую очередь, для питания автомобилей.

Первые экспериментальные установки по глубокому охлаждению коксовых газов, сооружённые в период зарождения промышленности синтетического аммиака, позволили получать не только водород для синтеза аммиака, но и другие газообразные продукты, входящие в состав коксовых газов. На этих экспериментальных установках, а впоследствии и на крупных промышленных предприятиях оказалось возможным вырабатывать метановую фракцию с высоким содержанием метана и этиленовую фракцию с большим содержанием этилена и его гомологов.

Вскоре после освоения на экспериментальных установках основного технологического процесса глубокого охлаждения коксового газа зародилась мысль об использовании метановой фракции в автогенном деле, для лабораторных нужд, освещения вагонов, взрывных работ, питания автомобилей и т. д. Поскольку для каждого из этих потребителей требовался метан соответствующей степени чистоты или концентрации, на экспериментальных установках без особого труда искусственно составлялись необходимые смеси, в которых содержание как метана, так и других углеводородов находилось в необходимых для каждого вида потребителей пределах.

На одной из таких экспериментальных установок по глубокому охлаждению коксовых газов, сооружённой в Обергаузене, выпускалось для различных, главным образом исследовательских, целей несколько составов метанистых газов, например: метан R, содержащий 94% CH_4 —для взрывных работ, метан В (30% метана, 30% этана, 30% этилена)—для осветительных и лабораторных целей, метан L—для питания автомобилей и т. д. На этой же установке были поставлены опыты по использованию метанистого газа в сжатом состоянии для питания грузовых автомашин, а затем и автобусов. После удачных опытов эксплуатации автомашин на сжатом метане были начаты опыты по применению сжатого светильного, коксового и других высококалорийных газов.

При первых опытах с метаном на грузовиках устанавливались обыкновенные тяжеловесные стальные баллоны, в которых метанистый газ (обычно смесь метана с водородом) находился под давлением 150 ат. Результаты опытов должны были в то время дать ответ на такие вопросы: можно ли вообще переводить автомобильный двигатель на сжатый газ, каков эквивалент расхода сжатого газа и бензина, возможна ли работа двигателя на газе и бензине попеременно, какие конструктивные изменения и дооборудования необходимы при переводе автомашин на газ, каков экономический эффект и т. д. Словом, предстояло разрешить весь комплекс основных вопросов, определяющих успех нового начинания.

Опыты, проведенные со всей тщательностью и полнотой, дали настолько положительные результаты, что вскоре стала совершенно очевидной полная техническая возможность перевода автомашин на сжатые горючие газы. Дешёвые высококалорийные газы нашли новых рентабельных потребителей.

Изготовление легковесных баллонов ускорило и облегчило внедрение сжатых газов как в автомобильном деле, так и среди других потребителей. Были разработаны проекты газонаполнительных станций по типу бензиновых колонок. Сжатые газы стали поступать на рынок как полноценные заменители бензина.

Кроме газонаполнительных станций в Париже, Лионе и Камбрэ, во Франкии в последующие годы было введено в эксплуатацию свыше 15 таких станций, размещённых в различных районах и городах: Вани, Монрамбер, Вазье, Динар, Булонь, Лилль, Бэтион, Лимож, Тионвиль и др.

Производительность станций—от 100 до 200 м³/час и выше.

Преобладающее количество газонаполнительных станций во Франции рассчитано для работы на светильном газе с теплотворностью 4000—5000 ккал/м³. Некоторые станции рассчитаны для работы на метане с заводов синтеза аммиака.

В 1940 г. намечался перевод большей части автотранспорта Парижа на сжатый светильный газ [7].

Англия. Если Лебон во Франции в конце восемнадцатого столетия сделал первые попытки получения светильного газа и его технического использования, то Мёрдох в Англии в 1792—1798 гг. провел первые опыты практического производства светильного газа в крупном масштабе и использования его сначала для освещения зданий, а затем и улиц городов. Газовое уличное освещение в Лондоне было осуществлено в 1813 г., т. е. на три года раньше, чем в Париже и на 13 лет раньше, чем в Берлине.

Английская газовая промышленность, несмотря на сравнительно раннее её зарождение, по общему техническому развитию уступает газовой промышленности США и Германии, значительно опередившим её как в области модернизации методов производства горючих газов, так и по общей структуре построения газового хозяйства. Однако, несмотря на некоторый элемент консерватизма, характеризующий общее состояние газовой промышленности Англии, производство сжатых горючих газов в этой стране развито довольно широко. Число построенных и эксплуатируемых газонаполнительных станций велико (в Фулгеме, Вэмблее, Вендсворте, Нью-Кэстле, Линкольне, Сток на Тренте, Честерфилде и

многих других городах) и во всяком случае значительно превосходит число таких станций во Франции.

На построенной в 1933 г. в Честерфилде газонаполнительной станции установлен один компрессор вертикального типа, четырёхступенчатый, приводимый в движение [от электромотора мощностью 75 л. с.; производительность компрессора 168 м³/час, рабочее давление 350 ат. В целях экономии площади здания станции газосборники установлены вне здания, под открытым небом, рядом с газонаполнительной колонкой. Общая ёмкость трёх установленных газосборников составляет 2 м³ (по воде); при рабочем давлении 350 ат, сборники вмещают 700 м³ газа. Газосборники, изготовленные из никель-хром-молибденовой стали, имеют наружный диаметр 546 мм; для защиты от нагревания солнечными лучами они покрыты слоем изоляции.

Английские газонаполнительные станции в большинстве случаев имеют лишь по одному компрессору и притом небольшой производительности.

Англия вслед за Францией занялась разрешением проблемы производства легковесных баллонов, которые изготавлиются, главным образом, из высоколегированной никель-хром-молибденовой стали.

Германия. На экспериментальной установке в Обергаузене, о которой упоминалось выше, были проведены первые в Германии опыты использования компримированных горючих газов в баллонах для снабжения автомобилей, обеспечения нужд автогенной промышленности и т. п. На основании изучения производства метанистого газа и работы опытного грузовика экспериментальный завод в Обергаузене разработал специальный состав метанистого газа, названного „моторным метаном“, наиболее приемлемого для широкого применения в автотранспорте. Состав моторного метана (в объемных %) следующий:

CH ₄	от 43,2	до 61,2
C ₂ H ₆	17,8	23,4
C _n H _m	13,1	16,6
H ₂	0,8	4,2
CO	1,5	4,1
O ₂	0,6	0,7
N ₂	5,0	10,0

Теплотворность этого газа (низшая) = ~ 10000 ккал/м³. Газ отпускался со станции под давлением 150—200 атм.

В конце 1934 г. при заводе, производящем синтетический аммиак из коксовых газов, была построена и пущена в эксплуатацию специальная станция по производству метана и продаже его автомашинам. Производительность станции — 3000 м³/сутки. Из производственных цехов азотного завода метанистый газ направлялся в специальный газгольдер, откуда поступал на компрессорную станцию. Установленный на станции компрессор сжимал газ до 300 атм; под этим давлением газ отпускался потребителям.

Первая станция для компримирования светильного газа и использования его в баллонах для автомобилей была построена в Ганновере в конце 1934 г. и пущена в эксплуатацию в 1935 г.

За год ее эксплуатации количество отпущенного станцией газа возросло, примерно, в 5 раз; число автомашин, целиком переведённых на сжатый газ, возросло с 2 до 67; число автомашин, подъезжающих в течение месяца к станции для получения газа, возросло с 70 до 1108.

Когда выяснилось, что эта станция, рассчитанная на суточную производительность 3000 м^3 светильного газа, не в состоянии удовлетворить спрос автотранспорта на сжатый газ, в 1936 г. была сооружена вторая газонаполнительная станция. Производительность установленного на новой станции компрессора для светильного газа составляла $180 \text{ м}^3/\text{час}$. Давление сжатия 300 атм . В качестве двигателя на второй станции был установлен газомотор мощностью 80 л. с. Сжатый газ хранился в 5 сборниках ёмкостью 1 м^3 каждый. Все сборники позволяли хранить при станции, примерно, 1500 м^3 газа в сжатом состоянии.

В 1935 г. аналогичная газонаполнительная станция была построена в Берлине. Производительность установленного компрессора составляла $160 \text{ м}^3/\text{час}$, а давление 350 атм .

В том же 1935 г. была пущена в эксплуатацию газонаполнительная станция в Штутгарте. На станции установлен четырехступенчатый компрессор производительностью $190 \text{ м}^3/\text{час}$ при давлении 250 атм с электромотором 50 квт , расположенным в изолированном от компрессорного зала помещении. В отличие от ганноверской и берлинской, штутгартская станция была рассчитана для работы не на светильном и коксовом газе, а на газе, добываемом при биологической очистке городских сточных вод.

Такие же газонаполнительные станции, работавшие на газе биологических станций, были сооружены в городах: Гейльброн, Галле, Эссен, Мюнхен, Дюссельдорф.

Опыт Ганновера и Берлина был воспринят и другими городами. По опубликованным данным на 1 июля 1937 г., находилось в эксплуатации 34 станции; а к концу 1937 г. их число предполагалось довести до 50.

В начале 1940 г. работало на сжатом газе, примерно, 40 000 грузовых автомашин, причём, благодаря широко развитой сети газонаполнительных станций, число устанавливаемых на грузовиках баллонов, в среднем, снизилось с 5—6 до 4—5 [8].

На питание сжатым газом переводились не только грузовые автомашины, но и автобусы регулярно действующих линий.

На берлинских автобусах было установлено по два баллона ёмкостью 230—250 л каждый (длина баллона—2400 мм, наружный диаметр 394 мм, толщина стенки—11,5 мм); при рабочем давлении 200 атм два таких баллона вмещают, примерно, 100 м^3 светильного газа. Дневная потребность автобуса достигала 300 м^3 и больше; для бесперебойной работы автобуса баллоны необходимо пополнять газом минимум три раза в день.

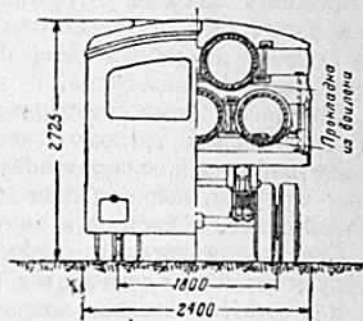
Снабжение сжатым газом этих автобусов производилось путем подвоза компримированного газа к конечной станции автобусов в баллонах на специальных грузовых машинах.

Общий вид такого грузовика изображен на фиг. 1. Это четырехосная автомашина, длина кузова которой соответствует длине установ-

ленных на ней 5 металлических баллонов ёмкостью по 1000 л каждый. На фиг. 2 указано размещение баллонов в кузове. На фиг. 3 изображен общий вид щита управления наполнением и опорожнением баллонов на грузовике.

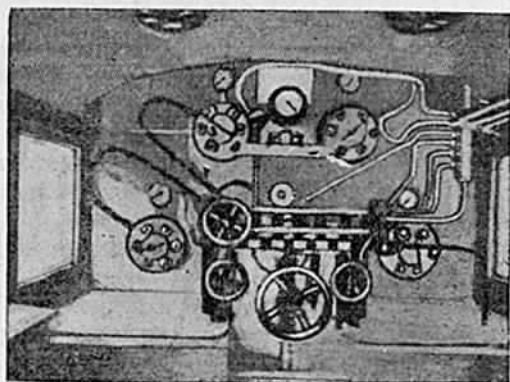


Фиг. 1. Общий вид грузовой автомашины для перевозки сжатого газа.



Фиг. 2. Поперечный разрез грузовой машины для перевозки сжатого газа.

Баллоны наполнялись газом на городской газонаполнительной станции. Грузовик с наполненными баллонами направлялся к месту стоянки автобусов, где газ перепускался в баллоны автобусов. Чтобы максимально использовать ёмкость баллонов грузовика, были проведены следующие



Фиг. 3. Щит управления грузовой автомашины для перевозки сжатого газа.

мероприятия: во-первых, баллоны грузовика наполняли газом не до 200, а до 350 ат, благодаря чему 5 баллонов одного грузовика вмещали, примерно, 1600 м³ светильного газа; во-вторых, перекачку газа в баллоны автобусов производили ступенчато; из первого баллона грузо-

вика наполняли баллоны автобуса до 50 ат, из второго баллона — до 100 ат и т. д. и, наконец, из последнего баллона грузовика наполняли баллоны автобуса до установленной нормы 200 ат. Благодаря такому методу ступенчатого наполнения удается в значительно большей степени опорожнять баллоны грузовика: до 82%, всего количества находящегося в них газа. В эксплуатацию было пущено три таких грузовика; по графику их работы один был на зарядке, один в пути, один на месте заправки автобусов.

Описанный опыт транспорта сжатого газа к месту его потребления на специальных грузовых машинах, осуществлённый на автобусной линии Берлина и воспроизводящий до некоторой степени аналогичный опыт Франции, явился одним из методов обеспечения сжатым газом его потребителей, в частности автотранспорта.

Следующим методом снабжения потребителей сжатым газом явилось сооружение передвижных компрессорных установок.

Как уже указывалось, широкое внедрение сжатых газов в промышленную практику породило самые разнообразные формы технического осуществления компримирования этих газов:

1) Газонаполнительные станции сооружаются в местах производства газов, 2) станции сооружаются в различных частях города и питаются газом от городской газовой сети, 3) готовый сжатый газ подвозят к местным газонаполнительным колонкам в баллонах или цистернах, 4) станции сооружаются на магистральных газопроводах большой протяженности (на дальних газопроводах) и т. д.

Выбор одного из этих вариантов базируется на изучении в каждом отдельном случае местных условий и реализуется в виде, требующем наименьших капиталовложений и минимума эксплуатационных расходов.

Передвижные установки могут быть осуществлены в двух формах.

1. Смонтированная на грузовике компрессорная установка высокого давления подвозится к стационарной газонаполнительной станции, присоединяется к городской газовой сети или магистральному газопроводу и наполняет газосборники этой станции сжатым газом.

2. На грузовике смонтирована батарея баллонов-газосборников, наполняемых сжатым газом на станции; грузовик развозит сжатый газ по газонаполнительным колонкам, наполняя установленные возле них стационарные газосборники. Такой метод газоснабжения осуществлён, как уже указывалось, во Франции.

При обоих вариантах для газоснабжения нескольких колонок достаточно располагать только одним работающим компрессором, который в одном случае является передвижным, в другом стационарным.

Производительность компрессора передвижной установки определяется с учетом затраты времени на её перевозку и на присоединения. Поскольку присоединения приходится делать и к газопроводам (на линии всасывания и на линии нагнетания) и к водопроводу, то производительность компрессоров таких установок принята 180 м³/час, а еще лучше 240 м³/час. Подсчеты показали, что подобная передвижная установка при двухсменной работе (16 час.) может обслужить четыре, максимум пять газонаполнительных колонок, затратив по два часа на пополнение газосборников каждой колонки; остальное время поглощают переезды

и присоединения. При производительности компрессора в $240 \text{ м}^3/\text{час}$ передвижная установка за 16 час. работы способна, таким образом, скомпримировать до 2400 м^3 газа.

Первая передвижная компрессорная установка была сооружена в 1935 г.

Италия. На базе месторождений природных газов в Италии развернулось строительство не только газопроводных магистралей, но и сооружение газонаполнительных станций. Имеются сведения [7], что в 11 провинциях оборудовано 17 установок для производства сжатого до 200 ат природного метанового газа с общей суточной производительностью $26\,145 \text{ м}^3$ и использования этого сжатого газа для питания автотранспорта. Одна из газонаполнительных станций сооружена в Болонье; эта станция получала газ из Поденцано по газопроводу диаметром $16/27 \text{ мм}$ и длиной 600 м . Газонаполнительная станция в Фонте-виво получала газ из Беллены по газопроводу длиной $3,5 \text{ км}$ и диаметром 51 мм . Из этого же источника питалась станция в Кастелькельфо (на расстоянии $3,6 \text{ км}$ от Беллены). Природный газ, поступающий из Беллены к этим двум станциям, загрязнен следами сероводорода, что потребовало оборудования при станциях сероочистных установок; одна из установок для очистки газа от серы работает под высоким давлением.

По данным за 1940 г. общая добыча природных газов в Италии составила 50 млн. м^3 (эквивалент $40\,000 \text{ т}$ бензина). Кроме природных газов, источником снабжения газонаполнительных станций Италии явился метановый газ городских биологических станций; газонаполнительная станция Милана рассчитана на питание этим газом. Газонаполнительная станция Неаполя работала на светильном газе.

В целях пропаганды по ряду маршрутов (Рим—Флоренция, Падуя—Милан и др.) в последние годы были совершены пробеги автобусов на сжатом метановом газе.

Прочие страны. В годы, предшествующие второй мировой войне, в ряде других европейских стран был проявлен интерес к производству и использованию сжатых горючих газов, главным образом, для перевода на них автотранспорта. Война и возникшие в связи с этим осложнения в импорте нефтепродуктов усилили такие тенденции, причем изыскания источников и методов ослабления дефицита бензина в отдельных странах пошли самыми разнообразными путями.

Швеция и Финляндия начали форсировать перевод двигателей на генераторный газ (дровяной и древесноугольный).

Норвегия, Швейцария и восточные провинции Франции начали изыскивать возможности использования ацетилена как заменителя бензина.

Дания, Румыния и Югославия начали развивать использование природных газов. Газонаполнительная станция Копенгагена ещё до войны практиковала перевозку сжатого газа в баллонах на грузовиках к отдаленным на большие расстояния потребителям [10].

Производство сжатого газа в СССР. Начатая, примерно, 5 лет назад реконструкция нашего газового хозяйства позволила выявить огромные ресурсы как природных, так и искусственных горючих газов в различных районах страны. Эти ресурсы дали возможность еще в 1938—1939 гг.

наметить сооружение большого числа газонаполнительных станций для снабжения сжатым газом в первую очередь автотранспорта и частично их осуществить.

При составлении плана сооружения газонаполнительных станций I очереди принималось во внимание:

1) наличие свободных ресурсов коксового, обогащённого коксового (после отделения водорода для производства аммиака), светильного или природного газа в количестве, достаточном для обеспечения бесперебойного питания станций;

2) хорошая очистка газа, в частности от сероводорода и нафталина;

3) потребность в сжатом газе местного автотранспорта; на первом этапе развития этого дела учитывалось, что основным потребителем сжатого газа будет грузовой автотранспорт.

При выборе площадок для строительства станций учитывались:

1) близость к гаражам или автомагистралям и

2) удобство снабжения станции газом, электроэнергией и водой.

Первые и наиболее энергичные мероприятия по использованию газа, как заменителя моторного топлива, были сделаны в Приазовье—в Мелитопольском районе, природные газовые месторождения которого были известны ещё с 1887 г. и где к 1938 г. уже было пробурено на газ 50 скважин. Первая газонаполнительная станция в этом районе была введена в эксплуатацию в 1939 г.

На этой станции установлен компрессор завода „Борец“, четырёх-ступенчатый производительностью $180 \text{ м}^3/\text{час}$, с давлением 220 ат . Для питания сжатым газом было переоборудовано 5 полутоннажных и 18 трёхтонных грузовых автомашин и один трактор.

Московская газонаполнительная станция была введена в эксплуатацию также в 1939 г. Станция рассчитана на питание городским светильным газом. Установленный компрессор с электроприводом имеет производительность $180 \text{ м}^3/\text{час}$. По техническому оснащению эта станция сооружена в полном соответствии с новейшим зарубежным опытом и по целому ряду показателей может служить прототипом для строительства аналогичных станций в других местах.

Горловка. Газонаполнительная станция введена в эксплуатацию в 1939 г. и у нас была первой станцией, работающей на обогащённом коксовом газе. В Горловке проведён также первый опыт снабжения сжатым газом не только автотранспорта, но и жилых домов. В 1940 г. было организовано баллонное газоснабжение одного четырехквартирного жилого дома и заканчивалось оборудование ещё 9 домов. В последующие годы предполагалось снабдить сжатым газом 5000 квартир.

Сооружение газонаполнительных станций было намечено перед Отечественной войной также в городах: Сталино, Макеевка, Енакиеве, Серго, Мариуполь, Днепропетровск, Днепродзержинск, Кривой Рог, Запорожье, Одесса, Харьков, Ворошиловск и др.

Эксплуатация наших первых станций сжатого газа облегчит дальнейшее развитие этого дела в СССР и поднятие всего газового хозяйства на ещё более высокую ступень его технической культуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Evans, „The history of the oil engine," London, 1932, ch. 1.
2. „Gas Age," 1940, vol. 86, № 2.
3. „Gas Age," 1943, vol. 91, № 1.
4. „Petroleum Times", 5/VIII 1939. № 1073.
5. „Нефтяное хозяйство" 1937, № 7.
6. „Journal des Usines à Gaz," 1937, № 13.
7. „Zeitschrift für kompr. u. flüss. Gase," 1940, № 9/10.
8. „Zeitschrift für kompr. u. flüss. Gase," 1940, № 3/4.
9. „Zeitschrift für kompr. u. flüss. Gase," 1941, №№ 1/2, 2/3.
10. „Het Gas," 1940, 60.

ГЛАВА II

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГОРЮЧИЕ ГАЗЫ КАК СЫРЬЕВАЯ БАЗА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЖАТЫХ И ЖИДКИХ ГАЗОВ

Газовая промышленность за 150 лет своего существования настолько широко развилась, что номенклатура известных в настоящее время горючих газов насчитывает много десятков наименований.

Классификация газов по их химическому составу является сложной задачей, поскольку при одном и том же технологическом процессе и одном и том же аппаратурном его оформлении может быть получен газ с колебанием состава в более или менее широких пределах. Здесь сказывается и химический состав исходного топлива, из которого вырабатывается газ, и предварительная подготовка этого топлива, и форсировка процесса и пр. Даже при таком, казалось бы, стабилизированном процессе, как коксование угля в современных стандартных коксовых печах, состав вырабатываемого коксового газа колеблется в сравнительно широких пределах. Неудивительно поэтому, что при составлении таблиц с перечислением состава как природных, так и искусственных горючих газов количество содержащихся в них отдельных компонентов обычно указывается в некоторых пределах, причём в эти пределы укладываются только наиболее характерные цифры.

В данной книге важно лишь установить, какие промышленные горючие газы и в какой степени могут оказаться пригодными для компримирования и сжижения.

Основным признаком, по которому целесообразно классифицировать промышленные горючие газы, является их теплотворность. По этому признаку горючие газы разделяются на три основные группы [1]:

а) низкокалорийные газы, теплотворность которых ниже 2500 ккал/н. м³;

б) среднекалорийные газы, теплотворность которых лежит в пределах от 2500 до 5000 ккал/н. м³;

в) высококалорийные газы с теплотворностью выше 5000 ккал/н. м³.

Ниже приведены составы и характеристики основных типов промышленных горючих газов с разбивкой по указанным трем группам, и дана оценка их пригодности для компримирования.

Низкокалорийные газы

К этой группе промышленных горючих газов относятся:

Доменные газы, получаемые в доменных печах в результате химического взаимодействия кислорода воздуха с углеродом топлива. Состав газов приведен в табл. 4.

Таблица 4

Состав доменных газов (в объёмн. %)

Наименование составных частей	При плавке на коксе			При плавке на древесном угле		
	среднее	максимальное	минимальное	среднее	максимальное	минимальное
CO ₂	8—13	15	4,5	10—13	20	7
CO	Переменное, смотря по содержанию CO ₂ и суммы (CO ₂ +CO)					
CH ₄	0,2—0,4	0,8	0,1	1,4	2,5	0,8
H ₂	2,5—3,0	4,0	1,2	7—8	10	5
N ₂	57—58	59	56	50—52	54	48
CO ₂ +CO	39—40	41	38	39	40	38

Теплотворность этих газов колеблется: при плавке на коксе в пределах 850—950 ккал/н. м³, при плавке на древесном угле в пределах 1000—1100 ккал/н. м³. Содержание пыли при плавке на коксе 20—40 г/м³; при плавке на древесном угле в газе содержится до 7 г/м³ смолы.

Огромные количества ежегодно вырабатываемого доменного газа (на 1 т расходуемого топлива получается при плавке на коксе 3800—4200 м³ газа, а при плавке на древесном угле 3700—3900 м³; при выплавке 1000 т чугуна в сутки выход газа составляет 2500 м³/мин) уже неоднократно побуждали техническую мысль изыскать способы обогащения этого газа и доведения теплотворности его до таких величин, при которых доменный газ можно было бы применять для квалифицированных потребителей.

Одним из наиболее эффективных путей в этом направлении является обогащение дутья кислородом и конверсия окиси углерода в метан. Теплотворность газа при этом может быть значительно повышена [2], как это видно из данных табл. 5.

Проведённые в свое время опыты на Тульском заводе показали возможность ведения плавки на торфе и на обогащённом дутье. Процесс конверсии окиси углерода в метан по основной реакции

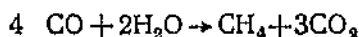


Таблица 5

Состав обогащённых доменных газов при работе на торфе
(в объёмн. %)

	CO ₂	CO	CH ₄	C _n H _m	H ₂	N ₂	Q _{ккал/м³}
При 40% кислорода в дутье	12,9	44,5	3,9	1,1	11,6	26	2000
При 60% кислорода в дутье	15,0	50	4,5	1,5	14	15	2510
При отмывке газа от CO ₂	—	58,8	5,3	1,8	26,5	17,6	2960
При метанировании с переводом 80% CO в CH ₄ и промывке от CO ₂ . .	—	18,2	26,4	2,7	25,4	27,3	3890

также освоен как в части подбора катализаторов, так и аппаратного оформления. Решающим вопросом остается экономика производства.

Обычные доменные газы, вырабатываемые на металлургических заводах, не могут служить источником для производства сжатых или сжиженных газов. Затрата энергии на компрессию 60—70% балластных составных частей—азота и углекислоты—не может быть оправдана. Иные перспективы рисуются при применении обогащённого кислородом дутья. Как показывают данные табл. 5, доменные газы при обогащённом дутье и химической переработке могут быть переведены в группу среднекалорийных газов и явиться потенциальным ресурсом для производства компримированных газов.

Генераторные газы получают в газогенераторах при химическом взаимодействии кислорода и водяных паров дутья с углеродом топлива.

В зависимости от рода топлива, состава дутья, конструкции газогенератора и пр. состав генераторных газов колеблется в широких пределах (см. табл. 6).

Таблица 6

Состав генераторных газов

Наименование компонентов	Содержание в % по объёму
CO ₂	2,0—10,0
CO	20,0—32,0
H ₂	2,0—20,0
CH ₄	0,2—5,0
N ₂	44,0—63,0
Теплотворность газа (высшая), ккал/н. м ³ .	1000—1700

Исключением из категории низкокалорийных генераторных газов являются: водяной газ, двойной газ и газ, получаемый при парокислородном дутье в газогенераторах под давлением. По теплотворности эти

газы относятся к группе среднекалорийных газов и будут рассмотрены дальше.

Как показывают данные табл. 6, низкокалорийные генераторные газы, как и доменные, содержат настолько много балластных CO_2 и N_2 , что не могут рассматриваться как пригодные для компримирования.

Газы подземной газификации углей. Революционная идея подземной газификации углей впервые практически реализована в нашей стране.

Качественная характеристика этих газов, полученных на экспериментальных участках [3], приведена в табл. 7.

Таблица 7

Состав газов подземной газификации угля (в объёмн. %)

Наименование составных частей	При воздушном дутье	При периодической подаче дутья		После отмывки от CO_2	
		I	II	I	II
CO_2	11,5	20,6	26,1	3,0	3,0
CO	12,0	32,5	21,8	39,7	28,6
H_2	14,0	40,0	45,5	48,9	59,7
CH_4	2,5	3,9	4,0	4,8	5,3
O_2	—	0,1	0,1	0,1	0,1
N_2	60,0	2,9	2,5	3,5	3,3
Теплотворность газа (высшая), ккал/н. м ³	1030	2580	2435	3150	3200

Данные табл. 7 показывают, что при периодическом процессе и отмывке газа от угольной кислоты может быть получен газ с теплотворностью свыше 3000 ккал/н. м³.

Пока нет оснований рассчитывать, что получаемый при этом процессе газ может содержать большие количества углеводородов; основными его компонентами являются водород и окись углерода. Поэтому процесс сжижения такого газа сопряжен с очень высокими давлениями или очень низкими температурами. Значительно доступнее может оказаться его использование в сжатом виде. Если будут изысканы способы обогащения газа подземной газификации, эффективность его компримирования увеличится.

До сего времени производство сжатых газов, состоящих, в основном, из CO и H_2 , не практиковалось. Слишком небольшой срок существования этой молодой отрасли промышленности и безусловная целесообразность компримирования более богатых газов, в первую очередь углеводородных, а также затруднительность работы с газами, содержащими большое количество окиси углерода и потому опасными для потребителей, ограничивали пока номенклатуру газов, используемых в сжатом виде, но появление таких новых мощных источников, как подземная газификация, могут в дальнейшем изменить наши представления и расчеты.

Среднекалорийные газы

Водяной газ, получаемый из кокса или антрацита, принадлежит по теплотворности к группе среднекалорийных газов, но, как состоящий главным образом из водорода и окиси углерода, в настоящее время не применяется для производства сжатых газов; причины этого были приведены выше. Компримирование водяного газа имеет место в тех случаях, когда он входит составной частью в городской газ; такой метод использования водяного газа практикуется на газовом заводе в Москве и ряде городов США и Западной Европы.

Двойной водяной газ более приемлем для использования его в сжатом виде у потребителей, так как обладает более высокой теплотворностью и меньшим содержанием окиси углерода (см. табл. 8), особенно при дополнительном обогащении газа посредством карбюрации [4].

Состав двойного водяного газа (в объёмн. %)

Таблица 8

Наименова- ние компо- нентов	При опытах газификации							Из германского бурого угля в генераторах Штрахе	Из саарских углей в ге- нераторе Крейсса с карбюра- цией	
	торфа			подмосковного угля						
	завод Шкода в Пильзене	газовый завод в Леобене	Московский газо- вый завод	завод Шкода	газовый завод в Леобене	газовый завод в Сан-Рафаэле	Московский га- зовый завод			
CO ₂	9,2	13,0	17,2	18,8	14,0	10,6	20,5	8,9	8,2	7,8
CO	35,8	27,0	21,2	24,3	28,5	34,0	16,3	34,2	29,1	27,6
CH ₄	2,9	4,0	8,7	6,6	4,0	5,8	6,5	6,3	7,1	10,7
C ₂ H ₆	0,2	2,0	1,0	0,4	0,4	0,9	0,5	0,2	0,7	2,2
H ₂	40,8	46,5	49,2	33,7	47,5	35,0	50,7	38,4	50,5	47,5
O ₂	0,2	0,5	—	0,1	0,2	0,3	—	0,3	—	—
N ₂	10,9	7,0	2,7	16,1	5,4	13,4	5,5	11,7	4,4	4,2
Теплотвор- ность газа (высшая) ккал/н.м ³ .	2650	3000	3140	—	2850	2900	2800	3030	3200	3710

В СССР производство двойного водяного газа до сего времени широкого промышленного развития не получило. В зарубежной практике для производства сжатых газов двойной водяной газ пока не применяется.

Газы парокислородного дутья. Применение парокислородного дутья дает возможность получения генераторных газов с повышенной теплотворностью, как это видно из данных табл. 9.

Применение высокого давления позволяет получить газ с такой же теплотворностью как и коксовый газ.

Коксовый газ, городской (светильный) газ. В наши дни исчезла грань, отделявшая в свое время коксовый газ от светильного; по всем основным показателям они идентичны. Различие появляется в тех слу-

Составы генераторных газов при парокислородном дутье (в объёмн. %)

Наименование составных частей	При обычном давлении		Под давлением 20 ат	
	из бурого угольных брикетов	из подмосковного угля	из бурого угля	
			сырой газ	очищенный газ
CO ₂	13,2	21,9—25,7	32,3—33,1	2,0
CO	32,9	25,1—33,2	13,9—15,9	20,3—23,7
H ₂	42,8	36,3—40,4	37,0—31,4	53,8—46,8
CH ₄	1,1	4,3— 4,9	13,8—15,4	20,0—23,0
C _n H _m	2,3	0,4— 0,8	0,6— 1,0	0,8— 1,5
O ₂	1,1	0,1— 0,2	0,1	0,15
N ₂	6,6	2,7— 3,8	2,3— 3,1	3,0—4,5
Теплотворность газа (высшая), ккал/н. м ³ . .	2985	2250—2490	2900—3050	4220—4550

чаях, когда в качестве городского газа используется смесь нескольких газов, подчас полученных при различных технологических процессах.

В табл. 10 приведены составы газов, заимствованные из проектных материалов Донюжгаза по данным 1939 г. и характеризующие качество городских и коксовых газов, которые вырабатывались в некоторых городах и на коксохимических заводах СССР.

Таблица 10

Составы городских (светильных) и коксовых газов (в объёмн. %)

Наименование составных частей газа	Московский газовый завод	Одесский газовый завод	Харьковский газовый завод	Ново-Макеевский коксохимический завод	Ново-Енакиевский коксохимический завод
CO ₂	5,0	3,8	2,6	2,0	2,4
CO	20,0	10,6	4,5	3,2	6,1
C _n H _m	8,6	2,7	2,0	2,5	2,0
CH ₄	16,0	24,4	22,8	24,2	22,3
H ₂	27,8	55,0	48,2	53,6	60,4
O ₂	0,6	0,7	0,5	1,4	0,7
N ₂	22,0	2,8	19,4	8,1	6,1
Теплотворность газа (высшая), ккал/н. м ³ . .	4340	4760	4400	4600	4470

Табл. 10 отчетливо показывает, насколько газы этой категории превосходят по качеству все ранее рассмотренные. Большое содержание горючих компонентов, в частности углеводородов, и высокая теплотворность, составляющая от 3800 до 5500 ккал/н.м³ — таковы основные преимущества этих газов. Если учесть еще высокую степень очистки газов (о пределах очистки будет сказано ниже) и масштабы их

производства, то станет понятным, почему именно на базе этих промышленных газов развилось производство сжатых газов.

Выше уже упоминалось, что производство городского газа во многих случаях ведется путем смешения различных газов. В городах США при этом главную роль играет природный газ, смешиваемый с различными менее калорийными искусственными газами; в городах Западной Европы смешиваются преимущественно искусственные газы от различных технологических процессов.

Различие в составе коксового или светильного газов и описанных ранее генераторных газов может быть выражено нагляднее, если входящие в их состав компоненты разбить на три основные группы:

I	II	III
CH_4 C_nH_m	H_2 CO	CO_2 O_2 N_2

К I группе отнесены углеводороды, представляющие по своей теплотворности наибольшую ценность и предопределяющие тем самым высокое качество газа; эта группа особенно интересна и с точки зрения производства сжатых или сжиженных газов.

Во II группу входят водород и окись углерода; оба газа менее калорийны и весьма трудно сжижаемы.

Наконец, III группа — углекислота, кислород, азот — балластные негорючие газы, ухудшающие своим присутствием качество газа; к этой же группе относятся и все вредные примеси, как-то: сероводород, нафталин, пары смолы, цианистые соединения и др., которые должны быть удалены из газа при его очистке перед отпуском потребителям.

Промышленные газы, относящиеся к категории низкокалорийных газов, состоят на 50—70% из индивидуальных газов III группы и на 30—50% из газов II группы; углеводородные газы, как было указано, в них почти отсутствуют. Иная картина при среднекалорийных газах; как видно из табл. 10, содержание газов I группы составляет здесь 24—27%, II группы — 48—66% и III группы — 7—27%.

Таким образом, коксовый и светильный газы относятся к категории промышленных газов, которые целесообразно использовать для производства сжатых газов.

Полукоксый газ (швельгаз). Примерные анализы газов, полученных при полукоксировании некоторых бурых и каменных углей СССР [6], приведены в табл. 11.

Отличительная особенность швельгазов — большое содержание углеводородов, благодаря чему теплотворность их выше, чем газов, получаемых при высокотемпературной сухой перегонке твердых топлив.

Для производства сжатых газов швельгазы до сего времени непосредственно не применялись, хотя после очистки от вредных примесей они могут быть использованы для этой цели.

Род топлива	Состав газа в объемных %							Теплотворность газа (высшая), ккал/м.м ³
	CH ₄ и гомологи	Ненасыщенные углеводороды	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ S	N ₂	
Из бурых углей	20—59	1—8	5—23	4—9	3—34	8—40	2—17	3500—6000
Из каменных углей	46—63	1—5	11—20	3—11	7—14	1—7	3—25	5500—8700

По экспериментальным наблюдениям при полукоксовании гдовских горючих сланцев получался швельгаз следующего состава (в объемн. %):

I	II	III
CH ₄ —27,8 C ₂ H ₄ — 1,5 C ₂ H ₆ — 8,0 C ₃ H ₈ — 2,3 C ₃ H ₆ — 2,8 C ₄ H ₈ — 9,2 C ₆ и выше 1,0 Итого 52,6%	H ₂ —3,5 CO—5,7 Итого 9,2%	CO ₂ —21,0 H ₂ S— 6,5 N ₂ —10,7 Итого 38,2%

При промышленном производстве такого газа он может после надлежащей очистки быть источником получения жидкого газа.

Остаточные газы при производстве синтетического бензина по методу Фишера-Тропша. Эти газы могут быть отнесены к категории среднекалорийных газов.

Технологические особенности нового процесса производства синтетического бензина по Фишеру-Тропшу сказываются, прежде всего, в том, что остаточные газы совершенно чисты; в них отсутствуют: смоляные пары, сероводород, аммиак, нафталин, органическая сера, цианистые соединения, окислы азота; в этих газах, наконец, очень мало кислорода. Отсутствие загрязнений и вредных примесей повышает ценность этих газов, но одновременно некоторые обстоятельства уменьшают возможность их широкого промышленного применения. Сюда, в первую очередь, надо отнести непостоянство состава газов. Практические наблюдения [7] показывают, что в промышленных условиях колебания процентного содержания отдельных составных частей очень велики: это видно из табл. 12, где для сравнения приведены колебания в составе обычного светильного газа.

Производство синтетического бензина по Фишеру-Тропшу принадлежит к числу новых отраслей промышленности; непостоянство состава остаточных газов, возможно, зависит ещё от недостаточного опыта промышленной эксплуатации.

Таблица 12

Наименование компонента	Содержание в объеме. % в	
	остаточном газе синтезного производства	светильном газе
CO ₂	13,5—21,8	2—4
C _n H _m	0,2—1,1	2—3,5
O ₂	0—0,2	0,1—0,3
CO	2,9—11,6	6—18
H ₂	11,3—23,6	50—65
CH ₄	27,6—40,9	17—25
N ₂	15,7—35,1	2—12
Теплотворность в ккал/н. м ³ :		
а) высшая	3925—4550	4200—4600
б) низшая	3595—4270	3800—4200
уд. вес (воздух = 1) . .	0,725—0,77	0,4—0,5

Вторая отрицательная особенность остаточных газов — очень большое содержание углекислоты и азота при малом содержании водорода; если сжигать такой газ в газовой горелке, то повышение избытка воздуха может значительно быстрее привести к затуханию пламени, чем при сжигании, например, светильного газа. Произведенные исследования показали, что действительно скорость воспламенения остаточного газа, т. е. скорость, с которой пламя движется навстречу горючей смеси, для данного газа значительно ниже, чем для светильного; так, при содержании остаточного газа в горючей смеси в 19,5% скорость воспламенения определена в 29 см/сек, в то время как для светильного газа при его содержании в горючей смеси 20—25% скорость воспламенения 95—70 см/сек. Это обстоятельство ограничивает пока возможность применения остаточного газа как полноценного заменителя светильного газа в городах; согласно произведенным опытам и наблюдениям считается возможным пока только добавлять его в определенной пропорции к светильному газу (в пропорции 1:3 или максимум 1:2); в основном этот газ используется в настоящее время для сжигания в топках паровых котлов или промышленных печей.

Высококалорийные газы

Не останавливаясь на характеристике промышленных газов, получаемых при карбюрации, смешении и прочими методами обогащения, перейдем к рассмотрению еще более ценных высококалорийных газов, имеющих теплотворность выше 5000 ккал/н. м.³

Обогащенные газы, получаемые при синтезе аммиака на базе коксовых газов. При глубоком охлаждении коксового газа и производстве из него водорода для синтеза аммиака в виде побочных продуктов получают: 1) метановая и 2) этиленовая фракции. Примерный состав этих ценных газов дан в табл. 13.

Таблица 13

Наименование газа	Состав газа в объёмн. %							
	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	H ₂	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
Исходный коксовый газ	24,2	1,85	1,29	56,8	5,4	1,03	0,81	8,6
Метановая фракция . . .	70,7	1,4	1,8	3,8	9,9	—	1,2	11,2
Этиленовая фракция . . .	37,2	23,6	15,4	13,0	3,2	—	1,4	6,2
Обогащённый коксовый газ (богатый газ, син- тез-газ)	51,2	3,7		7,8	12,5	—	1,55	23,6

В последней строчке табл. 13 приведен примерный состав обогащённого коксового газа, называемого еще „богатым газом“ или „синтез-газом“, который получается в виде конечного побочного продукта производства, если метановая и этиленовая фракции не используются отдельно. На долю обогащённого газа, теплотворность которого определяется в 5500—6200 ккал/н.м.³, приходится 60—65% от теплотворности исходного коксового газа, а в объёмных процентах—около 50% от исходного газа.

По своему составу обогащённый коксовый газ, а тем более его узкие фракции—метановая и этиленовая—являются весьма ценными источниками для производства компримированных газов и могут отпущаться потребителям как в сжатом, так и жидком виде. Как было указано в I главе, метановая фракция сыграла большую роль в деле развития производства сжатых газов в западно-европейских странах.

Метанистый газ городских биологических станций. Этот газ получается из ила городских сточных вод. Главными составными его частями являются метан и углекислота. В зависимости от оборудования биологических станций и технологических условий ведения процесса состав газа варьирует, но в сравнительно небольших пределах, как это видно из табл. 14 (в объёмн. %).

Таблица 14

Составные части газа	По данным западно- европейских городов [8]	По данным американ- ских горо- дов	По данным Харьковской биологической станции	
			до удале- ния CO ₂	после уда- ления CO ₂
CH ₄	65—80	60—70	64,6	93,0
CO ₂	20—30	30—40	31,36	1,06
N ₂	1—4	0,8—3,0	4,04	5,94
H ₂	до 7,0	0,02—0,1	—	—
H ₂ S	до 0,1	—	—	—
O ₂	до 0,2	до 0,2	—	—

Низшая теплотворность этих газов выше 5000 ккал/н. м³, а после отмывки от угольной кислоты составляет, примерно, 8000 ккал/н. м³.

Опыт западно-европейских стран показал полную возможность и рентабельность их использования для производства сжатых газов и питания автомобильных двигателей.

Остаточные газы гидрогенизационных заводов. Получающиеся при гидрировании углей по методу Бергюса остаточные газы состоят; в основном, из предельных углеводородов. Применяемые методы абсорбции этих газов маслом или адсорбции активированным углем позволяют при последующей десорбции получать отдельные индивидуальные углеводороды в технически чистом виде; эти углеводороды отпускаются потребителям в жидком или сжатом виде. По такому методу (метод Supersorbon) в Германии к 1940 г. работали 22 крупные установки [9].

По имеющимся данным [10] состав остаточных газов от водородного цикла следующий; метана 65—70%, этана 15—20%, пропана 12—16%, бутана 0,2—0,3%.

На базе этих остаточных газов был в свое время выпущен на рынок ряд продуктов под различными торговыми наименованиями, как например:

«Лёуна-пропан»	«Лёуна-бутан»
C_3H_8 —95% C_2H_6 C_4H_{10} } 5%	C_4H_{10} —95% C_3H_8 C_5H_{12} } 5%

Известен сорт торгового пропана с заводов Лёуна, в котором содержится 28% непредельных углеводородов [11].

Физико-химическая характеристика торгового „лёуна-пропана“:

Теплотворность (низшая) при 0° С и 760 мм рт. столба	21 670 ккал/н. м ³
Теплотворность (низшая) при 15° С и 735 мм рт. столба	19 910 ккал/н. м ³ 11 000 ккал/кг
Объемный вес:	
при 0° С и 760 мм рт. столба	1,97 кг/н. м ³
при 15° С и 735 мм рт. столба	1,81 кг/н. м ³
Плотность (по воздуху=1)	1,53
Вес в жидком состоянии при 15° С	0,511 кг/л
Упругость паров при —33° С	2,1 ата
» » » —15° С	3,6 »
» » » + 1° С	5,8 »
» » » +12,5° С	7,8 »
» » » +22° С	9,9 »
» » » +53° С	18,7 »
Начало кипения при давлении 1 ата	—49° С
Критическое давление	46 ата
Критическая температура	+97° С
Теоретический расход воздуха на сжигание	24 м ³ /м ³ газа

Судя по физико-химической характеристике, этот торговый продукт, состоящий преимущественно из пропана, идентичен техническому пропану, выпускаемому в продажу на американском рынке.

Искусственные нефтяные газы. В эту обширную группу входит большое количество искусственных газов, получаемых при термической переработке и стабилизации нефтей и нефтепродуктов. Основными компонентами газов являются предельные и непредельные углеводороды от C_1 до C_5 . По химическому составу они могут служить хорошим исходным продуктом для производства жидких и сжатых газов. Упомянутый в I главе блаугаз — продукт пиролиза нефтяных масел — был первым промышленным образцом этой группы газов.

Трудно дать уточненную характеристику современных промышленных газов этой группы, настолько они разнообразны в зависимости от условий ведения процесса и качества исходного продукта, тем более, что газы могут являться и самоцелью производства и побочными продуктами при соответствующих процессах переработки нефти.

Приводимые ниже данные поэтому служат только для общей характеристики изменения состава искусственных нефтяных газов в зависимости от изменения аппаратного оформления, температурного режима, давления и качества исходного продукта.

Газы крекинга нефти и нефтяных продуктов отличаются относительно высоким содержанием олефинов; процентное содержание отдельных углеводородов колеблется в широких пределах. В то же время тщательным регулированием крекинг-процесса можно регулировать и процентное соотношение основных компонентов в газе.

Примерный состав крекинг-газов в зависимости от исходного сырья дан в табл. 15 (в объёмн. %);

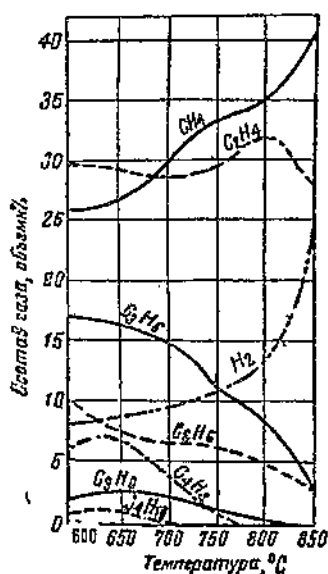
Таблица 15

Г а з ы		С ы р ь е д л я к р е к и н г а		
наименование	химическая формула	газойль	отбензиненная нефть	полимеры олефинов
Водород	H_2	35,0	38,8	48,4
Метан	CH_4			
Этилен	C_2H_4	24,6	20,3	14,2
Этан	C_2H_6	11,9	13,2	12,3
Пропилен	C_3H_6	18,0	13,1	12,6
Пропан	C_3H_8	2,5	5,7	2,8
Бутилен	C_4H_8	4,7	6,4	7,4
Бутан	C_4H_{10}			
Амилен	C_5H_{10}	3,1	2,5	2,3
Пентан	C_5H_{12}			

Эта таблица, между прочим, показывает, что качество исходного сырья, подвергаемого крекингу, в небольшой мере сказывается на химическом составе получаемого газа. Несмотря на то, что сырьем служила как сырая нефть, так и ее фракции, колебания в составе полученных газов сравнительно невелики.

Значительно отчётливее сказывается влияние температуры, при которой ведётся крекинг. Кривые на диаграмме (фиг. 4) наглядно иллюстрируют, как резко изменяется объёмное содержание в газе основных его составных частей, если изменять температуру крекинга в пределах от 600 до 850° С.

Газы нефте-крекинговых заводов обладают очень высокой теплотворностью, как это можно видеть из приведённых анализов. В современной промышленной практике, особенно американской, эти газы или непосредственно смешивают с бедными газами, или же пропускают через аппараты с раскаленной насадкой, благодаря чему газ обогащается водородом при соответствующем понижении его теплотворности. Аналогичный метод переработки применяется в американской практике и в отношении высококалорийного природного газа. Получающийся при этом „реформированный“ газ, поступающий к потребителям, по составу близок к светильному газу. Типичные анализы таких „реформированных“ газов, получаемых в американской практике при переработке нефтекрекинговых и природных газов, приведены в табл. 16 (в объёмн. %).



Фиг. 4. Диаграмма изменения состава крекинг-газа с изменением температуры процесса

Таблица 16

Составные части	О р а з ц ы г а з а				
	1	2	3	4	5
CO ₂	2,2	2,3	2,2	2,4	3,1
CO	14,3	20,8	18,7	14,5	15,6
H ₂	50,9	49,8	41,2	43,5	27,9
O ₂	0,9	0,7	0,2	0,2	0,1
CH ₄	15,9	12,3	26,8	29,7	30,0
C ₂ H ₆	5,0	5,5	3,7	1,7	4,9
C ₃ H ₈	2,4	3,7	0,5	1,0	0,4
N ₂	8,4	4,9	6,7	7,0	18,0
Удельный вес .	0,497	0,506	0,502	0,472	0,615

В табл. 16 в столбцах 1 и 2 приведены анализы газов, полученных при термической переработке нефтяных крекинг-газов, а в столбцах 3, 4 и 5 — полученных при переработке природных газов; природные газы в данном случае были взяты с содержанием, примерно, 75% метана и 20% этана.

Влияние физических условий процесса крекинга на состав газа могут иллюстрировать приведённые в табл. 17 анализы газов жидкофазного и парофазного крекинга нефти [12].

Таблица 17

Составные части	Крекинг (в объемн. %)	
	жидкофазный	парофазный
Водород	3	7
Метановые углеводороды . .	80,7	39,6
Этилен	3,9	27
Пропилен	6,6	16
Бутилен	5,8	9
Бутадиен	следы	1,0

Преобладание парафиновых углеводородов при крекинге в жидкой фазе и олефинов при крекинге в паровой фазе видно и по табл. 18, где сопоставлены анализы нефтяных крекинг-газов с анализами газов прямой гонки [13] (в объемн. %)

Таблица 18

Составные части	Газ прямой гонки	Газ из коксовых кубов	Газ жидкофазного крекинга	Газ парофазного крекинга	
				системы Суго	системы НК-НП
Метан	5	47	46,3	35,4	37,5
Водород	—	—		—	—
Этан	12	15	16,6	13,3	13,0
Этилен	—	—	1,2	22,9	13,5
Пропан	30	16	16,2	0	7,6
Пропилен	—	—	5,3	18,1	15,2
Бутаны	34	9	6,1	1,4	3,0
Бутилены	—	—	4,3	5,5	7,2
Высшие углеводороды	19	13	3,7	3,4	8,0

Если объединить данные по составу газов жидкофазного крекинга, то можно отметить следующие колебания процентного содержания наиболее интересных компонентов (в объемн. %)

Парафиновые углеводороды	72,9—88,0
Водород	1,7—7,5
Этилен	1,9—6,3
Пропилен	0,8—1,24
Бутилены	2,0—2,0

Газы пиролиза отличаются резким увеличением содержания метана и водорода за счет уменьшения содержания высших углеводородов. Это различие можно видеть при сравнении, например, с составом газа пиролиза крекинг-керосина (при 660—670°С) (в объёмн. %)

Водород	17
Метан	44
Этан	7,5
Этилен	17,5
Пропан	0,5
Пропилен	7,0
Бутилены	2,5
Бутаны	0,2
Бутадиен	1,3
Высшие углеводороды	2,5

Газ пиролиза нефти в ретортных печах (в объёмн. %):

Метан	32,8	Окись углерода	1,2
Высшие углеводороды	45,4	Кислород	0,4
Этан	3,0	Азот	2,5
Водород	5,0		

Необходимо отметить, что в газах пиролиза, так же как и в газах парофазного крекинга, содержатся хотя и в небольших количествах диолефины, в частности бутадиен или, как его часто называют, дивинил. Присутствие этого углеводорода, весьма склонного к полимеризации, создает большие трудности при производстве сжатых газов.

Если подойти к оценке искусственных нефтяных газов с точки зрения их теплотворности, то отличие их от газов среднекалорийных и особенно низкокалорийных весьма разительно. Первая группа углеводородных компонентов, наиболее ценная с точки зрения использования для производства жидких и сжатых газов, здесь составляет 80—90%. Непредельные углеводороды ценны как химическое сырье для производства высокооктановых авиатоплив, синтетического каучука, спиртов и пр.; их сжижение может быть рассматриваемо как метод физического обогащения. Предельные углеводороды ценны и как химическое сырье и как весьма концентрированное горючее, которое в жидком состоянии обладает большими преимуществами.

Природные газы. Средний состав углеводородных газов, добываемых в США, [14] (в объёмн. %):

Метан	69	Бутан	5
Этан	14	Высшие углеводороды	3
Пропан	9		

В табл. 19 приведены опубликованные в нашей литературе составы природных газов по месторождениям СССР, которые отчётливо показывают, какую высокую ценность представляют природные газы для нашего народного хозяйства.

Природные газы месторождений, указанных в пп. 1—6, относятся к категории жирных газов; природные газы остальных месторождений — сухие. Теплотворность жирных природных газов может быть принята в пределах от 7 000 до 15 000 ккал/н. м³; теплотворность сухих метанистых газов — 7 000—9 000 ккал/н. м³.

Таблица 19

Наименование месторождения	Состав газа в объемн. %						
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	высшие C _n H _m	CO ₂	N ₂
Баку :							
Сталинский район	90,9	3,0	0,5	1,4	2,0	2,2	—
Ленинский »	93,4	0,1	0,1	0,2	0,7	5,5	—
Район им. Орджоникидзе	89,8	0,2	0,1	0,3	1,3	8,3	—
» » Кагановича	97,1	2,5	—	—	0,4	—	—
Грозный :							
Новый район	43,0	7,6	17,4	16,7	15,3	—	—
Старый »	75,2	6,0	8,0	5,7	5,1	—	—
Майкоп	53,6	14,2	11,7	8,2	5,4	6,9	—
Бориславский район Западной Украины	83,0	10,9	4,8	1,1	—	0,2	—
Дашава	97,9	0,7	0,2	0,1	—	0,1	1,0
Предгорье	93,0	3,0	1,2	1,0	0,6	0,2	1,0
Дагестан	87,9	0,4				2,5	9,2
Мелитопольский район	97,0	—	—	—	—	—	3,0
Саратовский »	92,0	—	—	3,0	—	—	5,0
Керченский »	98,0	—	—	—	—	2,0	—
Ухтинский »	99,0	—	—	—	—	—	1,0

Жирные природные газы являются огромным ресурсом для производства жидких газов. Сухие метанистые газы являются источником для производства сжатых газов.

Пути облагораживания промышленных газов

Выше были приведены анализы состава ряда промышленных горючих газов и дана их оценка с точки зрения пригодности для производства сжатых и жидких газов. Приведенный перечень, конечно, далеко не полон и не охватывает все виды промышленных газов, известных в современной газовой технике.

Исходя из требований производства сжатых и жидких газов, небезинтересно остановиться на некоторых методах облагораживания промышленных газов, как средства повышения их теплотворности. Некоторые из этих методов уже широко практикуются в промышленном масштабе, другие находятся ещё в стадии теоретического или экспериментального изучения.

Метод смешения принадлежит к числу широко распространенных, особенно в практике США. Располагая большими ресурсами высококалорийного природного газа, во многих городах США практикуется простое смешение этого газа с низкокалорийными газами; получаемый

смешанный газ удовлетворяет всем требованиям стандартного городского светильного газа. Простота и легкость выполнения процесса смешения позволяют применять его практически при любом количестве смешиваемых индивидуальных газов. В этой области имеется уже многолетний опыт не только американских, но и европейских городов; в течение многих лет метод смешения практикуется в Москве.

Метод карбюрации. Простейшей формой применения этого метода является производство карбюрированного бензином газа. Воздух или низкокалорийный газ пропускается через карбюратор с легким бензином; получаемый газ имеет теплотворность 2000—3500 ккал/н. м³ и вполне пригоден, например, для снабжения лабораторий; кроме бензина может быть применен эфир, бензол и прочие летучие вещества.

В связи с появлением торгового пропана, изучалась возможность применения его для обогащения промышленных газов, содержащих незначительные количества углеводородов, как, например, водяной газ.

Опыты карбюрации техническим пропаном были произведены [15] с водяным газом состава: CO—47,6%, H₂—50,0%, O₂—0,4%, N₂—2,0% Q_g—2975 ккал/н. м³.

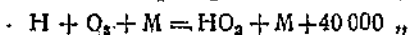
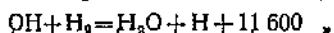
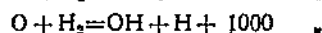
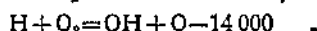
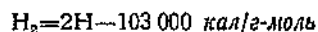
Характеристика исходных газов и их смесей приведена в табл. 20.

Таблица 20

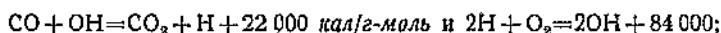
Наименование показателей	Водяной газ	Технический пропан	6% пропана + 94% водя- ного газа	7,5% пропана + 92,5% водя- ного газа	Городской све- тельный газ
Теплотворность газа (высшая), ккал/н.м ³	2700—2750	23000—24000	4200	4500	4200—4500
Удельный вес (воз- дух = 1)	0,55—0,58	1,5—1,6	0,61	0,63	0,4—0,5
Высшая скорость вос- пламенения, см/сек	150—170	32—35	85	80	70—95
Удельная плотность факела ккал/см ² /сек × 10 ⁻⁴	4000—4500	540—580	1100	1120	1200—1500

Опыты таким образом показали, что добавление пропана резко снижает скорость воспламенения газовой смеси.

Этот факт находит объяснение в теоретическом представлении о механизме горения водорода [16]. При горении водорода идут реакции

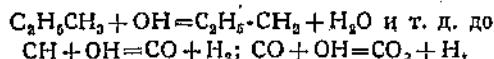


Образовавшийся радикал OH одновременно ускоряет процесс сгорания CO по уравнениям:



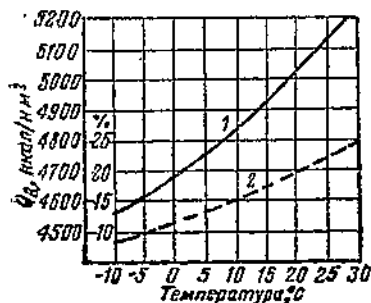
протекает также реакция: $\text{CO} + \text{O} + \text{M} = \text{CO}_2 + \text{M} + 126\,000 \text{ кал/г-моль}$.

При добавлении пропана часть радикалов OH расходуется на реакции с ним:



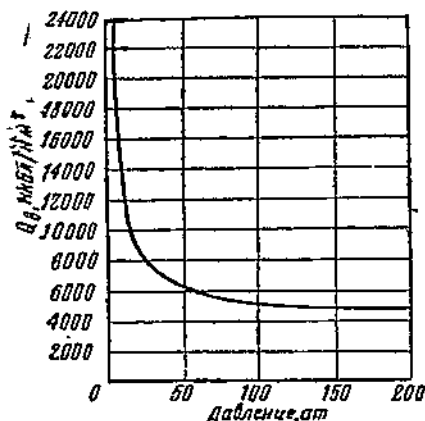
При добавлении пропана на реакции с ним расходуются не только радикалы OH , но и атомы водорода, которые, как известно, хорошо реагируют с углеводородами.

Этим расходом радикалов OH , как и атомов водорода, и может быть объяснено замедление цепных реакций горения водорода и окиси углерода и снижение скорости воспламенения карбюрированного пропаном газа.



Фиг. 5. Диаграмма изменения теплотворности сжатого до 200 ат светильного газа (4200 ккал/н. м³) при его карбюрации пропаном при различных температурах.

1 — теплотворность карбюрированного (до насыщения при данной температуре) светильного газа; 2 — %-ное повышение теплотворности.



Фиг. 6. Диаграмма изменения теплотворности сжатого светильного газа (4200 ккал/н. м³) при карбюрации пропаном при 0° С и различных давлениях.

Ограничение возможной добавки пропана к городскому газу только несколькими процентами вызывается необходимостью обеспечить нормальное горение газа в горелках бытовых потребителей. Но даже небольшая добавка пропана весьма заметно увеличивает теплотворность газа, а при производстве сжатого газа — количество тепловой энергии, заключенной в единице занимаемого объема (см. фиг. 5 и 6).

При производстве сжатого газа возможный процент добавки пропана к городскому газу (стандартной теплотворности равной 4 200 ккал/н. м³) ограничивается еще физическими свойствами пропана. Расчеты [17] показали, что в зависимости от температуры возможна добавка количеств пропана, приведенных в табл. 21.

Помимо вышеуказанного метода холодной карбюрации одного газа другим, та же цель может быть достигнута методом горячей

Таблица 21

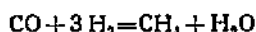
t °C	Парциальное да- вление пропана в ат	% (объемн.) про- пана в смеси (при 200 ат суммар- ного давления)
- 10	3,6	1,8
- 5	4,2	2,1
0	4,8	2,4
+ 5	5,6	2,8
+ 10	6,4	3,2
+ 15	7,3	3,65
+ 20	8,3	4,15
+ 25	9,3	4,65
+ 30	10,4	5,2

карбюраци. В этом случае высшие углеводороды пропускаются через нагретое реакционное пространство и расщепляются на простейшие газообразные продукты. Независимо от того, протекает ли процесс крекинга в аппаратах, работающих по принципу регенерации или рекуперации, происходит увеличение объема газа и снижение его теплотворности.

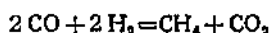
Метод горячей карбюрации имеет широкое распространение в США при производстве промышленного и коммунально-бытового газа стандартных качеств. На этом же принципе основан процесс производства карбюрированного водяного газа и рекламировавшийся в свое время „метод Тихоокеанского побережья“, распространенный в Калифорнии для производства нефтяного газа с теплотворностью, приближающейся к теплотворности городского светильного газа. По этому методу получается нефтяной газ состава (в объемн. %):

CO ₂	от 3,25 до 7,1%
C ₂ H ₆	0,9 „ 1,3
C ₂ H ₄	1,4 „ 3,3
O ₂	0,2 „ 0,54
CO	8,6 „ 13,0
H ₂	34,2 „ 52,9
CH ₄	26,0 „ 43,7
N ₂	3,4 „ 5,1
Теплотворность газа (высшая)	4890 „ 5415 ккал/н. м ³
Удельный вес	0,418 „ 0,517

Метод метанирования, не получивший пока широкого промышленного внедрения, основан на протекании реакций:



и



при применении различных катализаторов [17]. Изменения начального состава газа даны в табл. 22 (в объемн. %):

Таблица 22

Составные части газа	Катализатор никель		Катализатор окись железа	
	исходный газ	обогащен- ный газ	исходный газ	обогащен- ный газ
CO ₂	2,1	7,1	3	5,8
C ₂ H ₄	1,1	—	2	3,3
CO	16,4	3,3	17	1,9
H ₂	57,8	24,4	52	7,7
CH ₄	20,1	58,1	18	65,4
O ₂	0,6	0,6	—	—
N ₂	1,9	6,5	8	15,4
Теплотворность (высшая) ккал/н. м ³ . .	4400	6540	4200	7280

Метод конверсии окиси углерода. Широкое применение водяных паров при производстве промышленных газов привело к повышению в них содержания окиси углерода; ее отравляющее действие послужило поводом к изысканию методов конверсии окиси углерода.

В настоящее время существует несколько методов освобождения газа от окиси углерода. Метод общества „Гезент“ и метод Мюллера [18] заключается в пропускании газа в смеси с водяным паром над катализатором; при этом образуются водород и углекислота. Теплотворность газа почти не изменяется. По методу Мюллера образующаяся углекислота поглощается при промывке газа щелочью.

Происходящее при этом процессе общее изменение состава газа иллюстрирует табл. 23 (в объеме, %):

Таблица 23

Составные части газа	Состав газа до конверсии	Состав газа после конверсии
CO ₂	2,7	3,3
C ₂ H ₄	1,5	1,8
O ₂	0,6	0,7
CO	13,8	1,8
H ₂	46,2	57,7
CH ₄	20,3	20,0
N ₂	14,9	14,7
Уд. вес (воз- дух = 1)	0,485	0,383
Теплотворность (высшая) ккал/н. м ³ . .	4015	4025

Метод осушки газа. Во многих американских городах осушка газа практикуется уже около 15 лет, причём имеется тенденция производить осушку не только искусственных, но и природных газов [19]. Достижимые при этом: повышение теплотворности газа, сокращение расходов по откачке воды из сифонных горшков, устранение явлений обледенения газопроводов, уменьшение коррозии газопроводов и приборов—окупают расходы по осушке.

В настоящее время существуют следующие методы обезвоживания газа:

- 1) метод искусственного охлаждения газа,
- 2) метод поглощения влаги:

конц. серной кислотой,	силикагелем,
глицерином,	алюмогелем,
хлористым кальцием,	диэтиленгликолем,
хлористым магнием,	активированным углем.
фтористым кальцием (флюоритом),	

Заслуживает внимание, уделяемое этому методу облагораживания газов в городах США и Европы, обеспечит, надо полагать, весьма широкое внедрение процесса обезвоживания в промышленную практику.

Усиление внимания в направлении обогащения газа, наблюдаемое в последние годы, объясняется не только требованиями общего развития газовой промышленности; определённую роль играет при этом производство сжатых и жидких газов.

Значение обогащения газа ясно видно из подсчётов объёма газа, который надо передать потребителю для снабжения его 1 000 ккал тепловой энергии (см. табл. 24).

Таблица 24

Наименование газа	Теплотворность (низшая) при 0° и 760 мм рт. столба в ккал/н. м³	Количество газа в м³ на 1000 ккал
Блаугаз	12 000—14 000	0,084—0,072
Пинча	10 000—12 000	0,100—0,084
Нефтяной	8 000—12 000	0,125—0,084
Природный	8 000—11 000	0,125—0,091
Болотный (биологической очистки)	5 000—8 500	0,200—0,118
Светильный	2 000—6 000	0,250—0,167
Полукоксовый	4 000—8 000	0,333—0,125
Коксовый	3 800—4 500	0,263—0,222
Двойной водяной	3 200—3 500	0,312—0,286
Карбюрированный воздушный	2 000—3 000	0,500—0,333
Водяной	2 500—2 900	0,400—0,345
Генераторный	900—1 600	1,110—0,625
Монда	800—1 500	1,250—0,666
Доменный	700—900	1,430—1,110

Из этой таблицы видно, что для обеспечения потребителя определенным количеством тепловой энергии (1 000 ккал) ему надо доставлять,

например, вместо $0,1 \text{ м}^3$ природного газа около 1 м^3 генераторного газа, т. е. последнего в 10 раз больше.

Ещё больше значение обогащения газа углеводородными компонентами при производстве сжатых газов, так как, кроме увеличения запаса тепловой энергии, в данном случае увеличивается фактическая вместимость хранилищ газа. Как будет более подробно сказано в следующей главе, при сжатии газа до 200 ат вместимость баллонов для стандартного светильного газа на $5,3\%$ меньше, чем для идеального газа, а для метанистого газа на 40% больше, чем для идеального газа (см. табл. 25).

Таблица 25

Наименование газа		Фактическая емкость баллонов, н. м ³	Теплосодержание	
			ккал	Отношение теплосодержаний светильного и метанистого газов
Идеальный газ . . {	Светильный газ .	10	42 000	} 1:1,67
	Метанистый газ .	10	70 000	
Реальный промышленный газ . . {	Светильный газ .	9,5	39 900	} 1:2,46
	Метанистый газ .	14	98 000	

Таким образом, переход с обычного светильного газа на метанистый газ дает увеличение запаса тепловой энергии (при той же геометрической емкости баллонов) на 150% ; с этим обстоятельством надо считаться при промышленных масштабах производства.

Очистка газов

Оценка промышленных горючих газов производилась выше, главным образом, с точки зрения их теплотворности. Процентное содержание углеводородов, как носителей больших количеств тепловой энергии, в значительной мере определяло пригодность тех или иных газов для производства сжатых и жидких горючих газов.

Однако существенное значение имеет также загрязненность газов вредными примесями.

Степень очистки газа, предназначенного для компримирования, должна быть такая же, как при производстве городского светильного газа.

Примерное содержание вредных примесей в очищенном кменноугольном газе (по Шеферу) дано в табл. 26.

В 1933 г. в Германии был опубликован следующий стандарт на светильный и коксовый газ (см. табл. 27).

Таблица 26

Наименование примесей	В Англии		В Германии	
	в объемн. %	в 1 м^3	в объемн. %	в 1 м^3
HCN	0,0—0,02	0,0—0,23	0,0	0,0
H ₂ S	0,0	0,0	0,0	0,0
Прочих сернистых соединений	0,2	0,81—1,16	0,04	0,6—1,0
CO	6,8—9,0	159,0	9,0	103,0
CO ₂	5,0	90,0	2,5	36,0
NH ₃	0,0	0,0	0,0	0,0

Таблица 27

Наименование	Газовые заводы		Коксовые заводы		Примечание
	норма	допустимое колебание	норма	допустимое колебание	
Высшая теплотворность при 0° С и 760 мм рт. столба, ккал/н. м ³ . .	4200	± 50	4300	± 80	Допустимы колебания ± 200 ккал, если они происходят постепенно
Удельный вес по отношению к воздуху . .	0,5	± 0,015	0,5	± 0,01	
Отношение высшей теплотворности к корню квадратному из удельного веса, %	Постоянно	± 1,5	—	—	
Инертные газы (N ₂ + CO ₂), %	12,0	—	20	—	
Содержание кислорода, %	0,5	—	—	—	
Органическая сера, г/м ³ . .	0,25	—	—	—	Практически свободен от H ₂ S
Сероводород, г/м ³	0,02	—	—	—	
Аммиак, г/м ³ . .	< 0,005	—	0,002	—	
Нафталин, г/м ³ . .	< $\frac{0,05}{P}$	—	0,1	—	
Смола	Не должна быть обнаружена	—	Практически свободен от смолы	—	

P — начальное давление в ата

Как видно из табл. 27, к газу городских газовых заводов предъявляются большие требования, чем к газу коксовых заводов.

В последнее время Бунте [22] разработан проект норм для городского газа, сводящийся к следующему:

Теплотворность { высшая . . . 4200—4600 ккал/н. м³ (при 0°C и 760 мм рт. ст.)
 низшая . . . 3880—4200 " (при 0°C и 760 мм рт. ст.)
 Давление газа в сетях . . . не ниже 60 мм вод. ст.
 Уд. вес (воздух=1) 0,4—0,5

Содержание:

кислорода	ниже 0,5% (объемн.)
сероводорода	2 г в 100 м ³
аммиака	0,3 г в 100 м ³
органической серы	25 г в 100 м ³
цианистых соединений (в пересчете на HCN)	15 г в 100 м ³
окислов азота	0,2 см ³ в 1 м ³
нафталина	5 до 10 г в 100 м ³

(P —давление газа в *атм*)
 смолы—практическое отсутствие.

Требования к городскому газу в других странах:

Дания. Стандартных норм на газ нет. Теплотворность (высшая) обычно 4500—5000 ккал/н. м³.

Франция. Предельное содержание окиси углерода 15% [23]; полная очистка газа от сероводорода. Теплотворность (высшая) 4500 ккал/н. м³.

Голландия. Полная очистка газа от сероводорода (при 5 мин. пробе бумажкой, смоченной 6,5%-ным раствором уксуснокислого свинца, и при скорости струи газа > 100 л в час не должно быть никакого окрашивания). Содержание нафталина не выше 2/3 парциальной упругости паров при рабочей температуре в сети; при высоких давлениях в сети предельное содержание нафталина обратно пропорционально давлению (в *атм*). Давление в сети P в мм вод. ст.:

$$P = 45\,000 \cdot \frac{\sqrt{100 \cdot \gamma}}{Q},$$

где

γ —удельный вес газа,

Q —теплотворность (высшая) в ккал/н. м³ (при 15°C и 760 мм рт. ст.).

Швейцария. Высшая теплотворность газа (в пересчете на 0°C, 760 мм рт. ст., сухой) должна быть 5 000 ккал/н. м³ с небольшими колебаниями. Содержание ($\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{O}_2$) не выше 12%. Практическое отсутствие сероводорода и паров смолы. Постоянство состава газа.

США и Канада. Практическое отсутствие сероводорода. Содержание органической серы не больше 68,5 г на 100 м³, аммиака не больше 22,9 г на 100 м³. Содержание окиси углерода не ограничено. В Англии предельное содержание окиси углерода установлено в 20% [23].

Опыт работы Московской станции сжатого газа показал важность соблюдения правил тщательной очистки компримируемого газа от механических и химических примесей. Очистка газа от паров смолы, сероводорода, аммиака и нафталина является особенно важной.

Наряду с этим выяснилось, что присутствие в газе легко полимеризующихся углеводородов, например бутадиена (дивинила), также вносит серьезные затруднения в процесс производства сжатого газа. Ещё несколько лет назад на газонаполнительной станции в Париже [24] наблюдалось не только выделение масел, бензина и воды, но и смолистых веществ; эти смолистые вещества, попадая в моторы автомашин, отлагаются в редукторах и смесителях, вызывая перебои в работе.

Аналогичные явления наблюдались и в начальном периоде эксплуатации газонаполнительной станции в Москве; первые автомашины, переведённые на сжатый газ, выходили в ремонт после 100—200 км пробега, причем наблюдалось, что во время стоянки машин смолистые вещества загустевали и даже затвердевали.

Произведенное изучение этих явлений показало [25], что источником смолообразований являлись диолефиновые углеводороды, которые присутствовали в газе в небольшом количестве (см. табл. 28).

Таблица 28

Наименование компонентов	Состав газа в объёмн. %		
	исходный газ	газ из аккумуля- торов	газ из на- полни- тельных колонок
CO ₂	2,75	4,90	4,92
CO	19,49	18,90	18,56
H ₂	28,11	27,60	28,56
N ₂	30,80	26,43	25,46
CH ₄	9,49	10,02	10,19
C ₂ H ₄	3,48	4,52	4,84
C ₂ H ₆	3,96	3,40	4,37
C ₃ H ₆ + C ₃ H ₈	1,06	3,06	3,03
C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀	0,34	1,04	0,90
C ₄ H ₁₀ + C ₄ H ₈	0,17	0,13	0,19
Высшие углево- дороды	0,70	—	—

Примечание. Анализы сделаны по Подбильняку, диолефины (C₂H_{2n-2}) определялись по Короткову, с малеиновым ангидридом.

В начальный период обследования станции, до принятия ряда мер, анализы газа, взятые из разных аппаратов станции, показали еще боль-

шие количества диолефинов; так, было найдено диолефинов в газе в объёмн. %:

из ресинверов	0,42
из аккумуляторов	0,32
из дополнительных колонок	0,30

При снижении содержания диолефинов до величин, приведённых в табл. 28, бесперебойный пробег автомашин удлинился до 900 км; после 1050 км пробега накопление смолистых веществ достигло таких размеров, что потребовалась чистка моторов.

Способность диолефиновых углеводородов полимеризоваться и застывать вносит осложнения при эксплуатации не только автомашин, но и аппаратуры газонаполнительных станций, вследствие загрязнения поршней компрессора, холодильников, сборников, коммуникации и арматуры.

Методы очистки исходного газа от этих углеводородов или удаления их в процессе производства сжатого газа должны быть специально разработаны.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Бюллетень Комитета технической терминологии Академии наук СССР», Терминология газовой техники, ч. 1, 1940, Изд. Акад. наук СССР.
2. «Материалы Комиссии при президиуме Мособлисполкома по выплавке чугуна на торфе», 1933.
3. «Успехи химии». 1444, 1937; Г. О. Нусинов, «Подземная газификация углей», 1941; Бюллетень «Кислород», № 2, стр. 45—53, 1944.
4. «Вопросы газификации твердых топлив», вып. I, 1936.
«Химическая переработка бурых углей СССР», 1938.
5. «GWF», № 2, 1940.
6. «Общая химическая технология топлива» т. I, 1940.
7. «GWF», № 40, 1940.
8. «Automobiltechn. Zeit.», 43, 1940.
9. «Zeitschrift für kompr. u. flüss. Gase», № 9/10, 1940.
10. А. В. Лозовой и М. К. Дьякова, «Гидрогенизация топлива в СССР», 1940.
11. «GWF», № 22, 1940.
12. «Chem. Ind.», 49, 1930.
13. «Исследования и химическая переработка природных и искусственных нефтяных газов», ОНТИ, НКТП СССР, 1935.
14. «Ind. Eng. Chem.», 28, 1461, 1936.
15. «GWF», № 22, 1940.
16. Н. Н. Семенов, «Цепные реакции», ОНТИ, 1934; Lewis a. Elbe, «Combustion, Flames a. Explosions of Gases, Cambridge, 1938; «Журн. эксперим. теорет. физики», т. 10, № 9—10 и 12, 1940; «Докл. Акад. наук СССР», XLIII, № 8, 1944; XLIV, № 2, 1944.
17. «GWF», № 26, 1940.
18. «GWF», № 8, 1936.
19. Amer. Gas Journal, 151, № 5, 1939.
20. Gas World, 112, № 2896, 1940.
21. С. Г. Вессельман, «Степень очистки газа для коммунально-бытового потребления», Харьков, 1941.
22. «GWF», № 45, 1939.
23. «Вопросы газификации твердых топлив», вып. I, 1936.
24. «Journal des Usines à Gaz», № 10, 1938.
25. «Обследование московской газонаполнительной станции», отчёт ВНИГИ Главнефтегаза НКНП, 1939.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Основные компоненты промышленных горючих газов, как уже было указано в главе II, можно разбить на три группы:

I группа	II группа	III группа
Метан Этан Пропан н-бутан Изобутан Этилен Пропилен Бутилены	Водород Оксись углерода	Азот Углекислота Кислород

Как уже было указано во II главе, все современные промышленные горючие газы представляют собой смеси этих индивидуальных газов; низкокалорийные газы состоят, в основном, из газов II и III групп; среднекалорийные — из газов всех трех групп с преобладанием газов II группы; высококалорийные газы, — в основном, из газов I группы.

При производстве сжатых и жидких газов главным физическим фактором процесса при соблюдении необходимого теплового режима является давление. При производстве сжатых газов давление доводится до 350 ат; при производстве жидких газов — до 12—15 ат; при новом процессе сжижения природного газа применяется давление около 40 ат.

Давление существенно изменяет свойства газов и при некоторых условиях переводит их в жидкое состояние. Поэтому физико-химической характеристике перечисленных выше индивидуальных газов и их смесей — промышленных газов — следует предпослать некоторые теоретические данные о роли и влиянии давления.

Три основных закона идеальных и реальных газов

Согласно молекулярно-кинетической теории строения вещества, газообразное состояние характеризуется тем, что расстояния между молекулами велики, силы сцепления между ними весьма незначительны и не удерживают частиц в сфере своего действия. Частицы газа обладают свободным движением, причем, благодаря столкновениям друг с другом, направление движения их все время меняется. Общая масса газа не имеет ни определенной формы, ни объема. Если же газ поместить в закрытый сосуд, то частицы его, вследствие беспорядочного движения по всем направлениям, распределятся равномерно по всему объему сосуда. Неограниченное увеличение объема сосуда вызовет неограниченное расширение газа в пределах сосуда. Уменьшение объема сосуда, равносильное увеличению давления заключенного в нем газа, вызовет соответствующее уменьшение объема газа. При расширении газа взаим-

ные расстояния между его частицами возрастают, при сжатии газа—соответственно сокращаются.

Изменения давления и температуры газа изменяют его физическое состояние и при некоторых, определённых для каждого газа, условиях приводят к превращению газа в жидкое состояние.

Между объемом газа, его давлением и температурой существует зависимость, которая подчиняется определённым законам.

Законы идеальных газов

Первый основной закон—закон Бойля-Мариотта—устанавливает взаимную зависимость между объёмом газа и его давлением при условии, что температура газа остаётся постоянной величиной.

Если через v обозначить объём газа при давлении P , а через v_1 —объём газа при давлении P_1 , то по закону Бойля-Мариотта

$$\frac{v}{v_1} = \frac{P_1}{P}$$

или

$$v \cdot P = v_1 \cdot P_1 = \text{const}, \quad (1)$$

т. е. произведение числового значения объёма на числовое значение давления для данной массы газа при постоянной температуре является постоянной величиной.

Зависимость между объемом газа и его давлением от температуры определяется законом Гей-Люссака. Согласно этому закону, давление газа при постоянном объёме увеличивается с повышением температуры по следующему уравнению:

$$P_t = P_0(1 + \alpha t). \quad (2)$$

Если же нагревать газ при постоянном давлении, то объем газа с повышением температуры увеличивается по аналогичному уравнению:

$$v_t = v_0(1 + \alpha t), \quad (3)$$

т. е. для всех идеальных газов термический коэффициент увеличения объёма

$$\alpha_v = \frac{v_t - v_0}{v_0 \cdot t}$$

и термический коэффициент увеличения давления или упругости

$$\alpha_p = \frac{P_t - P_0}{P_0 \cdot t}.$$

численно равны между собою. Численное значение этих коэффициентов

$$\alpha_v = \alpha_p = \frac{1}{273,2} = 0,003660. \quad (4)$$

В. Томсоном закон Гей-Люссака был преобразован на основании следующих рассуждений.

Если данное количество газа, занимавшее объём v_0 , сперва находилось при нормальных условиях, т. е. при температуре 0°C и давлении

$P_0=760$ мм рт. столба, а затем перешло в состояние, характеризующееся объёмом v_1 , давлением P и температурой t , то этот переход может быть осуществлён в две стадии:

1) сначала газ при постоянном давлении P_0 нагревается до температуры $t^\circ\text{C}$, при этом объём газа изменится и станет равным

$$v_1=v_0(1+\alpha t);$$

2) затем газ сжимается до давления P , тогда:

$$P_0 \cdot v_1 = P \cdot v,$$

Подставляя сюда значение v_1 , получаем:

$$P \cdot v = P_0 \cdot v_0(1 + \alpha t).$$

Подставляя в это уравнение вместо α его значение из выражения (4), получаем:

$$\frac{P \cdot v}{P_0 \cdot v_0} = 1 + \frac{t}{273,2} = \frac{273,2+t}{273,2},$$

или, вводя понятие абсолютной температуры ($T_0=273,2^\circ$ и $T=273,2+t$), последнее уравнение можно написать так:

$$\frac{P \cdot v}{P_0 \cdot v_0} = \frac{T}{T_0} \quad \text{или} \quad \frac{P_0 \cdot v_0}{T_0} = \frac{P \cdot v}{T} = \text{const}, \quad (5)$$

т. е. отношение произведения значений давления и объёма к абсолютной температуре для данной массы идеального газа есть величина постоянная.

Если исходить из моля газа, то значение константы в уравнении (5) будет одинаковым для всех идеальных газов, так как, согласно закону Авогадро-Жерара, при одинаковой температуре и давлении в равных объёмах различных газов находится одинаковое число молекул. Эта газовая постоянная обозначается буквой R . Следовательно, зависимость между объёмом, давлением и температурой для одного моля газа выражается уравнением:

$$P \cdot v = R \cdot T \quad (6)$$

Это уравнение называется уравнением Клапейрона или уравнением состояния газа.

Для n молекул газа уравнение (6) выражается соответственно:

$$P \cdot v = n \cdot R \cdot T,$$

где

$$v = n \cdot v_0.$$

Для любого газа числовое значение газовой постоянной может быть вычислено по простому уравнению:

$$R = \frac{848}{M}, \quad (7)$$

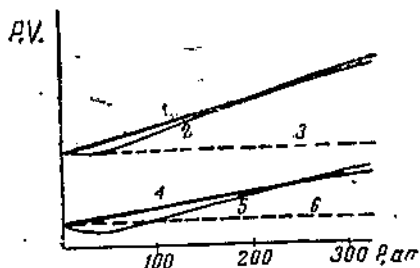
где 848 — газовая постоянная одного моля и M — молекулярный вес газа.

Уравнение состояния газа [6] действительно только при условии, что при любых давлениях и температурах, какими бы высокими или низкими эти давления и температуры не были, расстояния между молекулами газа остаются достаточно большими и что с увеличением давления силы взаимного притяжения между молекулами не изменяются, т. е. при условии, что газ является идеальным.

Отклонения от законов идеальных газов

Отклонения от закона Бойля-Мариотта. Экспериментальная проверка закона для ряда реальных газов при различных условиях показала, что реальные газы обычно в большей или меньшей степени отклоняются от этого закона.

Экспериментальная проверка закона Бойля-Мариотта производится путем сжатия газа до определенного давления при постоянной температуре и измерения объема газа при этом давлении. Результаты наблюдений изображаются в форме диаграммы; чтобы по полученной диаграмме



Фиг. 7. Диаграмма $P \cdot v - P$ для водорода и азота при $+17^\circ\text{C}$ и $+100^\circ\text{C}$.

1—водород; 2—азот; 3— $P \cdot v = \text{const}$ при 100°C ; 4—водород; 5—азот; 6— $P \cdot v = \text{const}$ при 17°C .

температурах значения $P \cdot v$ всё время возрастают с увеличением давления, т. е. водород сжимается меньше, чем идеальный газ; объём его остаётся всё время большим, чем это следует по закону Бойля-Мариотта.

Для азота значения $P \cdot v$ с увеличением давления сначала уменьшаются, при определённом давлении достигают минимума, а затем начинают расти. Таким образом, азот сначала сжимается больше, чем идеальный газ, а при высоких давлениях — выше 100 ат — сжимается меньше, чем идеальный газ, причём при 17°C и при давлении около 300 ат отклонения для азота и для водорода приблизительно одинаковы. Экспериментально найденные значения $P \cdot v$ отличаются при этих условиях от расчётных по закону Бойля-Мариотта, примерно, на 25%.

Из этой же диаграммы видно, что повышение температуры увеличивает отклонения этих газов от закона идеальных газов.

Таким образом, увеличение давления, как и увеличение температуры, влечет за собой, как правило, возрастающие отклонения азота и водо-

рода от закона Бойля-Мариотта, причём закономерность этих отклонений более правильна для водорода, чем для азота.

Водород и азот относятся к категории тех промышленных газов, которые при давлениях и температурах, применяемых при компримировании горючих газов, ещё далеки от перехода в жидкое состояние. Совершенно иную картину даёт углекислота.

На фиг. 8 изображена диаграмма для углекислоты, составленная по исследованиям Амага. Как видно из этой диаграммы, углекислый газ при низких температурах сжимается значительно больше идеального газа, причём кривые $P \cdot v$ при 0° и 20° С имеют очень резкий перегиб, который при более высоких температурах начинает постепенно сглаживаться.

Физический смысл перегибов по исследованиям Эндрюса сводится к тому, что при этих температурах и давлениях углекислый газ начинает переходить в жидкое состояние. Поскольку сжимаемость газообразной и жидкой углекислоты различна, кривые $P \cdot v$ — P дают резкие перегибы.

Из диаграммы (фиг. 8) видно, что кривые $P \cdot v$ в значительной области температур имеют минимумы. Если эти точки минимумов соединить между собой линией, то получается параболической формы кривая, изображенная на фигуре пунктиром. В начале эти минимумы смещаются в сторону высоких давлений, а затем, начиная с температуры 198° С, опять начинают приближаться к оси ординат; при 500° С парабола соединяется с осью ординат.

При всех температурах ниже 500° С углекислый газ сжимается сначала больше, чем идеальный газ. С увеличением давления сжимаемость проходит через максимум (минимум $P \cdot v$), а затем уменьшается, так что для каждой температуры имеется точка, отмеченная на диаграмме крестиком, в которой значения $P \cdot v$ соответствуют закону идеального газа. Если эти крестики соединить линией, то получается кривая, которая в пределах температур 20 — 187° С совпадает с ординатой давления 600 ат , а при более высоких температурах смещается влево и при 500° С тоже соединяется с осью ординат.

Температура 500° С называется температурой Бойля. Выше этой температуры сжимаемость углекислого газа все время меньше идеального газа.

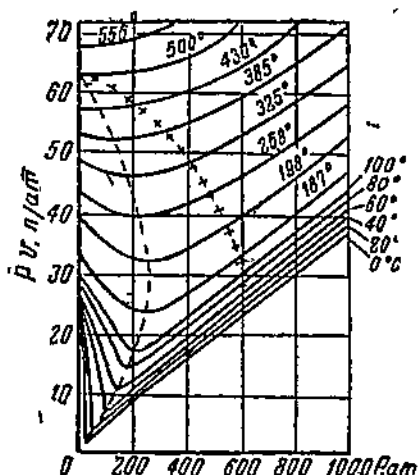
Если вернуться к рассмотрению диаграмм для водорода и азота (фиг. 7), то легко установить, что для водорода температура Бойля лежит ниже 17° С, так как кривые и при 17° и при 100° С идут все время выше кривых для идеального газа. Сжимаемость азота при 17° С и при определенном интервале давлений (примерно до 100 ат) больше идеального газа, т. е. эта температура ниже температуры Бойля. Для воздуха температура Бойля равна 54° С.

Отклонения от закона Гей-Люссака. Для идеальных газов значения термического коэффициента расширения газа при постоянном объеме и постоянном давлении не зависят от температуры и от давления и определяются величиной $0,00366$.

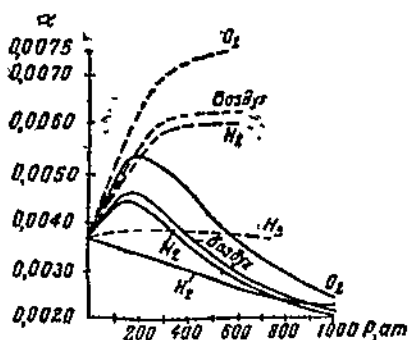
Экспериментально найдено, что это значение коэффициента α верно только при низких давлениях; при высоких давлениях наблюдаются значительные отклонения от этого значения.

Диаграмма на фиг. 9 иллюстрирует отклонения значений коэффициентов для водорода, азота, кислорода и воздуха при давлениях до 1000 ат и в интервале температур 0—100° С. На этой диаграмме сплошной линией показаны изменения значений коэффициента расширения газа при постоянном давлении (α_p), а пунктирной линией — изменения значений коэффициента увеличения давления при постоянном объеме (α_v).

Только для водорода значения α_v непрерывно уменьшаются с увеличением давления; для остальных трёх газов значения α_v сначала увеличиваются, а затем при давлениях выше 200—300 ат начинают уменьшаться, приближаясь при 800—1000 ат к значениям α_v для водорода. Следовательно, водород при высоких да-



Фиг. 8. Диаграмма $P-v-P$ для углекислоты.



Фиг. 9. Диаграмма изменений коэффициента расширения для водорода, азота, кислорода и воздуха с изменением давления.

влениях расширяется меньше идеального газа, а азот, кислород и воздух до 400—600 ат расширяются больше идеального газа, а при более высоких давлениях они расширяются меньше идеального газа.

Кривые значений α_v на этой диаграмме построены для интервала температур 0—100° С. Наблюдения показали, что повышение температуры сравнительно мало сказывается на изменении значений α_v .

Значения коэффициента α_p для водорода сначала, до 300—400 ат, несколько возрастают, а затем с дальнейшим повышением давления медленно убывают. Кривая имеет очень небольшой перегиб и по всей длине близка к прямой линии. Совершенно иначе идут кривые для азота, кислорода и воздуха. При повышении давления до 300—400 ат, эти кривые дают резкий подъём, и только при дальнейшем повышении давления становятся более плавными. Колебания значений α_p для кислорода более резкие, чем для азота; для воздуха, как и следует ожидать, кривая занимает промежуточное положение.

Отклонения от уравнения состояния. Уравнение состояния газа непосредственно вытекает из уравнений Бойля-Мариотта и Гей-Люссака. Поскольку реальные газы при высоких давлениях значительно отклоняются от этих двух основных законов, то и в уравнение Клапейрона для реальных газов должны быть внесены соответствующие поправки.

Что реальный газ при высоких давлениях не может удовлетворять уравнению состояния идеального газа (6), следует уже из того, что в этом уравнении не учитывается объем, занимаемый молекулами газа, а также сила притяжения между этими молекулами. При высоких давлениях, когда в небольшом объеме газа находится весьма значительное количество молекул и к тому же на близком расстоянии друг от друга, величиной объема молекул и силами взаимного их притяжения пренебрегать уже нельзя. Тот факт, что при высоких давлениях некоторые из компонентов промышленных горючих газов переходят даже в жидкое состояние, характеризуемое, по сравнению с состоянием идеальных газов, резким изменением действия сил сцепления между молекулами, подтверждает высказанное замечание о необходимости корректировки уравнения состояния идеальных газов и превращения этого уравнения в уравнение состояния реальных газов.

Неоднократно делались попытки найти математическую формулу для этого уравнения состояния, которая позволяла бы расчетным путем для любого газа найти цифровые значения искомых величин. Такие попытки были в своё время сделаны: Ван-Лааром, Клаузиусом, Ван-дер-Ваальсом, Бертело, Дитеричи, Вулем, Кейесом, Констанмом, Битти и Бриджменом, Планком, Кричевским и Казарновским. Из них наибольшую известность и практическую ценность получило уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$(v - b) \cdot \left(P + \frac{a}{v^2} \right) = R \cdot T, \quad (9)$$

где a и b — постоянные величины, определяемые для данного газа.

Преимущество уравнения Ван-дер-Ваальса перед другими заключается в том, что введенные в него коэффициенты a и b имеют определенный физический смысл. Коэффициент b выражает величину объема молекул газа, на которую надо уменьшить общий объем, занимаемый данным газом, так как объем самих молекул не участвует в изменениях общего объема газа с изменением его давления. Коэффициент a определяет то дополнительное давление, которое создается при повышении общего давления газа вследствие сокращения расстояния между молекулами и увеличения в связи с этим сил взаимного притяжения между молекулами.

Коэффициент a входит в это уравнение в виде дроби $\frac{a}{v^2}$, так как дополнительное давление находится в зависимости от объема; чем объем меньше (вследствие увеличения давления), тем дополнительное давление больше; если представить себе весь газ разделенным на слои, то силы взаимного притяжения этих слоев друг к другу будут пропорциональны плотностям как притягивающего слоя, так и притягиваемого, т. е. эти силы будут пропорциональны квадратам плотностей или обратно пропорциональны квадратам объемов. Исходя из этого, величина дополнительного давления изображена в виде дроби, знаменатель которой — квадрат объема.

В какой степени уравнение Ван-дер-Ваальса уточняет зависимость между давлением и объемом реальных газов, видно из данных табл. 29,

в которой сопоставлены расчетные и экспериментально найденные величины объемов при различных давлениях. Данные таблицы относятся к углекислому газу при температуре $+40^{\circ}\text{C}$.

Таблица 29

$P, \text{ ат}$	$v, \text{ см}^3$, вычисленное по уравнению Ван-дер-Ваальса	$v, \text{ см}^3$, измеренное
1	25597	25574
10	2471,3	2448,5
25	922,4	900
50	395	380
80	133,75	118,75
100	88,9	69,3
200	70,5	52,5
500	59,4	44,0
1000	54,2	40,0

Экспериментальные данные показывают, что уравнение Ван-дер-Ваальса представляет собой приближенное уравнение состояния реальных газов. Оно правильно отображает качественную сторону явления, но с количественной точки зрения имеет только относительную применимость; основная причина этого по современным представлениям лежит в том, что величины a и b являются не постоянными, а функциями от v и T .

Определение поправочного коэффициента к уравнению состояния реальных газов

Попытки Ван-дер-Ваальса и других исследователей изучить причины отклонений реальных газов от законов состояния идеальных газов и предложить формулы и уравнения, которые включали бы все поправочные коэффициенты для реальных газов при любых условиях их состояния, привели только к частичному решению вопроса. Предложенные новые уравнения состояния если и являются более точными, всё же применимы только в ограниченных условиях физического состояния реальных газов.

Каково бы ни было физическое толкование причин отклонения от законов идеальных газов, совершенно очевидно, что при сжатии реальных газов до высоких давлений эти отклонения имеют место, и уравнение состояния идеальных газов нуждается во введении в него поправочного коэффициента, значения которого индивидуальны для отдельных газов и различны для разных условий их физического состояния.

Если ввести такой поправочный коэффициент K , то уравнение состояния (5) примет вид:

$$P \cdot v = K \cdot R \cdot T. \quad (10)$$

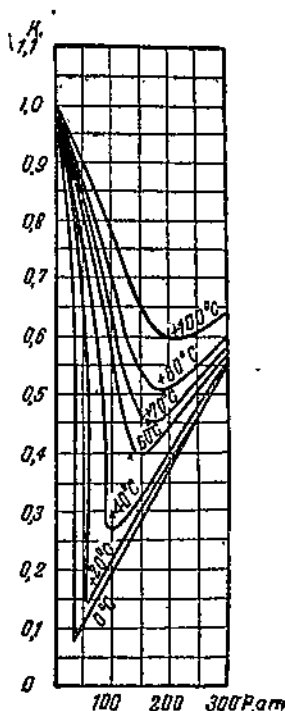
Поправочный коэффициент K получил название коэффициента сжимаемости или коэффициента компрессии.

Если при компримировании газа значения поправочного коэффициента K окажутся меньше единицы, то это будет означать, что при этих условиях объём газа меньше, чем по закону для идеального газа. Если K окажется больше единицы, то это будет означать, что газ занимает больший объём, чем по закону для идеального газа. Если $K=1$, то соотношение между объёмом, давлением и температурой соответствует уравнению состояния идеального газа.

Поправочный коэффициент K является экспериментально найденной величиной, корректирующей уравнение Клапейрона для данного реального газа. Этот коэффициент включает в себя все поправочные коэффициенты, которые вносились Ван-дер-Ваальсом и другими исследователями в предлагаемых ими уравнениях состояния реальных газов. Разница заключается только в том, что коэффициент K не может служить для математического обобщения уравнения (6) для всех газов и всех условий их состояния.

Поскольку коэффициент K включает в себя отдельные коэффициенты, например в уравнении Ван-дер-Ваальса, то, очевидно, что все изменения значений K для данного газа при изменении условий его состояния должны иметь аналогичный характер. Действительно, если сравнить диаграмму, изображённую на фиг. 10, с диаграммой, приведенной на фиг. 8 для углекислого газа, то аналогия между характером кривых для $P \cdot v$ и для K отчетливо видна.

В настоящее время цифровые значения коэффициента K найдены для всех компонентов промышленных горючих газов, а также для многих их смесей. Эти цифровые значения, опубликованные в различных физико-химических справочниках [1], включены на последующих страницах этой главы в общие физико-химические характеристики индивидуальных газов.



Фиг. 10. Диаграмма значений коэффициента сжимаемости для углекислоты.

Физико-химическая характеристика основных компонентов промышленных горючих газов

Индивидуальные газы первой (углеводородной) группы

Метан

Метан (CH_4) — бесцветный газ, в чистом состоянии с слегка чесночным запахом. Молекулярный вес 16,03. Температура кипения при 1 *ата* минус 164,4° С. Температура плавления — минус 186,0° С. Критическая температура минус 82,9° С. Критическое давление 45,6 *ата*.

Растворимость метана в воде невелика и составляет при 760 мм рт. ст.:

при 0° C—0,05563, объемов метана
 " 5° C—0,04805, в одном объеме
 " 10° C—0,04177, воды
 " 15° C—0,03690,
 " 20° C—0,03308,
 " 25° C—0,03006

Плотность метана по воздуху—0,55439. 1 л метана при 0° и 760 мм рт. ст., весит 0,7168 г.

Теплотворность метана при 0° C и 760 мм рт. ст.:

вышая — 13 318 ккал/кг и 9 527 ккал/м³,
 низшая — 11 970 " и 8 562 "

Теплоемкость при 0° C . . $c_p = 0,531 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$

$c_v = 0,406 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$

Газовая постоянная . . $R = 52,90$

Показатель политропы = 1,28; показатель адиабаты = 1,31. Октановое число 125.

Пределы взрываемости:

	Нижний	Верхний
с воздухом . . .	5,35%	14,9%
с кислородом . .	5%	59%

Наиболее сильная взрывчатая смесь получается при содержании в воздухе метана в количестве 9—10% (объемн.). При взрыве создается давление 13,6 ат.

Таблица 30

Коэффициенты сжимаемости метана ($P \cdot v = I$ при 1 ат и 0° C)

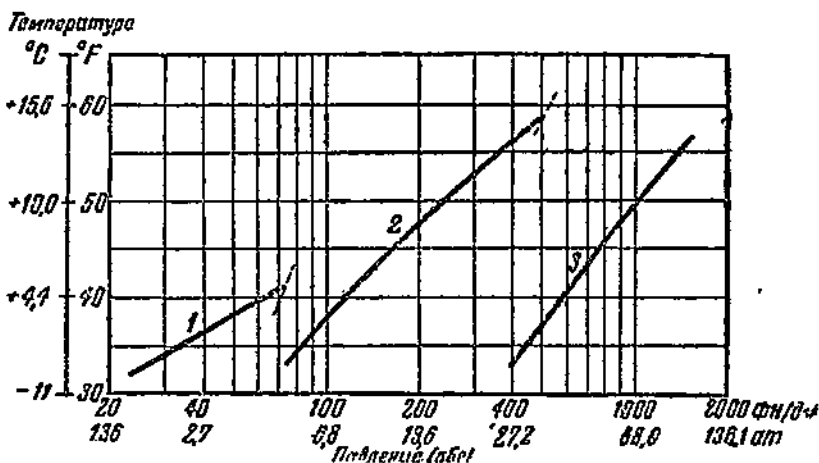
Давление, ат	—70° C	—50° C	—25° C	0° C	25° C	50° C	100° C
1	0,7410	0,8150	0,9075	1,0000	1,0922	1,1845	1,3686
10	0,6985	0,7795	0,8803	0,9785	1,0733	1,1780	1,3595
20	0,6473	0,7402	0,8493	0,9543	1,0549	1,1590	1,3500
30	0,5910	0,6991	0,8183	0,9297	1,0373	1,1412	1,3411
40	0,5244	0,6547	0,7873	0,9061	1,0198	1,1275	1,3335
50	0,4425	0,6069	0,7553	0,8830	1,0034	1,1152	1,3268
60	0,3366	0,5551	0,7243	0,8607	0,9871	1,1017	1,3200
80	0,2556	0,4604	0,6651	0,8192	0,9569	1,0799	1,3098
100	0,2808	0,4088	0,6167	0,7845	0,9319	1,0624	1,3018
120	0,3175	0,4095	0,5877	0,7604	0,9126	1,0487	1,2965
140	0,3543	0,4304	0,5801	0,7457	0,9003	1,0399	1,2939
160	0,3915	0,4601	0,5891	0,7425	0,8949	1,0367	1,2952
180	0,4288	0,4924	0,6079	0,7482	0,8970	1,0373	1,2997
200	0,4656	0,5269	0,6319	0,7631	0,9048	1,0437	1,3076
250	0,5567	0,6142	0,7066	0,8184	0,9469	1,0776	1,3364
300	0,6458	0,7025	0,7879	0,8886	1,0062	1,1286	1,3785
400	0,8185	0,8750	0,9561	1,0468	1,1499	1,2608	1,4929
500	0,9867	1,0433	1,1221	1,2086	1,3064	1,4106	1,6277
600	1,1487	1,2071	1,2862	1,3709	1,4659	1,5653	1,7729
800	1,4631	1,5246	1,6046	1,6894	1,7801	1,8781	2,0744
1000	1,7656	1,8287	1,9140	2,0000	2,0892	2,1845	2,3757

Теоретическое количество воздуха для сжигания 1 м³ метана равно 9,54 м³; то же для сжигания 1 кг метана — 17,22 кг.

Теплотворность рабочей смеси при $\alpha = 1$. 770 ккал/м³
 Температура воспламенения с воздухом . . 680—750° С
 » » » кислородом . 600—700° С
 Теоретическая температура горения 1830° С

Высшая скорость воспламенения смеси метана с воздухом 35 см/сек, с кислородом — 330 см/сек.

Как показали французские и американские исследователи, метан (как и его гомологи до бутанов включительно) при повышенных давлениях



Фиг. 11. Диаграмма физических условий образования твердых гидратных соединений, кривая 1 для пропана, кривая 2 для этана и кривая 3 для метана.

и пониженных температурах даёт с водой твёрдые гидратные соединения типа $\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, легко разлагающиеся при редуцировании давления или повышении температуры.

Физические условия (температура и давление), при которых экспериментально наблюдались [2] образования гидратных соединений для метана, этана и пропана, приведены на фиг. 11. Как видно из диаграммы, для отдельных углеводородов эти условия резко различны; наиболее высокие давления требуются для образования гидратов метана; наименьшие — для пропана. Для углеводородов выше бутанов гидратные соединения до сего времени не получены.

Изображённые на фиг. 11 кривые являются кривыми равновесия между фазами соответствующих углеводородов и водяных паров. Выше этих кривых углеводород находится в газообразном состоянии, а вода — в форме пара или тумана; ниже кривых — газовая и твёрдая фазы.

Имеющиеся данные по изобутану на диаграмме не приведены, так как они не укладываются в форме кривых.

Отдельные цифровые значения температур и давлений, найденных для образования гидратных соединений метана, заимствованные из диаграммы фиг. 11, приводятся в табл. 31.

Таблица 31

Температура, °С	Давление, ат
+ 0,6	27,2
+ 2,8	34,0
+ 4,0	37,4
+ 6,1	47,6
+ 7,2	54,4
+ 9,4	68,0
+ 12,8	102,0

Способность углеводородов к образованию твердых гидратных соединений создает серьезные эксплуатационные затруднения, которые особенно болезненно сказываются при транспорте газов по трубопроводам на дальние расстояния. Природа процесса образования гидратов и уточненные условия его протекания изучены еще далеко не полно.

Этан

Этан (C_2H_6) — бесцветный газ со слабым запахом. Молекулярный вес 30,0462. Температура кипения при 1 атa минус 88,2° С. Температура плавления минус 172,1° С. Критическая температура + 34,5° С. Критическое давление 48,2 атa. Плотность по воздуху 1,038. 1 л этана при 0° и 760 мм рт. ст. весит 1,3562 г. 1 кг этана при тех же нормальных условиях занимает объем 746 л. Удельный вес этана в сжиженном состоянии (при 15° С) равен 0,446 (вода = 1). Средняя удельная теплоемкость (при + 15° С):

$$c_p = 0,413 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{С.} \quad c_v = 0,338 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{С.}$$

Теплотворность при 15,5° С и 760 мм рт. ст.):

высшая 15 852 ккал/м³ и 12 320 ккал/кг
низшая 14 492 ккал/м³ и 11 264 ккал/кг.

При смешении с воздухом в определенной пропорции этан образует взрывчатые смеси. Нижний предел таких взрывчатых смесей — 3,12%, верхний предел — 15,0% содержания этана. Наиболее сильная взрывчатая смесь образуется при содержании этана 9—10%.

Температура воспламенения с воздухом . . . 530—605° С
» » с кислородом . 530—605° С
Теоретическая температура горения . . . 2020° С
Требуемое для сгорания 1 м³ этана количество воздуха . . . 16,74 м³
То же кислорода . . . 3,5 м³

Скорость распространения пламени:

при $\varnothing$ трубопровода 1" и 6,53% газа в смеси с воз- духом	0,856 м/сек
при $\varnothing$ трубопровода 12" и 5,8% газа в смеси с воз- духом	2,27 м/сек
Газовая постоянная	$R = 28,223$
Октановое число	125

Таблица 32

Коэффициенты сжимаемости этана

Температура, °C	Давление, атм	Объем, м ³		$K = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{теор}}}$
		$V_{\text{факт}}$	$V_{\text{теор}}$	
-84,3	1,33	5,2100	5,4251	0,960
-73,2	2,25	3,1809	3,3988	0,936
-62,1	3,60	2,0517	2,2414	0,913
-51,0	5,46	1,3782	1,5593	0,884
-39,9	7,91	1,0160	1,1292	0,900
-28,8	11,35	0,6735	0,8264	0,815
-17,6	15,60	0,4811	0,6283	0,766
- 6,5	20,80	0,3431	0,4924	0,707
+ 4,6	27,25	0,2547	0,3905	0,652
+15,7	35,20	0,1811	0,3141	0,577
+26,8	44,95	0,1104	0,2547	0,433

Таблица 33

Скрытая теплота парообразования (по Бэлли)

Температура		Упругость паров, атм	Удельный объем, м ³ /кг		Скрытая теплота испарения, ккал/кг		
°C	°K		жидко- сти	паров	общая	внут- ренняя	внешняя
-73,5	199,7	2,26	0,00189	0,2322	107,2	94,4	12,8
-45,7	227,5	6,1	0,00200	0,0916	98,9	85,7	13,2
-18,0	255,2	15,6	0,00221	0,0350	86,1	74	12,1
+ 9,8	283,0	30,0	0,00254	0,0159	63,1	53,3	9,8
+15,3	288,5	35,2	0,00265	0,0132	55,9	47,2	8,7
+20,9	294,1	39,8	0,00280	0,0108	46,9	39,4	7,5
+26,4	299,6	45,0	0,00312	0,0081	34,1	28,9	5,2

Способность этана давать твердые гидратные соединения изучена мало; найденные физические условия образования и разложения гидратов приведены в табл. 35 и на фиг. 11.

Упругость паров этана по данным Броуна, Козтса, Бэджера

Температура, ° C	Упру- гость паров, атм	Темпе- ратура, ° C	Упру- гость паров, атм	Темпе- ратура, ° C	Упру- гость паров, атм	Темпе- ратура, ° C	Упру- гость паров, атм
+70	100,0	+15	34,9	-40	7,0	-95	0,75
+65	91,0	+10	30,0	-45	6,0	-100	0,55
+60	84,0	+5	26,6	-50	5,2		
+55	77,0	0	23,6	-55	4,3		
+50	71,0	-5	19,2	-60	3,6		
+45	65,0	-10	17,0	-65	3,0		
+40	59,0	-15	15,0	-70	2,5		
+35	54,0	-20	13,0	-75	1,9		
+30	48,0	-25	11,3	-80	1,5		
+25	43,0	-30	9,8	-85	1,2		
+20	38,0	-35	8,4	-90	0,94		

Таблица 36

Температура, °C	Давление, ат
+ 0,6	5,1
+ 1,7	5,8
+ 10,0	17
+ 13,0	27
+ 15,0	34

Пропан

Пропан (C_3H_8) — бесцветный газ. Молекулярный вес 44,0616. Температура кипения при 1 *ата* минус 44,6° С. Температура плавления минус 189,9° С. Критическая температура плюс 96,0° С. Критическое давление 45,0 *ата*. Удельный вес в газообразном состоянии 1,523 (по воздуху). Удельный вес в жидком состоянии 0,536 (по воде). 1 м³ пропана (при 15° С и 760 мм) весит 1,8672 кг. Теплоемкость газа :

при постоянном давлении 0,475 ккал/кг°С

л	л	объёме	0,413	л
---	---	--------	-------	---

Теплотворность (высшая) — 11 910 ккал/кг и 22 400 ккал/м³.
Скрытая теплота испарения 103 ккал/кг и 52,4 ккал/л.

Предел взрываемости при смешении с воздухом: низший — 2,3%,
высший — 9,5%.

Температура воспламенения 510—580° С.

Теоретическое количество воздуха, потребное для сжигания 1 м³ пропана, 23,666 м³.

Высшая скорость воспламенения смеси пропана с воздухом 32 см/сек, с кислородом 370 см/сек.

Таблица 36

Коэффициент сжимаемости пропана

Температура, °C	Давление, атм	Объем, м³		$K = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{теор}}}$
		$V_{\text{факт}}$	$V_{\text{теор}}$	
-50,8	0,68	12,3643	12 5312	0,987
-39,7	1,13	6,6325	6,8787	0,969
-28,6	1,78	4,9808	5 2666	0,940
-17,4	2,68	3,3734	3,6592	0,922
- 6,3	3 89	2,3659	2,6291	0,892
+ 4,8	5,39	1,7065	1,9725	0,865
+15,9	7,50	1,2565	1,4773	0,851
+27,0	10,00	0,9594	1,1490	0,835
+38,1	13 08	0,7358	0,9113	0,808
+49,2	16,79	0,5717	0,7358	0,777

Теоретическая температура горения пропана 2043° С.
Октановое число — 125.

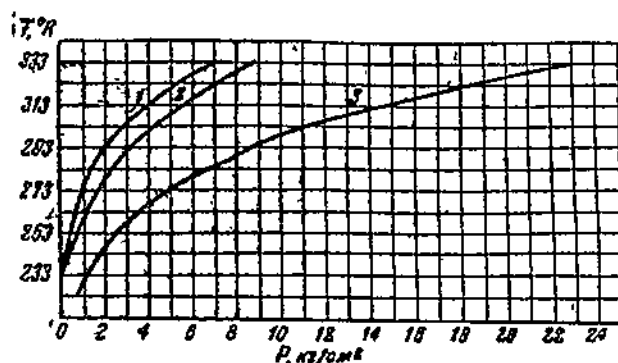
Таблица 37

Упругость паров пропана

Темпе- ратура, °C	Давле- ние, атм	Темпе- ратура, °C	Давле- ние, атм	Темпе- ратура, °C	Давле- ние, атм
+95	43,0	+30	11,0	-35	1,4
+90	39,0	+25	9,8	-40	1,2
+85	36,0	+20	8,5	-45	0,98
+80	33,0	+15	7,5	-50	0,80
+75	30,0	+10	6,4	-55	0,62
+70	27,0	+ 5	5,5	-60	0,48
+65	24,5	0	4,8	-65	0,38
+60	22,0	- 5	4,3	-70	0,30
+55	20,0	-10	3,7	-75	0,22
+50	18,0	-15	3,2	-80	0,17
+45	16,0	-20	2,7	-85	0,12
+40	14,3	-25	2,2	-90	0 07
+35	12,6	-30	1,8		

Опубликованные за прошлые годы данные по упругости паров пропана и бутанов существенно разнятся между собой, причем расхождения иногда достигают 30%. М. А. Айзерманом [3] собраны все экспериментальные данные по этому параметру, опубликованные за последние 50 лет на русском, немецком, французском, английском, итальянском и голландском языках; из этих данных отобраны более достоверные и для каждой температуры определены вероятные значения упругости паров, согласно с законами и формулами математической

теории вероятностей. Найденные таким методом кривые упругости паров пропана, н-бутана и изобутана приведены на фиг. 12. На этой диаграмме по оси ординат отложены абс. температуры ($^{\circ}\text{K}$), а по оси абсцисс упругости паров.



Фиг. 12. Диаграмма упругости паров; кривая 1 — н-бутана, кривая 2 — изобутана, кривая 3 — пропана.

Таблица 38

Теплоёмкость жидкого пропана при различных температурах

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Теплоёмкость жидкого пропана (насыщенного) по воде = 1	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Теплоёмкость жидкого пропана (насыщенного) по воде = 1
От -60 до -50	0,533	От -7 до +5	0,600
» -50 » -40	0,500	» +5 » +15	0,600
» -40 » -30	0,500	» +15 » +25	0,625
» -30 » -20	0,525	» +25 » +40	0,675
» -20 » -7	0,550	» +40 » +50	0,640

Таблица 39

Скрытая теплота испарения пропана

Температура		Упругость паров, ата	Удельный объём, $\text{м}^3/\text{кг}$		Скрытая теплота испарения, ккал/кг		
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{K}$		жидко- сти	паров	общая	внут- ренняя	внешняя
-59,4	213,6	0,49	0,00166	0,8980	105,5	96,5	9,0
-45,5	227,5	0,95	0,00170	0,4810	102,2	92,3	9,9
-34,4	238,6	1,44	0,00173	0,3060	99,2	89,0	10,2
-28,9	244,1	1,84	0,00176	0,2482	97,5	87,2	10,3
-23,3	249,7	2,25	0,00178	0,2020	96,1	85,6	10,5
-17,8	255,2	2,88	0,00180	0,1682	94,5	84,0	10,5
-6,6	266,4	3,89	0,00185	0,1180	91,4	80,6	10,8
+4,4	277,4	5,39	0,00190	0,0950	88,1	77,4	10,7
+15	288,5	7,50	0,00196	0,0626	84,8	74,0	10,8
+26,6	299,6	10,0	0,00202	0,0477	80,9	70,0	10,9
+37,8	310,8	13,0	0,00210	0,0378	76,7	66,0	10,7
+48,9	321,9	16,8	0,00219	0,0284	71,5	61,1	10,4
+51,7	324,7	18,3	0,00222	0,0269	70,1	60,1	10,0

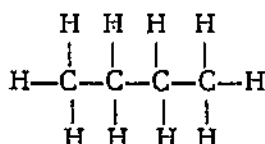
Найденные до сего времени условия образования и разложения твердых гидратных соединений пропана приведены в табл. 40 и на фиг. 11.

Таблица 40

Температура, °C	Давление, ат
+1,7	2,4
+2,3	2,7
+3,3	3,4
+4,4	4,1
+5,0	4,8

н - Б у т а н

Нормальный бутан (C_4H_{10}). Структурная формула этого насыщенного углеводорода:



Молекулярный вес 58,077. Температура кипения при 1 атa +0,6° C. Температура плавления минус 135° C. Критическая температура +153,8° C. Критическое давление 35,7 атa. Удельный вес: в газообразном состоянии 2,007 (по воздуху), в жидком состоянии 0,582 (по воде). 1 м³ н-бутана весит 2,4606 кг (при 15° C и 760 мм рт. ст.)

Таблица 41

Коэффициент сжимаемости н-бутана

Температура		Давление, атa	Объем, м³		
°C	°K		$V_{факт}$	$V_{теор}$	$K = \frac{V_{факт}}{V_{теор}}$
-17,6	255,6	0,50	18,2195	19,4195	0,946
- 6,5	266,7	0,81	11,8662	12,5765	0,944
+ 4,6	277,8	1,24	8,0089	8,6173	0,932
+15,7	288,9	1,84	5,5807	6,0081	0,928
+26,8	300,0	2,64	4,0384	4,3638	0,922
+37,9	311,1	3,66	2,9715	3,0847	0,913
+49,0	322,2	4,96	2,2640	2,4904	0,908
+60,1	333,3	6,49	1,7574	1,8697	0,892

Теплоемкость: при постоянном давлении $c_p = 0,458 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$, при постоянном объеме $c_v = 0,414 \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$. Теплотворность: (высшая) $11\,740 \text{ ккал/кг}$ и $28\,800 \text{ ккал/м}^3$, (низшая) — $27\,400 \text{ ккал/м}^3$ и $10\,845 \text{ ккал/кг}$.

Скрытая теплота испарения 94 ккал/кг и $54,7 \text{ ккал/л}$. Предел взрываемости при смешении с воздухом: низший — $1,9\%$, высший — $8,4\%$. Температура воспламенения $475\text{—}550^\circ\text{C}$.

Теоретическая температура горения. 2057°C
Октановое число 91

Средние данные по упругости паров н-бутана приведены на фиг. 12.

Таблица 42

Упругость паров н-бутана

$^\circ\text{C}$	$P, \text{ ата}$	$^\circ\text{C}$	$P, \text{ ата}$	$^\circ\text{C}$	$P, \text{ ата}$
150	36,0	80	10,2	10	1,5
145	33,5	75	9,2	5	1,3
140	31,0	70	8,1	0	0,96
135	28,5	65	7,4	— 5	0,80
130	26,3	60	6,6	— 10	0,68
125	24,2	55	5,8	— 15	0,54
120	22,0	50	5,1	— 20	0,45
115	20,4	45	4,4	— 25	0,35
110	18,5	40	3,9	— 30	0,28
105	17,0	35	3,4	— 35	0,22
100	15,4	30	2,9	— 40	0,18
95	14,1	25	2,5	— 45	0,13
90	12,7	20	2,1	— 50	0,10
85	11,4	15	1,8	— 55	0,07
				— 60	0,05

Таблица 43

Теплоёмкость жидкого (насыщенного) н-бутана (по воде = 1)

Температура, $^\circ\text{C}$	Теплоёмкость
От -20 до -7	0,525
» -7 » $+5$	0,550
» $+5$ » $+15$	0,575
» $+15$ » $+25$	0,595
» $+25$ » $+40$	0,625
» $+40$ » $+50$	0,650
» $+50$ » $+60$	0,675

Скрытая теплота испарения н-бутана

Температура		Упру- гость паров, ата	Уд. объем, л ³ /кг		Скрытая теплота испаре- ния, ккал/кг		
°C	абс.		жидко- сти	паров	общая	внутрен- няя	внеш- няя
-17,8	255,2	0,50	0,00161	0,6820	94,6	86,7	7,9
- 6,6	266,4	0,78	0,00164	0,4485	92,2	83,8	8,4
+ 4,4	277,4	1,24	0,00168	0,3022	90,7	81,8	8,9
+15,5	288,5	1,84	0,00170	0,2145	88,5	79,3	9,2
+26,6	299,6	2,63	0,00174	0,1523	86,0	76,4	9,6
+37,8	310,8	3,66	0,00178	0,1124	82,8	73,2	9,6
+43,3	316,3	4,26	0,00181	0,0980	81,5	71,7	9,8
+48,9	321,9	4,95	0,00184	0,0855	79,5	69,6	9,9
+55,5	328,5	5,82	0,00186	0,0750	77,9	68,0	9,9
+60,0	333,0	6,60	0,00188	0,0662	76,3	66,3	10,0

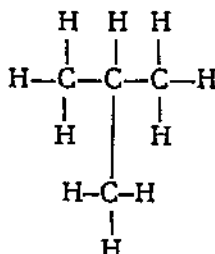
Таблица 46

Удельные веса и коэффициент расширения
жидкого н-бутана при различных темпе-
ратурах

°C	Уд. вес (по воде = 1)	Коэффициент расширения
0	0,5992	—
+ 8	0,5907	0,00379
+16	0,5820	0,00490
+24	0,5725	0,00605
+32	0,5635	0,00756
+40	0,5538	0,00948
+48	0,5436	0,0120

И з о б у т а н

Изобутан (C_4H_{10}) или $(CH_3)_2 \cdot CH$, отличаясь от н-бутана по своей структурной формуле,



имеет несколько иные физические параметры.

Температура кипения при 1 *ата* минус 10,2° С; температура плавления минус 145,0° С. Критическая температура +134,0° С; критическое давление 36,2 *ата*.

Теплоёмкость : при постоянном давлении . 0,462 *ккал/кг*°С
 " " " " объёме. . 0,416 "

Уд. вес в газообразном состоянии при 15° С (воздух = 1) 2,004; уд. вес в жидком состоянии (вода = 1) 0,566. Вес 1 *м³* при 0° и 760 *мм* рт. ст. 2,59 *кг*. Объём паров (при 15° С и 760 *мм* рт. ст.) при испарении 1 *кг* жидкого изобутана 0,406 *м³*; то же с 1 *л* — 0,228 *м³*.

Теплотворность : высшая 29 000 *ккал/м³* и 11 740 *ккал/кг*
 " " низшая 27 493 " " 10 845 "

Теоретическая температура горения 2057° С. Пределы взрываемости при смешении с воздухом : высший 8,4%, низший 1,9%. Октановое число 99.

Средние данные по упругости паров изобутана приведены на фиг. 12.

Коэффициент сжимаемости изобутана

Таблица 46

Температура		Давление, <i>ата</i>	Объём, <i>м³</i>		$K = \frac{V_{\text{факт}}}{V_{\text{теор}}}$
° С	° К		<i>V</i> _{факт}	<i>V</i> _{теор}	
-23,6	244,4	0,52	18,0554	18,0724	0,999
-17,4	255,6	0,81	11,7699	12,0529	0,977
- 6,3	266,7	1,27	7,6806	8,0145	0,958
+ 4,8	277,8	1,96	5,2864	5,4477	0,940
+15,9	288,9	2,71	3,7413	4,0837	0,916
+27,0	300,0	3,78	2,7253	3,0451	0,895
+38,1	311,1	5,16	2,0178	2,3093	0,874
+49,2	322,2	6,86	1,5197	1,7999	0,845
+60,3	333,3	8,87	1,1744	1,4376	0,817

Упругость паров изобутана

Таблица 47

° С	<i>P</i> , <i>ата</i>	° С	<i>P</i> , <i>ата</i>	° С	<i>P</i> , <i>ата</i>	° С	<i>P</i> , <i>ата</i>
135	38,2	85	15,0	35	4,8	-15	0,82
130	32,0	80	13,5	30	4,2	-20	0,69
125	30,0	75	12,2	25	3,6	-25	0,54
120	27,5	70	11,0	20	3,2	-30	0,44
115	25,2	65	10,0	15	2,7	-35	0,32
110	23,2	60	9,0	10	2,3	-40	0,27
105	21,4	55	7,8	5	1,9	-45	0,21
100	20,0	50	7,1	0	1,6	-50	0,17
95	18,0	45	6,2	- 5	1,4	-55	0,12
90	16,4	40	5,5	-10	1,02	-60	0,09

Таблица 48

Теплоёмкость жидкого (насыщенного) изобутана
(по воде = 1)

Температура, °C	Теплоёмкость	°C	Теплоёмкость
От -30 до -20	0,450	От +15 до +25	0,675
» -20 » -7	0,500	» +25 » +40	0,725
» -7 » +5	0,550	» +40 » +50	0,800
» +5 » +15	0,600	» +50 » +60	0,900

Таблица 49

Скрытая теплота испарения изобутана

Температура		Упру- гость паров; атм	Уд. объем, м³/кг		Скрытая теплота испаре- ния, ккал/кг		
°C	°K		жидко- сти	паров	общая	внут- ренняя	внешняя
-28,9	244,1	0,52	0,00162	0,6830	91,7	83,4	8,3
-17,8	255,2	0,80	0,00165	0,4460	89,0	80,3	8,7
-6,6	266,4	1,28	0,00169	0,2997	86,5	79,0	7,5
+4,4	277,4	1,86	0,00173	0,1992	83,6	74,5	9,1
+15,0	288,5	2,70	0,00170	0,1414	81,0	71,8	9,2
+26,6	299,6	3,78	0,00181	0,1029	77,8	68,6	9,2
+37,8	310,8	5,16	0,00186	0,0762	74,5	65,4	9,1
+48,9	321,9	6,86	0,00191	0,0574	70,6	61,6	9,0
+60,0	333,0	9,00	0,00198	0,0443	66,7	57,8	8,9

Таблица 50

Удельные веса и коэффициенты расширения жидкого изобутана при различных температурах

°C	Уд. вес (вода = 1)	Коэффициент расширения
0	0,5820	0,00435
+8	0,5730	0,00554
+16	0,5630	0,00703
+24	0,5530	0,00898
+32	0,5430	0,0109
+40	0,5330	0,0134

Физико-химическая характеристика группы непредельных углеводородов

Наименование показателей	Этилен	Пропи- лен	Бутилен	Изобу- тилен
Химическая формула	C_2H_4	C_3H_6	C_4H_8	C_4H_8
Молекулярный вес	28,0308	42,046	56,062	56,062
Уд. вес газа при 15° С (воздух = 1) . .	0,970	1,479	1,977	1,977
Уд. вес жидкого при 15° С (вода = 1) .	0,350 (при 0°С)	0,522	0,600	0,601
Температура кипения, °С	—103,8	— 47,0	+1,4	+6,0
Температура плавления, °С	—169,4	—185,2	—130	—146
Критическая температура, °С	9,5	92,3	151,0	150,7
Критическое давление, <i>атм</i>	50,6	46,5	34,0	—
Теплоёмкость при постоянном давлении, <i>ккал/кг °С</i>	0,400	0,390	0,380	0,382
То же при постоянном объеме, <i>ккал/кг °С</i>	0,320	0,343	0,345	0,347
Скрытая теплота испарения:				
<i>ккал/кг</i>	120	108	98	95
<i>ккал/л</i>	52,8	57,4	60,8	57,0
Теплотворность:				
вышая, <i>ккал/м³</i>	14300	20750	27370	27370
низшая »	13374	19387	25565	25565
Объём паров в <i>м³</i> с 1 <i>кг</i> жидкого газа при 15° С и 760 <i>мм</i> рт. ст.	0,836	0,526	0,422	0,422
Объём паров в <i>м³</i> с 1 <i>л</i> жидкого газа при 15° С и 760 <i>мм</i> рт. ст.	0,364	0,279	0,261	0,253
Газовая постоянная <i>R</i>	30,252	20,168	15,126	15,126
Предел взрываемости с воздухом:				
верхний, %	34,0	9,7	9,0	9,0
нижний, %	3,2	2,2	1,7	1,7
Упругость паров, <i>атм</i> при <i>t°</i> С				
+ 30	78,0	13,3	2,7	6,1
+ 20	64,0	10,3	2,0	4,6
+ 10	50,7	7,6	1,4	3,3
0	40,0	5,8	0,92	2,4
— 10	30,0	4,1	0,64	1,02
— 20	23,2	3,0	0,41	0,69
— 30	17,5	2,0	0,27	0,44

Индивидуальные газы второй группы

В о д о р о д

Водород (H_2) — бесцветный газ, без запаха и вкуса. Из всех известных до сих пор газов он является наиболее легким. Водород в 14,5 раз легче воздуха и в 16 раз легче кислорода. 1 л водорода на широте 45° при $0^\circ C$ и 760 мм рт. ст. весит $0,089871 \pm 0,000005$ г. Температура кипения при 1 атм минус $252,74^\circ C$. Температура плавления минус $259,1^\circ C$. Критическая температура минус $239,9^\circ C$. Критическое давление 12,8 атм. Удельный вес водорода (по воздуху) при $0^\circ C$ и 760 мм рт. ст. равен 0,06952. Молекулярный вес 2,0156. При $0^\circ C$ и 760 мм рт. ст. 1 г водорода занимает объем в 11,1176 л.

Теплотворность водорода: высшая 3052 ккал/н. м³
низшая 2570 »

Удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 3,408$ ккал/кг $^\circ C$. Температура пламени водорода $2182^\circ C$. Предел взрываемости при смешении с воздухом от 4,15 до 75,0% (объемн.).

Высшая скорость воспламенения: смеси с воздухом 267 см/сек., смеси с кислородом 890 см/сек. Такие высокие скорости воспламенения для водорода имеют весьма существенное значение; по сравнению, например, с углеводородными газами, водород в этом отношении обладает значительно лучшими свойствами как горючий газ, и его присутствие в промышленных газах повышает их качество при сжигании. в газовых горелках.

Таблица 52

Коэффициенты сжимаемости водорода

($P \cdot v = 1$ при 1 ат и $0^\circ C$)

Давле- ние, ат	-239,9°	-207,9°	-183°	-150°	-10°	-70°	-40°	-25°	0,0	20°	50° C
1	—	0,2380	0,3297	0,4508	0,6340	0,7438	0,8170	0,9085	1,0000	1,0732	1,1830
10	—	0,2308	0,3279	0,4520	0,6377	0,7482	0,8219	0,9138	1,0057	1,0791	1,1891
20	0,0286	0,2239	0,3265	0,4541	0,6421	0,7535	0,8275	0,9187	1,0120	1,0855	1,1959
30	0,0389	0,2183	0,3260	0,4564	0,6466	0,7583	0,8331	0,9257	1,0183	1,0920	1,2027
40	0,0595	0,2144	0,3262	0,4591	0,6513	0,7642	0,8389	0,9318	1,0247	1,0985	1,2094
50	0,0717	0,2125	0,3271	0,4623	0,6562	0,7695	0,8447	0,9378	1,0309	1,1051	1,2162
60	—	0,2127	0,3289	0,4658	0,6613	0,7752	0,8506	0,9441	1,0376	1,1116	1,2230
80	—	0,2187	0,3346	0,4740	0,6720	0,7870	0,8628	0,9567	1,0507	1,1249	1,2365
100	—	0,2301	0,3434	0,4839	0,6834	0,8008	0,8754	0,9700	1,0639	1,1388	1,2510
200	—	—	—	—	—	0,8640	0,9411	1,0383	1,1336	1,2066	1,3272
300	—	—	—	—	—	0,9340	1,0112	1,1093	1,2045	1,2799	1,3986
400	—	—	—	—	—	1,0075	0,8332	1,1803	1,2775	1,3511	1,4720
500	—	—	—	—	—	1,0804	1,1568	1,2542	1,3500	1,4240	1,5440
600	—	—	—	—	—	1,1555	1,2301	1,3272	1,4226	1,4958	1,6160
800	—	—	—	—	—	1,3018	1,3755	1,4717	1,5665	1,6391	1,7582
1000	—	—	—	—	—	1,4443	1,5185	1,6139	1,7101	1,7795	1,9006

О к и с ь у г л е р о д а

Оксись углерода (CO) — бесцветный газ, без запаха. Молекулярный вес 28,00. Температура кипения при 760 мм минус 191,5° С. Температура плавления минус 205° С. Критическая температура минус 139° С. Критическое давление 34,6 ат. Плотность по отношению к воздуху при 0° С и 760 мм рт. ст. 0,967. 1 л окиси углерода при нормальных условиях весит 1,2506 г; 1 кг при нормальных условиях занимает объем 800 л.

Теплотворная способность окиси углерода 3034 ккал/м³. Средняя удельная теплоемкость при постоянном давлении (1 ат) при +18° С — 0,251 ккал/кг ° С.

Предел взрываемости при смешении с воздухом от 12,8 до 75,0% (объемн.). Содержание окиси углерода в воздухе в количестве 0,34% смертельно для человека.

Теоретическое количество воздуха, требуемое для сжигания 1 м³ окиси углерода, равно 2,39 м³.

Высшая скорость воспламенения смеси с воздухом — 33 см/сек, с кислородом — 110 см/сек.

Таблица 53

Коэффициенты сжимаемости окиси углерода
($P \cdot v = 1$ при 1 ат и 0° С)

Давле- ние, ат	—70°	—50°	—25°	0°	25°	50° С
1	0,7427	0,8162	0,9082	1,0000	1,0918	1,1836
10	0,7275	0,8061	0,9025	0,9960	1,0885	1,1830
20	0,7115	0,7947	0,8960	0,9912	1,0858	1,1827
30	0,6950	0,7840	0,8895	0,9868	1,0836	1,1820
40	0,6792	0,7730	0,8833	0,9825	1,0820	1,1821
50	0,6636	0,7622	0,8768	0,9780	1,0814	1,1826
60	0,6495	0,7530	0,8712	0,9755	1,0810	1,1842
80	0,6274	0,7355	0,8620	0,9718	1,0820	1,1893
100	0,6147	0,7264	0,8592	0,9725	1,0851	1,1955
120	0,6110	0,7240	0,8590	0,9763	1,0917	1,2042
140	0,6142	0,7270	0,8627	0,9832	1,1009	1,2139
160	0,6255	0,7355	0,8715	0,9935	1,1125	1,2255
180	0,6431	0,7485	0,8856	1,0125	1,1255	1,2400
200	0,6631	0,7656	0,9022	1,0200	1,1415	1,2561
250	0,7247	0,8205	0,9520	1,0665	1,1885	1,3022
300	0,7955	0,8872	1,0087	1,1211	1,2406	1,3521
400	0,9434	1,0285	1,1403	1,2487	1,3625	1,4716
500	1,0920	1,1755	1,2831	1,3843	1,4940	1,6023
600	1,2386	1,3225	1,4282	1,5256	1,6317	1,7378
800	1,5236	1,6100	1,7153	1,8064	1,9115	2,0144
1000	1,7992	1,8871	1,9935	2,0827	2,1857	2,2879

И н д и в и д у а л ь н ы е г а з ы т р е т ь е й г р у п п ы

У г л е к и с л о т а

Углекислота (CO₂) — бесцветный газ с едва ощутимым запахом, растворяется в воде со слабым кисловатым вкусом. Молекулярный вес 44,00. Температура кипения при 1 ата минус 78,5° С. Темпера-

тура плавления минус $56,4^{\circ}\text{C}$. Критическая температура $+31,35^{\circ}\text{C}$. Критическое давление $73,0\text{ ат}$. Средняя удельная теплоёмкость при $+20^{\circ}\text{C}$ — $0,202\text{ ккал/кг }^{\circ}\text{C}$, при $+100^{\circ}\text{C}$ — $0,221\text{ ккал/кг }^{\circ}\text{C}$. 1 л углекислого газа при нормальных условиях весит $1,97686\text{ г}$. Плотность по воздуху при 0°C и 760 мм равна $1,529$.

Растворимость в воде (при атмосферном давлении):

при 0°C	— 171,3
» 15°C	— 101,9
» 20°C	— 87,8
» 30°C	— 66,5
» 60°C	— 35,9

объёмов в 100 объёмах воды.

При повышении давления растворимость увеличивается, следуя до давления $\sim 14\text{ ат}$ закону Генри.

Данные об отклонениях от законов идеальных газов для углекислоты, азота и кислорода приведены в начале этой главы.

Таблица 54

Упругость паров углекислоты

$^{\circ}\text{C}$	$P, \text{ ат}$	$^{\circ}\text{C}$	$P, \text{ ат}$
—30	14,1	+ 5	44,4
—25	16,1	+10	50,2
—20	18,8	+15	56,5
—15	22,2	+20	63,4
—10	25,7	+25	70,7
— 5	34,4		
0	39,2		

А з о т

Азот (N_2)—инертный газ без цвета, запаха и вкуса. Молекулярный вес $28,016$. Температура кипения при 1 ат равна минус $195,80^{\circ}\text{C}$. Температура плавления при 88 мм рт. ст. равна минус $210,52^{\circ}\text{C}$. Критическая температура минус $147,1^{\circ}\text{C}$. Критическое давление $33,5\text{ ат}$.

Растворимость в воде (при атмосферном давлении):

при 0°C	— 0,02312	при 20°C	— 0,01518
» 5°C	— 0,02050	» 25°C	— 0,01410
» 10°C	— 0,01829	» 30°C	— 0,01319
» 15°C	— 0,01656		

объёмов на 1 объём воды.

1 л чистого азота при 0°C и 760 мм весит $1,2507\text{ г}$. Плотность по воздуху при 0°C и 760 мм рт. ст. равна $0,9673$.

К и с л о р о д

Кислород (O_2). Молекулярный вес 32,00. Температура кипения при 1 *ата* равна минус 182,95° С. Температура плавления минус 218,4° С. Критическая температура минус 118,8° С. Критическое давление 50,8 *ата*. Плотность по воздуху при 0° С и 760 мм 1,105. 1 л кислорода при 0° и 760 мм рт. ст. весит 1,429 г.

Растворимость в воде (при атмосферном давлении):

при 0° С — 0,04890	при 20° С — 0,03102
» 5° С — 0,04286	» 25° С — 0,02831
» 10° С — 0,03802	» 30° С — 0,02678
» 15° С — 0,03415	» 35° С — 0,02440

объёмов в 1 объёме воды.

Средняя удельная теплоёмкость при постоянном давлении при +20° С равна 0,218 *ккал/кг* °С.

К III группе — балластных, а в отдельных случаях и вредных компонентов промышленных горючих газов — должны быть отнесены еще газообразные или парообразные соединения, как, например: аммиак, нафталин, сероводород, органические сернистые соединения, пары смолы, цианистые соединения, роданистые соединения, водяные пары. Как было указано в предшествующей главе, все эти соединения в той или иной степени должны быть удалены из газа. Некоторое исключение допускается пока в отношении водяных паров; несмотря на то, что водяные пары ухудшают товарную ценность горючих газов и в ряде случаев, как, например, при транспорте газов по газопроводам, создают серьезные эксплуатационные осложнения, современная практика газового дела только в сравнительно небольших масштабах применяет процесс обезвоживания. Надо полагать, что в будущем процесс осушки станет неотъемлемым в общей схеме очистки промышленных горючих газов за исключением отдельных случаев, когда это может противоречить экономике.

Газовые смеси

Промышленные горючие газы представляют собою смесь нескольких реальных газов. В большинстве случаев физико-химические свойства газовых смесей, как суммы индивидуальных газов, могут быть найдены путем суммирования цифровых значений соответствующих физико-химических свойств составных газов.

По закону Дальтона общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений составляющих эту смесь компонентов. По этому же закону удельный вес смеси газов $\gamma_{\text{см}}$ равен:

$$\gamma_{\text{см}} = v_1 \cdot \gamma_1 + v_2 \cdot \gamma_2 + \dots + v_n \gamma_n,$$

где

$v_1, v_2 \dots v_n$ — объёмы, занимаемые отдельными газовыми компонентами, и

$\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$ — удельные веса этих компонентов.

Пример. Определить удельный вес газа следующего состава:

$$CO_2 - 5,0\%, CO - 10\%, H_2 - 55\%, CH_4 - 25\%, N_2 - 5\%.$$

Пользуясь указанной формулой и цифровыми значениями удельных весов отдельных компонентов, получим :

$$\gamma = 0,05 \cdot 1,529 + 0,1 \cdot 0,967 + 0,55 \cdot 0,069 + 0,25 \cdot 0,554 + \\ + 0,05 \cdot 0,967 = 0,398 \text{ (воздух} = 1).$$

Предел воспламеняемости газа может быть подсчитан по формуле:

$$L = \frac{100}{\frac{a}{A} + \frac{b}{B} + \frac{c}{C} + \dots + \frac{n}{N}} \%$$

где

L — предел воспламеняемости газа в $\%$,

$a, b, c \dots n$ — процентное содержание соответствующих горючих компонентов,

$A, B, C \dots N$ — предел воспламеняемости соответствующих горючих компонентов.

Пример. Определить низший предел воспламеняемости газа состава: CO_2 —5,0%, CO —35,0%, H_2 —45,0%, CH_4 —3,0%, C_2H_6 —1,0%, N_2 —11,0%.

$$L = \frac{100}{\frac{0,35}{0,1280} + \frac{0,45}{0,0415} + \frac{0,03}{0,0535} + \frac{0,01}{0,0312}} \cong 6,8\%$$

Наблюдения показывают, что этот метод определения цифровых значений характеристических величин газовых смесей не всегда дает вполне точные результаты; экспериментальные определения тех же величин приводят к данным, отличающимся от расчётных.

Так, исследованиями Бунте (4) установлено, что экспериментально найденные скорости воспламенения газовых смесей отличаются от расчётных.

Экспериментально определенные высшие скорости воспламенения некоторых видов промышленных газов следующие:

генераторный газ состава: CO_2 —4,4%, CO —29,1%, H_2 —10,2%, N_2 —56,3% имеет скорость 33 см/сек (расчётная 37 см/сек);

водяной газ состава: CO_2 —0,2%, O_2 —0,4%, CO —47,0%, H_2 —50,5%, N_2 —1,9% имеет скорость 170 см/сек (расчётная 150 см/сек);

светильный газ состава: CO_2 —1,6%, C_nH_m —3,6%, O_2 —1,0%, CO —5,5%, H_2 —54,5%, CH_4 —27,2%, N_2 —6,6% имеет скорость 71 см/сек;

каменноугольный газ состава: CO_2 —4,5%, C_nH_m —2,4%, O_2 —0,2%, CO —20,8%, H_2 —51,8%, CH_4 —14,9%, N_2 —5,4% имеет скорость 76 см/сек.

Это же положение действительно и в отношении определения коэффициентов сжимаемости газовых смесей.

За последние годы было проведено весьма большое количество экспериментальных определений коэффициентов сжимаемости самых различных газовых смесей, начиная с искусственно составленных двухкомпонентных систем и кончая промышленными газами сложного состава.

Коэффициенты сжимаемости для природного газа
(свободного от воздуха и CO₂)

Удельный вес	°C	Манометрическое давление, в ат							
		6,8	13,6	20,4	27,2	34,0	40,8	47,6	54,4
0,60	15,6	1,013	1,030	1,047	1,065	1,082	1,099	1,116	1,134
	26,7	1,012	1,027	1,041	1,056	1,071	1,087	1,100	1,114
	37,8	1,010	1,024	1,033	1,048	1,060	1,074	1,087	1,099
	93	1,006	1,013	1,019	1,026	1,032	1,038	1,045	1,052
	204	1,002	1,005	1,007	1,009	1,011	1,014	1,016	1,018
0,70	15,6	1,020	1,045	1,070	1,100	1,130	1,157	1,188	1,220
	26,7	1,018	1,040	1,062	1,086	1,111	1,136	1,161	1,189
	37,8	1,016	1,034	1,054	1,075	1,096	1,119	1,140	1,163
	93	1,009	1,018	1,029	1,040	1,050	1,060	1,073	1,080
	204	1,003	1,007	1,011	1,014	1,018	1,022	1,026	1,030
0,80	15,6	1,028	1,062	1,099	1,140	1,185	1,227	1,272	1,319
	26,7	1,025	1,054	1,086	1,122	1,160	1,190	1,229	1,266
	37,8	1,021	1,047	1,076	1,107	1,138	1,163	1,193	1,224
	93	1,012	1,026	1,042	1,057	1,073	1,091	1,106	1,124
	204	1,005	1,009	1,015	1,020	1,027	1,032	1,038	1,045
0,90	15,6	1,036	1,082	1,133	1,190	1,250			
	26,7	1,032	1,072	1,115	1,160	1,228			
	37,8	1,029	1,062	1,096	1,130	1,167			
	93	1,016	1,033	1,049	1,067	1,083			
	204	1,006	1,012	1,018	1,025	1,031			
1,00	15,6	1,047	1,109	1,176	1,250	1,330			
	26,7	1,041	1,093	1,147	1,205	1,269			
	37,8	1,037	1,080	1,125	1,174	1,222			
	93	1,020	1,042	1,064	1,085	1,107			
	204	1,008	1,015	1,024	1,031	1,040			
1,20	15,6	1,074	1,175	1,290	1,410				
	26,7	1,064	1,151	1,242	1,342				
	37,8	1,056	1,129	1,209	1,295				
	93	1,030	1,065	1,105	1,145				
	204	1,011	1,025	1,038	1,053				
1,40	15,6	1,112	1,271	1,441					
	26,7	1,098	1,225	1,364					
	37,8	1,083	1,195	1,321					
	93	1,043	1,098	1,156					
	204	1,016	1,035	1,056					

И. Кричевским, В. Марковым и Г. Левченко проведены большие работы по изучению сжимаемости при давлениях от 50 до 700 ат и температурах от 0 до 200° С различных смесей метана, водорода, азота и углекислоты [5].

Казарновским, Симоновым и Аристовым изучались сжимаемости бинарных и тройных смесей водорода, аммиака и углекислоты при температурах до 300° С и давлениях до 1547 ат [6]; эти исследования, выполненные с точностью до $\pm 1\%$, показали хорошее совпадение с расчётными данными, полученными по формуле Битти-Бриджмена.

Особенно большое количество расчётных и экспериментальных определений коэффициента сжимаемости было проведено для природных и искусственных горючих газов или аналогичных им искусственно составленных смесей. Результаты этих определений, проведенных по природным и нефтяным газам американскими, а по искусственным газам немецкими исследователями, даны в виде таблиц или номограмм.

В табл. 55 приведены цифровые значения коэффициентов сжимаемости природного газа [7] при давлениях от 6,8 до 54,4 ат и температурах от 15,6° С (60° F) до 204° С (400° F).

Табл. 55 показывает, что при всех измеренных давлениях и температурах коэффициент K остаётся выше единицы, как это и следовало ожидать для природного газа, состоящего, в основном, из метана.

На фиг. 13 дана номограмма, составленная Мецгером и Пайером [8], для светильного газа состава:

CH_4 . . .	% 17,3	N_2 . . .	% 10,9
C_2H_6 . . .	2,4	CO_2 . . .	2,3
H_2 . . .	50,7	O_2 . . .	0,5
CO . . .	15,9	Q_b . . .	4200 ккал/н. м ³
Уд. вес . . .	0,465		

Эта номограмма позволяет учесть поправочный коэффициент K и найти действительный объём светильного газа (приведённого к нормальным условиям, в данном случае 15° С и 740 мм рт. ст.) в баллоне, теплотворность этого газа в баллоне и эквивалент по отношению к бензину.

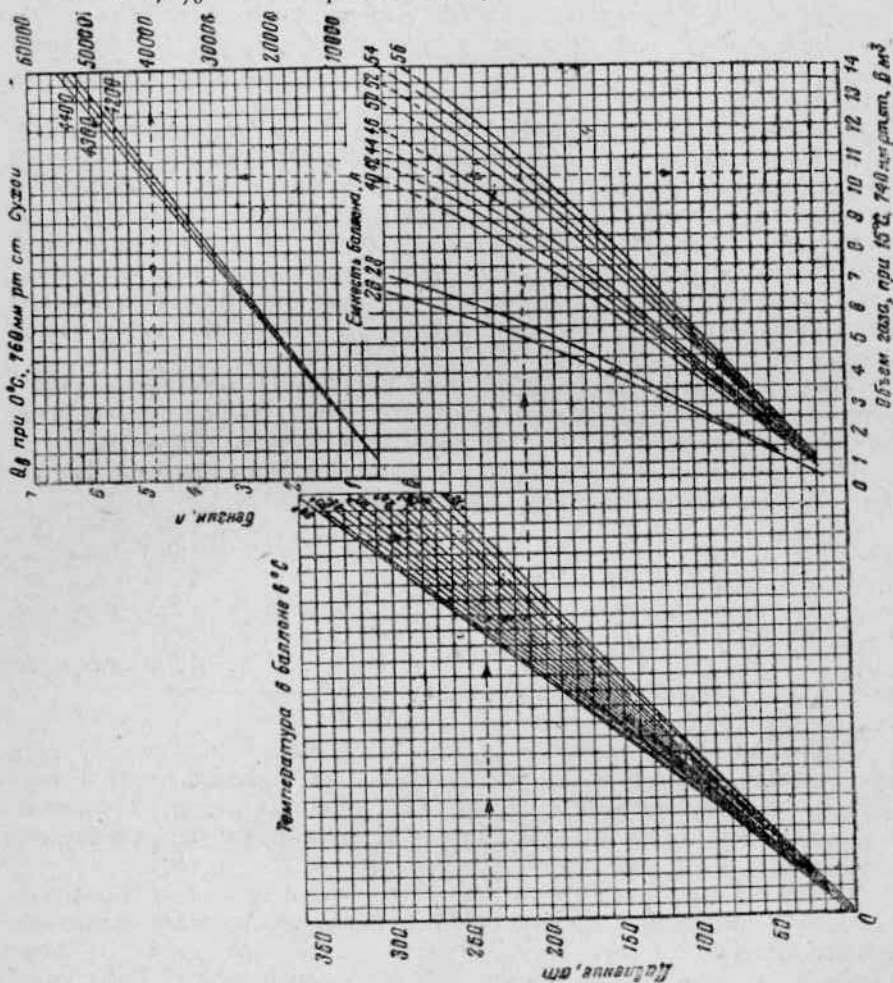
Пример пользования номограммой (фиг. 13). В баллоне, имеющем геометрическую ёмкость 53 л, находится светильный газ указанного состава под давлением 240 ат и при температуре 47° С. Определить количество газа в баллоне, общую теплотворность этого количества газа и эквивалентное ему количество бензина.

Решение. Проводим горизонтальную прямую, соответствующую 240 ат, до пересечения с изотермой 47° С и от места пересечения опускаем перпендикулярную линию до пересечения с изотермой 15° С; от точки пересечения проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой объёмов газа в баллоне заданной ёмкости (53 л). На оси абсцисс находим искомый объём газа 10,5 м³ (при 15° С и 740 мм рт. ст.). В верхней части номограммы находим (как показано пунктирными линиями и стрелками) общую теплотворность этого количества

газа — 40 000 ккал, что эквивалентно 4,75 л бензина. При подсчёте по уравнению состояния объем газа в баллоне при 15° С составлял бы

$$53 \cdot 240 \cdot \frac{273 + 15}{273 + 47} = 11,45 \text{ м}^3,$$

т. е. на 9,5% больше фактического.



Фиг. 13. Номограмма для светильного газа.

Для газа Московского газового завода был определен [9] коэффициент сжимаемости по формуле:

$$K = \frac{(K_1 \cdot a) + (K_2 \cdot b) + (K_3 \cdot v) + \dots + K_n (n)}{100},$$

где $K_1, K_2, \dots, K_n$ — коэффициенты сжимаемости для отдельных компонентов газа,

$a, b, v, \dots, n$ — объёмные количества этих компонентов в %.

Данные расчётов приведены в табл. 56.

Таблица 56

Компоненты газа	%	Коэффициенты сжимаемости при давлении			
		50 ат	100 ат	150 ат	200 ат
CO	20	0,99	0,98	0,99	1,02
CH ₄	16	0,91	0,85	0,82	0,80
H ₂	28	1,03	1,06	1,11	1,15
CO ₂	5	0,90	0,30	0,50	0,85
N ₂	22	0,99	0,99	1,02	1,04
C _n H _m	9	0,98	0,95	0,93	0,90
K светильного газа	—	0,97	0,95	0,97	1,01

По данным Г. Самоль результаты этих расчётов были проверены методом взвешивания и показали применимость их для приближенных практических подсчётов.

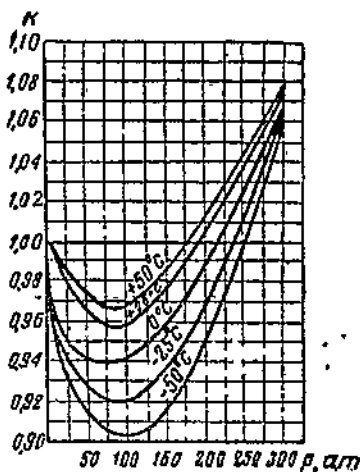
На фиг. 14 дана диаграмма значений K для светильного газа, составленная расчётным путем для температур от $+50$ до -50°C . Состав газа: CH₄—19%, H₂—49%, C_nH_m—2%, CO—13%, CO₂—3%, N₂—14%. Кривые этой диаграммы иллюстрируют, как увеличиваются значения K с повышением температуры.

Содержание водяных паров в промышленных газах. До последнего времени принималось, что в объёмной единице насыщенного водяным паром газа, как и воздуха, содержится определённое количество водяного пара, которое находится в функциональной зависимости от температуры и давления газа. Исходя из этого, составлялись общераспространённые таблицы, которыми широко пользовались в практике.

В 1927 г. Бертлетом [10] было установлено, что водород и азот при высоких давлениях содержат водяного пара на 200% больше, чем это следует по общепринятым таблицам.

В 1939 г. Ляульхир и Брайско [11] нашли, что в природных газах Калифорнии при давлении 36,15 атм содержится воды на 30% больше, чем по таблицам.

Все последующие изучения подтвердили, что табличные данные верны только при малых давлениях; для высоких давлений ими пользоваться нельзя.



Фиг. 14. Диаграмма значений коэффициента сжимаемости для светильного газа.

Дитоном и Фростом [12], изучавшими содержание влаги в образцах природного газа, воздуха и гелия, получены данные, приведенные в табл. 57 и 58.

Таблица 57

Состав изучавшихся газов (в объёмн. %)

Составные части	Природный газ			Воздух	Гелий
	А	В	С		
Воздух	—	—	—	100,0	—
Углекислота	0,3	0,8	0,2	—	—
Азот	9,4	25,0	1,1	—	2,0
Гелий	—	—	—	—	98,0
Метан	79,4	67,4	87,9	—	—
Этан	5,9	3,7	4,4	—	—
Пропан	3,3	1,9	4,9	—	—
Бутан и высшие	1,7	1,2	1,5	—	—
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Цифровые значения найденных экспериментально для этих газов коэффициентов сжимаемости (за исключением газа С) приведены в табл. 58.

Таблица 58

Коэффициенты сжимаемости газов

Температура		Д а в л е н и е						
°C	°F	0	7,031	14,062	21,093	28,124	35,155	42,186 ат
		0	100	200	300	400	500	600 фнт./дм²

Природный газ А

37,8	100	1,000	0,9876	0,9750	0,9622	0,9500	0,9382	0,9263
26,7	80	1,000	0,9857	0,9712	0,9566	0,9422	0,9283	0,9146
15,6	60	1,000	0,9830	0,9654	0,9481	0,9314	0,9146	0,8982

Природный газ В

37,8	100	1,000	0,9909	0,9825	0,9740	0,9652	0,9571	0,9493
26,7	80	1,000	0,9896	0,9799	0,9698	0,9598	0,9500	0,9408
15,6	60	1,000	0,9876	0,9766	0,9648	0,9530	0,9416	0,9305

Воздух

37,8	100	1,000	0,9987	0,9976	0,9966	0,9958	0,9952	0,9949
26,7	80	1,000	0,9981	0,9964	0,9948	0,9934	0,9922	0,9913
15,6	60	1,000	0,9973	0,9949	0,9926	0,9906	0,9888	0,9873

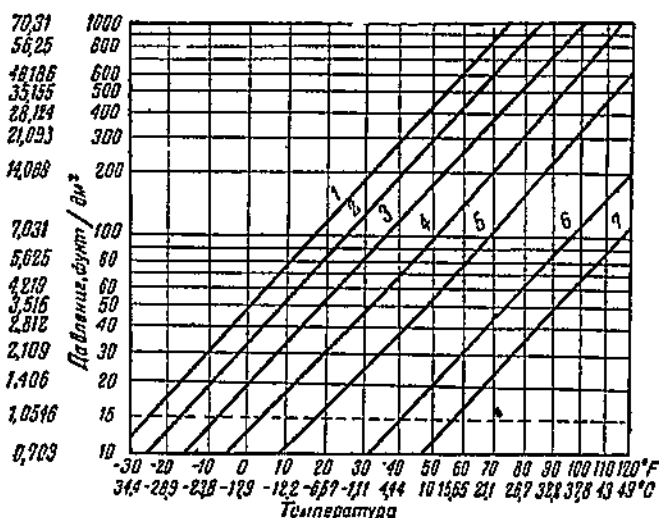
Гелий

37,8	100	1,000	1,0032	1,0064	1,0093	1,0128	1,0161	1,0192
26,7	80	1,000	1,0034	1,0066	1,0100	1,0134	1,0167	1,0201
15,6	60	1,000	1,0035	1,0070	1,0104	1,0139	1,0174	1,0208

Как и следовало ожидать, образцы газов А и В дали значительно большие отклонения от уравнения Клапейрона, чем воздух и гелий.

Указанными исследователями были далее экспериментально определены и рассчитаны точки росы и содержание водяных паров в объемной единице для этих газов при различных температурах и давлениях.

Полученные данные для газа А изображены на диаграммах фиг. 15 и 16, все цифровые величины, отложенные по осям абсцисс и ординат, даны в американских единицах, с пересчетом [13] на метрические.



Фиг. 15. Диаграмма точек росы для газа А.

На диаграмме фиг. 15 нанесены кривые точек росы для этого газа. Для каждой отдельной кривой этой диаграммы молярные концентрации водяных паров в газе постоянны. Количественное содержание водяных паров в 100 л³ газа при 1,153 *ата* и 15,56° С:

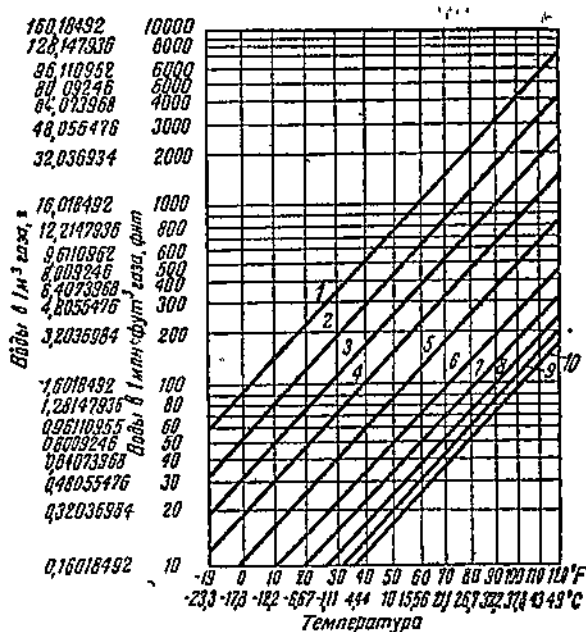
для кривой	1	40,4 г
"	2	58,1 "
"	3	93,4 "
"	4	153,7 "
"	5	279,1 "
"	6	750,7 "
"	7	1320,2 "

Пример пользования диаграммой. Кривая 6 пересекает абсциссу, соответствующую давлению 15 фунт./кв.дм.² (1,05465 *ата*), нанесенную на диаграмме пунктирной линией, в точке, соответствующей температуре 42° F (5,56° C); это и есть точка росы газа при данных условиях (при $P=1,05465$ *ата*, $t=5,56^{\circ}$ C и содержании воды 750,7 г в 100 л³).

На фиг. 16 дана более удобная для практического пользования диаграмма содержания водяных паров в газе того же состава. Каждая кривая построена для определенного постоянного давления, а именно:

кривая 1 для давления	0,90 <i>ата</i>	кривая 6 для давления	14,96 <i>ата</i>
" 2 "	1,60 "	" 7 "	21,99 "
" 3 "	2,66 "	" 8 "	29,02 "
" 4 "	4,42 "	" 9 "	36,05 "
" 5 "	7,93 "	" 10 "	43,09 "

Диаграмма показывает зависимость между содержанием водяных паров (в условиях насыщения), температурой и давлением; по ней легко найти, какое количество водяных паров содержится в 1 м³ газа при данной



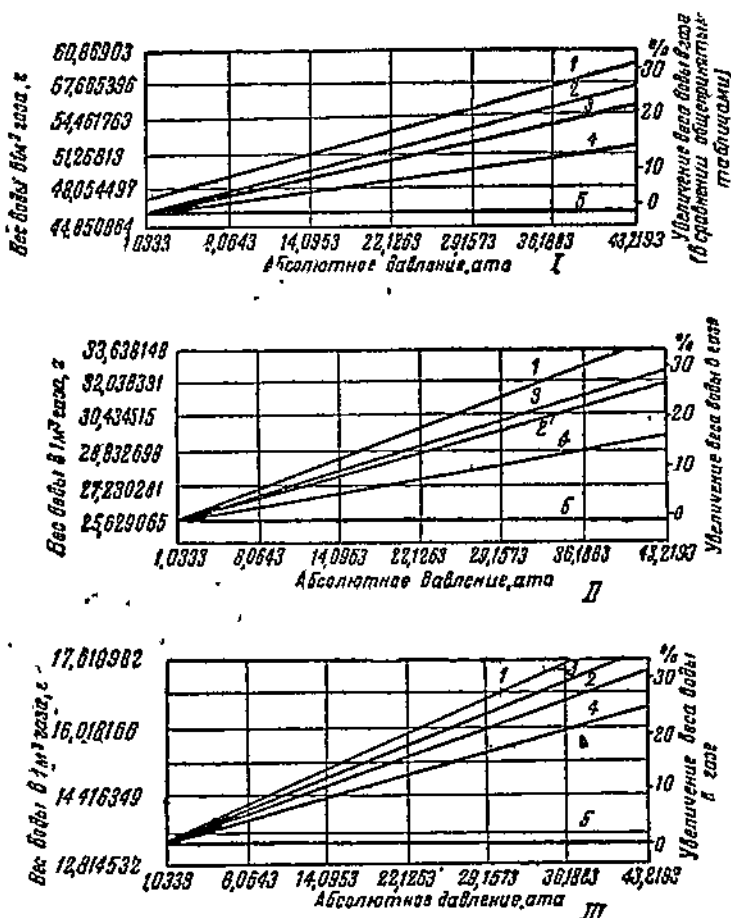
Фиг. 16. Диаграмма содержания водяных паров в газе А.

температуре и давлении в пересчёте на „нормальные условия“, — при давлении 16,4 фнт/дм² (1,153034 *ата*) и температуре 60° F (15, 56° C).

Наблюдениями установлено, что при малых давлениях кривые точек росы и кривые содержания воды для данного газа соответствуют цифрам общепринятых таблиц; при повышенных давлениях они отклоняются от этих таблиц.

На фиг. 17 даны диаграммы содержания водяных паров в трех природных газах А, В и С, воздухе и гелии, но построение этих диаграмм иное. В предшествующих диаграммах содержание водяных паров давалось в пересчёте на объём газа при нормальных условиях, здесь же содержание водяных паров даётся для 1 м³ того объёма, который занимает газ при данном давлении и при указанной на диаграмме температуре.

Авторы исследований пришли к выводу, что общепринятые таблицы содержания водяных паров в воздухе и других газах непригодны для повышенных давлений и что углеводородные газы по содержанию водяных паров нельзя приравнять к воздуху. При давлении, например, 43 ата



Фиг. 17. Диаграмма содержания водяных паров в газах А, В и С, воздухе и гелии.

I—при температуре 37,8° С, II—при 26,7° С, III—при 15,56° С.
1—природный газ С, 2—природный газ А, 3—природный газ В,
4—воздух, 5—гелий.

воздух, насыщенный водой, при температуре 37,8° С содержит на 15% больше, а при температуре 15,56° С на 24% больше водяных паров, чем по таблицам. Природные углеводородные газы, насыщенные водой, содержат водяных паров больше, чем воздух при тех же условиях, причём разные газы при точке росы содержат различные их количества. Сухие углеводородные газы содержат меньше воды, жирные — больше. Увели-

чение содержания азота в газе уменьшает способность газа поглощать воду. Углеводородный газ состава А при давлении 43 *атм* и температуре 37,8° С содержит на 25% воды больше, а при температуре 15,56° С на 35% больше, чем по обычным таблицам. Калифорнийский газ С, содержащий меньше азота, но больше углеводородов, даёт ещё большие расхождения с таблицами в сторону увеличения содержания водяных паров. Только гелий не даёт больших расхождений.

Надо ожидать, что обнаруженная аномалия имеет место и для искусственных горючих газов.

Гидратные соединения природных газов. Далеко не полная изученность условий образования твёрдых гидратных соединений для отдельных углеводородов и их смесей не позволяет утверждать, что принцип аддитивности имеет в данном случае место. Пока мы располагаем немногочисленными экспериментальными наблюдениями, говорящими о том, что и углеводороды (метан, этан, пропан и бутаны) и их смеси (отдельные образцы природного газа) при определённых условиях дают молекулярные кристаллогидраты; по имеющимся данным [14] почти для всех обычных в лабораторной практике газов были открыты шестиводные гидраты и исключение пока составляют только O_2 , N_2 , H_2 , и CO , а также инертные He и Ne .

Вилькоксом, Керзоном и Катцем [15] изучались условия образования гидратов для трех образцов природного газа В, С и Д (табл. 59)

Таблица 59

Составные части	Молярные концентрации		
	газ В	газ С	газ Д
Азот	0,0064	0,0043	—
Углекислота	—	0,0051	—
Метан	0,8641	0,9320	0,8836 *
Этан	0,0647	0,0425	0,0682
Пропан	0,0357	0,0161	0,0254
Изобутан	0,0099	—	0,0038
н-бутан	0,0114	—	0,0089
Пентаны и выше	0,0078	—	0,0101

* Включая азот.

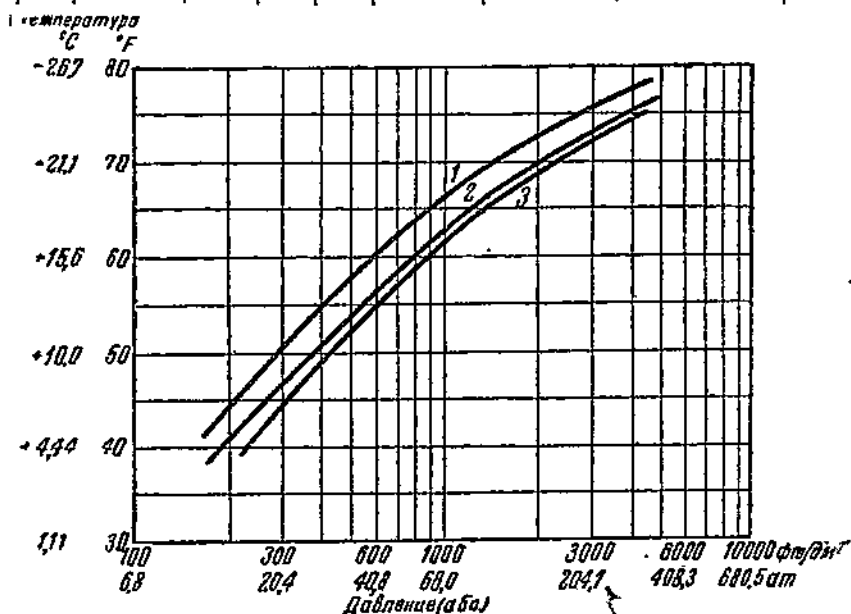
Газы В и Д типичные жирные газы; газ С — сухой газ, содержащий мало пропана и не содержащий более тяжёлых углеводородов.

Условия образования гидратов для этих трёх образцов природного газа приведены в табл. 60.

По этим данным построены кривые (фиг. 18), которые указывают на зависимость между условиями образования гидратов и составом газа. Газ В более склонен к образованию гидратов; при одной и той же температуре он при значительно более низком давлении даёт твёрдые кристаллы и, наоборот, при одном и том же давлении кристаллообразование

Таблица 60*

Газ В				Газ С				Газ Д			
Температура		Давление абс.		Температура		Давление абс.		Температура		Давление абс.	
° F	° C	фнт./дм ²	ат	° F	° C	фнт./дм ²	ат	° F	° C	фнт./дм ²	ат
				Первая серия				Первая серия			
42,2	5,6	182	12,4	40,2	4,5	232	15,8	38,5	3,6	175	11,9
49,5	9,7	279	19,0	51,3	10,7	492	33,4	47,2	8,4	317	21,6
60,0	15,6	598	40,7	60,8	16,0	1010	68,7	53,2	11,8	510	34,8
66,2	19,0	1010	68,7	66,0	18,9	1523	103,6	60,0	15,6	790	53,7
69,6	20,9	1404	95,4	68,3	20,1	2049	139,5	64,5	18,1	1190	80,8
71,5	22,0	1779	122,2					68,1	20,0	1740	118,3
73,3	22,9	2443	166,1								
75,0	23,9	3000	204,0	Вторая серия				Вторая серия			
77,3	25,2	3963	269,5	42,7	5,9	279	19,0	60,8	16,0	895	60,9
				47,6	8,6	384	26,1	66,0	18,9	1350	91,8
				56,4	13,5	699	47,6	69,4	20,8	2040	138,9
				62,8	17,1	1180	80,2	71,3	21,9	2640	179,5
				64,5	18,1	1375	93,5	74,7	23,8	3850	261,8
				68,3	20,1	1999	134,8	73,0	22,8	3270	222,3
				71,3	21,9	2939	199,9				
				70,0	21,1	2489	169,4				
				74,3	23,5	3989	271,3				
				72,3	22,3	3335	226,8				



Фиг. 18. Диаграмма физических условий образования гидратных соединений для природных газов В, С и Д.

1—газ В, 2—газ Д, 3—газ С.

у газа В начинается при более высоких температурах. Сухой газ С требует более высоких давлений и более низких температур для образования кристаллогидратов.

Эти данные указывают, что при давлениях 40—50 ат, столь часто практикуемых при транспорте природных газов по магистральным газопроводам и примененных при процессе сжижения природного газа на заводе в Кливленде, образование гидратных соединений может протекать уже при температурах $+10$ или $+15^{\circ}\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Landolt-Börnstein, «Physikalisch-Chemische Tabellen», 5 Aufl. Bd. I, 1923; Ergänzungsband, 1, 1927; «Handbook butan-propane gases» 1935, 1937; «Справочник по газовому делу», т. I, ОНТИ, 1937; Brückner H. „Gastafeln“ 1937; Агарунов И. А., Бабаян И. С. „Справочник по естественному газу“, 1934; Раковский А. В. „Курс физической химии“, 1939; Страхович К. И. „Прикладная газодинамика“, 1937; Egloff G. „J. Inst. Petrol. Technologists“ Bd. 23, 1937; Jost W. „Explosions u. Verbrennungsvorgänge in Gasen“ 1939.
2. „Petroleum Engineer“, vol. XIII, № 7, 1942.
3. „Авотракторное дело“, № 18, 1937.
4. „GWF“, 73, 897, 1930.
5. „Ж. физ. хим.“, № 1, 1940; № 2, 1941.
6. „Ж. физ. хим.“, № 5—6, 1940.
7. „Oil and Gas Journal“, vol. 40, № 50, 1942.
8. „GWF“, № 8, 9, 21, 22, 1936.
9. Г. И. Самоль, „Газобаллонные автомобили“, 1940.
10. „J. Amer. Chem. Soc.“, 1 vol. 49, стр. 65—78, 1927.
11. „Gas“, vol. 15, IX, стр. 21—24, 1939.
12. „Phil. Mag.“ IV, vol. 12, 32 1881.
„International Critical Tables“, vol. 3, 210—212, 1930.
Keenan J. H. a. Keyes F. G. „Thermodynamic Properties of Steam“, 1936.
„Western Gas“, vol. 9, XII, 9—11 и 29, 1933.
„Bureau of Mines Report of Investigations“ 3399, V, 1938.
„J. Am. Chem. Soc.“, vol. 63, II, 475—477, 1941.
„Amer. Gas Journal“, vol. 155, № 4, X, 61—64 и 70, 1941.
13. Реферативный сборник Наркомнефти СССР, серия „Нефтепромышленное дело“, выпуск 5 (XIV) стр. 17—23, 1943.
14. „Журнал общей химии“, т. IX, вып. 13, стр. 1167—1175, 1939.
15. „Compt. rend.“, 106, 1602, 1888.
„Compt. rend.“ 107, 395, 1888.
„J. phys.“ 5, 453, 1896.
„Compt. rend.“ 135, 959, 1902.
„Sammlung Chemisch-Technischer Vorträge“, XXIX 1—98, 1927.
„International Critical Tables“, vol. VII, 224, 1930.
„Ind. Eng. Chem.“, 25, 1373, 1933.
„Ind. Eng. Chem.“ 26, 851, 1934.
„Am. Gas Assoc. Monthly“, 18, 278, 1936.
„Am. Gas Assoc. Monthly“, 19 219, 1937.
„Am. Gas Assoc., Natural Gas Dept., Proc.“, 112—149, 193
„Gas“, VI, 31, 1938.
„Gas“, V, 30, 1939.
„Amer. Gas. Assoc., Natural Gas Section, 1939.
„Amer. Gas Assoc. reprint“, 1940.
„Oil a. Gas Journal“, 32, № 2 61, 1940.
„Oil a. Gas Journal“, 39, № 30, 37, 1940.
„Ind. Eng. Chem.“ 33, № 5, 662—665, 1941.
„Petrol. Eng“, 13, IV, 57, 1942.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКИХ И СЖАТЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Под термином „жидкие газы“ подразумеваются углеводородные газы, которые при сравнительно низких давлениях при комнатной температуре остаются в жидком состоянии; главнейшими компонентами этих жидких газов являются пропан и бутаны.

Под термином „сжатые газы“ подразумеваются промышленные горючие газы, которые при давлении порядка 350 ат и комнатной температуре остаются в газообразном состоянии.

Рамки данной книги не позволяют поместить описание всех технологических методов производства и жидких и сжатых газов. Технологические методы производства жидкого пропана, бутанов и их смесей тесно связаны с процессами улавливания и производства газовых бензинов и составляют, таким образом, определённый раздел технологии нефти. В настоящей главе поэтому приведены только некоторые схемы производства жидких газов и значительно большее место уделено производству сжатых газов. На грани между этими двумя производствами приводится описание новой схемы производства жидкого природного газа, осуществлённой впервые в 1941 г. в крупном промышленном масштабе в США.

Производство жидких газов при улавливании газового бензина

При улавливании газового бензина из жирных природных газов улавливание пропана и бутанов является сопутствующим производственным процессом, сводящимся фактически к ступенчатой стабилизации в ректификационных колоннах.

На фиг. 19 дана схема такого комплексного улавливания продуктов из природного газа и получения газового бензина, пропана и бутанов [1].

Газ из скважины поступает по газопроводу 1 в компрессор 2, откуда, пройдя холодильник и дрипп 3, поступает по трубопроводу 4 в абсорбер, орошаемый маслом. Пройдя абсорбер, газ, освобожденный от абсорбированных углеводородов, направляется по газопроводу 5 на промышленные и бытовые нужды.

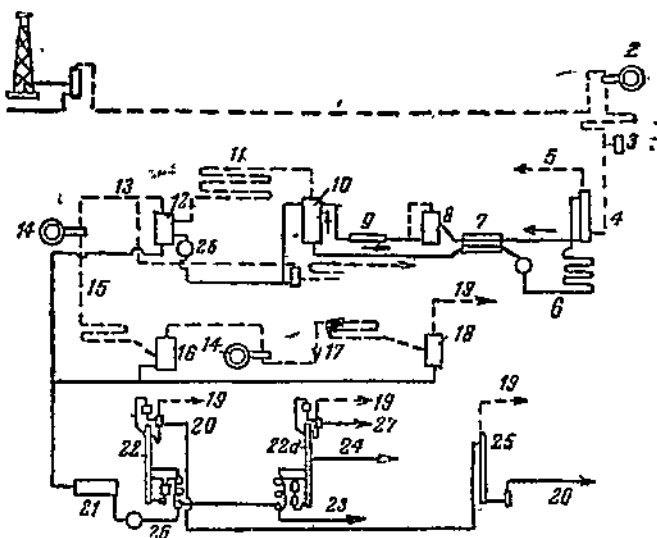
Насыщенное масло из абсорбера поступает в теплообменник 7, вент-танк 8, подогреватель 9 и эвапоратор 10, где происходит отгонка из масла лёгких фракций. Из эвапоратора сухое отогнанное масло направляется через теплообменник 7 насосом в холодильник 6, откуда поступает снова в цикл, на орошение в абсорбер 4.

Лёгкие фракции из эвапоратора 10 поступают в холодильник 11 и далее через аккумулятор 12 в смесительный сборник 21. Для обеспечения нормального режима отгонки лёгких фракций в эвапораторе часть конденсата из аккумулятора 12 насосом 26 подаётся на орошение в эвапоратор в качестве рефлюкса. Из аккумуляторов 12, 16 и 18:

продукты рекомпрессии паров подаются с помощью компрессоров 14 в общий смешительный сборник 21.

Из смешительного сборника 21 конденсат-сырец насосом 26 подается в первую пропановую ректификационную колонну 22, откуда пропан из рефлюксного конденсатора отводится по трубопроводу 20 в очистительную колонну 25.

Освобожденный от пропана продукт из первой колонны 22 поступает во вторую ректификационную колонну 22а. Из нижней части второй колонны стабильный бензин по продуктопроводу 23 направляется в хранилище бензина; из средней части колонны отводится н-бутан,



Фиг. 19. Схема улавливания пропан-бутановых газов из природного газа.

который по трубопроводу 24 направляется в сборник; из рефлюксного конденсатора колонны по трубопроводу 27 отводится изобутан. Сухие газы из рефлюксных аккумуляторов обеих ректификационных колонн и очистной колонны 25 по газопроводам 19 отводятся в общую газовую сеть для промышленно-бытовых нужд.

В основу этой схемы улавливания положен метод абсорбции углеводородов поглотительным маслом (уд. веса 0,825—0,850). Из первой ректификационной колонны получается сырой пропан, из второй колонны—газовый бензин и бутаны. В очистной колонне происходит ректификация пропана; получаемый при этом продукт состоит из 98% пропана и 2% этана.

Режим работы первой ректификационной колонны: температура поступающей в колонну жидкости 90°C , давление в колонне 14 ат, температура внизу колонны 110°C ; сверху колонны 40°C ; число тарелок 24.

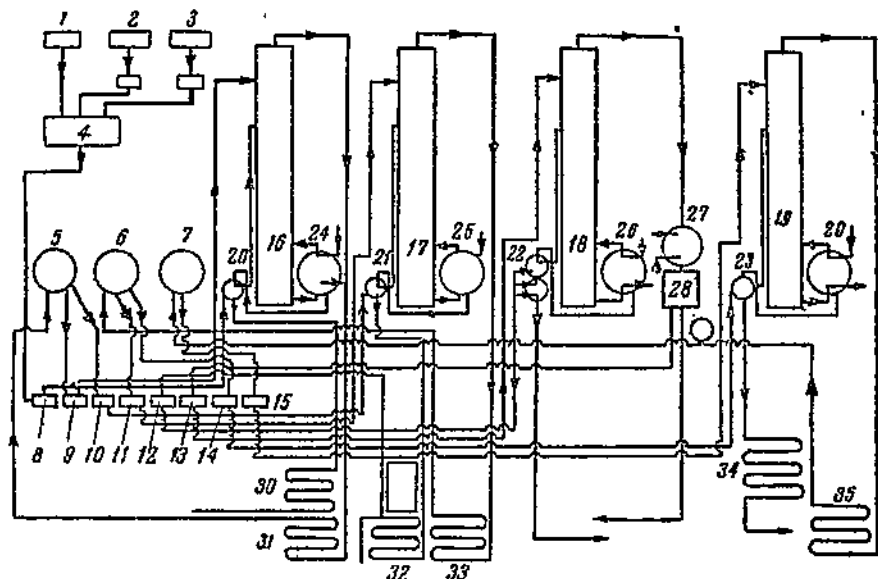
Режим работы очистной колонны для пропана: давление 34 ат, температура внизу колонны 80° С, сверху 25° С.

Режим работы второй ректификационной колонны: давление 7 ат, температура внизу колонны 90° С, сверху колонны 40—50° С.

Абсорбционный масляный метод улавливания, составляющий основу описанной схемы, и метод двойной ректификации, получившие наибольшее распространение в американской практике, применяются с различными видоизменениями, подробное описание которых можно найти в специальной литературе.

Производство жидких газов при стабилизации бензинов

На фиг. 20 дана схема получения пропана и бутанов при стабилизации бензинов, полученных различными способами: при компрессии низкого и высокого давления, абсорбционным методом, при перегонках и т. п.



Фиг. 20. Схема установки по производству пропана и бутана при стабилизации бензинов.

Из бензинохранилищ 1, 2, 3 продукт поступает в общее смешительное хранилище 4; из него бензин насосом 8 через теплообменник 20 подается в ректификационную колонну 16. Из рубойлера 24 этой ректификационной колонны продукт через теплообменник 20 поступает в конденсатор 30, из которого стабильный бензин направляется в хранилище.

Пары из ректификационной колонны 16 проходят в рефлюкс-конденсатор 31, а оттуда в сборник 5. Из сборника 5 насосом 9 определенное количество продукта подается на орошение колонны 16; из

этого же сборника часть продукта насосом 10 подаётся через теплообменник 21 в бутановую колонну 17. Из рибойлера 25 бутановой колонны продукт через теплообменник поступает в рефлюкс-конденсатор 32, откуда насосом 12 подаётся через теплообменник 22 в бутановую колонну 18. Из колонны 17 пары проходят через конденсатор 33 в сборник 6. Из сборника 6 насосом 11 продукт подаётся как рефлюкс на колонну 17. Из этого же сборника 6 часть продукта насосом 14 подаётся через теплообменник 23 в пропановую колонну 19. Из рибойлера 26 бутановой колонны 18 через теплообменник 22 и конденсатор отводится чистый бутан.

Пары с верхней части бутановой колонны 18 поступают в конденсатор 27 и в сборник 28, откуда отводится изобутан. Часть продукта насосом 13 подаётся в качестве рефлюкса в бутановую колонну 18.

Из рибойлера 29 пропановой колонны 19 через теплообменник 23 и конденсатор 34 отводится пропановая фракция. Пары с верхней части колонны 19 отводятся через конденсатор 35 в сборник 7; из сборника 7 насосом 15 продукт подаётся в качестве рефлюкса на пропановую колонну 19.

В ряде случаев схемы американских промышленных предприятий по стабилизации бензинов с одновременным получением жидких газов в той или иной степени отличаются от описанной выше принципиальной схемы.

Технологические схемы производства жидких газов при стабилизации бензина и при улавливании газового бензина показывают, что организация производства жидких газов требует сравнительно небольшого дооборудования основного завода. Получение пропана и бутанов в чистом виде требует, конечно, соответствующего улучшения процесса ректификации.

Производство жидкого природного газа

При современных масштабах промышленности природных газов в США вопросы его хранения приобрели большое значение. Даже при высоком техническом уровне газовой промышленности США, широко развитой сети магистральных газопроводов и внедрении жидких углеводородных газов, резервирование больших количеств газа в хранилищах неизбежно, как средство покрытия потребности в газе в периоды пиковых нагрузок.

До сего времени практиковались три основных метода резервирования больших количеств газа.

Первый метод—использование для этой цели ёмкости дальних газопроводов. При большой протяжённости газопроводов и высоком эксплуатационном давлении вместимость их выражается большими величинами; снижением давления можно в часы пик получить из магистралей дополнительные количества газа.

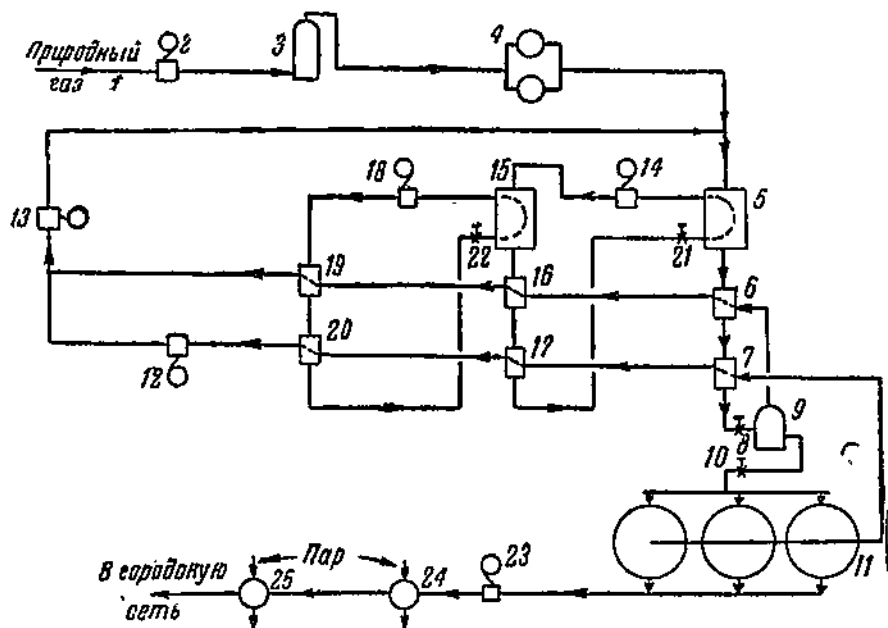
Второй метод состоит в сооружении газгольдеров высокого или низкого давления.

Третий метод—нагнетание избыточных количеств газа в подземные истощённые нефтяные пласты с последующим, по мере надобности,

забором из них газа. По этому оригинальному методу, практикуемому в США, нефтяные пласты используются как огромные подземные резервуары-газгольдеры.

Все три метода имеют свои положительные и отрицательные стороны. Сравнительная ограниченность применения каждого из них неоднократно побуждала искать в этом направлении новые возможности.

Современное крупное развитие промышленности жидких пропан-бутановых газов с одной стороны, и успехи внедрения в промышленную практику техники низких температур—глубокого холода,—с другой стороны, создали предпосылки для сооружения промышленной установки по сжижению природного газа.



Фиг. 21. Схема завода по сжижению природного газа в г. Кливленде (Огайо).

При сжижении природного газа его объем сокращается, примерно, в 600 раз; для получения такого же эффекта без применения глубокого холода этот газ надо было бы сжать до 612 ат (при комнатной температуре). Такое сокращение емкости газохранилищ и возможность хранения газа в жидком состоянии под атмосферным давлением в сосудах с тепловой изоляцией—являются достаточно заманчивыми.

Первая промышленная установка такого типа введена в эксплуатацию в 1941 г. в г. Кливленде (штат Огайо). Схема установки [2] дана на фиг. 21.

Природный газ из магистрали под давлением 30 фтг/дм² (2,04 ат) по газопроводу 1 поступает в компрессор 2; мощность двигателя компрессора 600 л. с.; производительность компрессора 4 000 000 фут³. (113 250 м³) газа в сутки. Из компрессора сжатый газ под давлением

600 фнт/дм² (40,8 ат) направляется по газопроводу высокого давления в скруббер-декарбонизатор 3, где промывается от углекислоты; после декарбонизатора газ под тем же давлением проходит два параллельно включенных осушителя 4, наполненных окисью алюминия, где осушается от паров воды.

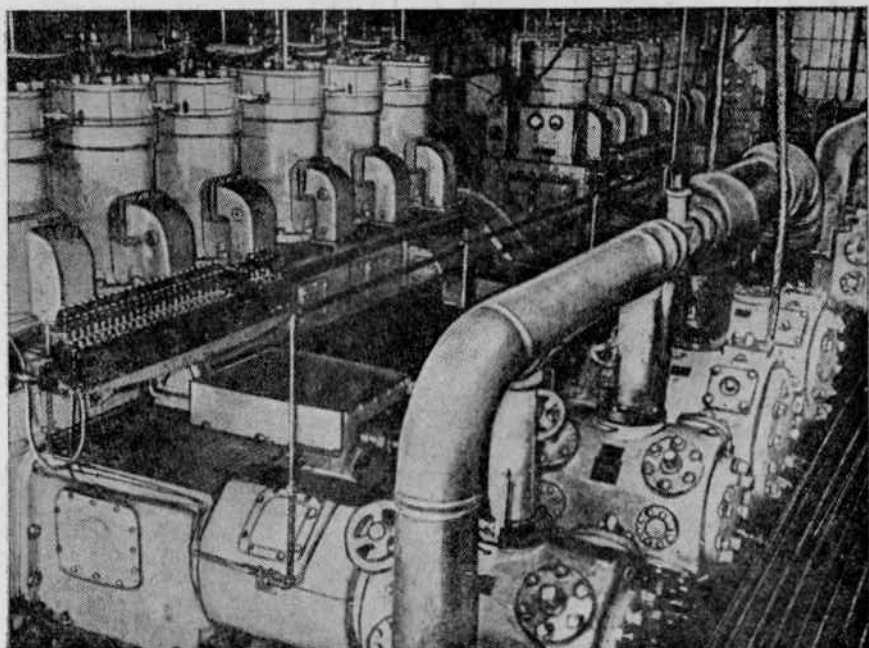
Пройдя очистную аппаратуру, сухой и очищенный от углекислоты газ под тем же давлением 40,8 ат поступает в этиленовый испаритель 5, охлаждаемый циркулирующим потоком кипящего этилена. До поступления в испаритель температура газа +50° F (+10° C); по выходе из испарителя температура газа -126° F (-88° C); при этом часть газа переходит в жидкое состояние. После этиленового теплообменника газ проходит последовательно два газовых теплообменника 6 и 7, в которых охлаждается до -139° F (-95° C) и через редукционный клапан 8 поступает в сборник 9; клапан 8 редуцирует давление газа с 40,8 до 3,74 ат (55 фнт/дм²); при редуцировании температура газа снижается до -218° F (-139° C), вследствие чего, примерно, половинное количество газа превращается в жидкость. Жидкий газ из сборника 9 проходит второй редукционный клапан 10 и под конечным давлением 8 фнт/дм² (0,54 ат) поступает в газгольдеры жидкого газа 11; при втором редуцировании давления температура снова снижается и жидкий газ поступает в хранилища с температурой -258° F (-161° C); при этом редуцировании давления 85% продукта получается в жидком виде, а 15% — в газообразном.

Газы после редуктора 10 из хранилищ жидкого газа 11 по газопроводу проходят последовательно теплообменник 7, теплообменник этиленового цикла 17, теплообменник аммиачного цикла 20 и поступают под давлением 2 фнт/дм² (0,136 ат) в компрессор 12 мощностью 150 л. с., где сжимаются до 55 фнт/дм² (3,74 ат). После теплообменника 7 температура газов повышается до -145° F (-98,3° C), после теплообменника 17 до -50° F (-45,6° C) и после теплообменника 20 до +30° F (-1,11° C). Через компрессор 12 проходит 1 200 000 фут³ (33 975 м³) газа в сутки.

Газы из сборника 9 с температурой -218° F (-139° C) проходят последовательно теплообменник 6, где их температура повышается до -140° F (-95,6° C), теплообменник этиленового цикла 16, где их температура повышается до -25° F (-31,7° C), и теплообменник аммиачного цикла 19, в котором их температура повышается до +60° F (+15,6° C). После теплообменника 19 поток газов в количестве 4 200 000 фут³ (118 912 м³) в сутки соединяется с потоком газов после компрессора 12 и в суммарном количестве 5 400 000 фут³ (152 890 м³) в сутки поступают в повысительный компрессор 13 (800 л. с.) где сжимаются до 600 фнт/дм² (40,8 ат). Дальше этот поток, состоящий практически из чистого метана, присоединяется перед теплообменником 5 к свежему газу и возвращается, таким образом, снова в цикл.

Замкнутый этиленовый цикл состоит из двух параллельно работающих 6-цилиндровых компрессоров 14 общей мощностью 1 200 л. с. (по 600 л. с. каждый), компримирующих этилен до 350 фнт/дм² (23,8 ат), и трёх последовательных теплообменников 15, 16 и 17. В первом из них этилен охлаждается парами кипящего аммиака; в теплообменниках 16 и 17 — парами рециркуляции. Перед входом в теплообменник 5 сжа-

того газа этилен проходит редуктор 21, в котором его давление редуцируется с 350 фнт/дм² (23,8 ат) до 5 фнт/дм² (0,34 ат); температура этилена снижается при этом до -145°F ($-98,3^{\circ}\text{C}$). Пройдя этиленовый испаритель 5, этилен с давлением 2 фнт/дм² (0,136 ат) засасывается компрессором 14 снова в цикл. Количество циркулирующего в системе этилена составляет 7 000 000 фут³ (198 190 м³) в сутки.



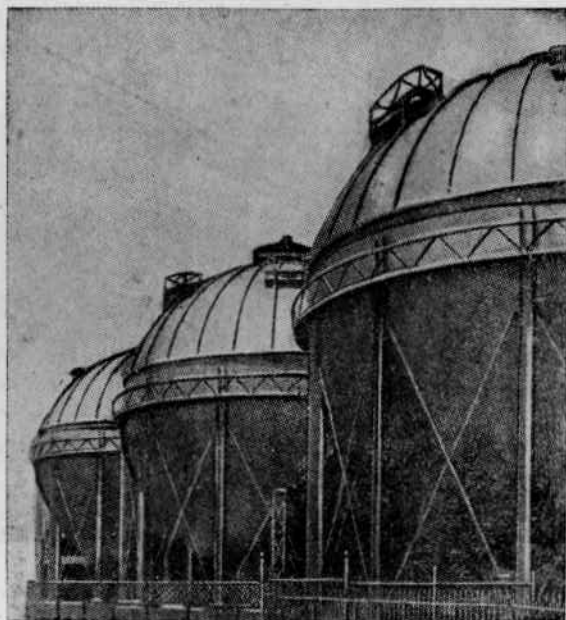
Фиг. 22. Компрессорный зал завода по сжижению природного газа в г. Кливленде. Компрессор 4-цилиндровый 500 л. с. для аммиачного цикла и два 6-цилиндровых по 600 л. с. для этиленового цикла.

Замкнутый аммиачный цикл построен по такой же схеме. Компрессор 18 (500 л. с. 4-цилиндровый) сжимает пары аммиака до 113 фнт/дм² (7,68 ат). Аммиак проходит затем последовательно два теплообменника 19 и 20, и после редуктора 22 поступает в аммиачный испаритель этиленового цикла 15.

В редукторе 22 давление редуцируется до 3 фнт/дм² (0,20 ат), температура аммиака снижается при этом до -20°F ($-28,9^{\circ}\text{C}$), охлаждая сжатый этилен. В системе циркулирует 3 750 000 фут³ (106 170 м³) аммиака в сутки. После аммиачного испарителя 15 пары аммиака под остаточным давлением 2 фнт/дм² (0,136 ат) засасываются компрессором 18.

Для приёма и хранения жидкого газа — готовой продукции завода — установлено три хранилища 11 емкостью по 600 000 галл. ($\sim 2270\text{ м}^3$); суммарная ёмкость составляет, таким образом, 1 800 000 галл. или 6810 м³, что эквивалентно 150 000 000 фут³ (4 246 890 м³) исходного природного газа.

Последнее звено этой схемы — испарительная установка. Жидкий газ из хранилищ по трубопроводу под давлением 2 фнт/дм² (0,136 ат) подаётся в три насоса 23, которые нагнетают жидкий газ под давлением 40 фнт/дм² (2,722 ат) в двухступенчатую систему испарителей 24 и 25 и дальше под тем же давлением через газовый счётчик в городскую газораспределительную сеть. В первом испарителе — трубчатке 24 (с трубками диаметром $\frac{3}{4}$ ") температура повышается до -200°F (-129°C); во втором — до $+30^{\circ}\text{F}$ ($-1,11^{\circ}\text{C}$). Оба испарителя обогреваются водяным паром. Мощность испарительной установки рассчитана на получение 3 000 000 фут³ (84 940 м³) газа в час.



Фиг. 23. Батарея хранилищ жидкого природного газа.

Отпускаемый в городскую сеть газ имеет, примерно, такой же состав, что и исходный природный. В нем только отсутствуют углекислота и водяные пары, удаляемые при очистке, а также азот, кислород и другие газы, не сжижаемые в условиях этого процесса.

Общая установленная мощность двигателей компрессоров составляет 3 250 л. с. (не считая мощности насосов испарительной установки и общезаводского хозяйства), что составляет 28,7 л. с. на 1 000 м³ сжижаемого газа в сутки.

Положенный в основу технологической схемы этого первого в мировой практике завода „каскадный“ метод получения низких температур и выбор в качестве хладоагентов этилена и аммиака в принципе ничего нового не представляют, но все-же сооружению такого завода пред-

шествовала большая расчётная и экспериментальная работа. Все принципиальные элементы схемы завода были предварительно проверены в эксплуатационных условиях на полужаводской установке с производительностью в 10 раз меньшей, и только после этого было приступлено к сооружению завода.

Оригинальным элементом завода являются хранилища жидкого газа (фиг. 23). Каждое из них состоит из двух концентрически расположенных сфер; диаметр внутренней сферы 57 фут. (17, 37 м), диаметр наружной сферы 63 фута (19,2 м). Пространство между сферами заполнено пробковой изоляцией толщиной 3 фута (0,914 м).

Для изготовления внутренней сферы, работающей в условиях весьма низких температур, применена листовая сталь следующего состава: С—0,08—0,12%, Мп—0,30—0,60%, S—не более 0,045%, Si—0,10—0,20%, Ni—3,25—3,75%, Р—не более 0,04%. При раскислении к стали добавлялось не менее 0,08% Al. После прокатки листы подвергались термической обработке при 1550° F (843° C). Для наружной сферы применена сталь нормального состава.

Внутренняя сфера была выполнена цельносварной. При сварке применялись электроды с 25% хрома и 20% никеля. Лучшие результаты дал предварительный подогрев до 100° C.

Наружная сфера укреплена на вертикальных колоннах. Внутренняя сфера покоится на слое пробковой изоляции, в связи с этим нижний слой изоляции выполнен из прессованной пробки; в верхней части хранилища для изоляции применена измельчённая пробка.

В центре установлена вертикальная перфорированная 18" труба, предназначенная для отвода испаряющегося газа. Предусмотрена установка компенсаторов, предохранительных клапанов, обслуживающих площадок и лестниц и пр.

Пробковая изоляция позволила достичь весьма низкой величины теплопроводности. Тепловой расчёт показал, что при среднегодовой температуре воздуха передача тепла составляет примерно, 65 B.T.U. на 1 фут² (176,1 ккал/м²) в сутки; наружная поверхность одного хранилища равна 13165 фут² (1224 м²); количество проникающего в хранилище тепла равно $13165 \times 65 \cong 855700$ B.T.U. (215636 ккал) в сутки. Для испарения 1 фунта (0,45 кг) жидкого газа при температуре —255° F (—159° C) требуется 220 B.T.U. (55,44 ккал); в сутки может быть испарено этим количеством тепла 3890 фунт. (1750 кг) или 91500 фут³ (2562 м³) газа. При вместимости хранилища 50000000 фут³ (1415630 м³) газа на его испарение потребуется ~600 дней.

После пуска завода в течение трех недель велись тщательные наблюдения за процессом испарения в одном из хранилищ, наполненном жидким газом почти до предела; за этот промежуток времени, несмотря на наличие жарких дней, фактические потери жидкого газа на испарение составили от 105000 до 115000 фут³ в сутки. Таким образом, если все три хранилища будут заполнены, то на испарение может уйти (и возвратиться в цикл завода) около 350000 фут³ газа в сутки (~10000 м³).

Столь небольшие потери жидкого газа на испарение могут быть объяснены как весьма удачной конструкцией хранилищ, так и благоприятным изменением физических свойств жидкого газа при низких темпера-

турах (уменьшение теплопроводности газа, и т. п.). Увеличение размеров хранилищ, надо полагать, еще в большей степени сократит потери жидкого продукта и тем самым увеличит рентабельность производства.

Представляет интерес проведенное сопоставление металлозатрат и капиталовложений на сооружение газохранилищ различных типов в пересчете на одну объемную единицу газа. Для сопоставления взяты:

а) сферический газгольдер высокого давления диаметром 200 фут (61 м); при давлении 34 фут./дм² (2,31 ат) вмещает 9 680 000 фут.³ (~271 000 м³) газа; вес металла 5 250 т;

б) мокрый газгольдер емкостью 2 млн. фут.³ (56 600 м³), вес металла 880 т;

в) сухой газгольдер емкостью 21 млн. фут.³ (594 300 м³), высота его 443 фут. (133 м), диаметр 262 фут. 6" (79 м), вес металла свыше 5000 т.

При сопоставлении этих систем газохранилищ получается следующая картина (см. табл. 61).

Таблица 61

Тип газгольдера	Максимальная вместимость газа, м ³	На 1000 м ³ газа	
		Стоимость, долл.	расход металла, т
Сферический высокого давления .	280 000	3820	19,2
Мокрый	280 000	3150	15,6
Сухой	850 000	1685	8,4
Жидкого газа	5 650 000	46,5	0,152

При сооружении хранилищ жидкого газа расход металла составил 287 т на одно хранилище или 0,182 т на 1000 м³ газа; предполагается, что если вместимость хранилища увеличить до 5650 тыс. м³ (200 млн. фут.³), то расход металла снизится до 0,152 т на 1000 м³.

При сопоставлении расхода металла и капитальных затрат, как и следовало ожидать, преимущества хранения газа в жидком состоянии совершенно очевидны.

Общая стоимость строительства первого завода для сжижения природного газа составила 1 250 000 долл., в том числе: компрессоры и механизмы, включая строительные и монтажные работы, 260 000 долл., три хранилища жидкого газа с коммуникацией к ним — 420 000 долл.

При паритете 5 р. 30 к. за 1 долл. стоимость завода выражается в сумме 6 625 000 руб. или ~60 руб. на 1 м³ сжижаемого газа в сутки.

Указывается, что строительство последующих заводов, к тому же большей производительности, будет обходиться значительно дешевле. Экономические расчёты показывают также, что для города Кливленда, получающего газ по дальнему газопроводу протяжённостью 150 миль (240 км), оказалось значительно выгоднее построить завод для хранения жидкого газа, чем прокладывать новую газовую магистраль.

Первый завод по производству жидкого природного газа пущен в эксплуатацию только в 1941 г. Опыт его эксплуатации даст, несомненно,

материал для суждения об экономической целесообразности дальнейшего развития этого дела, о новых технических и хозяйственных перспективах при внедрении и развитии производства жидкого природного газа. Пока можно констатировать, что использование низких температур и высоких давлений — этих мощных потенциалов техники наших дней — дало и в газовой промышленности первые положительные и многообещающие результаты; достигнуто сжижение не только индивидуальных углеводородных газов, но и промышленного природного газа.

Производство сжатых газов на газонаполнительных станциях

Как выше было указано, путём использования повышенных давлений и низких температур достигнуто сжижение углеводородных газов I группы.

В состав среднекалорийных промышленных газов в большом количестве входят компоненты II группы — водород и окись углерода. Сжижение этих компонентов связано с применением очень низких температур; современная техника не даёт пока технических возможностей их использования в промышленных условиях в жидком состоянии; при современной экономике производственных процессов их сжижение не может быть рентабельным. Путь физического облагораживания среднекалорийных газов и их использования для квалифицированных надобностей, в частности как заменителей моторного топлива на автотранспорте, для резки металлов, для некоторых нагревательных процессов, для коммунально-бытовых потребителей и т. п., приводит к компримированию этих газов до высоких давлений (350 ат). Процесс компримирования осуществляется в стационарных или передвижных компрессорных установках. Получаемый сжатый сухой газ хранится и транспортируется в сосудах высокого давления.

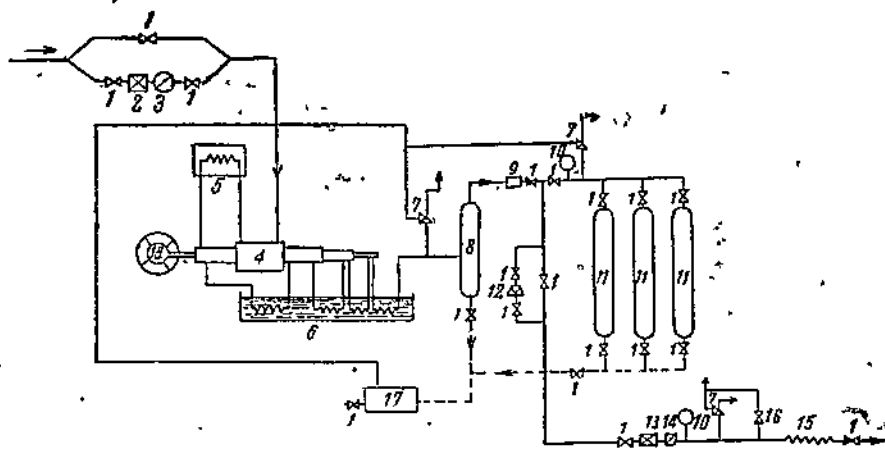
Стационарные газонаполнительные станции

Современные компрессорные газонаполнительные станции имеют совершенно самостоятельный облик, представляя собой либо отдельный цех при газопроизводящем промышленном предприятии, либо самостоятельную станцию, служащую для компримирования до установленного высокого давления газа, поступающего из газгольдера или магистрального газопровода, наполнения этим сжатым газом своих запасных газосборников и отпуска газа потребителям. Поскольку в настоящее время основным потребителем сжатого горючего газа является автотранспорт, газонаполнительные станции сооружают в тех местах, где удобнее всего производить отпуск газа автомашинам, т. е. возле крупных гаражей, на конечных пунктах грузовых и автобусных маршрутов, на узловых пунктах автострад и т. п. С другой стороны, при выборе места сооружения станции учитываются условия снабжения ее газом, а также электроэнергией и водой.

Технологическая схема газонаполнительной станции весьма проста.

На фиг. 24 представлена схема, по которой были сооружены первые газонаполнительные станции за границей. Газ из газгольдера, уличного или магистрального газопровода поступает через фильтр 2 и газовый

счётчик 3 к компрессору 4. С помощью задвижек 1 как фильтр, так и счётчик могут быть отключены, и тогда газ, минуя их, может поступить непосредственно в компрессор. В компрессоре, четырех- или пяти-ступенчатом, приводимом в движение электромотором 18, газ сжимается до высокого давления, которое на современных станциях принимается равным 350 *атм* (первые газонаполнительные станции работали при давлении 200 *атм*). После каждой ступени компрессора газ проходит трубчатый водяной холодильник 5—6, где охлаждается до комнатной температуры. Выйдя из последней ступени компрессора, газ поступает в промежуточный сосуд 8; его назначение—отделить из газа остатки конденсата, которые не успели выделиться в холодильниках и были механически увлечены потоком газа в линию высокого давления. После



Фиг. 24. Схема газонаполнительной станции.

отделителя конденсата газ по трубопроводу высокого давления направляется в батарею газосборников—аккумуляторов высокого давления 17, служащих хранилищем сжатого газа. На трубопроводе к сборникам, кроме обычных запорных вентилей высокого давления 7 и манометров 10, устанавливается еще обратный клапан 9, предотвращающий возможность обратного прохода сжатого газа из газосборников к компрессору.

Батарея газосборников высокого давления состоит из серии отдельных сосудов 11, включенных параллельно. Схема позволяет принимать и отпускать газ или из всех сборников сразу или из любого из них отдельно. Газовые задвижки 7, установленные на входе и выходе из каждого сборника, позволяют осуществлять любые комбинации их включения и выключения. В том случае, если газосборники устанавливаются вертикально (обычно это и встречается в современной практике), их нижние штуцеры с вентилями служат для выпуска конденсата, который по трубопроводу, показанному на фиг. 24 пунктирной линией, направляется к общему сборнику конденсата 17, а оттуда в канализацию.

На трубопроводе сжатого газа к газораздаточным колонкам устанавливаются последовательно:

1. Автоматически действующий регулятор давления 72, установленный на определённый для данной станции диапазон давлений. При снижении давления ниже установленного предела автомат включает двигатель компрессора; при достижении в газосборниках высшего предела рабочего давления этот автомат выключает двигатель компрессора. Автоматически действующий регулятор присоединён к трубопроводу параллельно, поэтому, в случае его порчи, он может быть легко отсоединен путем перекрытия соответствующих вентилей.

2. Взрывной клапан 13, выпускающий газ из сети высокого давления, если давление в ней почему-либо превысит допустимое.

3. Дроссельный клапан 14, автоматически снижающий давление с 350 до 200 *ати*, т. е. до давления, при котором производится отпуск сжатого газа потребителям.

4. Продувочный клапан 16 для продувки линии пониженного давления (200 *ати*) перед отпуском газа потребителям.

5. Гибкий шланг 15 для присоединения колонки к баллонам или цистернам потребителя при отпуске газа.

Кроме перечисленных основных приборов и аппаратов, схемой предусматривается, как это видно на фиг. 24, необходимое количество манометров — для измерения давлений в различных участках схемы, предохранительных клапанов 7 — для продувки газом отдельных звеньев сети и аппаратов и для предохранения от превышения давления, отделителей конденсата — для предотвращения образования гидравлических пробок и т. д.

По такой схеме были построены первые станции для компримирования светильного газа.

Учитывая характер потребления сжатого газа, станция должна быть рассчитана на периодическую работу. В часы максимального потребления газа станция работает на полную производительность; при сокращении отпуска газа компрессора станции уменьшают или прекращают производство сжатого газа. Такой неравномерный график работы станции в настоящее время неизбежен, так как в противном случае пришлось бы устанавливать при станции слишком большое количество газосборников высокого давления, что увеличило бы капитало- и металлозатраты, потребовало бы больших площадей и т. п.

При сооружении последующих газонаполнительных станций постепенно вносился ряд усовершенствований, касающихся, главным образом, управления работой отдельных элементов станции и улучшения техники безопасности.

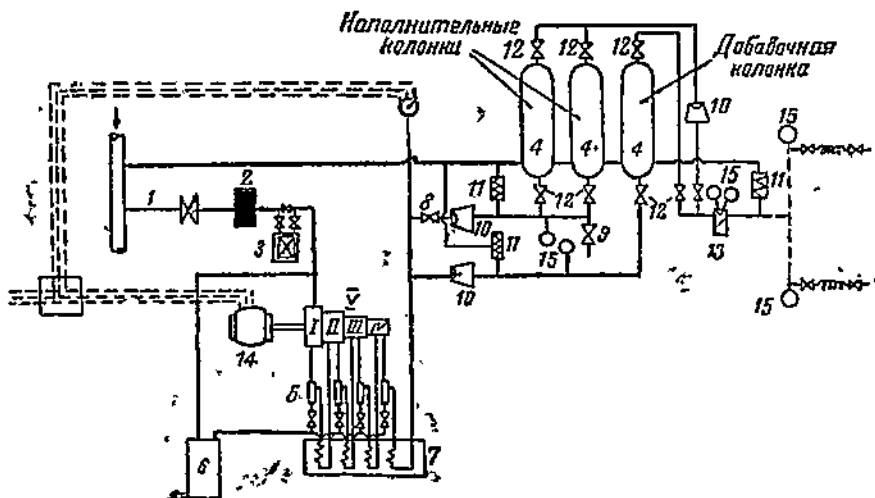
Более усовершенствованная технологическая схема газонаполнительной станции показана на фиг. 25.

Станция питается светильным газом от городского газопровода низкого давления 1; диаметр газопровода — 500 мм. При входе на станцию газ пропускается через фильтр 2 для очистки от возможных механических загрязнений. Фильтр состоит из двух параллельно установленных проволочных сит, между которыми имеется слой конского волоса. Пройдя фильтр, газ поступает в газовые счётчики 3 для учёта его количества. Сначала на этой станции были установлены сухие

газовые часы обычной конструкции, которые затем были заменены более удобным современным газовым счетчиком ротационного типа. Далее газ поступает в компрессор.

Проектная производительность этой станции составляла 70 м^3 газа в час. Для сжатия газа до 300 атм установлен компрессор горизонтального типа, четырехступенчатый, 280 об/мин . Газ после каждой ступени проходит водяной трубчатый холодильник 7 для охлаждения до комнатной температуры.

Пройдя компрессор и систему холодильников, сжатый до 300 атм газ поступает в три газосборника 4 емкостью по 1 м^3 каждый. Общая вместимость трех газосборников при 300 атм равна 900 м^3 , что соответствует, примерно, 13 часам работы компрессора. Газосборники



Фиг. 25. Схема газонаполнительной станции.

изготовлены из хром-никель-молибденовой стали, цельнотянутые, с толщиной стенок 28 мм . До монтажа они были испытаны водой при 450 атм .

При компримировании светильного газа до высоких давлений из него выделяется вода, бензол и легкое масло. К этому конденсату добавляется еще смазочное масло из компрессора. Для отвода конденсата после каждой ступени компрессора установлены водоотделители 5 . Из этих водоотделителей, работающих при высоком давлении, конденсат спускается через редукционные вентили в общий сборник конденсата низкого давления 6 , откуда отводится в канализацию.

Компрессор с газосборниками высокого давления соединен стальным цельнотянутым трубопроводом диаметром $7,5 \text{ мм}$. На трубопроводе по пути установлены: запорный вентиль 8 , вентиль 9 для спуска конденсата, обратный клапан 10 для предотвращения обратного прохода газа из сборников к компрессору и, наконец, предохранительный клапан 11 . Газ поступает в газосборники снизу, выходит сверху. Предохрани-

тельный клапан устроен таким образом, что выходящий через него газ попадает в газопровод низкого давления.

Из газосборников высокого давления газ направляется к местам наполнения баллонов автомашин. На трубопроводе установлен сначала запорный вентиль 12, а затем автоматически действующий редукционный клапан 13, снижающий давление с 300 до 200 *атм.* Трубопровод после редукционного клапана тоже стальной, цельнотянутый, диаметром 10,5 мм. На нём имеется свой предохранительный клапан, соединённый с газопроводом низкого давления. Трубопроводы высокого давления сварены и только в некоторых случаях имеют соединения на болтах.

Для наполнения баллонов подъезжающих автомашин у стены станции снаружи размещены три наполнительных колонки, к которым подведены трубки с давлением 200 *атм.* К колонкам присоединены раздаточные гибкие шланги, на концах которых имеются запорные вентили и непосредственно за ними соединительные муфты, с помощью которых шланг присоединяется к баллонам. В качестве раздаточных шлангов применяются медные толстостенные трубки с внутренним диаметром 4 мм или резиновые трубки со стальной проволоочной обмоткой. Опыт эксплуатации показал, что как медные, так и резиновые трубки имеют свои достоинства и недостатки. Медные трубки оказались удобнее в обслуживании, но при длительной эксплуатации они затвердевают и требуют через определённые промежутки времени отогревания. Резиновые шланги свободны от этого недостатка, но в то же время ими неудобно пользоваться: при пуске газа они стремятся выпрямиться и становятся слишком жёсткими для управления.

Компрессор приводится в движение взрывобезопасным электромотором закрытого типа 14 мощностью 30 л.с. Соединение с компрессором осуществлено с помощью цепной передачи (вместо ремённой передачи, во избежание накопления статического электричества, которое может вызвать воспламенение газа). При моторе установлен контактный манометр, который автоматически выключает мотор, если давление в компрессоре поднимается выше 300 *атм.*

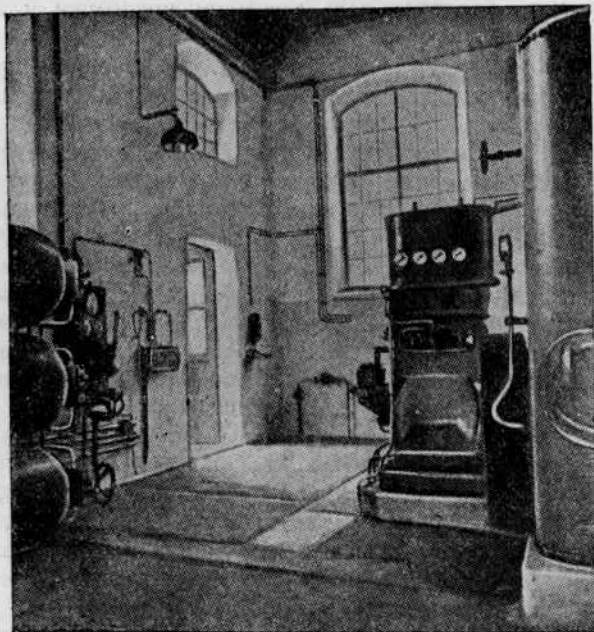
Все выключатели и электрические лампочки, находящиеся в компрессорной, взрывобезопасной конструкции. Главный рубильник электромотора установлен снаружи здания станции.

Все аппараты станции снабжены манометрами 15. На стороне высокого давления установлены манометры со шкалой до 400 *ат.* Опыт пуска и первого периода эксплуатации этой станции показал, что манометры высокого давления были почти единственными приборами, при работе с которыми возникли затруднения. Прежде всего, при поднятии давления стали лопаться спиральные трубки этих манометров, причём прорывавшийся газ разрывал стекло манометра и выходил в помещение станции. Новые манометры более совершенной конструкции были уже свободны от этих недостатков. Спиральные трубки новых манометров были изготовлены со стенкой большей толщины; лицевое стекло манометра было сделано из целлона (пластическая масса, изготавливаемая из ацетилцеллюлозы, винного спирта, бензола и камфоры); нижняя часть корпуса манометра была снабжена предохранительным приспособлением, через которое газ, в случае

попадания в корпус манометра, мог бы выйти наружу, не разрушив лицевого манометра.

Эксплуатационные показатели [3] такой станции: расход электроэнергии $= 1/3 \text{ кВт-ч}$ на 1 м^3 сжимаемого до 300 атм газа; расход воды на охлаждение $= 0,8 \text{ м}^3/\text{час}$ при работе станции на полную мощность, т. е. при производительности 70 м^3 газа в час; расход смазочных масел $40-60 \text{ л}$ в месяц.

Представление о размещении основных агрегатов и аппаратуры на современных зарубежных газонаполнительных станциях дает фиг. 26.



Фиг. 26. Компрессорный зал газонаполнительной станции.

На фиг. 26 показано размещение аппаратуры на станции с компрессором вертикального типа. Для хранения сжатого газа установлено 3 баллона горизонтального типа (на рисунке слева), расположенные над полом в одной вертикальной плоскости.

На другой станции с горизонтальным компрессором, приводимым в движение от газомотора, установлены вертикальные газосборники (две группы), опущенные в полуподвальное помещение, так что над полом выступают только верхние их части. Благодаря такому расположению газосборники занимают небольшую площадь и, вместе с тем, со всех сторон доступны для осмотра и наблюдения, так как головки газосборников находятся на высоте человеческого роста.

Число сооружённых газонаполнительных станций в западноевропейских странах велико. Многолетний опыт их эксплуатации позволил

не, только усовершенствовать все звенья технологической схемы, но и разработать основные положения по строительству новых станций.

Заграничные нормы по сооружению газонаполнительных станций для светильного и коксового газов

Выбор места для сооружения станций

Поскольку место для сооружения станции на площадке завода или на улице города часто бывает очень ограниченным, надо при компоновке станции максимально использовать всю свободную площадь. Так как потребление компримированного газа растет постепенно, необходимо при компоновке станции предусмотреть возможность её расширения, причём прежде всего в части увеличения числа газосборников.

Компрессорная установка

Производительность. Конечное давление сжатого газа— 350 кг/см^2 . Производительность компрессоров определяется с учётом общей суточной потребности в сжатом газе обслуживаемых автомашин. Для компрессоров устанавливаются следующие номинальные часовые производительности: 60, 120, 180, 240, 360, 600 м^3 засасываемого газа в час.

Двигатели для компрессоров. Компрессоры приводятся в движение газо- или электромоторами. Двигатели могут устанавливаться или в помещении компрессоров или в особом невзрывоопасном помещении. Установка двигателей в помещении компрессоров имеет преимущества с точки зрения обслуживания машин, но при этом должны быть строго соблюдены все установленные правила работы во взрывоопасных помещениях.

Газосборники

Рабочее давление в газосборниках— 350 кг/см^2 ; емкость каждого газосборника = 1 м^3 (по воде).

Основные размеры газосборников (фиг. 27) приведены в табл. 62.

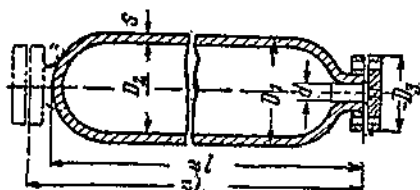
Таблица 62

D_1 , мм	D_2 , мм	d минимально, мм	L , мм	l , мм
470	365	100	8250	8100
521	415	100	6850	6700
572	415	100	5800	5650
622	415	100	5050	4900
660	415	100	4150	4800

Остальные размеры газосборников не ограничиваются и выбираются произвольно.

Толщина стенки газосборника — S и внутренний его диаметр D_2 устанавливаются в соответствии с качеством металла, из которого он изготовлен.

Качество металла (легированная или нелегированная литая сталь) выбирается по усмотрению, но при этом сталь должна обладать: временным сопротивлением на разрыв минимум 60 кг/мм^2 и относительным удлинением не менее 14% .



Фиг. 27. Разрез газосборника высокого давления.

Допустимые отклонения:

емкости газосборника $\pm 5\%$
 толщины стенки $\pm 15\%$
 веса пустого газосборника . . $\pm 10\%$

Газосборники изготавливаются с одним фланцевым соединением (на одном конце газосборника — фланец, на другом — выпуклое дно), или с двумя фланцевыми соединениями (на обоих концах газосборника).

Газосборник должен быть испытан при давлении, превосходящем рабочее давление в 1,3 раза, т. е. при давлении $= 455 \text{ кг/см}^2$.

Из соображений экономии площади газосборники лучше устанавливать вертикально. Такая установка удобнее также для спуска конденсата и отвода газа при переполнении газосборника. Если газосборники устанавливаются горизонтально, они должны быть доступны для осмотра, особенно у фланцев. Для удобства учёта газа газосборники должны работать, по возможности, при равной температуре.

Таблица 63

Число газосборников	2	3	4	5	6	7
Полезная емкость, м^3	300	450	600	750	900	1050
Число автомашин	8	12	16	20	24	28
Производительность компрессора, $\text{м}^3/\text{час}$	Примерное время для наполнения газосборников, в часах					
60	5	$7\frac{1}{2}$	10	—	—	—
120	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{3}{4}$	5	$6\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{2}$	—
180	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{4}$	$4\frac{1}{4}$	5	$5\frac{3}{4}$
240	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{2}$	3	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{4}$
360	—	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{4}$	2	$2\frac{1}{2}$	3
600	—	—	1	$1\frac{1}{4}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{3}{4}$

Число газосборников рассчитывается, исходя из учета пиковой часовой потребности в сжатом газе и производительности компрессорной установки. Табл. 63 составлена для облегчения такого расчёта, принимая, что автомашины, имеющие по 4 пятидесятилитровых баллона, наполняются непосредственно одна за другой.

Из табл. 63 видно:

а) сколько автомашин, затрачивая одно и то же время на наполнение своих баллонов, могут получить газ от станции (снижая давление в газосборниках с 350 до 200 кг/см²) и

б) сколько времени требуется компрессорной установке для наполнения газосборников до давления 350 кг/см².

При ступенчатом опорожнении газосборников до давлений 85—100 кг/см² число автомашин, которые могут быть наполнены сжатым газом, соответственно больше, но и время пополнения газосборников больше, что видно из табл. 64.

Таблица 64

Число газосборников	2	3	4	5	6	7	
Из них в качестве предварительных приемников	1	2	2	3	3	4	
Полезная емкость, м ³	424	632	848	834	1050	1270	1480
Число автомашин	10	15	21	21	26	32	37

Номинальная производительность компрессора, м ³ /час . .	Примерное время для наполнения газосборников в часах						
60	6 ³ / ₄	10	—	—	—	—	—
120	3 ¹ / ₄	5	7	7	8 ³ / ₄	10 ¹ / ₂	—
180	2 ¹ / ₄	3 ¹ / ₄	4 ³ / ₄	4 ³ / ₄	5 ³ / ₄	7	8 ¹ / ₄
240	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₂	3 ¹ / ₂	3 ¹ / ₂	4 ¹ / ₄	5 ¹ / ₂	6 ¹ / ₄
360	—	1 ³ / ₄	2 ¹ / ₄	2 ¹ / ₄	3	3 ¹ / ₂	4
600	—	1	1 ¹ / ₂	1 ¹ / ₂	1 ³ / ₄	2	2 ¹ / ₂

Примечание. При подсчете времени заполнения не учитываются отклонения от закона состояния ($P \cdot V = \text{const}$), так как эти отклонения выравниваются при работе компрессора за время наполнения.

Предохранительные и вспомогательные элементы станции

На станции должны быть предусмотрены:

На стороне всасывания 1. Запорное приспособление, расположенное на всасывающем газопроводе вне здания, с помощью которого в случае аварии прекращается подача газа на станцию. Если на станции в качестве двигателя установлен газомотор, то этим же приспособлением одновременно перекрывается подача газа к газомотору и к компрессору.

2. Фильтр для удаления из поступающего на станцию газа механических загрязнений.

3. Газовый счётчик, который должен быть невосприимчив к колебаниям давления во всасывающем газопроводе.

4. Уравнительный сборник газа с предохранительным клапаном (клапан устанавливается на давление, превышающее рабочее давление во всасывающем газопроводе на 1 кг/см^2), поскольку во всасывающем газопроводе можно ожидать колебания давления газового потока.

Уравнительный сборник испытывается на давление 4 кг/см^2 .

На стороне давления. 1. Холодильник для охлаждения газа.

2. Сборник для улавливания и удаления конденсата из газа.

3. Предохранительный клапан для выпуска газа в случае увеличения давления свыше 350 кг/см^2 .

4. Обратный клапан для предотвращения обратного прохода газа из газосборников к компрессору в случае остановки последнего.

При батарее газосборников. 1. При каждом газосборнике надо иметь:

а) запорный вентиль;

б) контрольный штуцер для манометра;

в) предохранительное приспособление для выпуска газа в атмосферу в случае повышения давления свыше 450 кг/см^2 ;

г) вентиль для спуска конденсата.

2. При батарее газосборников:

а) запорный вентиль, позволяющий включать или выключать всю батарею газосборников;

б) манометр с приспособлением для приключения контрольного манометра на линии от газосборников к установке по наполнению баллонов.

При установке по наполнению баллонов автомашин. 1. Хорошо регулируемый запорный вентиль.

2. Автоматически действующий запорный клапан (установленный на высшее предельное давление 220 кг/см^2).

3. Предохранительный клапан (установленный на высшее предельное давление 220 кг/см^2 и снабженный приспособлением для тревожной сигнализации).

4. Манометр с большим циферблатом и со штуцером для присоединения контрольного манометра. Манометр должен показывать как высшие давления (при наполненных баллонах), так и низшие давления (при опорожненных баллонах).

У баллонов на автомашине. 1. Штуцер с левой резьбой для приключения шланга.

2. Запорный вентиль, если он не предусмотрен при установке по наполнению баллонов.

3. Вентиль для продувки воздуха в случае отсутствия запорного вентиля.

При двигателе у компрессора. 1. В случае электромотора:

а) контактный манометр для автоматической остановки электромотора в случае повышения давления газа сверх установленной нормы;

б) контактный манометр для автоматической остановки электромотора в случае падения давления во всасывающем газопроводе ниже $20 \text{ мм вод. столба}$ (прекращение поступления газа).

2. В случае газомотора:

Приспособление для автоматического закрытия быстро действующего вентиля на подводящем газопроводе в случае повышения давления газа после компрессора сверх установленной нормы.

Трубопроводы

Для трубопроводов должны применяться цельнотянутые стальные трубы с резьбой, изготовленные из стали установленного по стандарту качества.

Поскольку трубы не свариваются, соединение их между собой осуществляется с помощью навинченных фланцев или линз.

При болтовых соединениях уплотнение осуществляется по конус-шаровому или по линзовому типу.

Правила для вентилей не могут быть пока указаны, так как обобщающее изучение их не закончено.

В отношении нормальных манометров, устанавливаемых на нагнетательных трубопроводах, следует учитывать, что лицевые стекла в корпусе манометров должны быть изготовлены из эластичного материала, например из целлона. Материал спиральной трубки манометра должен быть водородостойким.

Манометр присоединяется с помощью полудюймового штуцера. Шкала манометра должна соответствовать установленному стандарту.

Контактные манометры должны быть газонепроницаемы, взрывобезопасны и снабжены отводами для продувки.

Выполнение газонаполнительных приспособлений

Для присоединения к баллонам можно применять медные трубы или специальный резиновый шланг. Шланг высокого давления должен быть армирован многослойной проволоочной обмоткой. Медные трубы надо через определенные промежутки времени надлежащим образом прогревать, так как при длительной эксплуатации они затвердевают. Места спая надо защищать от повреждений и не перегибать.

Нормы испытаний

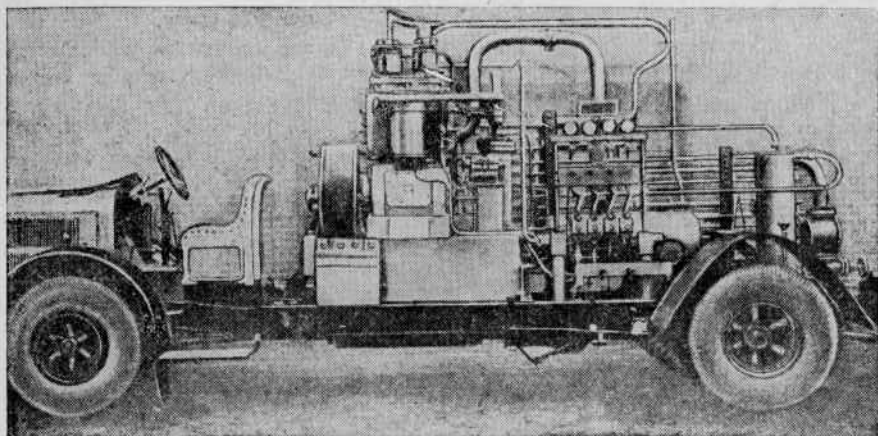
Отдельные элементы трубопроводов на стороне давления должны быть испытаны заводом-изготовителем гидравлическим давлением, превышающим рабочее давление в 1,5 раза (т. е. 525 кг/см^2). Газосборники испытываются при 1,3-кратном давлении (455 кг/см^2).

После окончания монтажа все трубопроводы и наполнительные сосуды должны быть испытаны гидравлически (водой) при 1,3-кратном давлении, и затем воздухом или газом при нормальном рабочем давлении. При испытании сжатым воздухом или газом все соединения (места сварки, соединения трубопроводов на резьбе, фланцевые соединения) целесообразно покрывать мыльной водой или другой соответствующей жидкостью для обнаружения утечки газа.

Передвижные станции

По всем описанным выше схемам газонаполнительные станции являются стационарными производственными единицами. Сжатый газ отпускается в баллоны потребителей на месте или в специальной таре перевозится к раздаточным пунктам, как это имеет место в ряде западноевропейских стран (Франция, Голландия).

В последние годы был проделан опыт сооружения передвижной компрессорной станции, которая могла бы подъезжать к любому месту и после соответствующего присоединения к газопроводной линии давать сжатый газ.



Фиг. 28. Передвижная компрессорная станция для компримирования газа.

Такой метод производства сжатого газа удобен во многих отношениях. Отпадает необходимость сооружения станции; имеется возможность производства сжатого газа в любом месте.

Отрицательной стороной этого варианта производства сжатого газа является недостаточная надёжность работы передвижной станции. Сама перевозка станции влечёт за собой возможность различных её повреждений; работа компрессора высокого давления, всей аппаратуры и коммуникации на неустойчивом основании неизбежно связана с возможным их расстройством. Не было, повидимому, особой необходимости широкого развития передвижных станций и по чисто хозяйственным соображениям, поскольку местом производства сжатых газов до сего времени были города, и размещение постоянно действующих стационарных станций в удобных для этого частях города было приемлемым и для потребителей сжатого газа.

Независимо от отрицательных сторон, этот вариант по своей идее весьма интересен и может быть перспективен при дальнейшем его совершенствовании.

Общий вид передвижной компрессорной станции изображен на фиг. 28.

Компрессор установлен вертикально. Шестицилиндровый мотор грузовика (мощностью 110 л. с.) служит одновременно для приведения в движение компрессора, причём питание мотора может быть переведено на газ. Присоединение компрессора к городской газовой сети осуществляется с помощью гибкого металлического шланга. Поступающий по шлангу газ проходит через фильтр и газовый счётчик в компрессор. Компрессор имеет четыре ступени и сжимает газ до 350 ат. Для охлаждения газа после каждой ступени его пропускают через водяные холодильники. Холодильники после первой и второй ступени компрессора выполнены в виде ребристых труб. После третьей и четвертой ступени компрессора холодильники изготовлены в виде двойных концентрически расположенных труб, работающих по принципу противотока: газ и охлаждающая вода движутся в противоположных направлениях. Все холодильники выполнены так, что каждый из них легко может быть разобранный для очистки или ремонта, а в случае необходимости и для замены другим.

После каждого холодильника газ проходит через маслоотделитель, в котором собирается конденсат. Все маслоотделители соединены с одним общим приемником конденсата.

После последнего маслоуловителя сжатый газ с помощью гибкого металлического шланга направляется в газосборники высокого давления.

Как основные агрегаты установки, так и вся арматура смонтированы компактно и весьма прочно, с учётом особо неблагоприятных условий эксплуатации. Наряду с компактностью предусмотрена возможность удобного наблюдения за работой каждого элемента, его ремонта и замены. Вся установка смонтирована на 6,5-м грузовике.

ЛИТЕРАТУРА

1. «Нефтяное хозяйство», № 7, 1937.
2. «Gas Age», vol. 86, № 9, 1940; vol. 87, №№ 8, 10, 11, 1941; vol. 91, № 8, 1943.
3. «GWF», № 21, 1936.

Г Л А В А V

БАЛЛОНЫ ДЛЯ СЖАТЫХ ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Баллоны для хранения газов под высокими давлениями существуют уже в течение многих десятилетий. К моменту зарождения промышленности жидких и сжатых горючих газов техника была, казалось бы, во всеоружии, чтобы обеспечить новую отрасль газового дела необходимой ей тарой как в качественном, так и в количественном отношении. Но опыт показал иное: баллоны явились одним из факторов, лимитировавших развитие нового производства; изготовление баллонов, удовлетворяющих специфическим требованиям потребителей жидких и особенно сжатых горючих газов, стало серьёзной проблемой, привлекавшей к себе внимание крупных исследовательских и конструкторских сил.

Нормальные промышленные баллоны, изготавливаемые из углеродистой стали и предназначенные для хранения, например, сжатого кислорода,

водорода, гелия и воздуха, имеют характеристики, приведенные в табл. 65 (ОСТ 6141).

Таблица 65.

Тип и марка	Рабочее давление, кг/см ²	Емкость, л	Приведенный объем газа, м ³	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Длина корпуса, мм	Вес, кг
A-50	150	50	7,5	219	8	1700	83
A-40	150	40	6,0	219	8	1390	70

Относительный вес этих баллонов, т. е. отношение веса баллона к объему содержащегося в нём газа (приведенного к нормальным условиям — 15°С и 760 мм рт.ст.), составляет:

$$\text{для баллонов A-50} \dots \frac{83}{7,5} = 11,07 \text{ кг/н. м}^3$$

$$\text{для баллонов A-40} \dots \frac{70}{6,0} = 11,67 \text{ кг/н. м}^3.$$

Величина относительного веса баллонов, т. е. мертвого груза, который надо перевозить при транспорте сжатых газов или при пользовании сжатыми газами для питания автомобилей, и явилась тем лимитирующим фактором, устранение которого было необходимо для внедрения жидких и сжатых горючих газов в широкую промышленную практику.

Утверждение, что проблема изготовления легковесных баллонов в настоящее время удачно и полностью разрешена, было бы необоснованным. В этом направлении остаётся ещё большое поле деятельности и для исследователей и для конструкторов, но то, что в этом направлении уже сделано, является крупным достижением.

При решении этой проблемы творческая мысль пошла по двум параллельным путям:

1) по пути повышения механической прочности стали, что дало возможность уменьшить толщину стенки баллонов, а отсюда и их вес;

2) по пути разработки нового конструктивного принципа изготовления баллонов, что дало возможность не только уменьшить толщину стенки стальных баллонов, но и изготавливать баллоны из легковесных сплавов.

Баллоны из специальных сталей

Достижения современной металлургии в области изготовлений легированных сталей оказали большую услугу при решении проблемы изготовления легковесных стальных баллонов. Ряд зарубежных заводов пошел по пути применения легированных сталей при изготовлении баллонов.

В Англии широкое распространение получили баллоны для сжатых горючих газов, изготовленные из так называемой Vibrac-стали с содержанием:

$$2,6-3,7\% \text{ Ni}, 0,7-1,1\% \text{ Cr}, 0,38-0,47\% \text{ Mo}.$$

Термообработка этих баллонов состоит в нагреве до 850°C, закалке на воздухе и отпуске в течение 90 мин. при 600—650°C.

Характеристика баллонов: длина 1,78 м, диаметр 200 мм, толщина стенки 5,6 мм, рабочее давление — 200—210 ат, ёмкость (по воде) 50 л, вместимость при 200 ат давления 10 м³ газа, вес 50 кг. На 1 м³ газа приходится, таким образом, только 5 кг веса баллона, т. е. вес баллонов уменьшается в два с лишним раза по сравнению с обычными толстостенными баллонами.

В Германии первые пробные легковесные баллоны были выпущены в 1934 г. заводами, изготовляющими маннессмановские трубы. Баллоны были изготовлены из хром-никель-молибденовой стали и по прочности вполне соответствовали установленным требованиям. Применённая для баллонов сталь имела следующую характеристику: временное сопротивление на разрыв — от 90 до 105 кг/мм², предел текучести — не менее 75 кг/мм², относительное удлинение — не менее 14%.

Наряду с легированной сталью, во Франции, Англии и Германии для изготовления баллонов высокого давления применялись и более дешёвые малолегированные стали, например, следующего состава:

C — 0,31%; Mn — 0,49%; Si — 0,50%; Cr — 0,60%;
Ni — 0,41%; P — 0,02%; S — 0,01%.

Характеристика стали: временное сопротивление на разрыв — 90 кг/мм², предел текучести — 65 кг/мм², относительное удлинение — 13,5%.

Изготовленные из этой стали баллоны имеют размеры: диаметр 214 мм, толщина стенки 5,5 мм, длина 1760 мм; вес 55—60 кг, ёмкость (по воде) 50 л, вместимость при 200 ат давления 10 м³ газа. На 1 м³ газа приходится 5,5—6,0 кг веса баллона. Допуски при изготовлении баллонов: по наружному диаметру $\pm 1,5\%$, по длине баллона ± 50 мм, по толщине стенки $+ 20\%$ и $- 10\%$, по ёмкости $\pm 5\%$.

Такие пятидесятилитровые стальные баллоны применяются на грузовых автомашинах.

Ассортимент выпускаемых на рынок стальных баллонов не ограничивается только указанной ёмкостью. В табл. 66 приведены характеристики тонкостенных стальных баллонов различных ёмкостей, пригодных для установки на автомашинах.

Таблица 66

Ёмкость баллона, л	Внутренний диаметр, мм	Минимальная толщина стенки, мм	Длина баллона, включая вентиль, округленно, мм	Вес баллона без вентиля, кг
44	204	5,2	1800	50
50	204	5,2	1980	56
53	232	5,85	1680	59
58	232	5,85	1800	67
65	232	5,85	2000	74
90	267	7,0	2100	110

По последним данным одной из фирм, специализирующейся по производству легковесных баллонов, выпускались ещё баллоны следующих ёмкостей (см. табл. 67 и 68).

Таблица 67

Баллоны для сжатых газов

Геометрическая ёмкость, л	Наружный диаметр, мм	Длина баллона (без вентилля), мм *	Толщина стенки, мм	Вес баллона, кг	Вместимость баллона, л. м³ газа	Вес баллона, кг на 1 л. м³ газа
53	229	1610	5,75	62	10,6	5,85
110	321	1720	8,00	135	22,0	6,18
150	368	1800	9,25	192	30,0	6,40
230	394	2400	10,00	281	46,0	6,11

* С вентилем длина баллона на 100 мм больше.

Характеристика литой стали, из которой изготавливаются эти баллоны; временное сопротивление на разрыв — 90—105 кг/мм², предел текучести — 77 кг/мм², относительное удлинение — 14%.

Таблица 68

Баллоны для жидких газов

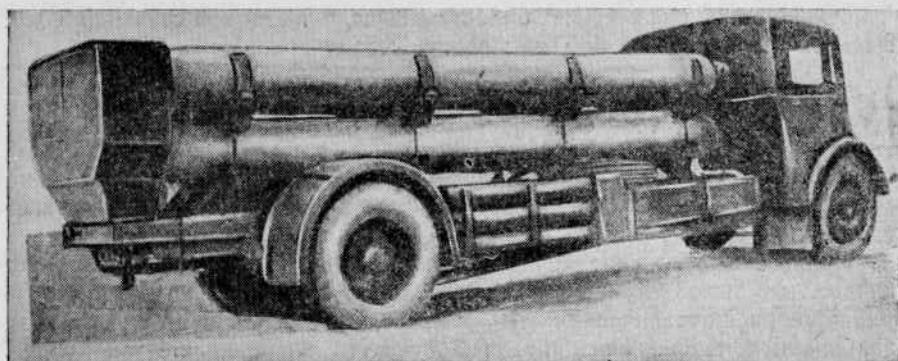
Наименование газа	Пробное давление, ат	Геометрическая ёмкость, л	Вес баллона, кг	Вместимость газа, кг	Вес баллона	
					кг на 1 кг газа	кг на 1000 ккал газа
Пропан (Deurag) . . .	25	52	30	22,1	1,36	0,28
Пропан (I. G.) . . .	25	30	28	15	1,86	0,38
»	25	75	50	30	1,67	0,35
Бутан	—	—	12	13	0,93	0,13
Рургазойль	65	75	55	45	1,22	0,11

Стальные баллоны ёмкостью 110, 150 и 230 л могут быть использованы для установки на специальных грузовиках для перевозки сжатых газов на те или иные расстояния. Этот вид транспорта сжатых газов, как было указано в главе 1, особенно распространён во Франции. Французскими фирмами для этих целей изготавливались стальные баллоны ещё больших размеров, ёмкостью которых доходит до 900 л. В табл. 69 приведены данные об изготавливаемых во Франции стальных многолитражных баллонах для транспорта сжатых до 200—350 ат газов на большие расстояния. Многолитражные баллоны изготавливаются как из обыкновенной углеродистой, так и из специальной стали повышенной прочности.

Таблица 69

Основные данные	Баллоны из обыкновенной углеродистой стали			Баллоны из специальной стали		
	1	2	3	1	2	3
Общая длина баллона, мм	7300	6650	6200	7300	7300	7100
Наружный диаметр, мм	435	435	435	435	435	435
Толщина стенки, мм	17	21	25	13	16	19
Емкость (по воде), л	865	750	670	900	875	820
Рабочее давление газа, ат	200	250	300	200	250	300
Давление при испытании, ат	300	375	450	300	375	450
Вмещается газа, м ³	173	187,5	201	180	218,75	246
Вес баллона (пустого) без арматуры, кг	1345	1480	1630	1040	1270	1445
Вес баллона, кг на 1 м ³ газа	7,77	7,90	8,10	5,78	5,81	5,87

Пример установки многолитражных баллонов на грузовой машине иллюстрирует фиг. 29. Три крупных баллона укреплены на шасси с помощью специальных хомутов. Горловины баллонов находятся у кабины шофера. В нижней части грузовика смонтирована батарея малолитражных баллонов, служащих для питания сжатым газом мотора грузовика.



Фиг. 29. Грузовик со стальными баллонами для перевозки сжатых газов.

Грузовые автомашины с многолитражными баллонами изготовлялись во Франции со специальным назначением перевозить сжатые горючие газы в отдаленные от газонаполнительных станций места потребления.

После Франции аналогичные автомашины начали выпускать и в других странах.

Кроме обычных испытаний стальных баллонов на механическую прочность, за истекшее время произведено немало испытаний специального характера, чтобы установить, какие явления могут иметь место при тех или иных авариях с баллонами в условиях эксплуатации и каких последствий можно при этом ожидать.

Так, например, были проведены опыты нагревания наполненных баллонов до высоких температур, быстрого резкого выпуска газа из баллонов в атмосферу и т. п. Опыты нагревания до 600°С наполненных светильным газом до 200 ат баллонов показали, что при этих условиях они остались неповреждёнными. С этой точки зрения снабжение автомашин горючим газом в баллонах значительно более безопасно, чем снабжение бензином в обыкновенных баках, которые не выдерживают нагревания даже до значительно более низких температур.

Опыты быстрого выпуска газа под высоким давлением показали, что воспламенения светильного газа при этом не происходит. Эти опыты многократно были повторены с баллонами, наполненными светильным газом до 200 ат. Газ быстро выпускался через 7-мм отверстие вентиля баллона в атмосферу; случаев самовоспламенения выпускаемого газа не наблюдалось.

Проводившиеся в НАТИ гидравлические испытания заграничных тонкостенных баллонов дали следующие результаты: баллон фирмы Маннесман ёмкостью 53 л выдержал давление до 560 ат; состав стали:

C—0,53%,	Si—0,33%,	Mn—0,70%,	Ni—0,63%,
Cr—0,64%,	Mo—0,35%,	V—0,024%,	S—0,013%,
P—0,03%;			

механические свойства стали: твердость по Роквеллу (шкала С)—30—32, временное сопротивление на разрыв—100,3 кг/мм², предел текучести—91,0 кг/мм², удлинение—10,8%.

Французский баллон GIP ёмкостью 50 л, с толщиной стенки 5,5 мм, выдержал давление до 485 ат; состав стали:

C—0,28%,	Si—0,44%,	Mn—0,45%,	Ni—0,42%,
Cr—0,19%,	Mo—0,27%,	S—0,025%,	P—0,036%;

механические свойства стали: твердость по Бринеллю—266, временно, сопротивление на разрыв—84 кг/мм², предел текучести—65,7 кг/мм², удлинение—11,3%.

Приведённые краткие материалы показывают, что применение легированных или малолегированных сталей для изготовления баллонов вполне удовлетворяет техническим требованиям, предъявляемым к баллонам для сжатых газов. Этим путем достигнуто значительное уменьшение толщины стенки баллонов и более чем в два раза уменьшен их вес.

Проводимые акад. Н. П. Чижевским опыты дегазации стали показывают, что, повидимому, этим путём можно будет достичь существенного повышения механической прочности даже обычной углеродистой стали; изготовление баллонов из вакуумной стали позволит сократить до минимума или даже вовсе избежать применения легирующих материалов.

Армированные баллоны

Параллельно с работами по изготовлению тонкостенных баллонов из легированной стали во Франции в двадцатых годах были проведены удачные опыты изготовления тонкостенных баллонов, исходя из совершенно иного принципа их конструирования.

Французские исследователи проф. Шапюи (Charpiot) и д-р Пиньо (Pigot), в течение многих лет занятые разрешением вопросов, связанных с переводом автомашин на компримированные газы, нашли метод изготовления металлических баллонов с тонкими стенками и сравнительно очень небольшим весом. К 1930 г. такие легковесные баллоны, изготовлявшиеся во Франции уже в массовом количестве, быстро завоевали широкую известность.

После посещения Парижа представителями газового завода в Бирмингеме методика и рецептура изготовления этих баллонов были перенесены и в Англию, где они также быстро распространились.

Метод конструктивного оформления и изготовления легковесных баллонов, предложенный Шапюи и Пиньо, существенно отличается от обычного метода конструирования и изготовления как толстостенных баллонов из углеродистой стали, так и легковесных баллонов из легированной стали. Сущность предложенного Шапюи и Пиньо метода основана на следующих исходных положениях:

Если

d —внутренний диаметр баллона,

l —длина его,

s —толщина стенки,

P —манометрическое (избыточное) давление газа в баллоне,

σ_o —напряжение, испытываемое при этом давлении стенками баллона в осевом направлении,

σ_m —напряжение, испытываемое при этом давлении стенками баллона в тангенциальном направлении,

то

$$\frac{\pi d^3}{4} \cdot P = \sigma_o \cdot \pi \cdot d \cdot s$$

и величина σ_o будет равна:

$$\sigma_o = \frac{d \cdot P}{4 s};$$

$$\frac{l \cdot d \cdot P}{2} = \sigma_m \cdot l \cdot s$$

и

$$\sigma_m = \frac{d \cdot P}{2 s}.$$

Отсюда следует, что при цилиндрической форме баллона напряжение, испытываемое материалом его стенки в тангенциальном направлении, вдвое больше напряжения в осевом направлении.

При расчётах толщины стенки стальных баллонов обычной конструкции принимается, конечно, что стенка должна выдерживать большее из этих напряжений, т. е. σ_m . Отсюда и получается большая толщина стенки баллонов обычной конструкции. В баллонах, изготовленных из специальной легированной стали, толщину стенки удалось уменьшить только за счёт повышенной механической прочности стали.

Итак, стенка баллона испытывает два усилия, причём одно из них—тангенциальное—по величине вдвое больше другого—осевого. Если корпус цилиндрического баллона сконструировать так, чтобы материал

стенки баллона испытывал только одно из этих усилий, и притом меньшее, т. е. осевое, а второе усилие передать на какую-либо конструкцию, изготовленную из более прочного металла, то и толщина стенки баллона получилась бы значительно меньшей. На этом принципе и разработаны во Франции новые конструктивные формы легковесных баллонов, имеющих уже несколько разновидностей, описываемых ниже.

Стальные баллоны, армированные кольцами (Tubes autofrettés)

На стальную трубу диаметром ~ 600 мм надеты стальные кольца. Материал трубы подбирается с сравнительно пониженной механической прочностью и пониженным пределом текучести, но с большим коэффициентом удлинения. Материал колец, наоборот, берется с высоким пределом текучести и повышенной прочностью. Труба с кольцами перекусывается затем донышками, стянутыми продольными штангами, и подвергается гидравлическому давлению до 400 ат. При этом давлении происходит деформация материала стенки баллона, причём после спуска давления в этом материале сохраняется определённая остаточная деформация. При расширении стенки баллона начинают работать стальные кольца, плотно насаженные на баллоны, создавая определённое противодавление на стенку баллона.

При правильном выборе материалов и толщины стенок баллона и колец можно добиться того, что при максимальном рабочем давлении в баллоне стенка его будет испытывать равновеликие осевое и тангенциальное напряжения, не превосходящие расчётную величину $\sigma_{расч}$. Остальную часть усилий будут при этом принимать на себя стальные кольца, которые соответствующим образом рассчитываются.

Эта конструкция металлических баллонов применяется при изготовлении газосборников высокого давления на газонаполнительных станциях. На станции в Камбре, во Франции, установлены два газосборника подобной конструкции. Емкость каждого газосборника— $1,12$ м³ (по воде); рабочее давление—200 ат. При этом давлении два сборника вмещают, примерно, 450 м³ светильного газа. Вес тары на 1 м³ газа составляет около 8 кг.

Стальные баллоны с проволочной обмоткой (Tubes frettés, Tubes monofrettés)

В этой конструкции стальные кольца заменены густой сеткой из фортепианной проволоки высокой прочности (временное сопротивление на разрыв от 250 до 300 кг/мм²). Принцип конструкции здесь сохранён тот же.

Стальные баллоны с проволочной сеткой изготавливаются во Франции в двух конструктивных разновидностях! Одна разновидность более простой формы—Tubes monofrettés, — когда стальной баллон имеет только сетку. Вторая разновидность.—Tubes frettés — несколько сложнее, так как стальной баллон с сеткой окружается, кроме того, ещё металлическим каркасом, состоящим из двух колец, соединённых между собой продольными штангами; кольца располагаются у головки и у дна баллона. Установка металлического каркаса преследует две цели: во-первых, каркас частично принимает на себя осевые усилия, испытываемые стенкой

баллона, и тем самым позволяет ещё в большей степени уменьшить её толщину; во-вторых, каркас предохраняет проволочную сетку баллона от возможных при эксплуатации механических её повреждений.

Стальные баллоны этой конструкции изготавливаются из легированной стали специального состава, благодаря чему толщину стенки баллонов, рассчитанных на рабочее давление 200 ат, удалось снизить до 3 мм. Баллон ёмкостью 50 л, рассчитанный на рабочее давление 200 ат, весит 57 кг. Такой баллон при 200 ат вмещает 10 м³ газа. Вес тары на 1 м³ газа составляет 5,7 кг.

Изготавливаемые таким же методом баллоны ёмкостью 13,4 л (по воде) весят 17 кг. Длина баллона — 1130 мм, внутренний диаметр — 136,6 мм.

Гидравлические испытания показали, что разрыв баллонов наступает при давлении 380 ат, причём сначала лопаются продольные проволоки, затем поперечная проволочная обмотка и затем уже корпус баллона.

Стальные баллоны этой конструкции выпускаются во Франции в серийном порядке и применяются не только в автотранспорте, но и в воздушном флоте, например, для хранения кислорода.

В табл. 70 приведена спецификация выпущенных во Франции легко-весных баллонов.

Таблица 70

Ем- кость, л	Рабо- чее дав- ление, ат	Приве- дён- ный объём газа, м³	Наруж- ный ди- аметр, мм	Длина балло- на, мм	Толщи- на стенки, мм	Диаметр прово- локи, мм	Вес бал- лона, кг	Вес баллона, кг на 1 м³ газа
50	200	10,0	203	1,82	4,5 — 5,0	1,3	50	5,00
67	200	13,4	203	2,40			65	4,85
74	200	14,8	203	2,62			77	5,20
67	200	13,4	229	1,90		1,4	66	4,92
91	200	18,2	229	2,66	6,0 — 6,25		92	5,05
40	250	10,0	203	1,55	6,0 — 6,25	1,7	55	5,50
200	250	50,0	229	5,65		2,0	250	5,00

Допуски при изготовлении баллонов: ёмкость $\pm 2,5\%$, вес $\pm 8,0\%$, длина ± 10 мм.

В последнее время во Франции был начат выпуск стальных сварных баллонов с проволочной обмоткой. При ёмкости 100 л и рабочем давлении 200 ат диаметр баллона 265 мм, длина 2,25 м, вес 110 кг; отношение веса баллона к приведённому объёму газа равно 5,5 кг на 1 м³.

Интересно отметить, что испытания баллонов такой конструкции на военном аэродроме во Франции для проверки характера их разрушения при попадании пуль или осколков снарядов показали, что при попадании разрывной пули в стенке баллона образуется соответствующей величины отверстие, через которое газ спокойно вытекает из баллона. Никаких разрывов баллона, как это наблюдается при обычных стальных толстостенных баллонах, не наблюдалось.

Баллоны этого типа представляют собой дальнейший шаг в области изготовления легковесной тары для компримированных горючих газов. Основной принцип конструирования баллонов мало чем отличается от описанного выше. Их особенность заключается лишь в том, что сам баллон изготавливается не из легированной стали, а из сплава, имеющего небольшой удельный вес.

Наибольшее распространение при изготовлении таких баллонов получили алюминиевые сплавы, в частности, так называемый, „алюмаг“ следующего состава: Al—93%, Mg—6,5%, Mn—0,45% и Mo—0,05%.

Удельный вес такого сплава равен 2,65. „Алюмаг“ обладает следующими механическими свойствами: модуль упругости ~8 000 кг/мм², временное сопротивление на разрыв—от 36 до 48 кг/мм² (в зависимости от метода обработки), относительное удлинение—от 6 до 24% (в зависимости от метода обработки).

Обмоточная проволока изготовлена из нелегированной высокоуглеродистой стали (содержание углерода 0,63%); ее механические свойства: временное сопротивление на разрыв 195—210 кг/мм², относительное удлинение 1,5%.

При изготовлении этих баллонов особое значение приобретает процесс выдерживания обмотанного проволоочной сеткой баллона при высоком давлении, как это было описано выше (см. „Стальные баллоны, армированные кольцами“). Значение этого процесса обусловлено тем, что в данном случае особенно важно правильное распределение напряжений между материалом стенки баллона и стальной проволокой сетки. При высоком гидравлическом давлении материал стенки баллона приобретает остаточную деформацию, а проволоочная сетка—определённой величины противонапряжение, благодаря чему компенсируется испытываемое материалом стенки давление.

Механические свойства алюминиевых сплавов и стальной проволоки резко различны. Если бы баллон не был предварительно подвергнут высокому давлению, то при наполнении его газом до рабочего давления 200 ат материал стенки и проволоочной сетки должен был бы расширяться на одинаковую величину. Принимая модуль упругости стальной проволоки сетки равным 21 000 кг/мм² и напряжение в ней равным, например, 70 кг/мм², получим величину напряжения материала стенки баллона:

$$\sigma_m = \frac{8000}{21000} \cdot 70 = 26,7 \text{ кг/мм}^2,$$

что значительно выше допустимого для алюминиевого сплава типа „алюмаг“.

Но если баллон был предварительно подвергнут высокому гидравлическому давлению, значительно превышающему рабочее давление, то картина существенно меняется. Проволока сетки приобретает противонапряжение и, если баллон пуст, создаёт давление на стенку баллона. При наполнении такого баллона газом материал его стенки испытывает значительно меньшие напряжения, благодаря чему механическая прочность алюминиевого сплава оказывается вполне достаточной.

Рабочее давление в этих баллонах держат на таком же уровне, как и в стальных баллонах, т. е. 200 ат. Вес алюминиевых баллонов значительно ниже и составляет только 3,2 кг на 1 м³ газа, т. е., примерно, в четыре раза меньше, чем в толстостенных стальных баллонах, применяемых для хранения кислорода.

Добавочный вес алюминиевых баллонов для грузовой четырёхтонной автомашины при пробеге на 75 км равен только 160 кг.

Обширный экспериментальный материал показывает, что легковесные баллоны, изготовленные из алюминиевых сплавов и обмотанные стальной проволокой, выдерживают с достаточным запасом прочности рабочее давление 200 ат, под которым эти баллоны должны работать у потребителей. Механическая прочность таких баллонов, как и их безопасность при эксплуатации, не вызывают сомнений.

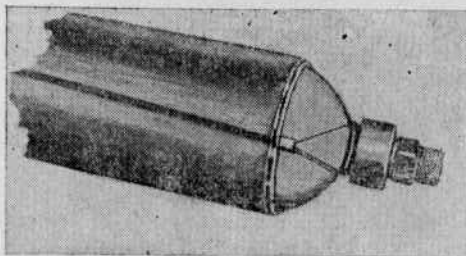
В первый период создания конструкций алюминиевых баллонов из „алюмага“ и других алюминиевых сплавов, как-то: дюралюминия, электрона, лауталя, бондюра, было установлено, что цилиндрическая часть этих баллонов, где имеется армировка из стальной проволоки, обладает необходимой механической прочностью.

Недостаточной оказалась механическая прочность горловины баллона, изготавливаемой с большей толщиной стенки, но без армировки стальной проволокой. Горловина баллона с конической резьбой для привинчивания вентиля, вследствие недостаточной прочности часто обнаруживала утечку газа и даже давала трещины.

В результате изучения конструкции этой части баллона был предложен способ укрепления горловины путём установки на нее стального кольца высотой 16 мм с толщиной стенки 5 мм, нагретого перед надеванием в масляной бане до 280° С. По имеющимся данным, изготавливаемые во Франции алюминиевые баллоны выпускались со стальными кольцами, надетыми на горловину. Таким образом и это уязвимое место новых легковесных баллонов, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, можно считать устраненным.

На фиг. 30 изображена часть баллона, изготовленного из алюмага и армированного стальной проволокой и кольцом. Фотография дает представление о форме горловины баллона, о месте расположения укрепляющего стального кольца и обмотки из стальной проволоки. Вся цилиндрическая часть баллона плотно обмотана стальной проволокой диаметром 0,8 мм. Кроме сплошной поперечной обмотки, имеется ещё продольная армировка, причём продольные проволоки охватывают и горловину баллона.

Длина таких баллонов 2300 мм, наружный диаметр—100 мм, толщина алюминиевой стенки—3,25 мм, а с проволокой 4,05 мм; внутренний диаметр баллона равен 91,9 мм.

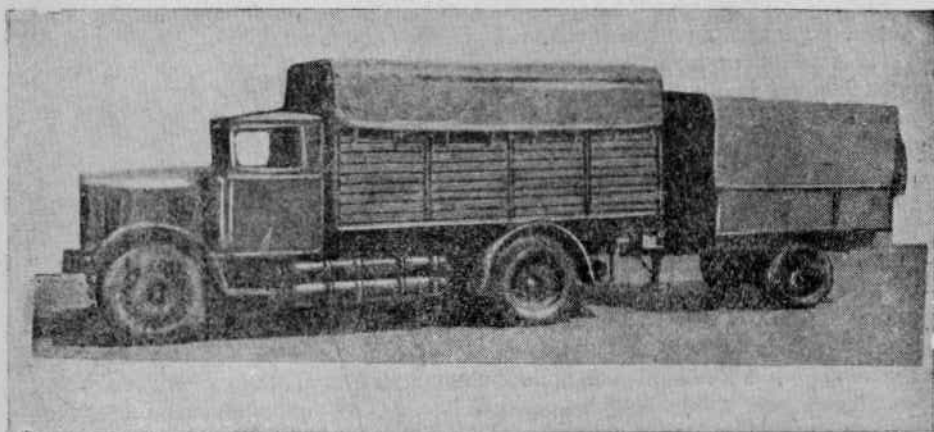


Фиг. 30. Верхняя часть алюминиевого баллона с проволоочной обмоткой.

Гидравлические испытания таких баллонов на разрыв, произведённые за границей и у нас, показали, что в интервале давлений от 330 до 450 ат разрываются сначала продольные проволоки, затем разрывается поперечная обмотка и только после этого корпус самого баллона.

На обоих концах баллона имеются штуцеры для присоединения трубок. Вес баллона настолько мал, что его свободно можно держать в руках.

Такие легковесные баллоны были уже использованы во Франции, в частности для перевозки сжатых горючих газов на значительные расстояния. С этой целью баллоны монтируются в несколько этажей в кузове грузовой автомашины или прицепа по несколько баллонов в каждом этаже.



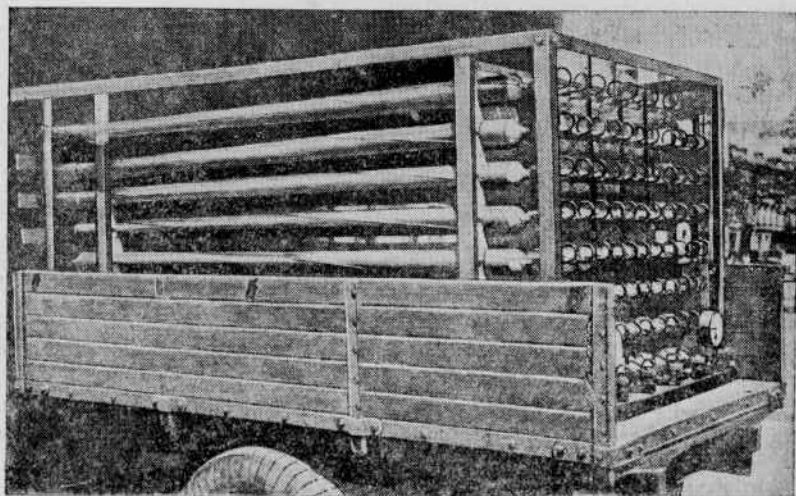
Фиг. 31. Общий вид грузовика с прицепом для перевозки сжатых газов в алюминиевых баллонах.

На фиг. 31 дан общий вид такого грузовика с прицепом, а на фиг. 32 расположение баллонов в кузове. В 8 рядах установлено 96 баллонов, по 12 баллонов в каждом ряду. При ёмкости одного баллона 15 л или 0,015 м³ (по воде) и при рабочем давлении 200 ат 96 баллонов вмещают около 300 м³ светильного газа.

Соединение этих баллонов между собою может быть осуществлено по различным схемам. Можно все баллоны соединить последовательно, тогда наполнение и опорожнение всей батареи будет происходить одновременно. Можно все баллоны разбить на две или большее число секций, тогда наполнение и опорожнение каждой секции может происходить обособленно от остальных. Последняя схема соединения баллонов применяется в тех случаях, когда процесс опорожнения всей батареи баллонов производят ступенчато, по аналогии со ступенчатым методом наполнения автомобильных баллонов на газонаполнительных станциях.

Процесс изготовления баллонов из сплавов с армированием стальной проволокой, конечно, более сложен, чем процесс изготовления легковесных баллонов из легированной или мало легированной стали. Освоение

новой техники производства требует большой тщательности и культуры. Этим отчасти можно объяснить, что до сих пор главным образом развито ещё производство легковесных баллонов из мало легированной и легированной стали, в то время как производство баллонов из алюминиевых сплавов, несмотря на их несомненные преимущества в части уменьшения веса, широкого распространения пока еще не получило.



Фиг. 32. Расположение баллонов в кузове грузовика для перевозки сжатых газов.

Отрицательным моментом при применении алюминиевых баллонов является их более высокая стоимость. При современном состоянии техники алюминиевые сплавы стоят дороже легированной стали. По данным за 1935 г. стоимость стального баллона с провололочной сеткой (*Tubes frettés*) составляла по Франции 60 франков на 1 м^3 вмещаемого газа (баллон ёмкостью 50 л стоит 600 франк.), а алюминиевого баллона с провололочной сеткой — 100 франк. на 1 м^3 , т. е. на 67% дороже. Но если учесть, что с дальнейшим развитием алюминиевой промышленности стоимость алюминия будет снижаться и что при сравнительной калькуляции нельзя не учитывать стоимости перевозки на автомашинах лишнего мёртвого груза (а на 1 м^3 газа этот лишний груз составляет $5,7 - 3,2 = 2,5 \text{ кг}$), то вполне логичен вывод, что баллоны французской конструкции, изготовленные из легковесных сплавов, имеют широкие перспективы промышленного внедрения.

ТИПОВАЯ СХЕМА ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Сооружение и эксплуатация газонаполнительных станций сжатого газа во многих странах Европы позволили накопить богатый опыт в этом деле.

Опыт сооружения и эксплуатации первых газонаполнительных станций в СССР позволил внести соответствующие коррективы и дополнения к заграничному опыту. Сейчас имеются все основания для разработки типового проекта советской газонаполнительной станции, который с теми или иными видоизменениями мог бы применяться в нашей практике.

Основные положения для разработки такого типового проекта, составленные с использованием материалов б. Донюжгаза НКНП, приводятся ниже.

Производительность станции

Основным потребителем сжатого газа пока является автотранспорт, поэтому назначение станции — наполнение сжатым газом баллонов автомашин. Это — основной фактор, определяющий производственную мощность станции.

Второй фактор — производительность главного агрегата станции — компрессора. Преобладающее число заграничных станций имеет по одному компрессору; чаще всего применяются компрессора со следующими производительностями:

на	60	м ³ /час	с мощностью	двигателя	25 л. с.
"	120	"	"	"	50 "
"	180	"	"	"	80 "
"	240	"	"	"	110 "

На основании опыта эксплуатации некоторых западноевропейских станций рекомендован следующий упрощенный метод выбора производительности компрессора.

Пусть

Q — производительность компрессора в м³/час;

q — количество кубических метров газа, забираемое, в среднем, подъезжающими автомашинами в час;

V — емкость газосборников высокого давления в м³,

P — рабочее давление в газосборниках высокого давления в атм,

p — рабочее давление наполненных баллонов автомашин в атм.

Зависимость между этими величинами может быть выражена в таком виде:

$$Q + \frac{V \cdot (P-p)}{4} = q.$$

Рабочее давление (максимальное) в газосборниках станции P принимается равным 350 *ати*; максимальное давление при наполнении баллонов $p = 20$ *ати*. Величина q подсчитывается по количеству подъезжающих к данной станции автомашин для наполнения сжатым газом баллонов и ёмкости этих баллонов.

Произведение $V \cdot (P-p)$ представляет собой количество газа, которое может быть отпущено из газосборников высокого давления за счёт понижения в них давления с 350 до 200 *ати*. Эта величина в формуле разделена на 4, исходя из расчёта, что опорожнение газосборников продолжается, примерно, 4 часа.

Величина $\frac{V(P-p)}{4}$ определяет, таким образом, часовое количество газа в кубических метрах, которое может быть отпущено подъезжающим к станции автомашинам за счёт находящегося в газосборниках сжатого газа.

Эта формула показывает, что производительность компрессоров должна подсчитываться одновременно с определением ёмкости газосборников высокого давления.

Суточная производительность компрессоров должна равняться суточному потреблению сжатого газа. Пиковое часовое потребление газа должно быть равно часовой производительности компрессоров плюс одна четверть отпускной ёмкости газосборников высокого давления.

Опыт эксплуатации показал, что если на станции установлен один компрессор на 60 $\text{м}^3/\text{час}$, то при наличии газосборников такая станция может регулярно снабжать сжатым газом от 35 до 45 автомашин в течение суток. При наличии компрессора 120 $\text{м}^3/\text{час}$ станция способна снабжать газом от 55 до 65 автомашин; при компрессоре 180 $\text{м}^3/\text{час}$ — от 75 до 85 автомашин; при компрессоре 240 $\text{м}^3/\text{час}$ — от 95 до 105 автомашин.

Бесперебойный отпуск со станции газа такому количеству подъезжающих автомашин возможен, конечно, только при наличии на станции достаточного количества газонаполнительных колонок. При компрессоре 60 $\text{м}^3/\text{час}$ таких колонок должно быть минимум две, при компрессоре 120 и 180 $\text{м}^3/\text{час}$ — три, а при компрессоре 240 $\text{м}^3/\text{час}$ — 4 колонки. Число колонок в данном случае определяется из расчёта, что одна колонка наполняет в течение часа от 8 до 10 автомашин.

Нашей машиностроительной промышленностью выпущен компрессор производительностью 180 $\text{м}^3/\text{час}$; установкой одного или нескольких таких компрессоров может быть достигнута необходимая мощность станции.

В качестве исходной величины для последующих расчетов принимается производительность станции 360 н. м^3 всасываемого газа в час.

Технологическая схема газонаполнительной станции

Технологическая схема станции изображена на фиг. 33.

Газ поступает на станцию по газопроводу, соединяющему станцию с магистральным газопроводом или газораспределительной сетью. При скорости поступающего газа 8 м/сек, диаметр входного газопровода равен:

$$d = \sqrt{\frac{360 \cdot 4}{\pi \cdot 60 \cdot 60 \cdot 8}} \approx 125 \text{ мм} = 5''.$$

На входном газопроводе должен быть установлен запорный вентиль.

Далее газ проходит: а) через диафрагмовый счётчик и затем через фильтр, как это указано на фиг. 33, или б) через фильтр и газовый счётчик ротационного типа.

Целесообразнее было бы установить диафрагму после фильтра, но при этом пришлось бы удлинить участок входного газопровода, на котором устанавливается диафрагма.

Установку острой диафрагмы 7 с расходомером 77 и манометром 78 нельзя рассматривать, как оптимальный вариант учёта принимаемого станцией газа.

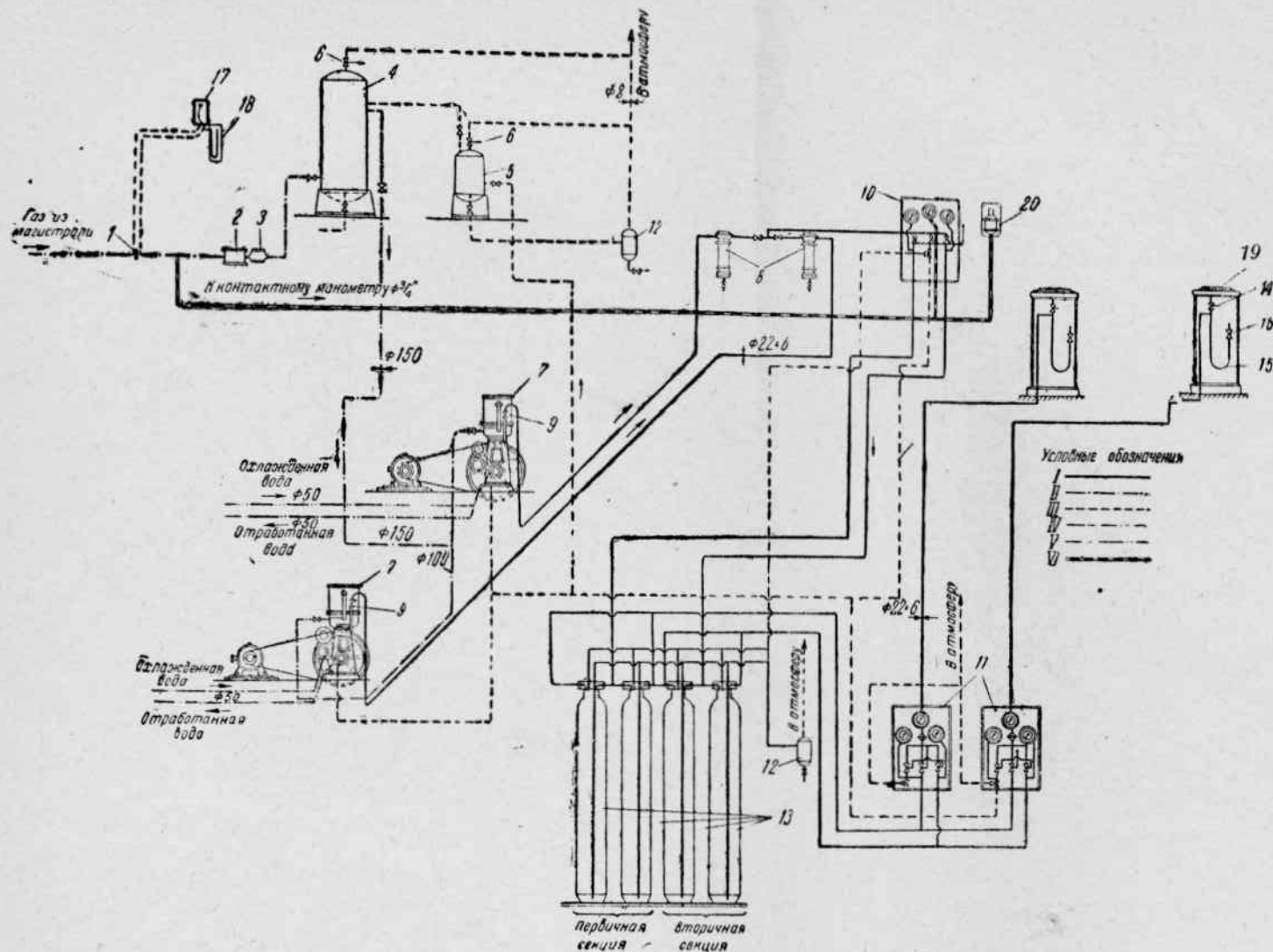
Ротационные газомеры для этой цели значительно более пригодны, ибо они: а) занимают сравнительно мало места, б) изготавливаются на производительность до 24 000 м³/час, в) очень просты по конструкции, и долговечны, г) не чувствительны к пульсирующим потокам и д) отмечают на своем циферблате непосредственно общее количество прошедшего через них газа с точностью до $\pm 2\%$. При сочетании ротационного газомера со специальным прибором по корректированию объема газа на температуру и давление, показания газомера могут быть получены в нормальных объёмах или весовых единицах и не будут требовать внесения дополнительных поправок. Вопрос заключается пока в трудности получения рационных газомеров.

С освоением нашей промышленностью производства ротационных газомеров им должно быть отдано предпочтение.

Расходомер 77 — кольцевые газовые весы типа РРР Харьковского завода КИП.

Висциновый фильтр 2 служит для очистки поступающего газа от примесей. На первых заграничных станциях такой промывочный фильтр не ставился; он введён только в последнее время и проверен в работе на Московской станции.

Фильтр (фиг. 34) представляет собой цилиндрическую коробку, в которую вставлен фильтрующий патрон; стенки патрона состоят из двух рядов металлической сетки; патрон заполнен латунными кольцами Рашига, смоченными висциновым маслом (нефтяное масло ОСТ № Ст. Гл. $\frac{2}{4210}$, температура вспышки 170°C, вязкость по Энглеру при 20°C не ниже 15,0, при 50°C 3,5—4,0, температура застывания не выше —20°C). Патрон легко вынимается из корпуса фильтра; очистка фильтра состоит в промывке патрона в горячей содовой воде. Затем патрон погружают в ванну с горячим висциновым маслом, дают стечь избыточному маслу и устанавливают патрон в фильтр. Срок периодических очисток фильтра зависит от степени загрязнённости газа.

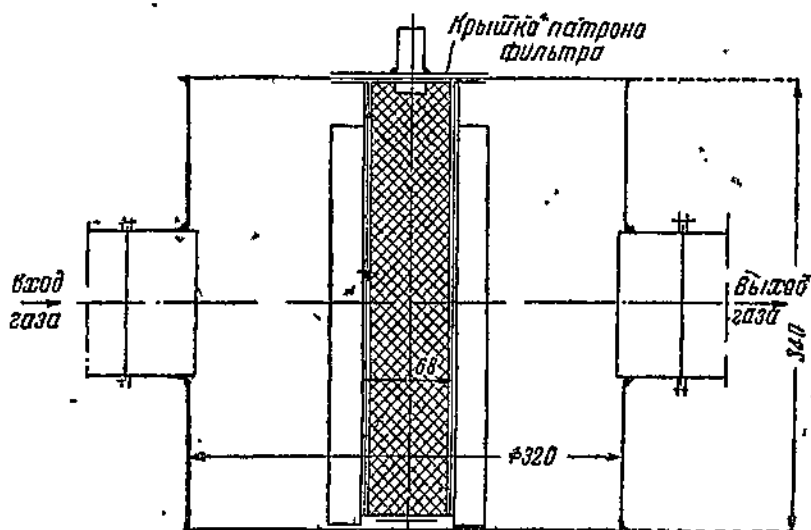


Фиг. 33. Технологическая схема газонаполнительной станции на 360 м³ газа в час.

1—измерительная диафрагма; 2—фильтр висциновый; 3—обратный клапан; 4—газосборник; 5—ресивер; 6—предохранительный клапан; 7—компрессор; 8—газоосушительный баллон; 9—обратный клапан; 10—распределительный механизм; 11—раздаточный блок; 12—отделитель жидкости; 13—аккумулятор; 14—предохранительный клапан шланга; 15—гибкий шланг; 16—накидная головка; 17—расходомер РРР; 18—V-образный ртутный манометр; 19—раздаточная колонка; 20—сигнализатор понижения давления.
 I—коммуникация высокого давления, II—газопровод низкого давления, III—газопроводная продувочная линия, IV—вода холодная, V—вода горячая, VI—трубопровод к контактному манометру и сигнализатору понижения давления.

Пройдя газовый счетчик, фильтр и установленный после него обратный клапан 3, газ поступает в буферный газосборник 4, назначением которого является устранение пульсации и толчков газового потока. Газосборник представляет собой вертикально установленный цилиндрический сосуд, сваренный из листового железа; диаметр 1 м, высота 2,5 м, ёмкость 2 м³. На верхнем его днище установлен предохранительный клапан 6, внизу — спускной ventиль.

Из верхней части буферного газосборника газ поступает в компрессоры 7. Компрессоров установлено два; производительность каждого 180 м³/час. Компрессоры четырёхступенчатые, вертикального типа, выпускаемые Сумским заводом им. Фрунзе; давление газа со стороны



Фиг. 34. Висциновый фильтр (вертикальный разрез).

всасывания 0,95 атм, давление на выдаче 350 атм, число оборотов 380 об/мин. Давление после I ступени 3,5 ат, после II ступени 18 ат, после III ступени 80 ат и после IV ступени 350 ат.

Конструктивная характеристика компрессоров: вал двухколенчатый, оба цилиндра двухступенчатые; отливка цилиндров выполнена в виде двух блоков: нижний чугунный блок для цилиндров I и II ступеней сжатия, верхний стальной блок для цилиндров III и IV ступеней сжатия. Цилиндры снабжены водяными рубашками; рубашки цилиндров первых двух ступеней открытые и сообщаются с водяной ванной, охлаждающей змеевики, сальники и клапаны. Газ по выходе из первой и второй ступеней охлаждается, соответственно, в двух цилиндрических холодильниках; по выходе из третьей и четвертой ступеней — в двух змеевиках, проходящих через ванну. Каждая ступень компрессора снабжена отдельным манометром, предохранительным клапаном, запорным ventилем, сборником конденсата и спускной линией для конденсата. Конденсат каждые два часа, поочередно со всех четырех ступеней, спускается через продувочные ventили в продувочный ресивер. Предохранительные

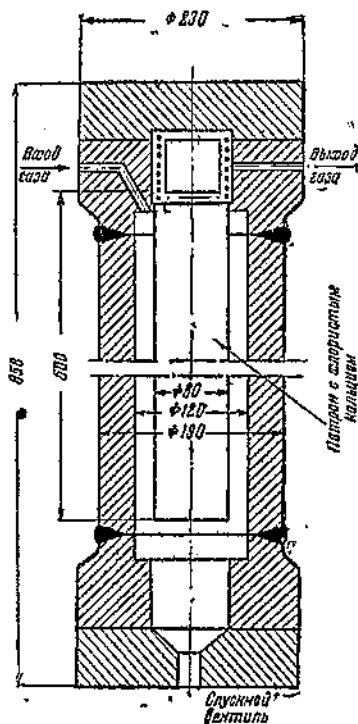
клапаны компрессора отрегулированы на 10%-ное превышение давления, установленного для каждой ступени; при превышении этого максимума допустимого давления предохранительный клапан открывается и выпускает избыточный газ во всасывающую линию соответствующей ступени.

Из трех возможных в данном случае типов двигателей—электромотора, газомотора и паровой турбины—для данной типовой станции выбран электромотор, так как паровая турбина требует сооружения парокотельной (при изолированности станции от промышленных предприятий), а газомоторный вариант отпадает вследствие неосвоенности у нас пока производства газомоторов необходимых мощностей.

Потребная мощность электромотора 75 квт.

Продувочный ресивер 5—сварной цилиндрический сосуд диаметром 0,5 м и высотой 1 м; собранный в этом ресивере при продувках холодильников компрессоров и остальной аппаратуры конденсат периодически перепускается в специальный маслоотделитель 12; после отстаивания масло спускается в сборник отработанного масла (не показанный на схеме), а конденсат—в канализацию. Ресивер 5 соединен с буферным газосборником 4, что позволяет поступающий в ресивер при продувках газ направлять снова в компрессоры. Ресивер так же, как и буферный газосборник, снабжен предохранительным клапаном 6, выпускающим газ в атмосферу при повышении давления сверх допустимого.

После четвертой ступени компрессора газ, сжатый до 35 ат и охлажденный до комнатной температуры, поступает по газопроводу высокого давления в газоосушительный баллон 8, наполнен-



Фиг. 35. Газоосушительный баллон для сжатого газа.

ный хлористым кальцием, предназначенный не только для механического улавливания капель, брызг и тумана, но и для возможно более глубокой осушки сжатого газа. Газоосушитель—толстостенный цилиндр, рассчитанный на рабочее давление 35 ат, изготавливаемый Краматорским машиностроительным заводом (фиг. 35); диаметр его 190 мм, высота 600 мм. В цилиндр вставляется патрон, наполненный хлористым кальцием; смена хлористого кальция должна производиться через каждые 1—3 недели в зависимости от производительности станции и влажности газа. По числу компрессоров устанавливается два газоосушительных баллона.

Сжатый и осушенный газ направляется затем в газосборники высокого давления—аккумуляторы 13, проходя через

распределительный механизм 10, в котором сосредоточено управление передачей газа и работой аккумуляторов

Для более полного использования ёмкости аккумуляторов они сгруппированы в две секции: секцию первичных и секцию вторичных аккумуляторов. Распределительный механизм направляет газ, по желанию, в одну из этих секций или, в случае необходимости, — обратно во всасывающую линию или в атмосферу.

В распределительном механизме имеется соответственно три клапана: средний клапан холостого хода направляет газ обратно через продувочный ресивер 5 и буферный газосборник 4 во всасывающий газопровод; два крайних клапана направляют газ в первичные и вторичные аккумуляторы. При помощи переключающего крана, расположенного ниже среднего клапана, газ может быть выпущен в атмосферу. Если наличие среднего клапана позволяет перевести работу компрессоров на циркуляцию без противодействия, то наличие переключающего крана позволяет в период пуска компрессоров производить продувку газом всей коммуникации и выпускать продувочный газ в атмосферу; переключающий кран позволяет, кроме того, контролировать во время работы плотность среднего клапана.

Рычаг управления может занимать три различных положения: первичные аккумуляторы, вторичные аккумуляторы и холостой ход; все три клапана находятся под действием сильных пружин; под давлением газа открывается тот или иной клапан в зависимости от положения рычага управления. Эти клапаны являются одновременно обратными клапанами, не позволяющими сжатому газу выходить из аккумуляторов при остановке компрессоров.

В верхней части распределительного механизма установлены 3 манометра, указывающие давления в первичных и вторичных аккумуляторах и во всасывающем газопроводе перед буферным газосборником 4. Каждый из этих манометров соединён параллельно с соответствующими контактными манометрами 20, вынесенными вследствие их взрывоопасности из компрессорного зала станции наружу; контактные манометры автоматически выключают электромоторы компрессоров: 1) при достижении в аккумуляторах максимального рабочего давления (350 ат) и 2) при падении давления во всасывающем газопроводе ниже 100—150 мм вод. ст.

Общая ёмкость аккумуляторной батареи принимается равной трёхчасовой производительности станции, т. е. $3 \times 2 \times 180 = 1080 \text{ м}^3$. Размеры аккумуляторов: внутренний диаметр 460 мм, высота 4900 мм; рабочее давление 350 ат; ёмкость каждого 0,8 м³ (по воде). Необходимое число аккумуляторов $\frac{3 \times 2 \times 180}{0,8 \times 350} \cong 4$ шт. Как уже отмечено, для

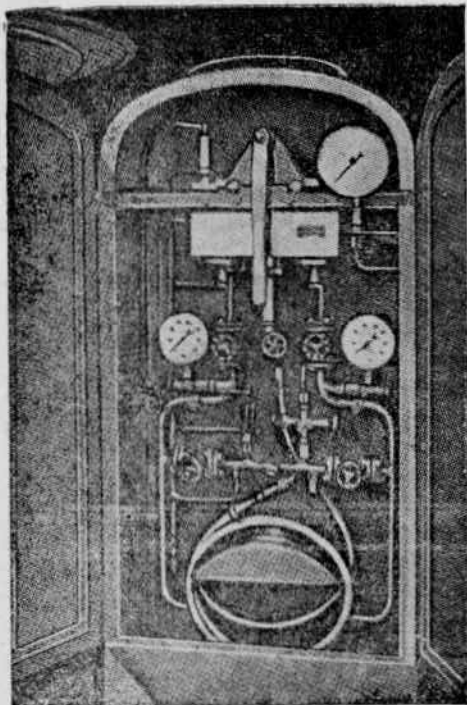
увеличения степени их использования батарея разбивается на две секции (первичную и вторичную), по два аккумулятора в каждой секции.

Аккумуляторы — стальные штампованные баллоны, снабжённые в верхней части головками, выполненными в виде стальной поковки; в головке установлено 3 вентиля: первый вентиль перекрывает трубопровод, соединяющий аккумулятор с распределительным механизмом; второй перекрывает трубопровод, соединяющий аккумулятор с раздаточным блоком, и третий — для продувки и удаления конденсата.

В каждом аккумуляторе имеется также предохранительное устройство, представляющее собой трубку, выведенную наружу здания; в соединительном штуцере этой трубки вставлена предохранительная пластинка, разрывающаяся при повышении давления в аккумуляторе до 450 ат.

Продувочные трубопроводы всех аккумуляторов соединены в общую линию, заканчивающуюся ресивером, снабжённым спускным и выпускным вентилями.

Из аккумуляторов сжатый газ поступает в раздаточный блок 11, оборудованный двойными танковыми вентилями. Танковые вентили обслужи-



Фиг. 36. Газонаполнительная колонка.

ваются общим рычагом, что даёт возможность забирать газ из любой секции аккумуляторов. Позади этих вентилей установлен автоматический ограничитель давления, который при повышении давления до 230 ат запирает раздаточный трубопровод. Предохранительный клапан 14 на раздаточном трубопроводе, отрегулированный на 240 ат, служит предохранителем в случае прекращения действия автоматического ограничителя давления.

После окончания отпуска газа сжатый газ из гибкого шланга 15 может быть удален в газосборник при помощи разгрузочного клапана, установленного в раздаточном блоке 11, благодаря чему при выключении шланг находится под атмосферным давлением. При помощи переключающего крана содержимое шланга может удаляться в атмосферу.

На конце гибкого шланга укреплена накидная головка 16 с запорным клапаном, который при отсоединении накидной головки от баллонов потребителя автоматически закрывается и препятствует проникновению воздуха в шланг или утечке газа в атмосферу.

Раздаточный блок 11 снабжён тремя манометрами (фиг. 36).

Первый показывает давление в первичных аккумуляторах, второй — во вторичных, третий прецизионный манометр показывает давление в баллонах получателя газа. Разность давлений (начального и конечного) при наполнении баллонов отсчитывается с помощью вращающейся шкалы.

Раздаточный блок и распределительный механизм изготавливаются на заводе им. Маленкова в Москве.

Все трубопроводы высокого давления монтируются из стальных труб высокого давления диаметром 10/22 мм; эти трубы изготавливаются из

качественной углеродистой стали. Присоединение труб к аппаратам высокого давления выполняется посредством дифференциальных винтовых соединений и линзовых уплотнений.

При фланцевых соединениях труб высокого давления устанавливаются двояковыпуклые линзы; при присоединении этих труб к аппаратам высокого давления применяются полукруглые линзы.

Минимально допустимый внутренний радиус изгиба бесшовных стальных труб должен быть не менее шести наружных диаметров труб.

Контрольно-измерительная аппаратура

Замер температур газа (на газосборнике и после каждой ступени компрессора) и температур воды (на водяной линии, питающей компрессор, и после каждой ступени компрессора) требует установки ртутных термометров с фарфоровой шкалой:

со шкалой 0—100° С 13 шт.
 „ „ 0—250° С 8 „

Замер давлений газа в буферном газосборнике производится V-образным ртутным манометром со шкалой 0—5000 мм вод. ст.

Для измерения высоких давлений требуется установка манометров высокого давления с трубчатой пружиной в количестве:

со шкалой 0—30 ат 2 шт.
 „ „ 0—160 „ 2 „
 „ „ 0—400 „ 4 „
 „ „ 0—450 „ 6 „

Для установки на распределительном механизме для автоматического выключения электромоторов требуется контактных манометров:

со шкалой 0—5000 мм вод. ст. 1 шт.
 „ „ 0—500 ат 2 „

Кроме перечисленных приборов, требуется 1 газомер для учёта поступающего на станцию газа и 1 водомер для учёта расхода воды.

Строительные данные

В одноэтажном здании станции размещаются рабочие и обслуживающие помещения:

	Площадь, м ²	Кубатура, м ³
Компрессорный зал	56	300
Аккумуляторная	12	75
Насосная—вентиляционная	14	56
Административно-бытовые	10,5	42
Силовые установки	38	150
Общий размер помещений . . .	130,5	623

Общая площадь здания станции 156 м².

Газораздаточные колонки размещаются за пределами станции в местах, удобных для подъезда автомашин.

Эксплуатационные показатели

Производительность станции. При работе станции в две смены (16 часов) годовая производительность станции:

$$16 \cdot 2 \cdot 180 \cdot 350 \cdot 0,9 = 1\,800\,000 \text{ м}^3 \text{ в год.}$$

Коэффициент 0,9 учитывает неравномерность подхода автомашин на зарядку газом.

Расходные показатели по электроэнергии, воде, маслу и газу. Годовые расходы этих видов энергии и материалов составляют:

	Единицы измерения	Годовой расход	Расход на 1000 н. м ³ газа
Электроэнергия	квт-ч	650 000	361
Вода	м ³	4 340	2,41
Масло машинное	кг	3 100	1,72
Газ на отопление и вентиляцию	м ³	18 300	10,17

Общий расход воды подсчитан, исходя из нормы расхода воды на охлаждение одного компрессора 115 л/мин и замкнутого цикла водяного хозяйства станции. Норма расхода машинного масла при работе одного компрессора завода им. Фрунзе 5 г/мин или 0,3 кг/час.

Штат станции

	Число смен	Число единиц в смену
Зав. станцией	1	1
Машинисты	2	1
Раздатчики газа	2	1
Электромонтер и слесарь	1	1
Сторож-вахтер	2	1
Исполники	3	1

Расчет наполнения баллонов автомашин сжатым газом из аккумуляторной батареи станции

В основу приводимого ниже расчета принято: а) все аккумуляторы станции наполнены газом до 350 ат; б) компрессоры станции не работают, в) остаточное давление газа в баллонах всех прибывающих на заправку автомашин типа ЗИС-5 равно 10 ат.

В первый период сжатый газ отпускается только из аккумуляторов первой секции.

Расчётная формула для определения остаточного давления газа после заправки автомашин:

$$P'_a = \frac{P_1 \cdot V_1 + (P_2 - P_x) \cdot V_2}{V_1},$$

где P_1 и V_1 — давление и объём газа в аккумуляторах,

P_2 и V_2 — давление и объём газа в баллонах автомашины до заправки,

P_x — давление газа в баллонах автомашины после заправки.

Цифровые значения:

$$P_1 = 350 \text{ ат},$$

$$P_2 = 10 \text{ "}$$

$$P_x = 200 \text{ "}$$

$$V_1 = 1,6 \text{ м}^3 \text{ (ёмкость двух аккумуляторов),}$$

$$V_2 = 8 \cdot 0,05 = 0,4 \text{ м}^3 \text{ (8 пятидесятилитровых баллонов).}$$

После заправки первой автомашины остаточное давление газа в аккумуляторах первой секции составит:

$$P'_{a_1} = \frac{350 \cdot 1,6 + (10 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 303 \text{ ат}.$$

После заправки последующих автомашин:

$$P'_{a_2} = \frac{303 \cdot 1,6 + (10 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 256 \text{ ат},$$

$$P'_{a_3} = \frac{256 \cdot 1,6 + (10 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 208 \text{ ат}.$$

Четвёртая автомашина заправляется из первой секции аккумуляторов до давления

$$P'_{a_4} = \frac{208 \cdot 1,6 + (10 \cdot 0,4)}{1,6 + 0,4} = 170 \text{ ат},$$

после чего баллоны четвёртой автомашины донаполняются до требуемых 200 ат из аккумуляторов второй секции. Обозначая через P''_a давление в аккумуляторах второй секции, получим после наполнения баллонов четвёртой автомашины:

$$P''_{a_4} = \frac{350 \cdot 1,6 + (170 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 340 \text{ ат}.$$

Производя двухступенчатое наполнение баллонов последующих автомашин, получим:

$$P'_{a_5} = \frac{170 \cdot 1,6 + (10 \cdot 0,4)}{1,6 + 0,4} = 138 \text{ ат},$$

$$P''_{a_5} = \frac{340 \cdot 1,6 + (138 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 325 \text{ ат},$$

$$P'_{a_6} = \frac{138 \cdot 1,6 + (10 \cdot 0,4)}{1,6 + 0,4} = 112 \text{ ат},$$

$$P''_{a_6} = \frac{325 \cdot 1,6 + (112 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 302 \text{ ат},$$

$$P'_{a_7} = \frac{112 \cdot 1,6 + (10 \cdot 0,4)}{1,6 + 0,4} = 92 \text{ ат},$$

$$P''_{a_7} = \frac{302 \cdot 1,6 + (92 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 275 \text{ ат},$$

$$P'_{a_8} = \frac{92 \cdot 1,6 + 10 \cdot 0,4}{1,6 + 0,4} = 75 \text{ ат},$$

$$P''_{a_8} = \frac{275 \cdot 1,6 + (75 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 244 \text{ ат},$$

$$P'_{a_9} = \frac{75 \cdot 1,6 + 10 \cdot 0,4}{1,6 + 0,4} = 62 \text{ ат},$$

$$P''_{a_9} = \frac{244 \cdot 1,6 + (62 - 200) \cdot 0,4}{1,6} = 210 \text{ ат},$$

$$P'_{a_{10}} = \frac{62 \cdot 1,6 + 10 \cdot 0,4}{1,6 + 0,4} = 51 \text{ ат},$$

Из второй секции аккумуляторов десятая автомашинна может быть заправлена только до давления

$$P''_{a_{10}} = \frac{210 \cdot 1,6 + 51 \cdot 0,4}{1,6 + 0,4} = 178 \text{ ат}.$$

Этот расчёт показывает, что при принятой схеме аккумуляторной батарее, производя двухступенчатое наполнение баллонов автомашин, число заправленных автомашин может быть доведено до 10 единиц с расходом газа 734 м³. Использование ёмкости аккумуляторной батарее составит при этом

$$\frac{734}{3,2 \cdot 350} = 65,5\%.$$

Стоимость строительства станции (в ценах 1936 г.)

Статьи расхода	Стоимость в тыс. руб.	В %
Изыскания	9,95	1,4
Проектирование и экспертиза	17,01	2,4
Строительство здания станции	46,35	6,7
Прочие строительные работы	132,70	19,0
Стоимость оборудования	375,60	53,8
Монтажные работы	57,78	8,3
Сантехника, спецоборудования и проч.	58,83	8,4
В с е г о	698,22	100,0

Себестоимость компримирования 1 м³ газа

Стоимость электроэнергии	3,5 коп/квт-ч
" оборотной воды	50 коп/м³
" машинного масла	30 коп/кг
" газа для собств. нужд	4 коп/м³
Амортизация зданий и сооружений	3,5%
" оборудования	9,5%
Текущий ремонт зданий и сооружений	1,5%
" оборудования	4,5%
Содержание оборудования, зданий и сооружений	1,0%

Общий размер годовых затрат на эксплуатацию станции составляет (без учёта стоимости исходного газа) ок. 180 000 руб.

Отсюда себестоимость компримирования 1 м³ газа (без учёта его начальной стоимости):

$$\frac{180\,000}{1\,800\,000} = 0,10 \text{ руб. или } 10 \text{ коп.}$$

С учётом 15% отчислений на содержание управления, стоимость компримирования 1 м³ газа составит 11,5 коп.

Для сопоставления эффективности производства различных видов сжатых газов можно привести следующие данные:

Состав и стоимость исходного газа

Наименование газа	Состав в % (объемн.)							Q _н ккал/н. м³	Цена 1 м³ в коп. при норм. давлении
	CH ₄	C _n H _m	H ₂	CO	N ₂	CO	O ₂		
Городской коксовый	25	2	55	7	7	3	1	~ 4000	12
Синтез-газ	51,2	3,7	7,8	12,5	23,6	—	1,2	~ 5200	4
Природный	97	—	—	—	3	—	—	~ 8300	3

Стоимость сжатого газа

Наименование газа	Стоимость компримирования в коп.		Стоимость сжатого газа в коп.	
	1 н. м³	1000 ккал	1 н. м³	1000 ккал
Городской коксовый	11,5	2,9	23,5	5,9
Синтез-газ	11,5	2,2	15,5	3,0
Природный	11,5	1,4	14,5	1,75

При дальнейшем развитии производства сжатых газов в нашей стране надо ожидать существенного снижения как размеров капитальных затрат на сооружение станций, так и эксплуатационных расходов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. История развития и современное состояние промышленности компримированных горючих газов	6
Жидкие горючие газы	7
Сырьевая база для производства жидких газов	10
Состав рыночных сортов жидких газов	11
Транспорт жидких газов	12
Потребители жидких газов	13
Промышленный опыт сжижения природного газа	17
Возможности развития производства жидких газов в СССР	17
Сжатые горючие газы	18
Франция, Англия, Германия, Италия, прочие страны	18
Производство сжатого газа в СССР	27
Литература	29
Глава II. Промышленные горючие газы как сырьевая база для производства сжатых и жидких газов	29
Низкокалорийные газы	30
Доменные газы. Генераторные газы. Газы подземной газификации углей	30
Среднекалорийные газы	33
Водяной газ. Двойной водяной газ. Газы парокислородного дутья. Коксовый газ, городской (светильный) газ. Полукоксовый газ. Остаточные газы при производстве синтетического бензина по методу Фишера-Тропша	33
Высококалорийные газы	37
Обогащенные газы, получаемые при синтезе аммиака на базе коксовых газов. Метанистый газ городских биологических станций. Остаточные газы гидрогенизационных заводов. Искусственные нефтяные газы. Газы крекинга нефти и нефтяных продуктов. Газы пиролиза. Природные газы	37
Пути обогащения промышленных газов	44
Метод смешения. Метод карбюрации. Метод метанирования. Метод конверсии окиси углерода. Метод осушки газа	44
Очистка газов	50
Литература	54
Глава III. Физико-химическая характеристика [промышленных горючих газов и их компонентов]	55
Три основных закона идеальных и реальных газов	55
Законы идеальных газов	56
Отклонения от законов идеальных газов	58

Определение поправочного коэффициента к уравнению состояния реальных газов	62
Физико-химическая характеристика основных компонентов-промышленных горючих газов	63
Индивидуальные газы первой (углеводородной группы). Метан. Этан. Пропан. н-бутан. Изобутан	63
Индивидуальные газы второй группы. Водород. Окись углерода	77
Индивидуальные газы третьей группы. Углекислота. Азот. Кислород	78
Газовые смеси	79
Содержание водяных паров в промышленных газах . .	80
Гидратные соединения природных газов	85
Литература	90
Глава IV. Технологические схемы производства жидких и сжатых горючих газов	92
Производство жидких газов при улавливании газового бензина	93
Производство жидких газов при стабилизации бензинов . .	95
Производство жидкого природного газа	96
Производство сжатых газов на газонаполнительных станциях	103
Стационарные газонаполнительные станции	103
Заграничные нормы по сооружению газонаполнительных станций для светильного и коксового газов	114
Выбор мест для сооружения станций. Компрессорная установка. Газосборники. Предохранительные и вспомогательные элементы станции. Трубопроводы. Выполнение газонаполнительных приспособлений. Нормы испытаний.	
Передвижные станции	115
Литература	115
Глава V. Баллоны для сжатых горючих газов	115
Баллоны из специальных сталей	116
Армированные баллоны	120
Стальные баллоны, армированные кольцами. Стальные баллоны с проволоочной обмоткой. Баллоны из легких металлов с проволоочной сеткой.	
Приложение. Типовая схема газонаполнительной станции	128
Производительность станции	128
Технологическая схема газонаполнительной станции . .	130
Контрольно-измерительная аппаратура	135
Строительные данные	135
Эксплуатационные показатели	136
Штат станции	136
Расчёт наполнения баллонов автомашин сжатым газом из аккумуляторной батареи станции	136
Стоимость строительства станции	138
Себестоимость компримирования 1 м ³ газа	139

Ведущий ред. Л. А. Львова Техн. ред. А. С. Полосина

Л 101742. Сдано в произв. 10/II-1945 г. Подписано к печати 1/VIII 1945 г.

Тираж 4000 экз. Печ. л. 8,75+1 вкл. Уч. изд. л. 11,40

Кол. зн. в п. л. 56.000. 60 × 92¹/₁₆. Ц. 10 р. Зак. № 164

Ленинград. Тип. „Кр. Печатник“, Международный пр., 75а.