

## Глава V

### Производство олефинов. Этилен и пропилен

Завод по производству олефинов — это «большой папа» нефтехимической индустрии. Разработка этого процесса относится еще к довоенным годам. Олефиновые заводы являются источником основных строительных блоков нефтехимии — этилена, пропилена, бутенов, бутадиена и бензола. Созданные недавно заводы по производству олефинов огромны: даже наиболее компактно спроектированный типовой современный завод превосходит по своим размерам многие средние нефтеперерабатывающие заводы. Производительность подобных заводов измеряется уже не в миллионах, а в миллиардах фунтов в год!

Существует множество вариантов проектирования и эксплуатации установок для производства олефинов, а также видов используемого сырья. В этой главе мы рассмотрим оборудование, химические реакции и переменные параметры, которые позволяют управлять количеством и составом продуктов. Кроме того, не будут забыты физические свойства этилена и пропилена, вследствие которых эти вещества требуют особого обращения.

Заводы по производству олефинов могут иметь разные названия (одно из них вообще вводит в заблуждение). Их часто называют заводами по производству этилена (по их основному продукту), установками парового крекинга (так как сырье перед крекингом смешивается с паром) или установками крекинга, где вместо пропуска надо поставить название сырья (например, крекинг этана, крекинг газойля и т.д.). Производство олефинов иногда ошибочно называют этиленовым крекингом, хотя этилен не подвергается крекингу, а является его продуктом.

Простота молекулы этилена ( $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ) наводит на мысль, что существует множество углеводородов, при крекинге которых должен образоваться этилен. Первые промышленные установки по производству олефинов были спроектированы для использования этана и пропана. Как видно из табл. 5.1, этан и пропан с высокими выходами превращаются в этилен, а пропан, кроме того, с высоким выходом образует пропилен. В 1960-е годы в основном использовались эти два вида сырья. Однако специалисты предсказывали, что вследствие нехватки природного газа в 1970-е годы снизится его добыча, а вместе с ней — и производство этана. Пропан станет очень дорогостоящим, так как он будет служить заменой природному газу. Поэтому к концу 1970-х годов была разработана новая технология и построены установки крекинга более тяжелого сырья, включая нефть и газойли. В настоящее время около половины заводов по производству этилена

используют этан—пропановое сырье, а остальные — в основном нефту и газойль.

Таким образом, особенность производства этилена, отличающая его от других нефтехимических продуктов, — это широкий круг пригодных для использования видов сырья. Большая часть остальных продуктов привязана к одному или двум видам промышленного сырья. Многие компании организуют производство таким образом, что могут выбирать из целого ряда вариантов. Далее станет ясно, что экономические характеристики сырья являются важным параметром, управляющим производством олефинов.

**Таблица 5.1.** Выходы продуктов на установках по производству олефинов из различных видов сырья

Продукт	Выход, фунты на фунт сырья				
	Этан	Пропан	Бутан	Нафта	Газойль
Этилен	0,80	0,40	0,36	0,23	0,18
Пропилен	0,03	0,18	0,20	0,13	0,14
Бутен	0,02	0,02	0,05	0,15	0,06
Бутадиен	0,01	0,01	0,03	0,04	0,04
Топливный газ	0,13	0,38	0,31	0,26	0,18
Бензин	0,01	0,01	0,05	0,18	0,18
Газойль	—	—	—	0,01	0,12
Пек	—	—	—	—	0,10

### Технологическая схема

Крекинг этана и пропана проще, чем крекинг тяжелых жидкостей (газойля и нефти), и его следует рассмотреть в первую очередь. Когда этан нагревают до 1700°F (925°C), может пойти любая из двух основных реакций — разрыв связей углерод-водород или связей углерод-углерод. Есть известное изречение, применимое и к производству этилена: «Все, что может случиться, обязательно случается». Продукт крекинга этана зависит от того, какая именно связь расщепляется (рис. 5.1). Этилен получается в результате разрыва связей углерод-водород; метан — в результате разрыва связей углерод—углерод и присоединения атома водорода к образовавшемуся метильному радикалу. Даже ацетилен и водород могут образоваться и сохраниться в реакционной смеси до конца процесса. Однако если работа установки организована правильно, то основным продуктом должен быть этилен.

Крекинг пропана чуть сложнее, так как имеется больше вариантов образования различных фрагментов и их последующего сочетания. Конечными продуктами в данном случае могут быть не только этилен и метан,

но еще пропилен и, что самое интересное, этан. Разрыв связей углерод—водород в молекуле пропана дает пропилен, расщепление связей углерод—углерод приводит к этану и метану (после того, как метильный и этильный радикал присоединят по атому водорода), а разрыв и тех и других связей дает этилен. Этан также образуется на второй стадии, когда два метильных радикала соединяются друг с другом, а не с водородом. Вспомните: «Все, что может случиться...».

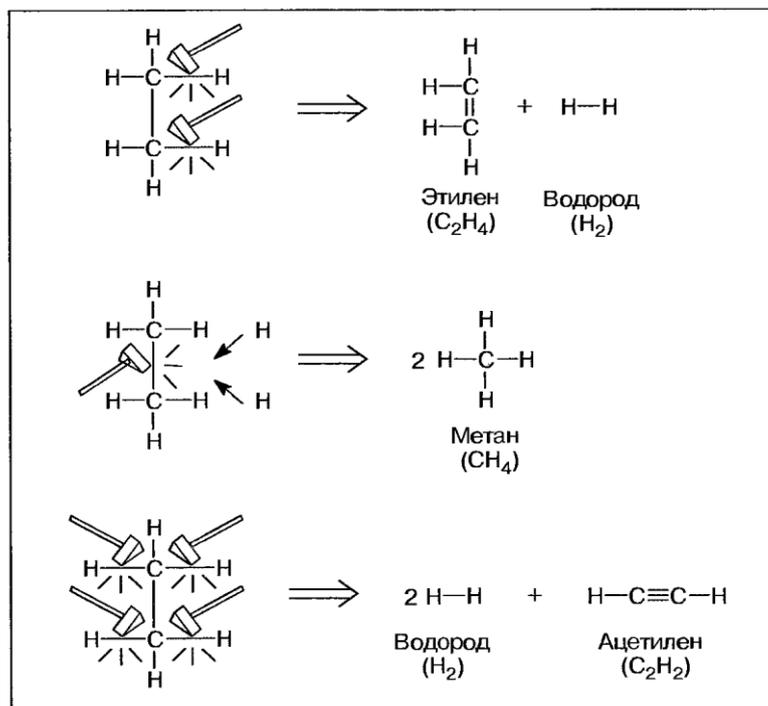


Рисунок 5.1. – Крекинг этана

В ходе крекинга нефти или газойля возможно бесконечное число комбинаций. Нефтя состоит из молекул углеводородов состава от C<sub>5</sub> до C<sub>...</sub>, газойль — от C<sub>...</sub> до (предположительно) C<sub>30</sub> или C<sub>40</sub>. Они могут содержать любые вещества, начиная от простых парафинов (алифатические соединения) до сложных полициклических ароматических соединений. Поэтому спектр молекул, которые могут образоваться, гораздо разнообразнее. Как видно из табл. 5.1, выходы этилена при крекинге нефти или газойля значительно ниже, чем при крекинге этана или пропана. Однако это обстоятельство компенсируется образованием целого ряда других углеводородов.

В случае C<sub>4</sub>- и C<sub>5</sub>-углеводородов появляется новый класс соединений. Это алифатические соединения, в молекулах которых имеется несколько двойных связей. Промышленно важными представителями этого класса являются бутadiен и изопрен, оба применяются как сырье для производства синтетического каучука.

Соединения группы БТК, описанные в двух предыдущих главах, образуются в основном при отрыве боковых цепей от имеющих в сырье

сложных молекул с ароматическими кольцами. Другие  $C_5$ — и  $C_6$ — углеводороды, а также более тяжелые продукты используются чаще всего как сырье для процессов нефтепереработки и как компоненты бензина. Многие из них являются гораздо более ценным сырьем, чем нефть или газойль. Поэтому, хотя это всего лишь побочные продукты, они вносят ощутимый вклад в экономическую эффективность эксплуатации установки. Действительно, многие компании строят установки крекинга тяжелых жидкостей как связующее звено между нефтеперерабатывающим заводом и нефтехимическими производствами.

### Оборудование

Установка для производства олефинов состоит из двух важнейших частей — узла пиролиза, или крекинга, и узла очистки, или перегонки. В качестве примера на рис. 5.2 показана установка крекинга этана, для которой требуется самый простой узел очистки. Узел пиролиза (от греческого *pyro* — огонь) состоит из газоотапливаемой печи, где и происходит крекинг. Этан проходит через лабиринт из труб диаметром 10—15 см, где он нагревается до  $1500^\circ\text{F}$  ( $800^\circ\text{C}$ ) и разлагается. Между прочим, этан нигде не соприкасается с пламенем (иначе он воспламенится), а находится внутри труб.

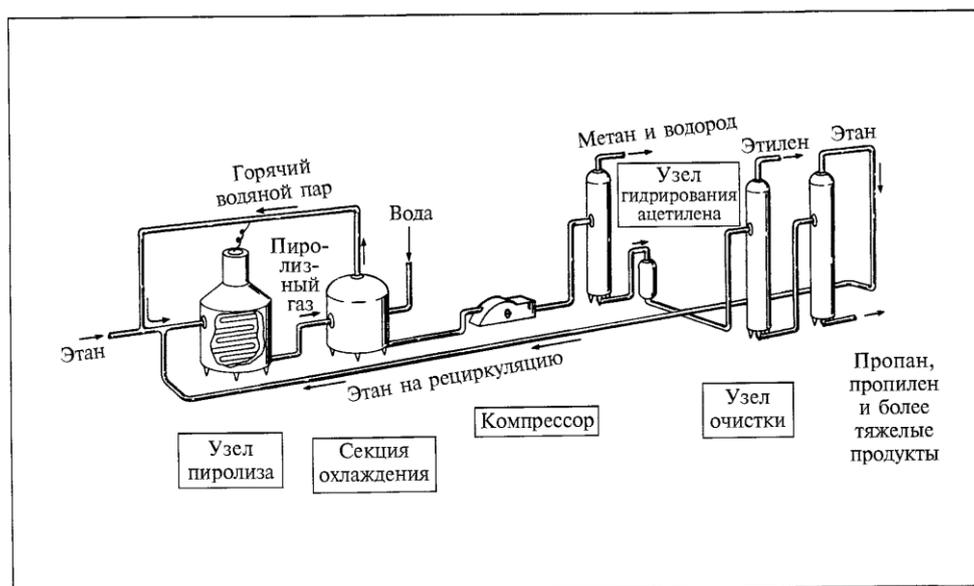


Рисунок 5.2. – Установка крекинга этана

Этан проходит через узел пиролиза с очень высокой скоростью. Продолжительность пребывания в реакторе отдельной молекулы составляет несколько секунд на старых установках и менее 100 мкс на новых. Большая скорость нужна для удержания процесса крекинга в нужных рамках, чтобы предотвратить разложение этана на метан или даже на кокс (углерод) и водород. Для более полного контроля процесса этан перед подачей в печь

смешивают с водяным паром. Пар играет двоякую полезную роль. Во-первых, он снижает температуру, необходимую для крекинга; это уменьшает затраты на топливо, а также количество образовавшегося метана и водорода. Во-вторых, при низкой температуре снижается образование кокса и его осаждение на внутренних стенках труб. Это избавляет от необходимости часто останавливать процесс, чтобы удалить кокс и предотвратить засорение и появление охлажденных участков. Отложения кокса действуют как изолятор, что не дает этану прогреться до температуры, необходимой для эффективного крекинга.

Когда горячий эфлюент (поток газов, выходящих из реакционного узла) покидает печь крекинга, его направляют в секцию охлаждения. Это необходимо, поскольку при высокой температуре крекинг будет продолжаться, подобно тому как бифштекс, снятый с решетки, некоторое время продолжает жариться. Поэтому газы немедленно охлаждают потоком воды. Тепло передается от газа к воде, заставляя воду испаряться; пар впоследствии отделяют от потока продукта и смешивают со свежим сырьем, поступающим в реактор.

Ниже приведен типичный состав пиролизного газа на этой стадии:

	Доля, мас.%
Метан и водород	8
Этилен	48
Этан	40
Пропан и более тяжелые продукты	4

Видно, что крекингу подвергается только 60% этана, 40% потока эфлюента составляет непрореагировавший этан. Таким образом, часть работы узла очистки направлена на отделение этана, который затем возвращается в процесс. Такой способ переработки сырья иногда называют злоеце — рециркуляция до уничтожения. В результате, хотя выход этилена в реакторе пиролиза составляет только 48%, благодаря рециркуляции этана после пиролиза и очистки достигаются следующие суммарные выходы:

	Выход, мас.%
Метан и водород	13
Этилен	80
Пропан и более тяжелые продукты	7

Продукт уже не содержит этана, ну а прочие изменения — чисто арифметические. Просто возьмите выходы продуктов после одного цикла, удалите 40% этана, а остальное разделите на 0,60, чтобы в сумме было 100%. В секции очистки на установке крекинга этана разделение газа можно осуществить двумя способами. Для фракционирования продукт должен быть

переведен в жидкое состояние. А так как все продукты — легкие газы, сжижение можно провести, либо увеличив давление в компрессоре, либо сильно снизив температуру в емкости, которая называется холодильной камерой. На установке, изображенной на рис. 5.2, реализован вариант с компрессором (даже в этом случае газы надо охлаждать, чтобы наверняка добиться сжижения).

После компрессора располагается ряд колонн фракционирования (как правило, это самые высокие сооружения на заводе по производству этилена), где в виде отдельных фракций получают смесь метана с водородом, этилен, этан, а также пропан и более тяжелые продукты.

Все оборудование должно быть металлическим и толстостенным, чтобы выдерживать высокие давления, и теплоизолированным, чтобы сохранять низкие температуры. На установке имеется также узел гидрирования ацетилена, или конвертор. Следы (очень малые количества) ацетилена, остающиеся в этилене, могут нарушить некоторые процессы с его участием — особенно это касается производства полиэтилена. Поэтому поток продуктов обрабатывают водородом над катализатором, чтобы превратить имеющееся малое количество ацетилена в этилен.

На первый взгляд кажется странным, что при крекинге этана в качестве конечных продуктов могут получиться пропан и более тяжелые вещества. Однако для этого имеются две причины. Во-первых, этан, используемый как сырье, редко оказывается чистым; он часто содержит немного пропана и более тяжелых веществ. Это и дает некоторое количество тяжелых продуктов. Нет смысла беспокоиться и тратить средства для получения чистого этанового сырья. С этой задачей легко справляется узел очистки олефинового завода. Во-вторых, в «мешанине» свободных радикалов и водорода в процессе крекинга все же образуется некоторое количество тяжелых углеводородов.

Крекинг более тяжелых видов сырья. Чем тяжелее сырье, поступающее на олефиновую установку, тем больше усложняется оборудование и тем оно дороже. Но технологическая схема (рис. 5.3) мало отличается от таковой для легкого сырья. На этой упрощенной схеме тяжелое жидкое сырье поступает в секцию пиролиза, где подвергается крекингу. Потом оно попадает в секцию охлаждения, где, естественно, охлаждается; далее идет секция разделения, где поток делится на составляющие.

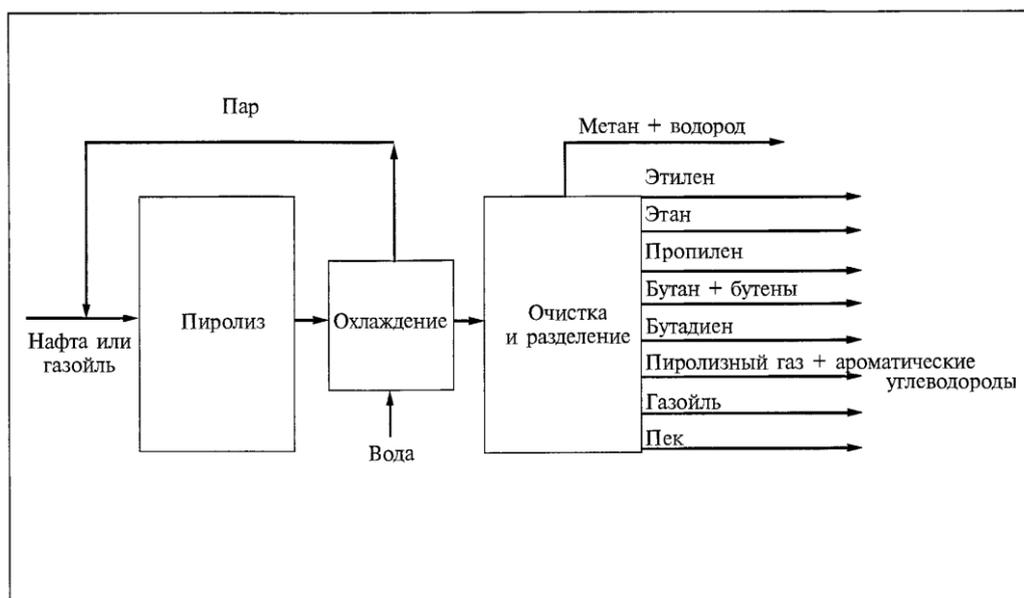


Рисунок 5.3. – Крекинг тяжелых жидкостей

Из рис. 5.4 ясно, что для крекинга более тяжелых жидкостей требуется намного больше оборудования, чем для крекинга этана и пропана. Как вы уже видели из табл. 5.1, выход этилена из тяжелого сырья гораздо ниже, чем из этана. Это означает, что для производства одного и того же количества этилена печи крекинга газойля должны переработать в пять раз больше сырья, чем печи крекинга этана. Технологам следует учитывать такие факторы, как размер труб, необходимый, чтобы разогреть требуемое количество сырья, оптимальное время пребывания в реакторе для каждого вида сырья и оптимальные условия – температура, давление и содержание пара.

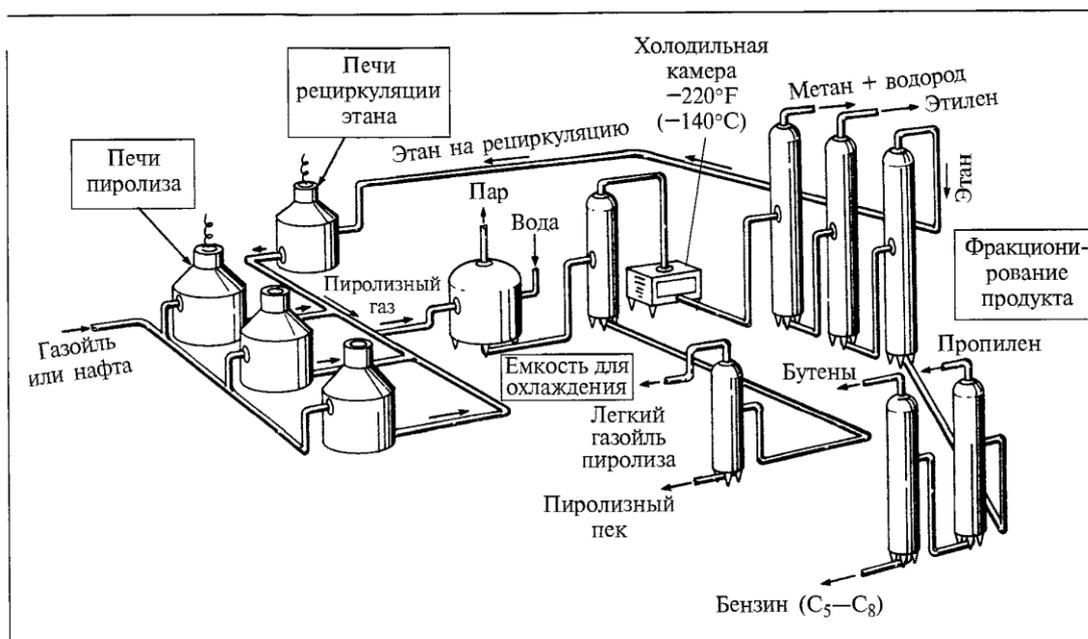


Рисунок 5.4. – Установка крекинга тяжелых жидкостей

Как видно из рис. 5.4, узел разделения на установке крекинга газойля выглядит как маленький нефтеперерабатывающий завод. Кроме ректификационных колонн и емкостей для обработки, которые присутствовали и на установке крекинга этана, в данном случае имеются также приспособления для разделения более тяжелых побочных продуктов. На входе в узел разделения находится холодильная камера, необходимая для сжижения газов. В этом мощном холодильнике достигается температура порядка  $-220^{\circ}\text{F}$  ( $-140^{\circ}\text{C}$ ). Фреоновое охлаждение непригодно для создания такой низкой температуры. В данном случае для охлаждения применяют жидкий воздух, метан, этилен или аммиак, подобно тому, как фреоны используются в кондиционерах.

Вы видите, что на рис. 5.4 появились некоторые новые потоки по сравнению с крекингом этана. Получение пропилена подробнее описано ниже в этой главе. Поток  $\text{C}_4$ -углеводородов — это смесь бутанов, бутенов и бутадиена. В зависимости от экономического предпочтения эту смесь можно обрабатывать по-разному и выделять различные продукты. Поток бензина  $\text{C}_5+$ , который называется бензином пиролиза, обычно подвергают мягкому гидрированию. Некоторые компоненты представляют собой высоко реакционноспособные олефины и диены (молекулы с двумя двойными связями), которые негативно сказываются на свойствах бензина, образуя осадки и лаковые отложения в автомобильных двигателях. Если эти олефины подвергнуть гидрированию, бензин пиролиза, имеющий высокое октановое число, станет хорошим компонентом для компаундирования бензина (см. главу 11, раздел «Бензол, поступающий с заводов по производству олефинов»). Этот продукт может быть также переработан на установке для получения ароматических соединений с целью удаления веществ группы БТК, на долю которых приходится до 10% потока. И даже после этого он все равно остается хорошим компонентом бензина.

Жидкие топлива, поступающие с олефиновых заводов, также отличаются избытком полициклических ароматических углеводородов (подобных тому, что изображен на рис. 2.1). Часто говорят о высоком содержании ароматики в этом продукте, что не совсем верно. Если оставить вопросы номенклатуры, стоит добавить, что по этой причине горючие качества пиролизного газойля и пиролизного пека довольно низки. Они дымят, коптят, образуют осадок; они имеют высокую вязкость, а большое содержание полициклических ароматических углеводородов вызывает подозрение, что они являются канцерогенами.

Всякий раз, когда крекингу подвергается что-то тяжелее этана или хотя бы пропана, установка должна иметь печь для потока рециркулирующего этана. Установка, схема которой изображена на рис. 5.4, включает три печи

для тяжелых жидкостей и одну — для этана. Поскольку альтернативным использованием этана является его применение в качестве топлива на нефтеперерабатывающем заводе, его выделение и крекинг обычно экономически более эффективны.

### *Параметры процесса*

Несмотря на множество аналитических статей в технических изданиях на эту тему, в действительности, когда установка уже построена, возможности изменения выходов продуктов при производстве олефинов ограничены. Дело в том, что при варьировании давления, температуры и длительности пребывания реакционной смеси в реакторе выходы основных продуктов изменяются в разных направлениях. Кроме того, изменчивость коммерческой ценности побочных продуктов — не лучший стимул к манипулированию выходами.

Более заметным фактором, влияющим на выход продуктов, является стоимость сырья. На многих заводах конструкция позволяет заменить один вид сырья на другой, например, использовать этан вместо пропана или нефть вместо газойля. В этих случаях заводские процессы реагируют на рынок сырья и продуктов, что отражается в изменении выходов продуктов, как указано в табл. 5.1.

### **Этилен**

Этилен — бесцветный газ со сладковатым запахом. Он переходит из жидкого состояния в газообразное (т.е. кипит) при  $-155^{\circ}\text{F}$  ( $-103,8^{\circ}\text{C}$ ). Он легко горит в присутствии кислорода, образуя светящееся пламя. В действительности, именно благодаря присутствию этилена в каменноугольном газе, этот газ широко использовали в газовых светильниках в XIX в. Остальные компоненты каменноугольного газа не дают света при горении. Лампы на природном газе и пропан-бутановые фонари нужно было закрывать кожухом для снижения доступа кислорода, чтобы проходило только неполное окисление. Горение этих веществ сопровождается свечением. При сжигании этилена сетка не требуется.

Поставки этилена — сложная задача. Поскольку это легкий газ, для его транспортировки в виде жидкости необходимы очень низкие температуры и высокое давление. Небольшое количество этилена перевозится автомобильным транспортом, для чего требуется специальное разрешение. При дальних перевозках водитель грузовика должен периодически выпускать часть этилена наружу, чтобы поддерживать достаточное охлаждение

оставшегося количества и, соответственно, приемлемое давление. Известно, что испарение любого газа сопровождается охлаждением. Если намочить палец и выставить его вверх, можно определить, в каком направлении дует ветер: с какой стороны палец будет охлаждаться, с той ветер и дует. Так происходит потому, что влага с вашего пальца испаряется, а это сопровождается охлаждением. Чтобы перейти из жидкого состояния в пар, влага должна забрать тепло из окружающих предметов (вашего пальца). Так и здесь, когда часть этилена выпускают из цистерны, он забирает тепло у оставшегося количества этилена. Если не удерживать температуру на достаточно низком уровне, давление этилена может опасно возрасти.

Изготовление и эксплуатация автомобильных цистерн для перевозки этилена стоят дорого. Наиболее существенными факторами затрат являются энергоёмкость процесса ожижения этилена и его высокие потери при закачке в цистерны. Поэтому большая часть этилена транспортируется по трубопроводам. Хотя стоимость эксплуатации трубопроводов невелика, затраты на их сооружение довольно высоки. Транспортировка по трубопроводам, как и большая часть работ с этиленом, капиталоемкая. Поэтому потребители этилена чаще всего располагаются в непосредственной близости от производителей.

Трубопроводы для транспортировки этилена больше похожи на газопроводы для природного газа, чем на нефтепроводы. Это естественно, ведь этилен перекачивается по трубам в виде газа, а не жидкости, причиной чего является его критическая температура. Здесь скрывается интересное физическое явление. Каждый газ характеризуется критической температурой, и если температура газа выше критической, то он не сжижается, как бы давление ни увеличивалось (объяснение этого явления весьма сложно, связано оно с атомным строением вещества). Критическая температура этилена равна 48,6°F (9,15°C). Трубопроводы для транспортировки этилена обычно залегают на глубине 10—15 футов (3—4,5 м) под землей, так что окружающая температура всегда находится в интервале 60-70°F (15—20°C). Этилен можно пропускать по трубам при очень высоком давлении — 700—800 psi (50—55 атм), и при этих давлении и температуре он представляет собой очень плотный газ, почти жидкость, но все же еще газ.

Хранение этилена тоже стоит недешево. Для небольших объемов (к примеру, грузовики-перевозчики на химическом заводе) обычно используют Цилиндрические или шарообразные цистерны. Однако необходимость поддерживать высокое давление при обычных температурах требует массивных и дорогих стальных емкостей. Для значительных количеств этилена — скажем, свыше 100 тыс. фунтов — используют криогенное хранение (от греческих *kryos* — холод и *gen* — создавать). Криогенные

цистерны гораздо легче и дешевле стальных. Их использование возможно благодаря сильному охлаждению этилена до температуры ниже критической (рис. 5.6). При этих условиях этилен находится в жидком состоянии, и для того чтобы он не испарялся, требуется совсем невысокое давление. Стоимость эксплуатации криогенных цистерн высока. Несмотря на то, что цистерну окружает толстый изолирующий слой, тепло все же проникает внутрь. Чтобы поддерживать температуру в цистерне ниже температуры кипения этилена, равной  $-155^{\circ}\text{F}$  ( $-103,8^{\circ}\text{C}$ ), некоторое количество паров этилена выводится из цистерны, проходит через узел охлаждения, где сжижается, и возвращается в цистерну. За счет изменения скорости прохождения потока через холодильник температура жидкого этилена остается на необходимом уровне независимо от температуры окружающей среды.

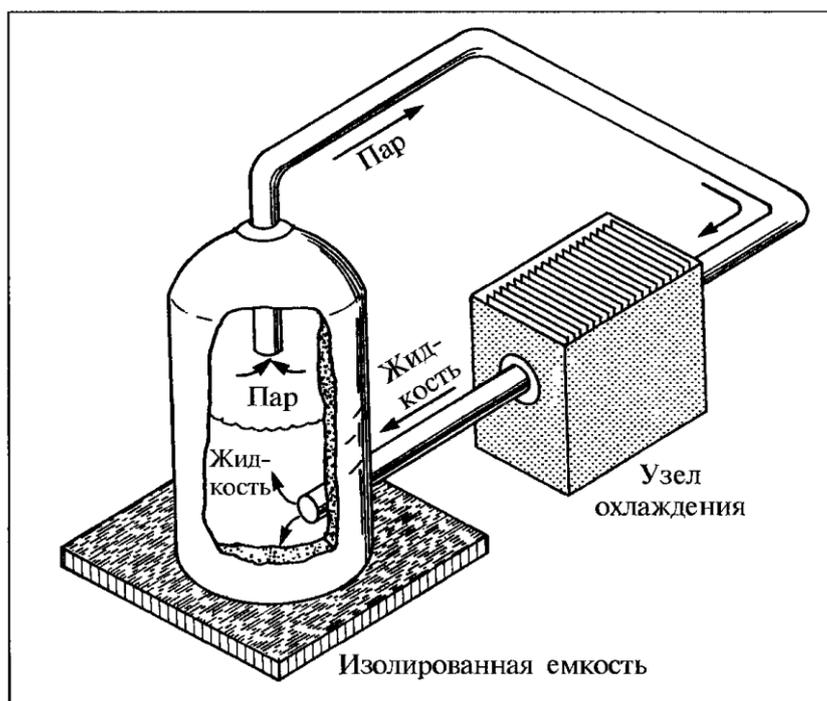


Рисунок 5.6. – Криогенное хранение этилена

В случае больших объемов этилена — порядка миллионов фунтов — очень эффективным и выгодным является подземное хранение. Этилен хранят в подземных полостях, возникающих в скальной, сланцевой или известковой породе, либо в «кувшинах», образовавшихся при вымывании соли в огромных соляных сводах, как показано на рис. 5.7.

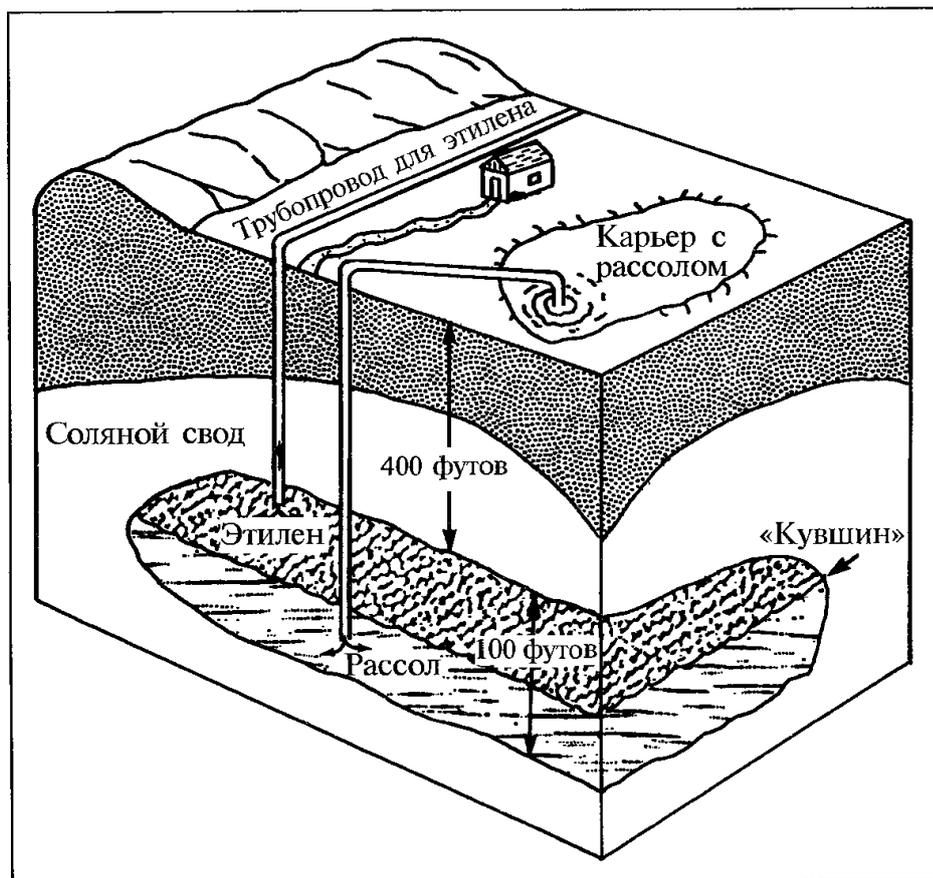


Рисунок 5.7. – Хранение этилена в соляном своде

При более простом способе хранения — в подземных «кувшинах» — этилен попадает внутрь и выходит наружу за счет вытеснения. Когда этилен поступает в «кувшин», он вытесняет оттуда рассол (соленую воду). Чтобы заставить этилен выходить из кувшина, туда закачивают соленую воду, которая, в свою очередь, вытесняет этилен. Как и любое сочетание углеводорода и воды, этилен и соленая вода не смешиваются. Таким образом, вода служит для сжатия этилена. Кувшины и полости обычно располагаются на глубине двух сотен футов под землей. Температура там постоянна, 65—70°F (18—20°C), и всегда выше критической температуры этилена. Тем не менее масса воды в стояке достаточна для того, чтобы этилен находился в сжатом состоянии при нормальной (не криогенной) температуре для транспортировки по трубопроводу.

Стоимость конструирования соляного кувшина ниже, чем стоимость хранения в горной полости, а последний вариант, в свою очередь, дешевле в расчете на фунт этилена, чем криогенное хранение или хранение под давлением.

До Второй мировой войны химические области применения этилена были ограничены по большей части производством этиленгликоля и этилового спирта. После войны возрос спрос на стирол и полиэтилен, что стимулировало производство этилена и строительство соответствующих заводов. В наши дни

список областей применения этилена читается как справочник «Что есть что» по нефтехимическим продуктам: полиэтилен, этилбензол, стирол, дихлорэтан, винилхлорид, этиленоксид, этиленгликоль, этанол, винилацетат,  $\alpha$ -олефины и линейные спирты — все это наиболее распространенные производные этилена, выпускаемые промышленностью. Бытовые продукты, которые получают из этих химикатов, можно сейчас встретить повсюду, начиная с мыла и стройматериалов и заканчивая пластиковыми изделиями и синтетическими моторными маслами.

## Пропилен

При комнатной температуре пропилен, как и этилен, представляет собой бесцветный газ. Он не менее горюч, чем так называемый «сжиженный нефтяной газ» (пропан-бутановая фракция). Действительно, пропилен можно использовать как заменитель или как дополнение к сжиженному нефтяному газу. Их характеристики как топлив практически неразличимы.

Промышленность выпускает пропилен трех марок: пропилен нефтепереработки, химический пропилен и пропилен для полимеризации, которые различаются соотношением пропилена и пропана в потоке. Пропилен нефтепереработки содержит около 50—70% основного вещества, химический — 90—92%, а пропилен для полимеризации — как минимум 99%. В каждом случае оставшиеся проценты приходятся на долю пропана.

Названия этих трех марок объясняются чисто практическими причинами. В первых двух случаях они указывают на способ получения пропилена. Пропилен нефтепереработки является, как правило, побочным продуктом каталитического крекинга на нефтеперерабатывающем заводе, а отношение пропилена к пропану определяется режимом крекинга, направленного на производство бензина, а не пропилена. Химический пропилен обычно производится на установке крекинга нефти или газойля. При большей части используемых рабочих режимов соотношение пропилен: пропан = 92: 8.

Некоторые области применения, в частности производство полипропилена, требуют особенно чистого пропиленового сырья. Пропилен для полимеризации получают просто фракционированием пропилена одной из менее чистых марок — пропилена нефтепереработки или химического.

Способы транспортировки пропилена являются более традиционными по сравнению с этиленом, но все равно дорогостоящими. В то время как этилен похож в этом отношении на природный газ, работа с пропиленом и его транспортировка сходны с таковыми для сжиженного нефтяного газа. При комнатной температуре пропилен следует хранить под давлением, чтобы он

не испарялся. Температура кипения пропилена равна  $-54^{\circ}\text{F}$  ( $-48^{\circ}\text{C}$ ), так что его охлаждение для хранения в жидком состоянии обходится довольно дорого.

Одинаково большие количества пропилена транспортируют по трубопроводам, в железнодорожных цистернах или автоцистернах. Во всех трех случаях пропилен находится в жидком состоянии под давлением около 200 psi (14 атм). Технология хранения больших объемов пропилена такая же, как и этилена, — в подземных полостях или кувшинах. Криогенный способ хранения используется редко, так как хранение пропилена в сжиженном состоянии под давлением не требует столь высокого давления, как в случае этилена. Широко распространено хранение в стальных емкостях, сферических (обычно 5—10 млн фунтов пропилена) или цилиндрических, в форме пули (200—500 тыс. фунтов).

В отличие от этилена, пропилен всегда производили в большем объеме, чем это требовалось для химической индустрии. Такая ситуация сложилась еще в начале XX в., когда на нефтеперерабатывающих заводах стали появляться установки термического крекинга. К началу Второй мировой войны установки каталитического крекинга производили большие объемы пропилена в качестве побочного продукта, и перед химиками встала задача разработки способов применения пропилена как в нефтехимии, так и в нефтепереработке. В итоге большое количество пропилена с тех пор используется в производстве бензина. Самым распространенным процессом является алкилирование, при котором пропилен реагирует с изобутаном в присутствии серной или плавиковой кислоты, образуя высокооктановый C<sub>7</sub>-углеводород. Этот продукт называется алкилатом и имеет октановое число порядка 96, так что является хорошим компонентом бензина.

Пропиленовым аналогом полиэтилена является полипропилен. На долю полипропилена приходится около 25% от общего объема производимого пропилена. Прочие наиболее значительные области его применения — производство пропиленоксида, изопропилового спирта, кумола и акрилонитрила. Известные вам бытовые продукты на основе этих веществ встречаются повсеместно — это ковры, веревки, ткани, пластмассовые детали в автомобилях, бытовые электроприборы, игрушки, спирт для протирки, краски и эпоксидный клей.

## Резюме

Этилен (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) и пропилен (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) — одновременно самые «маленькие» и самые «крупные» нефтепродукты. Они производятся в наибольшем объеме, но при этом имеют простейшую структуру (по крайней мере, этилен). Самое

привлекательное их свойство — наличие двойной связи между двумя атомами углерода, благодаря которой они являются химически активными веществами.

Крекинг крупных молекул углеводородов обычно приводит к образованию олефинов, молекул с двойными связями. Поэтому установки каталитического и термического крекинга на нефтеперерабатывающих заводах является источником этилена и пропилена. Однако наиболее важный источник этих углеводородов — заводы по производству олефинов, где этилен и пропилен образуются как целевые продукты в результате крекинга одного или нескольких веществ: этана, пропана, бутана, нефти, газойля. Выбор вида сырья зависит как от конструкции установки, так и от рыночной цены сырья.

На олефиновых заводах сырье нагревается в крекинг печах до очень высокой температуры на короткое время, а затем резко охлаждается для остановки крекинга. Для отделения олефинов от побочных продуктов необходимо сложное оборудование.

При комнатной температуре и этилен, и пропилен представляют собой газы; они должны храниться в закрытых системах под давлением. Список химических веществ, которые производятся из этих двух строительных блоков, весьма обширен.