



Авторский коллектив РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина  
под руководством к.т.н. Л.Н. Багдасарова

**О ПЕРЕРАБОТКЕ  
НЕФТИ –  
ДОСТУПНО  
И БЕЗ СЛОЖНОСТЕЙ**

# **ПОПУЛЯРНАЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА**

Авторский коллектив РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина  
под руководством к.т.н. Л.Н. Багдасарова

# ПОПУЛЯРНАЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА

При поддержке компании «Газпром нефть»  
и Московского нефтеперерабатывающего завода

2017

**Багдасаров Леонид Николаевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии смазочных материалов и химмотологии факультета химической технологии и экологии Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина.

Окончил с отличием Ташкентский автодорожный институт по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Книга «Популярная нефтепереработка» предназначена современным автолюбителям – покупателям бензинов и дизельных топлив. В простой и доступной не специалистам форме книга рассказывает об особенностях состава и свойств современных моторных топлив, а также о технологии их производства. Информационной основой книги является учебная дисциплина, которая читается студентам в Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина – «Химмотология». Этот термин, не самый известный широкой общественности, объединяет несколько научных направлений и может быть расшифрован как «теория и практика рационального производства и применения нефтепродуктов». За прошедшие пять-шесть лет в этом направлении в России усилиями нефтепереработчиков достигнуты очень большие успехи, качество нефтепродуктов в стране резко улучшилось. Именно поэтому авторы книги считают, что эта очень важная информация должна стать достоянием широкого круга потребителей топлив и просто любознательных читателей.

**Оглавление**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. НЕФТЬ КАК ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ И НЕОБХОДИМОСТЬ ЕЕ ПЕРЕРАБОТКИ.....	7
1.1. Химический состав нефти и ее энергетические характеристики.....	8
1.2. Основные цели и задачи переработки нефти.....	13
Глава 2. ПЕРВИЧНАЯ ПЕРЕРАБОТКА НЕФТИ – ОЧИСТКА И РАЗДЕЛЕНИЕ.....	17
2.1. Обезвоживание и обессоливание нефти.....	18
2.2. Разделение нефти на фракции.....	22
Глава 3. УГЛУБЛЕНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ.....	29
3.1. Висбрекинг и коксование.....	30
3.2. Процессы каталитического крекинга.....	37
3.3. Гидрокрекинг.....	42
Глава 4. УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА МОТОРНЫХ ТОПЛИВ.....	47
4.1. Изомеризация легких бензиновых фракций.....	48
4.2. Каталитический риформинг.....	51
4.3. Гидроочистка керосиновых и дизельных фракций.....	54
4.4. Гидродоочистка бензиновых и дизельных фракций после каталитического крекинга.....	57
Глава 5. СИНТЕЗ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ БЕНЗИНОВ И ПРИСАДОК для моторных топлив.....	59
5.1. Алкилирование и олигомеризация.....	60
5.2. Производство МТБЭ и ТАМЭ.....	65
5.3. Присадки для улучшения качества топлив.....	67
Глава 6. СОВРЕМЕННЫЕ ДВИГАТЕЛИ, ТРЕБОВАНИЯ К НИМ И ТОПЛИВАМ ДЛЯ НИХ.....	71
6.1. Требования к бензинам и бензиновым двигателям.....	72
6.2. Требования к дизельным топливам и дизельным двигателям.....	84
6.3. Требования к топливам для авиационных газотурбинных двигателей.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	101
ГЛОССАРИЙ.....	102



## Введение

Автомобиль стал верным спутником человека более ста лет назад. Все эти годы автомобиль непрерывно совершенствовался. Причем скорость внедрения этих совершенствований непрерывно возрастала. Сегодня в условиях жесточайшей конкуренции производители автомобилей почти ежегодно меняют модельные ряды, внедряют новые двигатели, коробки передач, электронные системы управления. А что же бензин? Или дизельное топливо? Сто лет назад это были просто обычные фракции нефти, то есть просто отогнанные из нефти простой дистилляцией ее части. Качество топлива зависело только от качества добытой нефти.

Бензин и дизельное топливо сегодня так же отличаются от бензина и дизельного топлива, выпущенных сто лет назад, как «жестянка Лиззи» – простейший автомобиль Генри Форда – отличается от напигованных электроникой и автоматикой современных монстров. Достаточно сказать, что в современном бензине уже нет компонентов, не прошедших трансформацию в процессе переработки нефти, нет прямогонных фракций. Цель всех этих трансформаций – сделать автомобиль экономичнее, надежнее и экологичнее.

Каждый уважающий себя автомобилист считает себя экспертом в области конструкции и эксплуатации автомобиля. Он неплохо разбирается в том, каким должен быть внешний вид автомобиля, какими должны быть фары, шины, сиденья, как должны работать двигатель и коробка передач, но мало кто знает, из чего все-таки состоит бензин и какими усилиями огромных коллективов нефтепереработчиков это достигается.

Современный нефтеперерабатывающий завод – несколько сложных последовательных технологических цепочек, каждая из которых заканчивается производством определенного компонента товарного топлива или других нефтепродуктов. Каждое звено цепочки – технологическая установка – имеет определенное назначение. Завершающим звеном является смешение компонентов в необходимых пропорциях для обеспечения соответствия всем техническим и экологическим требованиям.

Еще одна важная задача – при изготовлении экологически чистых топлив не оказывать вредного воздействия на природу и человека в процессе самого производства. Решение этой задачи достигается огромными капиталовложениями в совершенствование технологических процессов, снижение выбросов в атмосферу, исключение выбросов в водные бассейны и почвы. Идеальный вариант – создание полностью замкнутого производства.

Цель настоящей книги – просто и доступно рассказать о том, как нефть превращается в автомобильные топлива и как затем химическая энергия топлив превращается в полезную и необходимую для нас работу – движение миллионов автомобилей.

Для достижения этой цели мы расскажем обо всех технологических процессах и даже покажем, из чего состоят топлива и что с ними происходит в двигателях.

Автомобиль делает жизнь современного человека чрезвычайно комфортной – в любую погоду и в любое время можно быстро и удобно добраться на работу и с работы, слушая музыку или новости, ведя переговоры по громкой связи или беседуя с попутчиком. Автомобиль делает приятной и необременительной процедуру покупок, а отдых человека становится многократно интереснее и насыщеннее. Проблема только в одном – автомобилей становится слишком много, а их выбросы являются самым опасным воздействием на окружающую среду. Снизить это воздействие – важнейшая цель всего человечества. И этому также посвящена наша книга.

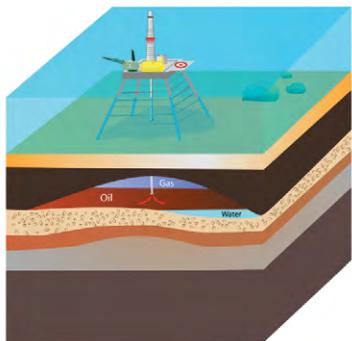
## ГЛАВА I.

# Нефть как источник энергии и необходимость ее переработки

*Номинальный уровень масла*

## 1.1. Химический состав нефти и ее энергетические характеристики

**Н**ефть представляет собой уникальное природное ископаемое – жидкую смесь углеводородов различной структуры и свойств, залегающих в пористых горных породах. Как правило, эти пропитанные нефтью пористые горные породы окаймлены сверху непроницаемыми для жидкостей породами, а снизу – водоносными пластами. В результате бурения скважин сквозь непроницаемые породы нефтяникам удается поднимать на поверхность значительную часть жидкости. Эта жидкость – ценнейший источник энергии для всего человечества.



Пористые горные породы окаймлены сверху непроницаемыми породами, а снизу – водоносными пластами

Ежегодно в мире добывается более 4,2 млрд тонн нефти. Большая часть нефти расходуется на производство топлив для автомобильных двигателей – бензиновых и дизельных. Сегодня в мире насчитывается почти 1,1 млрд автомобилей, и для них ежегодно производится свыше 1,0 млрд тонн автомобильного бензина и почти 1,5 млрд тонн дизельного топлива (включая дизтопливо для корабельной, сельскохозяйственной, строительной, военной и промышленной техники). И это далеко не предел – ежегодно в мире продается 100 млн единиц новой моторной техники и растет потребление бензина и дизельного топлива. По различным оценкам, к 2035 году в мире будет ежегодно потребляться свыше 1,2 млрд тонн бензина и до 1,8 млрд тонн дизельного топлива.

Автомобиль делает жизнь человека чрезвычайно комфортной. По количеству автомобилей на 1000 жителей оценивают уровень экономического развития страны. В США насчитывается около 750 автомобилей на 1000 жителей, в Российской Федерации – почти

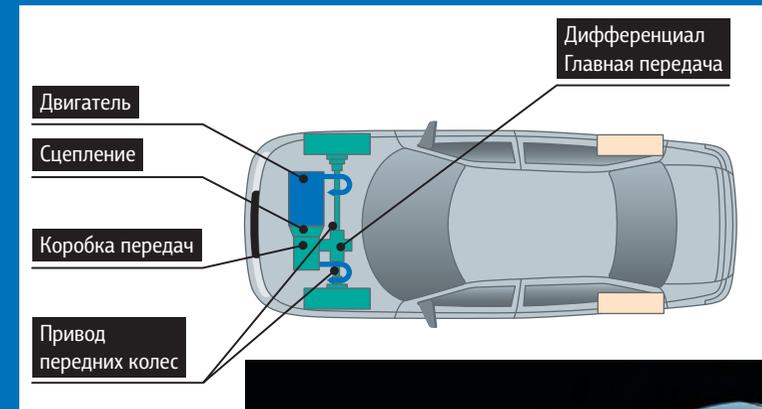


Рис. 1. Динамическая цепочка переднеприводного автомобиля

*Главное требование к новым автомобилям – минимизация вредных выбросов.*



300, в Китае – почти 150. Кроме того, огромное значение имеет потребление бензина на душу населения: в США оно превышает 1000 кг на человека в год, в России – почти 250 кг, в Китае – менее 100 кг.

Огромная востребованность нефтяных топлив объясняется их энергетической эффективностью и экологическими показателями. При сгорании в двигателях нефтяные топлива быстро отдают большое количество энергии и при этом выделяют минимальное количество вредных и опасных веществ. В основном – свыше 99% – выбросы представляют собой водяной пар и углекислый газ. Тем не менее большое количество автомобилей в городах делает их главным источником загрязнения воздуха. Отсюда главное требование к новым автомобилям – минимизация вредных выбросов, в том числе относительно безопасного углекислого газа, который в больших количествах вызывает в масштабах всего земного шара так называемый парниковый эффект.

Если бы топливом в двигателях служил водород – тогда выбросы представляли бы собой только водяной пар и автомобили были бы абсолютно безвредны (если не считать канцерогенной шинной пыли). В будущем так и произойдет. А пока водородные двигатели слишком дороги: водород чрезвычайно взрывоопасен, и для его хранения и транспортировки требуется слишком громоздкое оборудование. Поэтому человечество пока применяет в качестве топлива углеводороды – соединения углерода с водородом, которые относительно безопасны. Их главным источником служат нефть и газ. Чем больше в углеводороде водорода – тем он ценнее с энергетической и экологической точки зрения. Таким образом, самый ценный углеводород – метан (природный газ), в котором содержится 25% масс водорода. При его сгорании выделяется меньше всего углекислого газа на единицу получаемой энергии.

Однако природный газ тоже требует достаточно сложного оборудования для его эффективного применения в автомобильных двигателях. Жидкие углеводороды значительно проще перевозить и сжигать в двигателях на различных режимах их работы. Поэтому именно жидкие топлива наиболее распространены. Жидкими при обычных условиях – атмосферном давлении и комнатной температуре – являются углеводороды с пятью атомами углерода в молекуле (пентаны) и больше. На рисунке 2 представлено схематическое изображение молекулы *нормального гексана* – углеводорода с шестью атомами углерода в молекуле. Общая формула насыщенных водородом углеводородов (алканов) –  $C_nH_{2n+2}$ . По мере увеличения числа атомов углерода в молекулах углеводородов повышается температура их кипения и уменьшается содержание в них водорода.

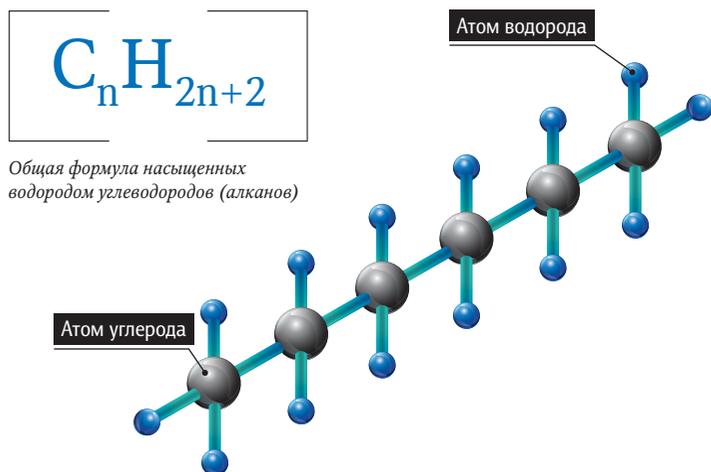


Рис. 2.  
Структура молекулы нормального гексана  $C_6H_{14}$

Зная атомную массу водорода и углерода (1 и 12 соответственно), нетрудно подсчитать количество водорода в различных углеводородах:

УГЛЕВОДОРОД	% МАСС;
пентаны	16,67
гексаны	16,28
гептаны	16,00
октаны	15,79
нонаны	15,63
деканы	15,49 и т.д.

При сгорании 1 кг водорода выделяется 143 060 кДж энергии, при сгорании 1 кг углерода – 33 520 кДж, то есть в 4,27 раза меньше.

В нефти кроме алканов имеются еще и углеводороды циклического строения – алкены (или нафтены) – с общей формулой  $C_nH_{2n}$ . На рисунке 3 представлено схематическое строение молекулы *циклогексана*. К нафтеновым относятся и углеводороды, в которых к кольцу присоединены один или несколько «хвостов» – линейных или разветвленных – с одним или несколькими атомами углерода в цепочке. Чем больше «хвостов» (их называют алкильными радикалами), тем больше водорода в молекуле нафтенового углеводорода. Например:

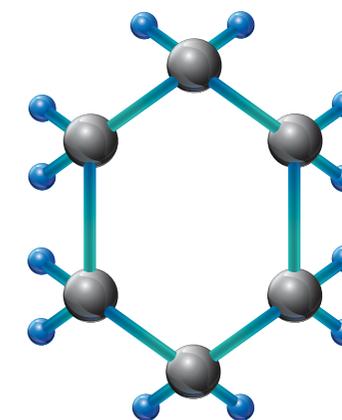
УГЛЕВОДОРОД	% МАСС;
циклопентан	14,29
циклогексан	14,29
метилциклогексан	13,40
этилциклогексан	13,51
пропилциклогексан	13,60

ⓘ В среднем в нафтенах водорода на 2% меньше, чем в алканах, но с точки зрения получения энергии получается, что нафтены почти на 9% хуже.



При сгорании 1 кг водорода выделяется 143 060 кДж энергии, при сгорании 1 кг углерода – 33 520 кДж, то есть в 4,27 раза меньше.

Рис. 3.  
Структура молекулы циклогексана  $C_6H_{12}$



Общая формула углеводородов циклического строения – алкены (или нафтены)

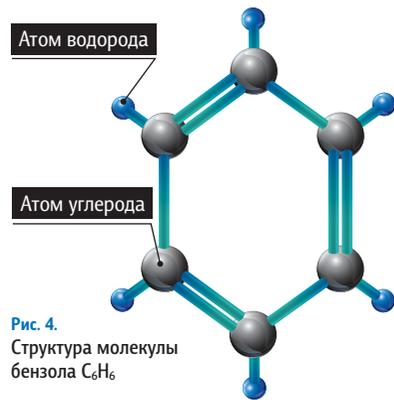


Рис. 4.  
Структура молекулы бензола  $C_6H_6$

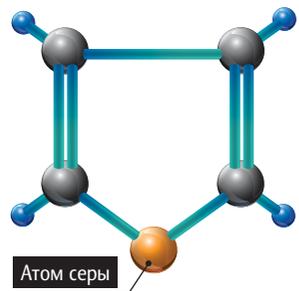


Рис. 5.  
Структура молекулы тиофена  $C_4H_4S$

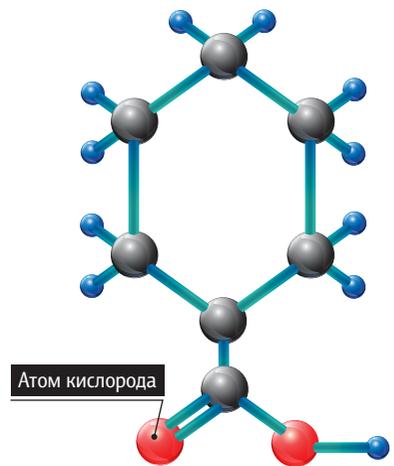


Рис. 6.  
Структура молекулы нафтеновой кислоты  $C_6H_{10}COOH$

В нефти имеется большое количество ароматических углеводородов (или аренов). На рисунке 4 представлено схематическое строение молекулы бензола.

К ароматическим относятся и углеводороды, в которых к бензольному кольцу присоединены алкильные радикалы («хвосты») – одни или несколько с одним или более атомом углерода в цепочке. Чем больше «хвостов», тем больше в молекуле ароматического углеводорода водорода:

АРОМАТИЧЕСКИЙ УГЛЕВОДОРОД	% МАСС:
бензол	7,69
метилбензол (толуол)	8,70
диметилбензолы (ксилолы)	10,28
этилбензол	9,43

Поскольку в ароматических углеводородах водорода в среднем на 8% меньше, чем в алканах, при их сгорании выделяется на 35% меньше энергии.

Кроме углеводородов в нефти содержатся соединения углеводородов с серой (рис. 5) или кислородом (рис. 6). Соединения, содержащие серу, при сгорании образуют *сернистый ангидрид* ( $SO_2$ ) или *серный ангидрид* ( $SO_3$ ), которые могут привести к коррозии деталей двигателя и вредны для окружающей среды. Соединения кислорода могут вызвать смолистые отложения в двигателе, далее переходящие в лаки или нагары, нарушающие нормальную работу двигателей. Соединения серы и кислорода удаляют из топлив в процессе переработки нефти и очистки.

❗ Самый простой способ определить качество нефти – определить ее плотность. Чем ниже плотность нефти, тем больше в ней водорода и тем она ценнее. Еще один важный показатель – содержание серы. Чем меньше в нефти серы – тем она ценнее.

## 1.2. Основные цели и задачи переработки нефти

Нефть подвергают первичной очистке еще в процессе добычи. Дело в том, что в добываемой нефти содержится большое количество воды, различных газов, минеральных солей и механических примесей. Транспортировать такую нефть невыгодно, да и невозможно. Поэтому прямо на промыслах нефть сначала очищают от газов, потом удаляют воду, соли и механические примеси. Полностью очистить нефть от нежелательных примесей в условиях промысла очень сложно, поэтому окончательную очистку проводят на нефтеперерабатывающих заводах, куда нефть доставляют по магистральным нефтепроводам (реже – железнодорожным или автомобильным транспортом). На некоторые НПЗ, расположенные в морских или речных портах, нефть доставляют специальными судами – танкерами.

Прямо на промыслах нефть сначала очищают от газов, потом удаляют воду, соли и механические примеси



Важнейшей характеристикой нефти (кроме плотности и содержания серы) является *фракционный состав*. Обычно из нефти на НПЗ выделяют следующие фракции:

28–200 °С	бензиновая
200–300 °С	керосиновая
300–360 °С	дизельная
выше 360 °С	остаток атмосферной перегонки или прямогонный мазут

Керосиновая фракция может быть использована как для производства авиационного топлива для газотурбинных двигателей (авиакеросина), так и для производства дизельного топлива.

В основе всех методов определения фракционного состава нефти и нефтепродуктов лежит процесс испарения и последующей конденсации паров углеводородов (перегонка или дистилляция) с отбором отдельных фракций. Кстати, эти же процессы лежат в основе нефтепереработки. Для исследовательских целей фактическую разгонку нефти в последние годы все чаще заменяют имитированной дистилляцией с помощью газового хроматографа. Этот прибор позволяет расшифровывать химический состав нефти и далее, используя известные сведения о температурах кипения всех углеводородов, строит кривую ИТК (истинных температур кипения) нефти.

Суммарное содержание в нефти бензиновой, керосиновой и дизельной фракций называют содержанием светлых углеводородов.

Объясняется это очень просто – эти фракции представляют собой абсолютно прозрачные подвижные жидкости очень светлого цвета. Содержание светлых углеводородов является важнейшей технологической характеристикой нефти.

На заре развития нефтепереработки основным продуктом переработки нефти был осветительный керосин – выделенная из нефти фракция, которую не подвергали никакой очистке. Керосином заправляли керосиновые

лампы – простейшие осветительные устройства. Лампу изобрел в 1853 году польский аптекарь Игнаций Лукаевич, она была значительно удобнее применявшихся до того свечей или лампад. Собственно изобретение керосиновой лампы и привело к созданию нефтяной промышленности и нефтепереработки.

Качество керосина целиком зависело от химического состава выделенной из нефти фракции. Чем больше во фракции было алкановых и нафтеновых углеводородов (а значит, и водорода), чем меньше было во фракции ароматических углеводородов, а также сернистых и смолистых (кислородсодержащих) веществ, тем ярче горела керосиновая лампа, тем меньше она коптила и меньше было неприятных запахов. Да и расход керосина был меньше. Для того чтобы покупатели приобретали керосин, сделанный из высокосернистых нефтей, его стали очищать при помощи серной кислоты (купоросного масла). Парафиновые и нафтеновые углеводороды не реагируют с серной кислотой, а вот все другие углеводороды, а также гетеросоединения (в молекулах которых кроме углерода и водорода присутствуют атомы других элементов) – реагируют и выпадают в осадок. В результате из плохой нефтяной фракции получался очищенный керосин, качество которого было выше, чем неочищенного из хорошей фракции. Правда, при этом получался отход (осадок) и выход товарного продукта сокращался. Но, во-первых, плохая нефть стоила дешевле, а во-вторых, очищенный керосин стоил дороже. Так нефтеперегонный завод стал еще и нефтеочистительным, то есть нефтеперерабатывающим (по-английски – *refinery*, от *refine* – *очищать*).

В принципе современный нефтеперерабатывающий завод делает то же самое – разделяет нефть на фракции и очищает их до заданных параметров. Только для этого применяются чрезвычайно мощные и сложные технологические установки (кстати, кроме очистки современные НПЗ ведут еще и синтез новых продуктов, которых в нефти не было). Стоимость сооружения таких установок составляет сотни миллионов долларов, а их эксплуатация требует очень высокой квалификации персонала. Эти установки позволяют производить десятки тысяч тонн топлив в сутки – и только так можно обеспечить постоянно возрастающий спрос: количество автомобилей непрерывно растет, и топлива они требуют значительно больше, чем керосиновые лампы.



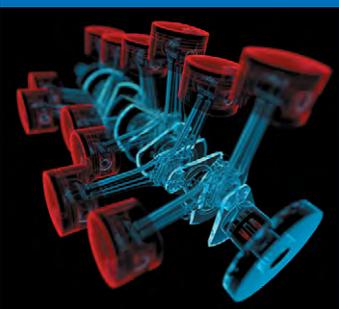
Изобретение керосиновой лампы и привело к созданию нефтяной промышленности и нефтепереработки

**Современный нефтеперерабатывающий завод разделяет нефть на фракции и очищает их до заданных параметров**



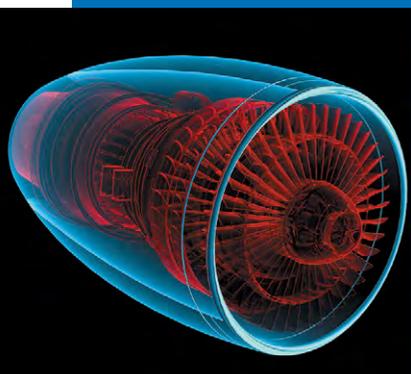
Суммарное содержание в нефти бензиновой, керосиновой и дизельной фракций называют содержанием светлых углеводородов.





Первый бензиновый двигатель был изобретен в 1876 году, и уже в 1906 году в США бензина было продано больше, чем осветительного керосина.

Первый дизельный двигатель был построен в 1897 году, но только в 1956 году производство дизельных топлив в мире превысило производство бензинов.



Первый реактивный газотурбинный двигатель был построен в годы Второй мировой войны, и сегодня трудно представить себе жизнь современного человека без реактивной авиации. Конечно, реактивных и турбовинтовых двигателей значительно меньше, чем автомобильных, и производство авиационных топлив (керосинов) по объему уступает бензинам и дизельным топливам. Тем не менее в год в мире потребляется свыше 300 млн тонн авиакеросинов.

---

Итак, основная цель переработки нефти – производство топлив для современных двигателей. Она достигается разделением нефти на фракции и очисткой этих фракций.

---

Главные задачи при этом – относительно невысокая себестоимость получаемых топлив, минимальное воздействие процессов нефтепереработки на окружающую среду, обеспечение промышленной безопасности, минимизация отходов и требуемый уровень качества нефтепродуктов.

В следующих главах книги мы ознакомимся с основными стадиями технологических процессов переработки нефти и качеством нефтепродуктов подробнее.

## ГЛАВА 2.

# Первичная переработка нефти – очистка и разделение

## 2.1. Обезвоживание и обессоливание нефти

Нефть, поступающая на НПЗ по системе магистральных нефтепроводов, может содержать до 3600 мг/л солей, до 1,0% масс воды и до 0,05% масс механических примесей. Если при транспортировке такое количество примесей не очень опасно, при переработке нефти на НПЗ могут произойти необратимые последствия.

Вся поступающая на НПЗ нефть закачивается в *сырьевые резервуары*. Они представляют собой вертикальные стальные цилиндры емкостью от 5 тыс. до 50 тыс. м<sup>3</sup>. Внутри каждого резервуара имеется специальный понтон, предотвращающий испарение и потери легких углеводородов при хранении и перекачке. В сырьевых резервуарах происходит частичное отстаивание нефти с выпадением в осадок воды, солей и механических примесей. Но этого недостаточно (рис. 7).

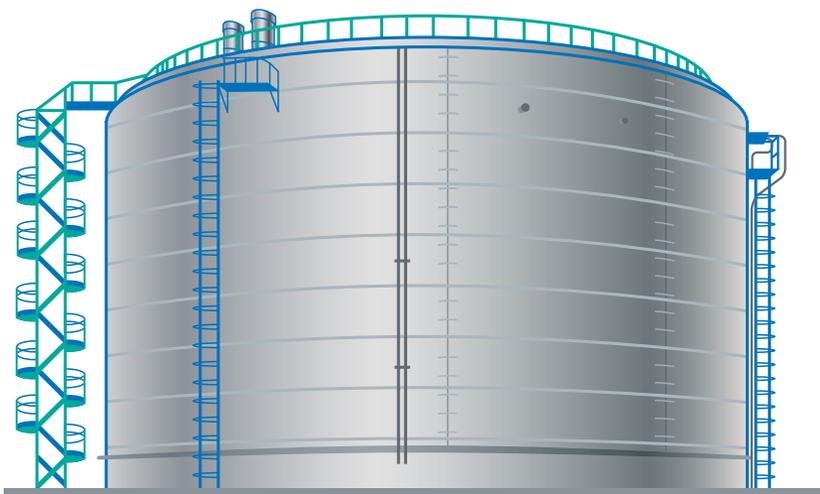


Рис. 7.  
Внешний вид РВС (резервуар вертикальный стальной)

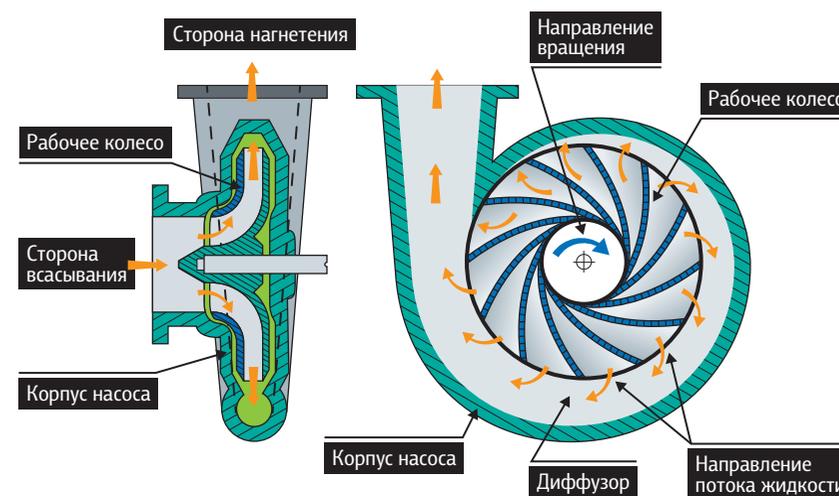


Рис. 8.  
Схема работы центробежного насоса

Высокое содержание в нефти солей может привести к ускоренной коррозии стальной аппаратуры, и уже через сто дней придется осуществлять ее замену, а для этого останавливать технологический процесс (который на НПЗ не прекращается на протяжении как минимум двух лет).

Высокое содержание в нефти воды может вызвать при переработке резкое увеличение давления – вплоть до взрыва (попробуйте капнуть водой на раскаленную сковороду с маслом). Механические примеси могут вызвать эрозию подвижных частей насосов и проточных частей трубопроводов, а также привести к образованию отложений во внутренних полостях аппаратуры.

Основными перекачивающими агрегатами на НПЗ являются *центробежные насосы*. Эти насосы обеспечивают наиболее высокий КПД при перекачке маловязких жидкостей, отличаются высокой надежностью, просты в обслуживании (рис. 8).

В нефти, поступающей на переработку, содержание солей не должно превышать 5 мг/л, содержание воды – не более 0,1% масс, а механических примесей вообще быть не должно. Поэтому первой стадией переработки нефти на НПЗ всегда является обезвоживание и обессоливание. Поскольку нефть и вода нерастворимы друг в друге, при их смешении образуются эмульсии.

Эмульсии – гетерогенные системы, состоящие из двух жидкостей, одна из которых диспергирована в другой в виде мелких капелек (глобул) размером более 0,1 мм.

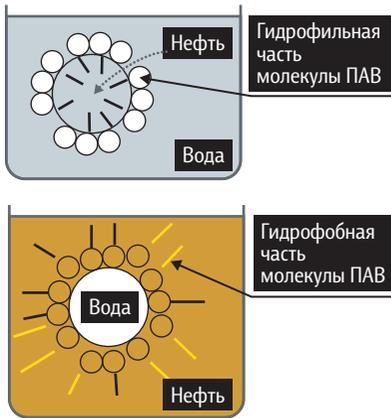


Рис. 9. Схема глобулы эмульсии воды в нефти и глобулы нефти в воде

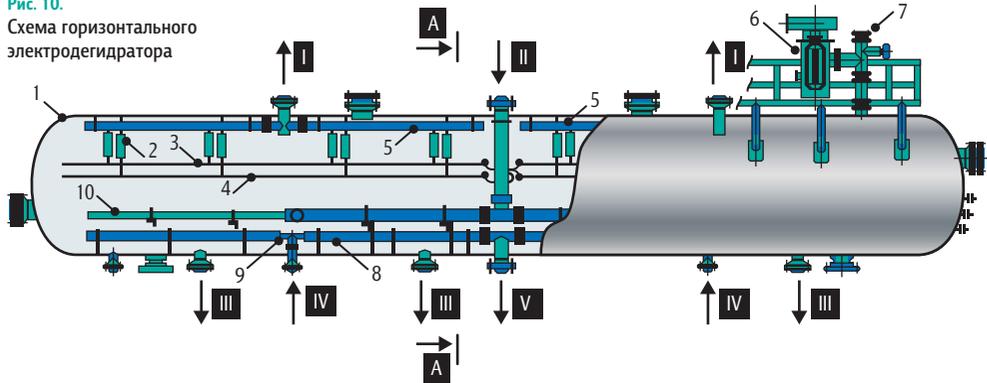
Примером прямой эмульсии, с которой мы имеем дело каждый день, причем эмульсии очень стабильной, является молоко (это эмульсия жира в воде). Эмульсия воды в нефти – обратная эмульсия. Устойчивость эмульсии воды в нефти зависит от содержания в нефти природных веществ – стабилизаторов эмульсии. Молекула стабилизатора имеет олеофильную часть, которая хорошо растворяется в нефти, и гидрофильную, которая удерживается на поверхности глобулы. Таким образом, вокруг капельки воды образуется слой эмульгатора, который удерживает капельку воды в объеме нефти и не дает капелькам воды соединиться и выпасть

из нефти под действием силы тяжести (плотность воды выше плотности нефти).

Для того чтобы разрушить эмульсию воды в нефти, ее подогревают, вводят в ее состав специальные вещества – деэмульгаторы и создают мощное переменное электрическое поле. Повышение температуры снижает вязкость нефти и увеличивает разность плотностей воды и нефти. Деэмульгаторы – поверхностно-активные вещества (ПАВ), которые разрушают глобулы и позволяют им соединиться. Мощное переменное электрическое поле активизирует перемещение капелек воды вдоль линий силового поля, они соударяются, укрупняются, и вода выпадает из нефти вниз.

Комплексный аппарат, в котором происходят одновременно все три процесса, называется *горизонтальным электродегидратором*

Рис. 10. Схема горизонтального электродегидратора



1 – корпус, 2 – изолятор, 3 – верхний электрод, 4 – нижний электрод, 5 – сборник обессоленной нефти, 6 – трансформатор, 7 – ввод высокого напряжения, 8 – сборник соленой воды, 9 – промывочный коллектор, 10 – распределитель нефти. Потоки: I – выход обессоленной нефти, II – вход нефти, III – удаление шлама, IV – ввод воды на промывку аппарата, V – выход дренажной воды

(рис. 10), а технологическая установка, в которой собраны несколько аппаратов, называется ЭЛОУ – электрообезвоживающая и обессоливающая установка.

Для того чтобы обеспечить очистку до требуемого уровня, электродегидраторы работают последовательно в две ступени. Сырая нефть насосом подается через теплообменники в электродегидратор первой ступени. Теплообменник представляет собой набор трубок небольшого диаметра, собранных в пучок. Пучок трубок заключен в кожух, внутри которого прокачивается нагревающая жидкость (например, мазут с температурой 360 °С), а через трубки подается нефть (рис. 11).

Нефть нагревается в теплообменнике до температуры 130 °С. При этом снижается ее вязкость и облегчается удаление воды. Для того чтобы при этом из нефти не испарялся бензин, в электродегидраторе поддерживают довольно высокое давление – до 12 атмосфер. В подаваемую нефть вводят деэмульгатор и раствор щелочи, а также до 10% обессоленной свежей воды. Нефть поступает в аппарат равномерно через распределитель (маточник) и движется вверх через слой уже отстоявшейся ранее воды. Далее нефть попадает в зону слабого электрического поля – между нижним электродом и слоем воды, затем – в зону сильного поля между двумя электродами, затем – в зону между верхним электродом и маточником сбора обработанной нефти, из которого нефть выводится в электродегидратор второй ступени, имеющий точно такую же конструкцию. В нем содержание воды и соли снизят еще и доведут до требуемых параметров.

❗ Для того чтобы снизить потребление воды, на современных нефтеперерабатывающих заводах (например, на Московском НПЗ) применяют закрытую систему очистки оборотной воды. В результате технологическая вода в окружающую среду не поступает вообще.

Обезвоженная и обессоленная до требуемого уровня нефть поступает далее на установки атмосферной и вакуумной разгонки.

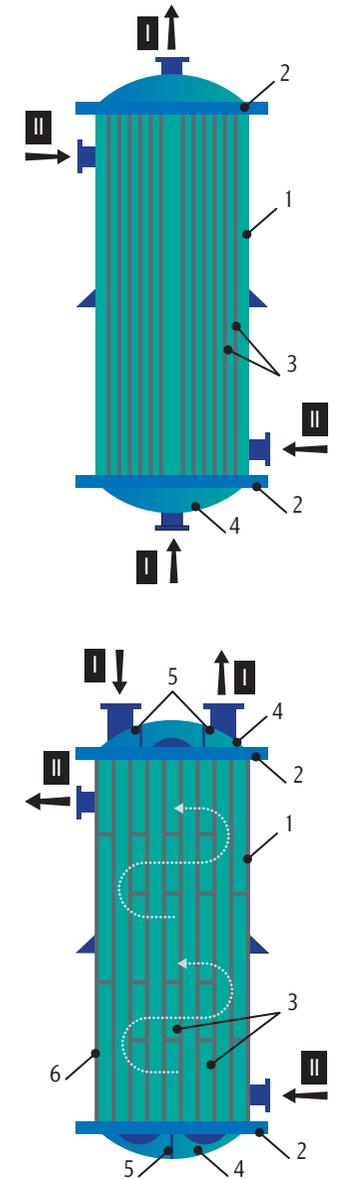


Рис. 11. Схема кожухо-трубчатых теплообменников (прямоточного и возвратного)

I – поток в трубное пространство; II – поток в межтрубное пространство. 1 – кожух; 2 – крышки; 3 – трубы; 4 – фитинги; 5 – перегородки; 6 – обечайка

## 2.2. Разделение нефти на фракции

Разделение нефти на фракции проводится по температуре их выкипания. Для этого нефть необходимо нагреть до температуры не выше 360 °С. Если нефть нагревать до более высоких температур, при атмосферном давлении начинается процесс термического крекинга – разложения нефти на газообразные и твердые (коксообразные) продукты. Это категорически недопустимо – может привести к выходу из строя теплообменной аппаратуры, а самое главное – снижает объем выхода из нефти самых дорогостоящих светлых углеводородов – компонентов бензинов.

Для того чтобы нагреть нефть до требуемой температуры, применяют специальные трубчатые печи (рис. 12).

Топливом для большинства современных трубчатых печей могут служить:

- *природный газ*, поступающий на НПЗ извне (наиболее экологичный вариант) – вариант особенно популярный в России, где природный газ очень дешевый;
- *углеводородные газы*, выделяемые из нефти при ее переработке на заводе;
- *мазут* – смесь тяжелых нефтяных остатков с разных технологических установок НПЗ.

Поскольку печи имеются почти на всех технологических установках НПЗ, как правило, все печи на заводах получают топливо из единых заводских систем (колец) топливного газа (питающее газовое) и жидкого топлива – мазута.

Это позволяет гарантировать подачу топлива к печам даже в случае разрыва топливопровода, а многотопливность печей позволяет маневрировать подачей топлива исходя из текущей ценовой и производственной ситуации (например, мазут или заводские газы можно в какие-то периоды с выгодой продавать).



НПЗ, расположенные в крупных городах, стараются использовать в качестве топлива для печей природный газ

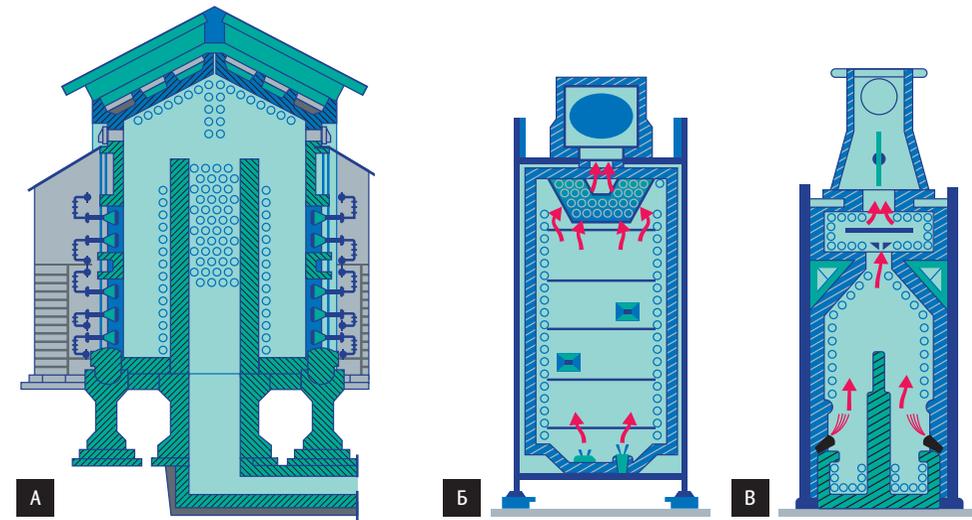


Рис. 12. Схемы трубчатых печей: А) шатровой; Б и В) вертикальных

КПД современных печей очень высокий – достигает 96%. В результате на переработку одной тонны нефти в среднем на НПЗ расходуется не более 70 кг мазута. Кроме КПД важнейшими характеристиками печей являются производительность (мощность) и теплонапряженность поверхностей нагрева – эти параметры рассчитываются исходя из потребностей технологических установок.

Нефть поступает в стальные трубы диаметром 100–200 мм, установленные в топке печи, и протекая по трубам, нагревается газами сгорания топлива до требуемой температуры. В результате в трубах образуется парожидкостная смесь – углеводороды с числом атомов углерода в молекуле до 26 испаряются, а более высокомолекулярные – остаются жидкими. Эта парожидкостная смесь поступает дальше на разделение в вертикальный стальной аппарат – ректификационную колонну.

Для всех печей большое значение имеет полнота сгорания топлива – это важно и с экономической, и с экологической точки зрения. Для обеспечения полноты сгорания в топку печи (на топливные форсунки) подается принудительно избыточное количество воздуха. Если топливом служит метан – в составе газов сгорания присутствуют только углекислый газ и водяной пар. Если топливом является сернистый мазут – в составе газов сгорания появляется еще и сернистый ангидрид, возрастает количество выбрасываемого углекислого газа – экологические характеристики печи ухудшаются. Поэтому НПЗ, расположенные в крупных городах, стараются использовать в качестве топлива для печей природный газ (так поступают,

КПД современных печей достигает **96%**

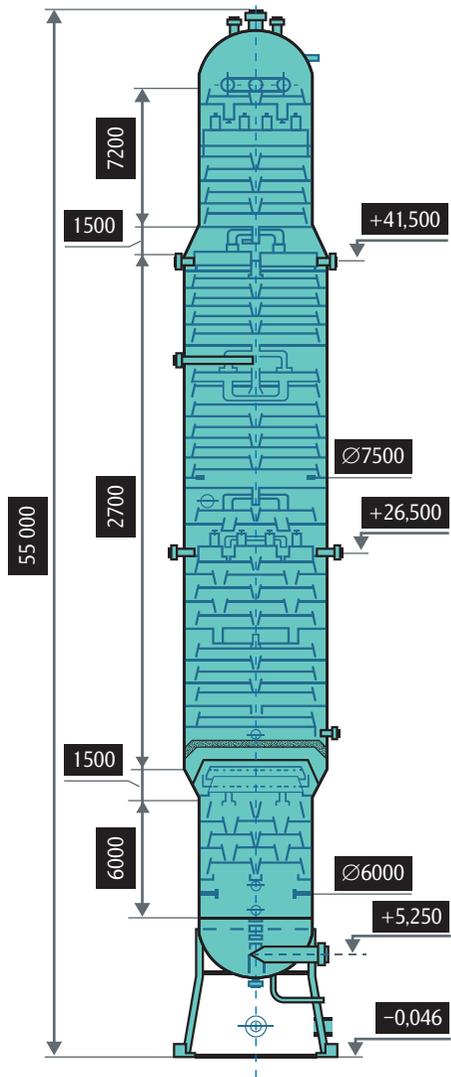


Рис. 13.  
Схема ректификационной колонны

например, на Московском НПЗ). В этом случае выбросы в воздушный бассейн минимальны. По этому показателю любой НПЗ значительно безопаснее любой ТЭЦ, даже если она работает на природном газе. Если же сравнивать НПЗ с ТЭЦ, работающими на каменном угле, коксохимическими предприятиями или металлургическими комбинатами, получается что выбросы НПЗ в разы меньше.

Парожидкостная смесь углеводородов поступает в *атмосферную ректификационную колонну*. Колонну называют атмосферной, потому что внутри поддерживается атмосферное давление. Внешне все колонны очень похожи – стальной вертикальный цилиндр большой (до 70 м) высоты, а вот внутреннее устройство колонн может быть самым различным.

❗ Главная цель – разделить пары и жидкость таким образом, чтобы в жидкости не оставалось паров, а пары не уносили с собой капельки жидкости – это называется четкостью разделения фракций по температуре кипения.

Для этого внутри колонны устанавливают сложные насадочные устройства, улучшающие процессы конденсации и испарения (рис. 13).

В ректификационной колонне можно разделить нефть на две фракции – жидкую и газообразную, а можно – на несколько. Это определяется типом перерабатываемой нефти и мощностью установок по сырью. В результате нефть разделяется на фракции: *бензиновую, керосиновую, дизельную и прямогонный мазут*.

*Прямогонный мазут* – смесь углеводородов, кипящих выше 360 °С, далее поступает на разделение в *вакуумную колонну*. Поскольку мазут нельзя нагревать выше 360 °С, а разделить прямогонный мазут на фракции нужно – в вакуумной колонне при помощи специальной вакуумсоздающей аппаратуры снижают давление до одной десятой атмосферного. Как известно, снижение давления понижает температуру кипения жидкостей, а повышение – увеличивает (например,



Нефть разделяется на фракции: бензиновую, керосиновую, дизельную и прямогонный мазут.

в скороварке). В вакуумной колонне углеводороды, имеющие от 26 до 60 атомов углерода в молекуле, которые не испарялись при температуре 360 °С в атмосферной колонне, начинают при этой температуре испаряться, а более тяжелые – все равно остаются жидкими. Таким образом можно разделить мазут без крекинга на фракцию, которая при атмосферном давлении испарилась бы в диапазоне температур 360–490 °С – она называется *вакуумным газойлем*, и фракцию, которая при атмосферном давлении начала бы испаряться выше 490 °С и которая не кипит в вакуумной колонне при температуре 360 °С – она называется *вакуумным остатком* или *гудроном* (рис. 14).

Вакуумный газойль при комнатной температуре представляет собой вязкую темно-коричневую непрозрачную жидкость, а гудрон – смолообразный твердый продукт черного цвета. Иногда в вакуумной колонне получают несколько вакуумных газойлей – например, для производства из них нефтяных масел разной вязкости.

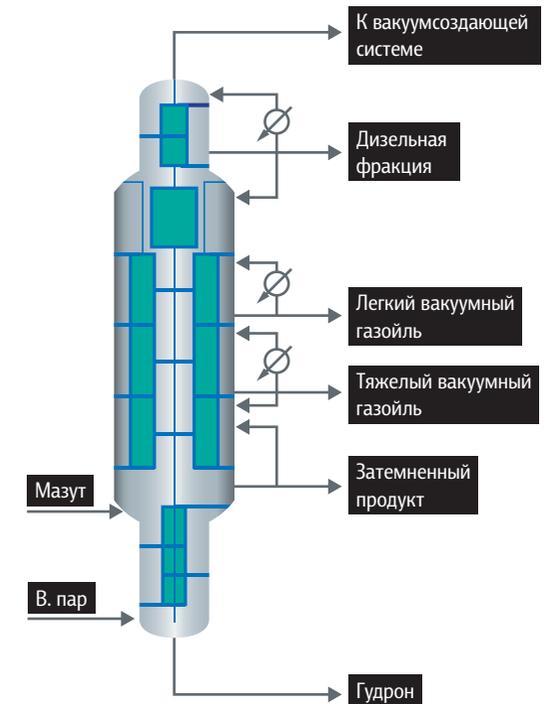


Рис. 14.  
Схема вакуумной колонны

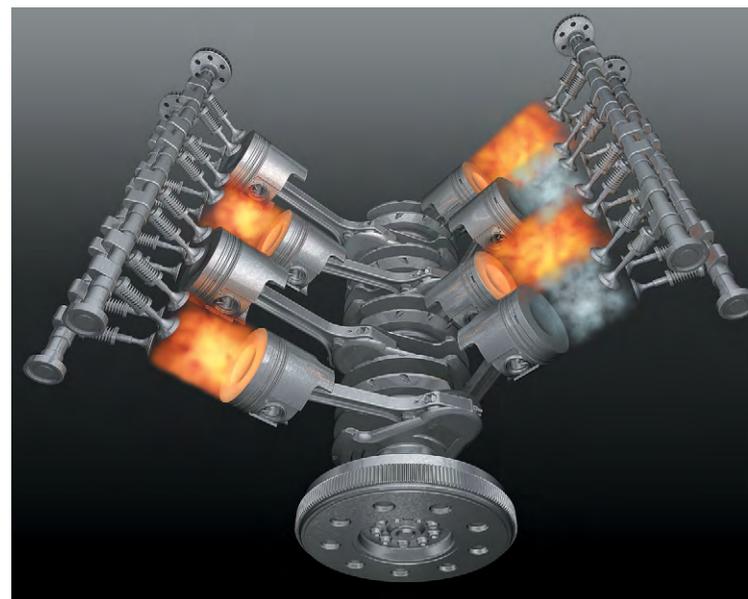
Из типичной российской смеси западно-сибирских и волгоуральских нефтей (той, что называется Urals) обычно выделяют следующее количество светлых и темных фракций:

бензиновая	30–200 °С	до 20% масс
дизельная	200–360 °С	до 30% масс
вакуумный газойль	360–490 °С	до 25% масс
гудрон	выше 490 °С	до 25% масс

Если на НПЗ производится топливо для реактивных двигателей, то выделяют еще до 10% масс керосиновой фракции (200–300 °С). В этом случае дизельной фракции будет на соответствующее количество меньше.

Фракционный состав топлив имеет огромное значение для работы двигателей. Так, в автомобильном бензине не менее 10% объема должно выкипать при температуре до 70 °С. Это обеспечивает быстрое испарение части бензина при холодном запуске бензинового двигателя и образование легковоспламеняемой топливно-воздушной смеси. Если не обеспечить в составе товарного бензина наличие легкокипящих компонентов, зимой двигатель запустить не удастся.

❗ Более того, зимой в состав бензинов вовлекают бутан-бутиленовые фракции. Эти фракции летом просто испарились бы из бензинов при транспортировке и перекачке (они имеют температуру кипения около 0 °С), создавая определенную пожарную опасность. А вот зимой они облегчают запуск двигателей.



Фракция бензина, выкипающая выше 130 °С, обеспечивает поступление в цилиндры максимальной массы углеводородов с каждой порцией бензина и, соответственно, максимальную мощность двигателя на форсированных режимах его работы

До 50% объемных бензинов должно испаряться при температуре до 130 °С. Это обеспечивает двигателям хорошую приемистость – способность быстро реагировать на нажатие педали акселератора увеличением мощности и числа оборотов. Наличие относительно быстро сгорающих углеводородов обеспечивает высокую скорость нарастания давления в цилиндрах при сгорании топливно-воздушной смеси. А что же будет, если заправить бензиновый автомобиль метаном? Он действительно станет менее динамичным. Но ведь в метане много водорода и он имеет высокую теплоту сгорания? Это верно. Но подать в двигатель резко большую массу (именно массу, а не объем) метана очень сложно. Для этого нужно держать метан под очень большим давлением, а это потребует усложнения конструкции двигателя и значительного увеличения его массы. Поэтому двигатели, работающие на метане, значительно менее приемисты, чем бензиновые. Поэтому и гонки Формулы-1 проводятся на болидах, снабженных бензиновыми двигателями: их система питания значительно проще, машина легче, а приемистость выше.

Фракция бензина, выкипающая выше 130 °С, обеспечивает поступление в цилиндры максимальной массы углеводородов с каждой порцией бензина и, соответственно, максимальную мощность двигателя на форсированных режимах его работы. Кроме того, именно эта фракция обеспечивает минимальный расход топлива в литрах, поскольку плотность этой фракции выше.



*Температура самовоспламенения у бензинов значительно выше, чем у дизельных топлив.*



А что произойдет, если в бензин подлить немного (5–10% объемных) авиакеросина или дизельного топлива? Попав в бензиново-воздушную смесь, относительно тяжелые углеводороды не успеют полностью испариться при сжатии, а значит – не успеют полностью сгореть. Накапливаясь на днище поршня и стенках цилиндра, эти углеводороды будут смешиваться с моторным маслом, постепенно снижая его вязкость и увеличивая уровень масла в картере двигателя. Через короткое время малая вязкость масла приведет к задиру коренных или шатунных вкладышей или даже к их проворачиванию. Двигатель выйдет из строя и потребует дорогостоящего ремонта. В советское время, когда бензин был дефицитом, а дизельного топлива было много, на нефтебазах занимались «компотом» – добавляли дизтопливо в бензин. В результате пробу бензина на конец кипения стали называть «прокурорской пробой» – за такие дела сажали.

А если на АЗС ошибочно заправят бензиновый двигатель дизельным топливом? Сначала автомобиль заведется и отъедет от АЗС на остатках бензина в топливопроводе. Как только дизельное топливо начнет поступать в цилиндры, при сжатии оно не будет испаряться, перестанет формироваться газообразная топливно-воздушная смесь, и при подаче искры в камере сгорания нечему будет воспламеняться. Двигатель заглохнет, автомобиль надо буксировать на станцию техобслуживания и тщательно промывать систему питания.

А если наоборот – в дизельный двигатель залить бензин? К чему это приведет? Сначала двигатель заведется и отъедет от АЗС на остатках дизтоплива в системе. Как только бензин начнет поступать в цилиндры, активно испаряясь, он резко снизит температуру сжатого воздуха и не воспламенится: температура самовоспламенения у бензинов значительно выше, чем у дизельных топлив. Двигатель заглохнет, автомобиль опять надо везти на станцию и промывать систему питания.

## ГЛАВА 3.

# Углубление переработки нефти

### 3.1. Висбрекинг и коксование

**В**ажнейшим показателем технологического совершенства НПЗ является глубина переработки нефти. Почему этот показатель является важнейшим? Ответ очень прост – наибольшим спросом пользуются светлые нефтепродукты, которые имеют максимальную продажную цену, а топочный мазут традиционно имеет очень низкую цену (в несколько раз ниже цены нефти). Поэтому чем больше завод сделает светлых нефтепродуктов из тонны нефти, тем большую прибыль он в итоге получит. Но из предыдущей главы нам известно, что выход светлых фракций из тонны нефти сорта Urals составляет 50% масс. Получается, что если завод при переработке нефти безвозвратно потеряет всего 1,0% масс этой нефти (с испарившимися газами, с утечкой жидких продуктов, с потерей твердых продуктов в виде отложений и шламов) – глубина переработки на этом заводе не превысит 49% масс.

Действительно, заводы, имеющие в своем составе только установки по ректификации (разгонке) нефти, достигают именно такой глубины переработки. Это многочисленные мини-НПЗ (мини-рифайнеры). Экономический эффект от их работы весьма сомнителен.

#### Формула определения глубины переработки нефти

$$G, \% \text{ масс} = \left( \frac{V_{\text{пер}} - V_{\text{вм}} - V_{\text{пот}}}{V_{\text{пер}}} \right) \times 100$$

количество выпущенного заводом валового топочного мазута\*

количество переработанной за период нефти

безвозвратные потери нефти за период

\*валовый мазут = товарный мазут + мазут в топливо НПЗ



Наибольшим спросом пользуются светлые нефтепродукты, которые имеют максимальную продажную цену

Но как же увеличить глубину переработки? Об этом задумались еще сто лет назад. Спровоцировало процесс появление на рынке США сверхтяжелых сортов венесуэльской нефти, выход светлых фракций из которой порой не превышал 10% масс. Решением стало создание процессов термического крекинга. Мы уже упоминали, что нагревать углеводороды выше 360 °С нежелательно – начинается *термический крекинг* – разрыв молекул легких жидких углеводородов до газов и конденсация тяжелых до коксообразных. Но если нагревать фракции нефти, кипящие выше 360 °С (мазуты), до значительно более высоких температур, часть углеводородов подвергается крекингу (разрыву) не только в газообразные, но и в жидкие – бензиновые и дизельные. Таким образом, из мазутов стали получать дополнительно до 10% масс светлых фракций. Побочным продуктом такого процесса являлся мазут с низкой вязкостью.

Установки термического крекинга получили очень широкое распространение. Достаточно сказать, что в предвоенные годы в СССР было построено несколько НПЗ, которые так и называли – крекинг-заводы. Так возникли Одесский, Херсонский, Бердянский, Саратовский и Московский НПЗ. Они получали из Баку прямогонный мазут в качестве сырья и выпускали нефтяные газы, бензин, дизельное топливо и мазут. Но эффективность установок термического крекинга была очень невысока, и сегодня их в эксплуатации не осталось. Однако принцип крекинга получил дальнейшее развитие в виде более совершенных установок – *висбрекинга*, *коксования*, *каталитического крекинга* и *гидрокрекинга*. Эти установки составляют группу вторичных процессов (напомним: первичная переработка заканчивается ректификацией нефти – разделением на фракции), углубляющих переработку нефти.

Наиболее простым из современных процессов углубления переработки нефти следует считать процесс *висбрекинга* (от английского словосочетания *viscosity breaking* – *снижение вязкости*). Такое название процесс получил по основному получаемому продукту – топчному мазуту с низкой вязкостью.

Сырьем для установок висбрекинга служит *гудрон* – остаток от вакуумного разделения мазута. Гудроны представляют собой смолообразные сверхвязкие жидкости с температурой застывания выше 50 °С. Они содержат большое количество асфальтообразных веществ и поэтому являются сырьем для производства дорожных и строительных битумов. Как мы убедились ранее, количество выработки гудрона составляет до 25% масс от количества перерабатываемой нефти сорта Urals. При объеме переработки нефти в России более 250 млн тонн в год получается, что количество гудрона превысит 60 млн тонн. Такого количества битумов рынок потребить не в состоянии: потребности РФ и соседних стран не превышают 15 млн тонн. Так что же делать с гудроном? Если добавлять его в топочный мазут, вязкость последнего многократно возрастет и топливная форсунка не сможет распылить такое топливо в топке печи. Кроме того, такой мазут будет иметь очень высокую температуру застывания, и слить его зимой из железнодорожной цистерны будет очень тяжело. Выход нашли в строительстве установок висбрекинга. Схема установки висбрекинга представлена на рис. 15.

В таблице 1 представлены характеристики сырья и продуктов установки висбрекинга.

Рис. 15.  
Схема установки висбрекинга с сокинг-камерой  
1 – печь;  
2 – сокинг-камера;  
3 – фракционирующая колонна;  
4 – вакуумный испаритель

Мощность установок висбрекинга – до 2,5 млн тонн в год по сырью

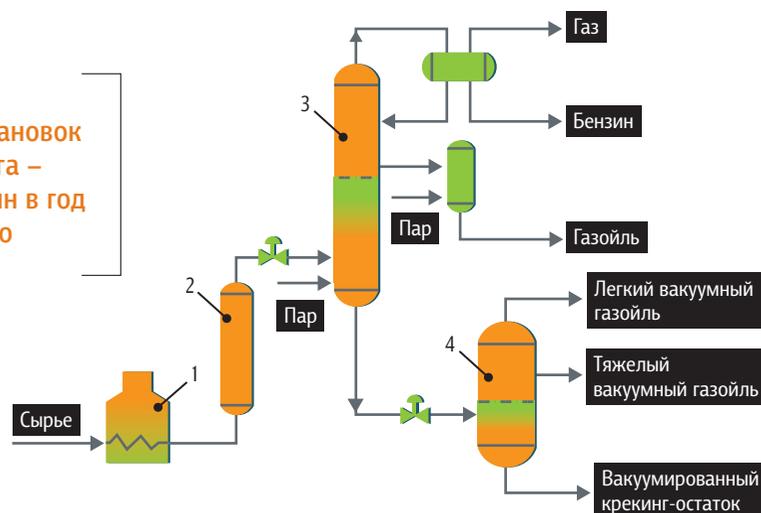


Таблица 1. Характеристика сырья и продуктов висбрекинга

ПРОДУКТ	ВЫХОД, % МАСС
Сырье – гудрон вязкостью 274,0 мм <sup>2</sup> /с при 80 °С	100,0
Газы (С1-С4)	2,3
Бензиновая фракция (30–200 °С)	10,8
Дизельная фракция (200–360 °С)	36,5
Мазут вязкостью менее 59,0 мм <sup>2</sup> /с при 80 °С	50,4

Полученные в процессе висбрекинга светлые фракции напрямую в состав товарных бензинов или дизельных топлив вовлекать нельзя: они содержат очень много вредных для двигателей примесей. Эти продукты подвергаются дальнейшей очистке, но после этого могут быть использованы для производства товарных светлых нефтепродуктов. Таким образом, глубина переработки нефти может быть увеличена на 12,5% масс (половина гудрона – а его на нефть 25% масс – превращается в светлые фракции). Кроме того, вторая половина гудрона превращается в топочный мазут с невысокой вязкостью и относительно невысокой температурой застывания.

Мощность установок висбрекинга может быть довольно значительной – до 2,5 млн тонн в год по сырью. При этом стоимость строительства таких установок не очень значительна (в установках не применяются катализаторы, нет сверхвысоких давлений, нет необходимости применять водород, нет жестких требований к качеству оборудования). Но одновременно с этим необходимо понимать, что установки висбрекинга очень чувствительны к качеству сырья – чем тяжелее гудрон, тем меньше выход светлых фракций. Управлять процессом можно только с помощью трех факторов: температура, давление (иногда достигает 50 атмосфер) и скорость процесса. Увеличение температуры выше 500 °С может вызвать закоксовывание внутренних полостей аппаратуры и необходимость частых остановок; уменьшение температуры ниже 430 °С снижает выход светлых фракций. Увеличение давления способствует подавлению сверхактивного крекинга, уменьшение – наоборот. Время пребывания гудрона в зоне высокой температуры определяет производительность установки и выход светлых фракций.



Установки висбрекинга очень чувствительны к качеству сырья – чем тяжелее гудрон, тем меньше выход светлых фракций. Управлять процессом можно только с помощью трех факторов: температура, давление (иногда достигает 50 атмосфер) и скорость процесса.

Таблица 2. Характеристика сырья и выход продуктов установок коксования

СЫРЬЕ	плотность, кг/м <sup>3</sup>	коксуемость сырья, % масс	ВЫХОД, % МАСС					потери
			газ	бензин	ДТ	мазут	кокс	
Мазут	950	9,9	4,5	7,5	40,0	29,0	15,0	4,0
Полугудрон	965	12,6	6,0	12,0	30,0	26,0	22,0	4,0
Гудрон	991	16,0	7,0	16,0	26,0	23,0	24,0	4,0

В связи со строительством большого количества установок каталитического крекинга и гидрокрекинга, сырьем для которых является вакуумный газойль, качество гудронов непрерывно будет ухудшаться (утяжеляться), и выход светлых нефтепродуктов на установках висбрекинга не будет превышать 20% масс на гудрон. Поэтому в будущем установки висбрекинга скорее всего уступят место другим типам технологических установок, в частности установкам коксования и гидрокрекинга нефтяных остатков.

Установки коксования в качестве сырья также получают гудроны, но могут использовать и другое сырье (таблица 2). В сумме выход продуктов с высокой добавленной стоимостью на установках коксования выше, чем на установках висбрекинга. Получаемые светлые нефтепродукты (бензиновая и дизельная фракция) также нуждаются в дополнительной очистке перед вовлечением в товарные бензины или дизельные топлива. Глубина переработки на установке коксования при переработке гудрона может быть повышена на 18%, что значительно превышает показатели установок висбрекинга. Вырабатываемый на установках кокс пользуется значительным спросом в алюминиевой и электротехнической промышленности.

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируются только *установки замедленного коксования* с периодической разгрузкой кокса. Схема такой установки представлена на рис. 16.

Сырье установки (гудрон) поступает в печь, где нагревается до 490 °С, и далее поступает в ректификационную колонну. В этой колонне отделяются светлые фракции, а отбираемый с низа колонны сверхтяжелый гудрон вновь поступает в печь

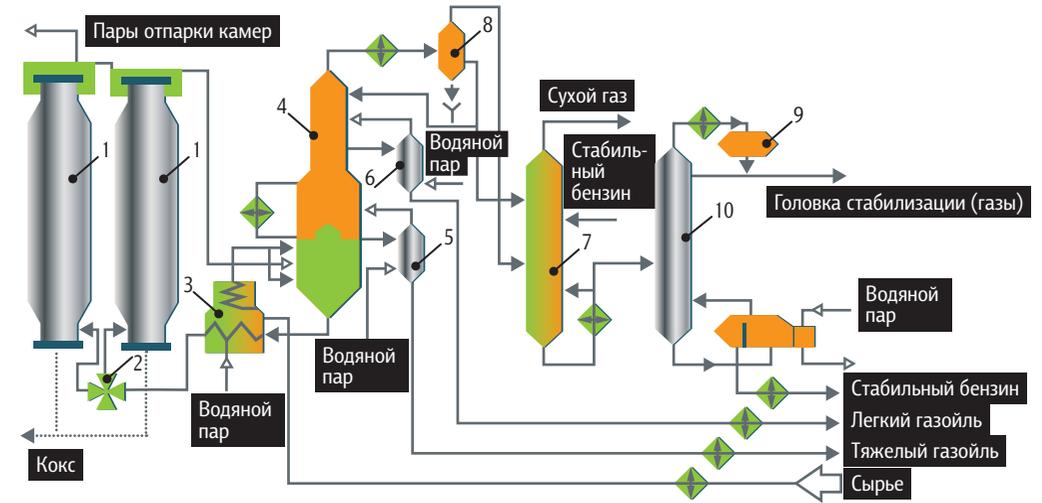


Рис. 16. Двухблочная установка замедленного коксования  
1 – камеры коксования;  
2 – четырехходовой кран;  
3 – печь с двумя змеевиками;  
4 – фракционирующая колонна;  
5, 6 – отпарные колонны;  
7 – фракционирующий абсорбер;  
8 – сепаратор;  
9 – емкость;  
10 – стабилизационная колонна

и снова нагревается и поступает в работающую камеру коксования. Поскольку сырье находится в камере коксования длительное время, оно постепенно превращается при высокой температуре в кокс. Испаряющиеся при этом относительно легкие нефтепродукты удаляются в ректификационную колонну. Две камеры работают по циклическому графику – в одной идет процесс коксования, другая при этом разгружается от кокса и готовится к новому циклу. График цикличности в среднем составляет одни сутки – 24 часа коксование, 24 часа разгрузка и подготовительные операции.

ⓘ Важнейшим технологическим фактором процесса коксования является давление, которое значительно ниже, чем в процессе висбрекинга (находится в пределах 2–4 атмосфер). Чем ниже давление, тем больше образуется светлых нефтепродуктов, но совсем низкое давление может привести к большому выходу газообразных углеводородов. Количество кокса и его качество напрямую зависят от температуры процесса: чем выше температура, тем выше качество кокса.

В камере коксования кокс разрезают на куски при помощи гидрорезака – струей воды под давлением 150 атмосфер и выгружают в специальный бункер. Далее камеру коксования вновь готовят к следующему циклу.

Для того чтобы полученный в процессе коксования нефтяной кокс можно было использовать в алюминиевой промышленности, его подвергают прокаливанию на специальной установке для удаления из кокса легких углеводородов. Для этого кокс предварительно измельчают на зубчатых дробилках до кусков размером 50–70 мм. Далее кокс загружают во вращающуюся печь, представляющую собой наклоненный к горизонту цилиндр диаметром до 3,6 м и длиной до 60 м, вращающийся со скоростью 1–4 об/мин. В зоне прокаливания кокс находится до 1 часа при температуре до 1400 °С, что позволяет удалить значительную часть легких углеводородов, а также снизить содержание серы. Схема работы прокалочной печи представлена на рис. 17.

Наиболее проблемной точкой процесса коксования является периодическое отключение и подключение камер коксования, что значительно сдерживает производительность установок. Этому недостатка лишены перспективные процессы коксования – *флюид-кокинг* и *флекси-кокинг* (по-английски *soking* – *коксование*). В этих процессах выгрузка кокса происходит непрерывно. Пока в России подобных установок на НПЗ нет.

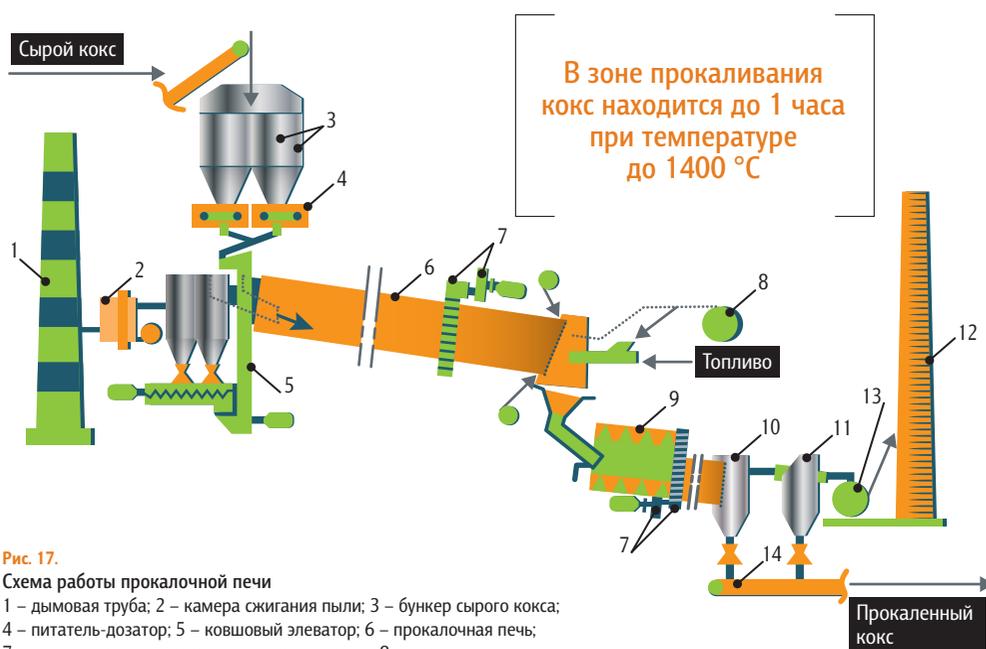


Рис. 17. Схема работы прокалочной печи  
1 – дымовая труба; 2 – камера сжигания пыли; 3 – бункер сырого кокса; 4 – питатель-дозатор; 5 – ковшевый элеватор; 6 – прокалочная печь; 7 – система кольцевого воздушного охлаждения; 8 – воздуходувка; 9 – оросительный водяной холодильник; 10 – бункер прокаленного кокса; 11 – сборник коксовой пыли; 12 – вспомогательная дымовая труба; 13 – вентилятор отсоса газа; 14 – транспортер прокаленного кокса

## 3.2. Процессы каталитического крекинга

Одним из самых распространенных процессов углубления переработки нефти является *каталитический крекинг*. Впервые процесс был осуществлен в 1937 году в США, а уже в 1944 году в Советском Союзе в Грозном была запущена первая лицензионная промышленная установка каталитического крекинга.

Катализом в химии называют ускорение химических реакций под воздействием веществ (катализаторов), которые участвуют в реакции, но не входят в состав продуктов реакции. Катализаторы могут быть *гомогенными* (т.е. иметь то же фазовое состояние, что и продукты реакции) или *гетерогенными* (т.е. иметь отличное от продуктов реакции фазовое состояние).

Промышленные установки каталитического крекинга – типичный пример *гетерогенного катализа*, поскольку катализаторы крекинга являются твердыми телами, а сырье и продукты реакции – жидкими или газообразными.

Цеолит – кристаллическое вещество с микропористой структурой, обеспечивающей основные реакции крекинга

Катализаторы каталитического крекинга представляют собой микросферические гранулы с фракционным составом в пределах от 20 до 150 микрон. Средний размер гранул около 80 мкм. Катализаторы состоят из активного компонента – *цеолита*, кристаллического вещества с микропористой структурой, обеспечивающей условия процесса.



Таблица 3. Влияние качества сырья на выход продуктов крекинга

ПРОДУКТЫ КРЕКИНГА	ВЫХОД ПРОДУКТОВ, % ОБЪЕМНЫХ, НА СЫРЬЕ		
	ПАРАФИНОВОМ	НАФТЕНОВОМ	АРОМАТИЧЕСКОМ
Сухой газ (C1, C2, H2)	2,6	3,2	3,4
Сжиженный газ (C3 – C4)	34,5	27,5	24,3
Бензин (C5 – 221 °C)	73,0	70,0	54,2
Газойль легкий	5,0	10,0	20,0
Газойль тяжелый	2,0	5,0	10,0
Кокс	4,8	5,4	6,3

Процесс крекинга осуществляют на установках с непрерывно циркулирующим твердым катализатором, который последовательно проходит через зону реакции, а затем через зону регенерации самого катализатора. Необходимость регенерации катализатора вызвана тем, что в процессе крекинга поверхность катализатора быстро покрывается слоем кокса, препятствующего контакту катализатора и сырья. Этот кокс с поверхности катализатора выжигается за счет подачи в регенератор воздуха.

Качество сырья оказывает очень существенное влияние как на ход процесса, так и на выход продуктов крекинга и их качество. В таблице 3 представлены данные об изменении выхода продуктов крекинга при изменении качества сырья.

Поскольку вакуумный газойль, как правило, содержит большое количество серы, необходима его предварительная очистка перед проведением каталитического крекинга, иначе сернистые соединения будут негативно сказываться на катализаторе и качестве процесса.



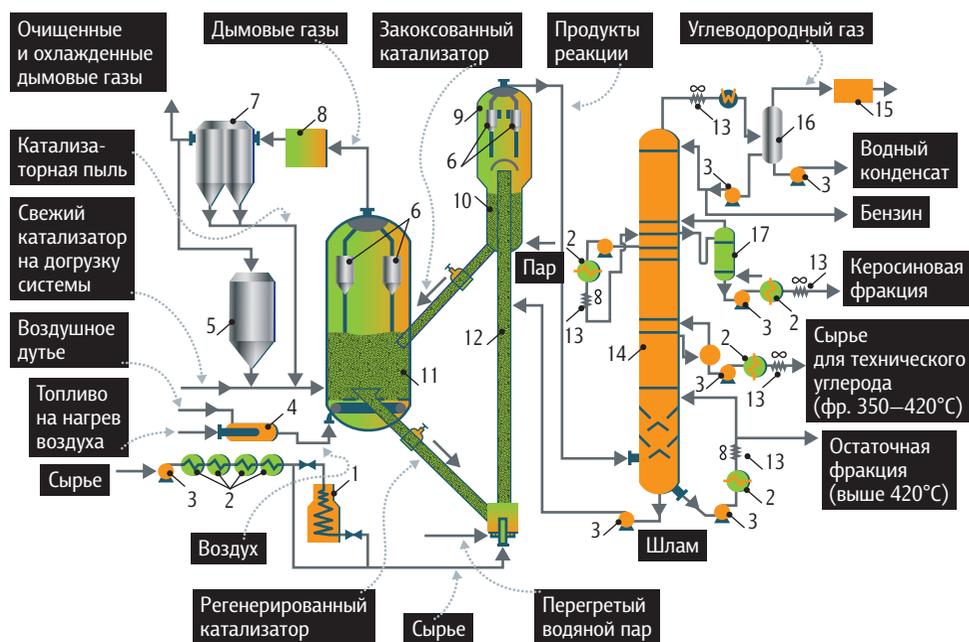
❗ Процесс гидроочистки проводится на неподвижно загруженном в колонну реактора катализаторе при давлении водорода до 50 атмосфер и температуре до 400 °C.

Качество катализаторов гидроочистки мы рассмотрим в главе 4. Достаточно сказать, что катализаторы гидроочистки представляют собой цилиндры диаметром до 5 мм и длиной до 6 мм. Вакуумный газойль подается в верхнюю часть реактора и постепенно проходит через слой катализатора. При этом сернистые соединения разлагаются и сера переходит в газообразный сероводород, который в дальнейшем отделяют. При гидроочистке вакуумного газойля происходит частичный его крекинг с образованием до 15,0% дизельной фракции.

В таблице 4 приведены данные о балансе предварительной гидроочистки вакуумного газойля перед проведением процесса его каталитического крекинга. Уже на этой предварительной стадии глубина переработки нефти увеличивается примерно на 3,0% масс (вакуумный газойль в среднем составляет 25% от перерабатываемой нефти, а выход газов, дизельной и бензиновой фракции после гидроочистки составляет около 12% на вакуумный газойль). Но все же главным результатом предварительной гидроочистки вакуумного газойля следует считать сохранение активности катализатора последующего крекинга и улучшение показателей процесса.

Таблица 4. Выход продуктов при гидроочистке вакуумного газойля

ВЗЯТО	% МАСС
Сырье	100,00
Водород 100%-й	0,65
Всего	100,00
ПОЛУЧЕНО	% МАСС
Гидрогенизат	86,75
Дизельная фракция	9,2
Бензиновый отгон	1,3
Углеводородный газ	1,5
Сероводород	1,5
Потери	0,4
Всего	100,65



**Рис. 18.**  
Каткрекинг с лифт-реактором  
1 – трубчатая печь; 2 – теплообменник; 3 – насос; 4 – подогреватель воздуха; 5 – бункер для катализатора; 6 – циклоны; 7 – электрофильтр; 8 – котел-утилизатор; 9 – сепарационная зона реактора; 10 – отпарная колонна; 11 – регенератор с кипящим слоем; 12 – проточный реактор; 13 – холодильник (АВО); 14 – ректификационная колонна; 15 – газовый блок; 16 – емкость; 17 – отпарная колонна

На рис. 18 представлена схема установки каталитического крекинга с лифт-реактором. Сырье подается в лифт-реактор на катализатор, поступающий сюда же из регенератора с температурой до 630 °С. На поверхности катализатора за короткое время происходит крекинг тяжелых углеводородов, за счет расширения вскипающих углеводородов катализатор движется вверх по реактору. Далее пары углеводородов поступают в ректификационную колонну, а катализатор под действием силы тяжести поступает в регенератор. Сюда подается воздух, кокс с поверхности катализатора выгорает и его активность восстанавливается. Катализатор за счет сгорания кокса вновь нагревается до 630 °С и поступает под действием силы тяжести в лифт-реактор. Общее количество катализатора, загруженного в установку, достигает 400 тонн. В таблице 5 представлены технологический режим и показатели процесса.

Принципиальное отличие установок каталитического крекинга от других заключается в том, что катализатор никогда не меняют, а лишь понемногу добавляют в систему свежий катализатор.

Общее количество катализатора, загруженного в установку, достигает **400 ТОНН**

**Таблица 5. Технологический режим и показатели процесса крекинга**

ПОКАЗАТЕЛЬ	ЗНАЧЕНИЕ
Температура крекинга, °С	515–520
Объемная скорость подачи сырья, 1/час	80–100
Кратность циркуляции	5,0–7,0
Давление в системе, МПа	0,15
Температура в регенераторе, °С	650–670
Выход С2, % масс	3,4
Выход С3-С4, % масс	12,6
Бензин (С5 – 205°С), % масс	50,0
Дизельная фракция, % масс	12,9
Тяжелый газойль, % масс	17,5

Расход катализатора связан с тем, что в процессе постоянного движения с большой скоростью частицы катализатора соударяются между собой и о стенки аппаратов. В результате образуется катализаторная пыль, которая частично уносится с дымовыми газами из регенератора, а частично – с продуктами и оседает затем в составе шламов в товарных резервуарах. Регенерация катализатора и организация его непрерывного движения внутри установки – наиболее сложные вопросы процесса каталитического крекинга.

Установка каталитического крекинга не только дает большое количество бензиновой фракции с высоким октановым числом и дизельной фракции с низким содержанием серы, но и значительное количество пропан-пропиленовой фракции и бутан-бутиленовой фракции, которые служат сырьем для производства различных полимеров и высокооктановых компонентов бензина – алкилатов, олигомеризатов и эфиров. Общее углубление переработки нефти на установках каталитического крекинга составляет не менее 20%. Общая мощность установок каталитического крекинга в мире превышает 500 млн тонн по сырью. За этими установками, безусловно, будущее нефтепереработки. Будут улучшаться катализаторы (в Омске для этой цели компания «Газпром нефть» начала строительство новой катализаторной фабрики), повышаться выходы и качество полезных продуктов. А если в дальнейшем установки каталитического крекинга будут в состоянии перерабатывать не только вакуумные газойли, но и прямогонные мазуты, углубление переработки нефти на этих установках может составить до 40%.

### 3.3. Гидрокрекинг

**П**роцессы гидрокрекинга – наиболее быстро развивающийся вид нефтепереработки в мире. Принципиальное отличие гидрокрекинга от каталитического крекинга – высокое давление водорода в системе (до 300 атмосфер). Чем выше давление в процессе, тем более глубокие и полезные преобразования сырья удастся получить. Но высокое давление водорода предъявляет чрезвычайно жесткие требования к качеству оборудования. Достаточно сказать, что толщина стенок реакторов гидрокрекинга достигает полуметра, и эти стенки состоят из нескольких слоев высоколегированной стали

разных марок. Это вызвано стремлением не допустить утечки водорода, который способен проникать сквозь дефекты кристаллических решеток почти всех известных конструкционных материалов. А утечка водорода неизбежно приводит к образованию взрывоопасных (гремучих) газов при его смешении с воздухом.

Мероприятия по обеспечению безопасности делают установки гидрокрекинга очень дорогими. Так, например, установка гидрокрекинга вакуумного газойля на заводе компании «Сургутнефтегаз» в Киришах, запущенная в декабре 2013 года, обошлась, по официальным данным, в 81 млрд рублей, что по тогдашнему курсу превышало 2,2 млрд долларов США. Почему идут на такие гигантские траты?



**Чем выше давление в процессе, тем более глубокие и полезные преобразования сырья удастся получить**

❗ Дело в том, что установки гидрокрекинга позволяют получать из вакуумного газойля до 60% масс дизельных фракций очень высокого качества и до 15% бензиновых фракций с низким содержанием серы, а также авиакеросин.



Принимая во внимание огромную разницу между ценой мазута и ценой светлых нефтепродуктов, становится понятно, что столь значительные инвестиции на строительство установок гидрокрекинга достаточно быстро окупаются. Поэтому в последние годы в России уже запущено несколько таких установок и еще большее количество строится на ряде заводов.

В таблице 6 приведены зависимости выходов целевых продуктов установок гидрокрекинга от создаваемого в процессе давления водорода (0,1 МПа = 1 атмосфера). Простое сравнение позволяет сделать вывод о целесообразности строительства установок гидрокрекинга с высоким давлением. Кроме того, необходимо понимать, что увеличение давления позволяет с успехом перерабатывать не только вакуумные газойли, но и в перспективе мазуты, а в еще более далекой перспективе – гудроны (в некоторых странах подобные установки

Таблица 6. Влияние давления на выход целевых продуктов гидрокрекинга

ПОКАЗАТЕЛИ	5–10 МПа	10–30 МПа
Температура процесса, °С	380–450	380–450
Объемная скорость, 1/ч	0,5–1,5	1,5–1,7
Вид сырья	вакуумный газойль	мазут
Конверсия, %	25–40	80–90
Объем инвестиций	низкий	высокий
Эксплуатационные затраты	низкие	высокие
ВЫХОД, % ОБ. НА СЫРЬЕ		
бутаны	0,6	4,2
бензины	2,1	17,4
дизельное топливо	33,9	69,0
сырье для каткрекинга (>360°)	66,2	21,2

В таблице 6 приведены зависимости выходов целевых продуктов установок гидрокрекинга от создаваемого в процессе давления водорода (0,1 МПа = 1 атмосфера)

уже работают). Такой подход делает установки гидрокрекинга наиболее перспективными на очень далекие периоды. Тем не менее обращает на себя внимание тот факт, что гидрокрекинг при низком давлении позволяет получать большое количество качественного сырья для каталитического крекинга.

Таким образом, сочетание установок гидрокрекинга и каталитического крекинга позволяет довести общую глубину переработки на заводе до 95–97%.

Вариант с выходом большого количества авиакеросина проектируется для Московского НПЗ «Газпром нефти»



На рис. 19 приведена схема установки одноступенчатого гидрокрекинга. Катализатор (цилиндрические гранулы диаметром до 5 мм и длиной до 6 мм) загружен в реактор неподвижными слоями и почти полностью его заполняет.

Двигаясь сквозь слой катализатора с небольшой скоростью, молекулы сырья претерпевают необходимые целевые трансформации.

Регулируя скорость процесса, давление и температуру, можно менять соотношение получаемых целевых продуктов в зависимости от конкретных коммерческих задач (таблица 7).

Например, вариант с выходом большого количества авиакеросина проектируется сейчас для Московского НПЗ «Газпром нефти». Это легко объясняется тем, что московский авиаузел потребляет авиакеросина значительно больше, чем производит сегодня Московский НПЗ, и его приходится возить с других заводов.

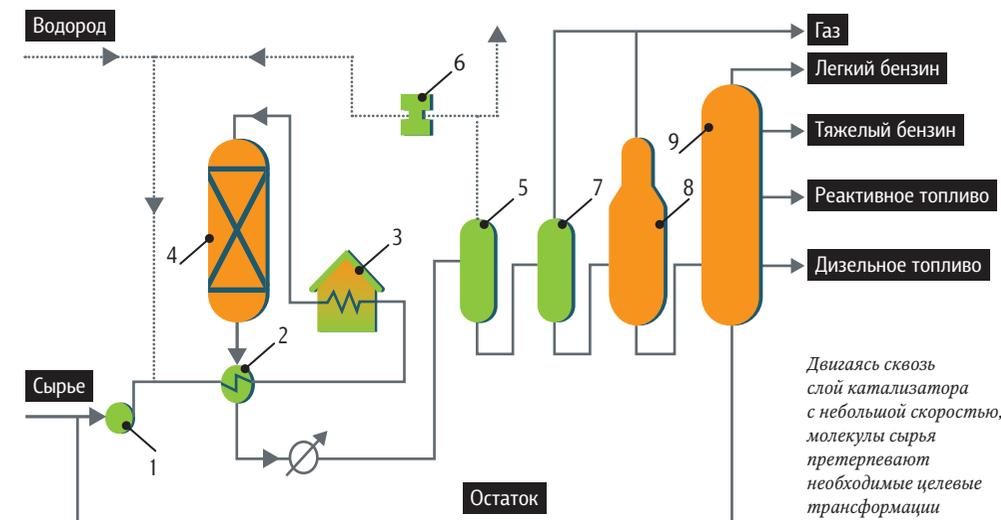


Рис. 19. Схема установки одноступенчатого гидрокрекинга  
1 – сырьевой насос; 2 – теплообменник; 3 – трубчатая печь; 4 – реактор; 5, 7 – сепаратор; 6 – циркуляционный компрессор; 8 – колонна стабилизации; 9 – дистилляционная колонна



Таблица 7. Варианты соотношения целевых продуктов гидрокрекинга

ПОКАЗАТЕЛИ	ЦЕЛЕВОЙ ПРОДУКТ ПРОЦЕССА			
	БЕНЗИН	РТ	ДИЗТОПЛИВО	СЫРЬЕ КК
ВЫХОД, % ОБ. НА СЫРЬЕ				
Бутаны	16,0	6,3	3,8	5,2
Легкий бензин	33,0	12,9	7,9	8,8
Тяжелый бензин	51,0	11,0	9,4	31,8
РТ	–	69,8	–	–
Дизельное топливо	–	–	78,9	19,6
Газойль > 360°C (сырье каткрекинга)	–	–	–	33,8
Расход водорода, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> сырья	361	312	260	420

Остаток гидрокрекинга (или тяжелый газойль гидрокрекинга) может использоваться еще и для производства высококачественных нефтяных масел.

В целом необходимо отметить, что российские НПЗ, начиная с 2010 года, построили и ввели в эксплуатацию несколько десятков установок, углубляющих переработку нефти. Это позволило значительно увеличить выпуск бензинов, дизельных топлив и топлив для авиационных двигателей. Но это потребовало строительства и другой группы установок вторичной переработки нефти – установок, улучшающих качество полученных прямогонных и вторичных компонентов до уровня современных требований, и установок синтеза высококачественных компонентов бензинов из газов. Их работу рассмотрим в главе 4.

## ГЛАВА 4.

# Улучшение качества моторных топлив



## 4.1. Изомеризация легких бензиновых фракций

**Л**егкие алкановые (*парафиновые*) углеводороды, содержащие в молекуле 5 и 6 атомов углерода, имеют пределы выкипания от 28 до 70 °С. Эти углеводороды являются ценными для товарных бензинов, поскольку содержат 16–17% масс водорода (максимальное среди всех жидких углеводородов). Кроме того, именно эти углеводороды за счет низкой температуры кипения обеспечивают легкий запуск бензиновых двигателей при низких температурах.



Изомеризация – разветвление молекул нормальных углеводородов.



Единственный недостаток этой фракции – высокая склонность к детонации при сжатии топливно-воздушной смеси в бензиновом двигателе. Подробнее процесс детонации мы рассмотрим в главе 6. Пока же отметим, что устойчивость компонентов бензинов к детонации оценивают так называемым октановым числом. Условно принято считать антидетонационную стойкость нормального гептана равной нулю, а этот же показатель для 2,2,4-Триметилпентана (*изооктана*) – равным 100 единицам. Низкое октановое число фракции 28–70 °С объясняется тем, что в ней преобладают нормальный пентан (с октановым числом 61) и нормальный гексан (с октановым числом 25), суммарное содержание которых составляет до 70% масс на фракцию для обычных российских нефтей. А вот октановое число разветвленных молекул парафинов (*изо-алканов*) находится в пределах 89–96 единиц. Но их во фракции 28–70 °С не больше 30% масс, поэтому октановое число фракции обычно колеблется в пределах 60–70 единиц.

Если легкую часть бензиновой фракции (ее иногда называют легкой нефтью) подвергнуть изомеризации (разветвлению молекул нормальных углеводородов), можно значительно повысить ее октановое число, сохранив при этом высокое содержание водорода во фракции. Задача повышения октанового числа легкой части прямогонной бензиновой фракции решается на установках изомеризации.

В таблице 8 представлены основные показатели процесса изомеризации. Как видим, установки отличаются высоким (до 98% масс) выходом целевого продукта очень хорошего качества.

Таблица 8. Основные показатели процесса изомеризации

ПОКАЗАТЕЛИ	АЛЮМОПЛАТИНОВЫЙ КАТАЛИЗАТОР		ПЛАТИНА НА ЦЕОЛИТЕ
	ФТОРИРОВАННЫЙ	ХЛОРИРОВАННЫЙ	
Температура, °С	360–440	120–220	230–280
Давление, МПа	3,5–3,9	2,1–4,0	1,6–3,0
Выход изомеризата, % масс	95–97	98	93–97
ОЧ, моторный метод	78–80	82–83	78–80
ОЧ, исследов. метод	88–90	92–94	88–90
ДОПУСКАЕМОЕ СОДЕРЖАНИЕ В СЫРЬЕ:			
серы, ppm	10	50	50
воды, ppm	10	50	100

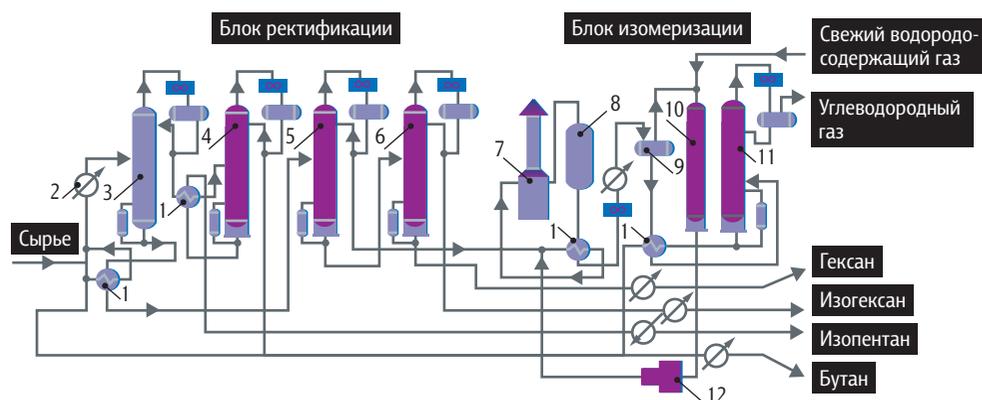


Рис. 20. Высокотемпературная изомеризация

- 1 – теплообменник;
- 2 – холодильник;
- 3 – изопентановая колонна;
- 4 – бутановая колонна;
- 5 – пентановая колонна;
- 6 – изогексановая колонна;
- 7 – печь;
- 8 – реактор;
- 9 – сепаратор;
- 10 – адсорбер;
- 11 – стабилизационная колонна;
- 12 – компрессор

На рис. 20 представлена схема установки изомеризации. На этой установке сырье (фракция 28–70 °С) предварительно осушается на цеолите или силикагеле и после нагревания в печи подается в реактор, заполненный катализатором. Катализатор представляет собой гранулы различной формы размером 2–3 мм. Гранулы состоят из оксида алюминия, на который нанесена платина. Сырье медленно движется через неподвижный слой катализатора. Поскольку сырье содержит достаточно большое количество целевых продуктов – *изопентана* и *изогексана*, – их предварительно отделяют от сырья на специальных ректификационных колоннах, а затем добавляют в целевой продукт.

На Омском НПЗ построена и успешно эксплуатируется несколько лет установка «Изомалк», разработанная российской компанией НПП «Нефтехим» (г. Краснодар), имеющая мощность 820 тыс. тонн в год. Это крупнейшая подобная установка в Европе.

Изомеризаты (целевые продукты установок изомеризации) являются ценнейшими компонентами товарных бензинов, обеспечивающими высокие экологические и теплотворные характеристики, хорошие пусковые свойства и высокое октановое число. Изомеризаты являются компонентами, обеспечивающими бензинам соответствие самым высоким экологическим классам. По совокупности свойств они значительно превосходят продукты установок риформинга – *рифформаты*.

Суммарная мощность установок изомеризации в России в последние годы резко возросла и сейчас превышает 20 млн тонн изомеризатов в год.

## 4.2. Каталитический риформинг

Из всех углеводородов бензиновых фракций самым высоким октановым числом обладают ароматические углеводороды: бензол (108), толуол (102), этилбензол (98), ксилолы (100), триметилбензол (114) и т.д. Ароматические углеводороды сосредоточены во фракции 80–180 °С, но их содержание невелико (около 10% масс), и поэтому октановое число этой фракции не превышает 55 единиц. С целью повышения октанового числа эту фракцию необходимо подвергнуть *рифформингу* – процессу превращения парафиновых углеводородов в ароматические. В результате получается *рифформат* – бензиновая фракция с октановым числом до 100 единиц – ценный высокооктановый компонент товарных бензинов. Но рифформаты имеют существенный недостаток – низкое содержание водорода, а значит, плохую теплотворную способность и высокую склонность к нагарообразованию. При сгорании таких углеводородов выделяется повышенное количество углекислого газа, а при сгорании бензола – *бенз-альфа-пирен* – один из самых страшных канцерогенов (по этой причине содержание бензола в бензинах ограничивают 1,0% масс, а рифформингу подвергают углеводороды, содержащие более 7 атомов углерода, которые переходят в толуол, ксилолы и более высокомолекулярные ароматические углеводороды, то есть не образуют бензол). Иногда с этой целью специально выделяют из рифформатов бензолсодержащие фракции.

Установки риформинга широко распространены в нашей стране – их суммарная мощность превышает 30 млн тонн. Но современные требования к бензинам ограничивают общее содержание ароматических углеводородов 35% масс, а это значит, что в дальнейшем установки риформинга будут строить только для получения индивидуальных ароматических углеводородов – ценнейшего сырья для производства моющих средств, пластмасс, лекарственных



Риформинг – процесс превращения парафиновых углеводородов в ароматические.

Таблица 9. Сравнительные характеристики катализаторов риформинга

ПОКАЗАТЕЛИ	ПР-51 (РФ)	REF-23 (РФ)	R-86 (США)	RG-682 (ФР.)
Давление в реакторе, МПа	1,0–1,5	2,0–2,5	1,3–1,5	1,3–1,5
ВЫХОД, % МАСС:				
риформата	85–87	84–85	82–84	83–85
ароматических у/в	58–60	54–55	56–57	57–58
водорода	2,5–2,9	2,0	2,0–2,4	2,2–2,6
ОЧ риформата (иссл.)	98–100	95–98	98–100	98–100
СОДЕРЖАНИЕ В РИФОРМАТЕ:				
ароматических у/в (% масс),	67–70	63–67	67–70	67–70
в том числе бензола	1,0	1,5	2,0	1,5
СОДЕРЖАНИЕ, % МАСС				
платины	0,23	0,25	0,25	0,25
рения	0,30	0,40	0,40	0,40
Диаметр гранул, мм	1,6	1,8	1,6	1,6
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	680	700	730	690

препаратов и другой химической продукции. А октановое число бензинов будут повышать другими методами, не имеющими недостатков, присущих ароматическим углеводородам.

Процессы риформирования проходят при высокой температуре на *платино-рениевых* катализаторах. Катализаторы представляют собой пористые сферические гранулы диаметром 1,5–2,0 мм, изготовленные из оксида алюминия с напылением платины и рения. Сравнительные характеристики катализаторов риформинга приведены в таблице 9.

Процесс риформинга проходит в несколько стадий при температурах до 495 °С. Чем выше пределы выкипания фракции (например, не 180, а 200 °С), тем больше получается в итоге целевого риформата. Но с повышением пределов выкипания в сырьевой фракции растет содержание серы, которая отравляет катализатор и быстро выводит его из строя. Для снижения содержания серы в сырье перед установками риформинга устанавливают блок гидроочистки, на котором содержание серы в сырье снижают до 0,0001% масс.

Побочным положительным фактором процесса риформинга является получение значительного количества *водорода*, выделяемого из молекул углеводородов при их дегидроциклизации. В прежние годы

именно установки риформинга были основными источниками водорода на НПЗ. Сегодня водород высокого качества получают путем конверсии метана и дальнейшей короткоцикловой концентрацией водорода до 99,9% чистоты. Но водород, получаемый на установках риформинга как побочный продукт, является более дешевым (рис. 21).

Повышение давления в системе установки риформинга способствует более длительной работе катализатора. Снижение давления позволяет увеличивать выход риформатов и водорода в процессе риформинга. Повышение температуры процесса приводит к уменьшению выхода риформата, но повышает его октановое число. Кроме того, повышение температуры ведет к быстрому закоксовыванию катализатора. Поскольку катализатор в реакторе находится в неподвижном состоянии, его периодически регенерируют, подавая в систему воздух. При этом кокс выжигается и удаляется из системы в виде углекислого газа.

Поскольку риформаты содержат до 70% масс ароматических углеводородов, а общее их содержание в товарных бензинах ограничено 35% масс, в состав товарных бензинов риформаты вовлекают в объеме не более 40% масс. Но даже это количество позволяет получать очень высокие октановые числа товарных бензинов.

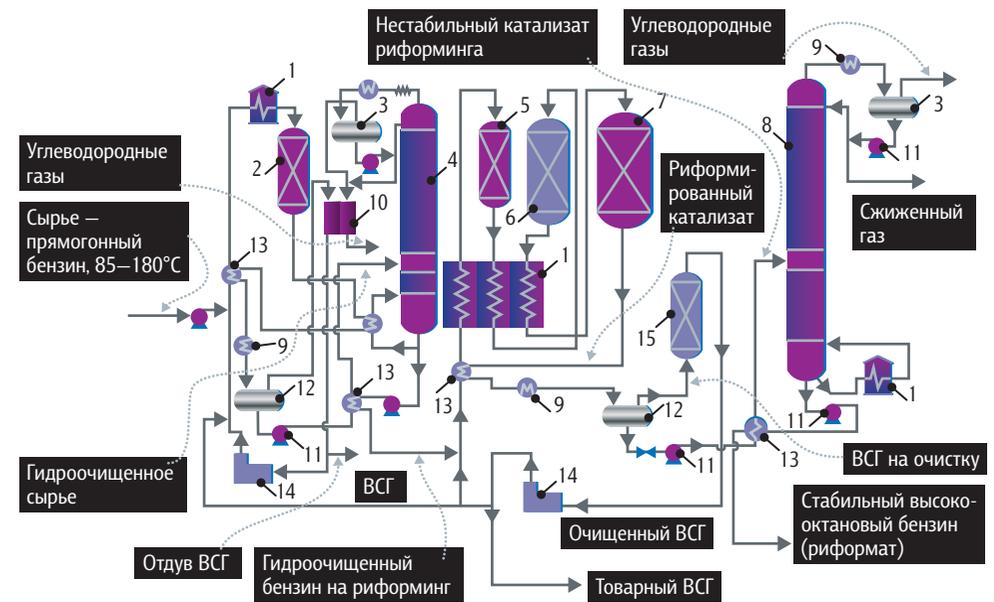


Рис. 21. Установка бензинового риформинга

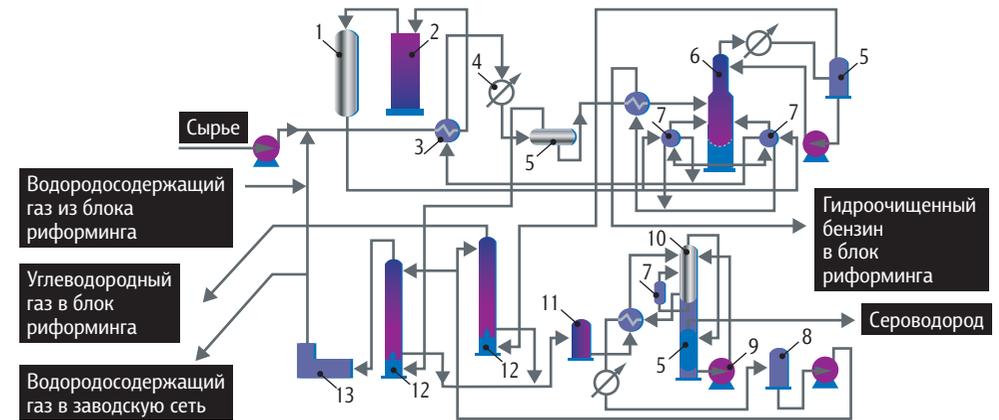
1 – трубчатая печь; 2 – реактор гидроочистки; 3 – сепарационная емкость колонны; 4, 8 – ректификационные колонны; 5–7 – реакторы риформинга; 9 – холодильник; 10 – секция очистки газа; 11 – насос; 12 – сепаратор высокого давления; 13 – теплообменник; 14 – компрессор; 15 – абсорбер

### 4.3. Гидроочистка керосиновых и дизельных фракций

В современных топливах содержание серы и ароматических углеводородов ограничивают очень низкими концентрациями. Так, в дизельном топливе содержание серы не должно превышать 0,001% масс. В прямогонной же дизельной фракции (200–360 °С) из нефти сорта Urals содержание серы превышает 0,5% масс. Кроме того, в этой фракции много бициклических ароматических углеводородов, а их содержание ограничено требованиями Технического регламента к топливам типа Евро-5 не более 8,0% масс.



В дизельном топливе содержание серы не должно превышать 0,001% масс.



Технологическая схема предварительной гидроочистки бензина

1 – реактор; 2 – секционная печь; 3 – теплообменник; 4 – холодильник; 5 – сепаратор; 6 – отпарная колонна; 7 – рибойлер; 8 – емкость для регенерированного раствора МЭА; 9 – насос; 10 – отгонная колонна; 11 – дегазатор; 12 – абсорбер для очистки газов; 13 – компрессор

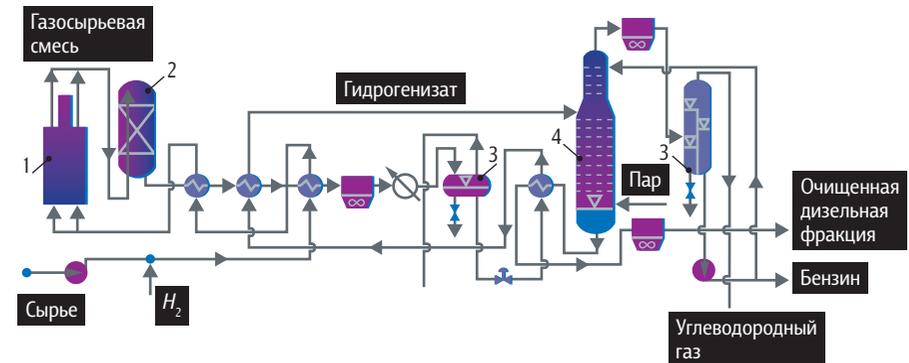


Схема установки гидроочистки дизтоплива

1 – печь; 2 – реактор; 3 – сепаратор; 4 – стабилизационная колонна

Такие жесткие требования обусловлены, прежде всего, экологическими нормативами дизельных двигателей.

Для достижения требуемого уровня качества дизельные фракции подвергаются гидроочистке. Приставка «гидро» в данном случае от латинского наименования водорода – *Hydrogenium* – рождающий воду.

При высоких температуре и давлении на катализаторе водород связывает серу, переводя ее в сероводород, а также насыщает ароматические углеводороды водородом, превращая их в наftenовые.

На рис. 22 представлена схема установки гидроочистки. В целом она очень похожа на установку гидрокрекинга, только давление и температура в системе значительно ниже.

Рис. 22. Схемы установок гидроочистки бензина и дизтоплива

Таблица 10. Параметры установок гидроочистки дизельных фракций

ПОКАЗАТЕЛИ	ЛЧ-24-7	ЛК-6У	ЛЧ-24-2000
МОЩНОСТЬ ПО СЫРЬЮ, ТЫС. Т/ГОД			
проектная	1200	2000	2000
фактическая	1500–2000	2000	2000
Давление в реакторе, МПа	2,8–4,0	5,2–5,5	5,0
Температура, °С	340–400	350–400	360–400
Кратность ВСГ, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	200–350	350–500	250
Объемная скорость, 1/ч	3–5	4,3	4,5
Выход гидрогенизата, % масс	97,0	95,3	97,0
Сера в сырье, % масс	0,6–1,6	0,6–1,6	0,8
Сера в гидрогенизате, % масс	0,1	0,12	0,15
Расход водорода, % масс	0,35	0,42	0,40

Параметры промышленных установок гидроочистки приведены в таблице 10.

Прямогонная дизельная фракция попадает непосредственно на установку гидроочистки, нагревается до необходимой температуры и подается в реактор. Реактор представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат, почти полностью заполненный слоем неподвижного катализатора. Катализаторы гидроочистки представляют собой цилиндрические гранулы длиной до 6 мм и диаметром до 5 мм. Основой гранул является оксид алюминия, на который нанесены оксиды молибдена, никеля или кобальта. Катализаторы имеют очень развитую поверхность – до 200 м<sup>2</sup>/г.

При медленном продвижении сырья сквозь слой катализатора (объемная скорость подачи сырья 3–5 1/ч) под высоким давлением водорода происходит насыщение ароматических углеводородов и удаление из них серы в виде сероводорода. Сероводород далее выводится с установки и отправляется на специальные печи (печи Клауса), где производится комовая элементарная сера.

❗ Целевым продуктом гидроочистки являются *гидрогенизат* (до 97% масс на сырье) – почти товарное дизельное топливо (в него еще нужно добавить присадки для улучшения эксплуатационных характеристик, которые рассмотрим в главе 5).

## 4.4. Гидроочистка бензиновых и дизельных фракций после каталитического крекинга

Получаемая в ходе процесса каталитического крекинга бензиновая фракция содержит большое количество олефиновых или даже диеновых углеводородов. Их структура представлена на рис. 23. Они образовались при разрыве (крекинге) молекул большего размера.

Содержание олефиновых (и тем более диеновых) углеводородов в бензинах ограничено. Например, в бензинах класса Евро-5 содержание олефиновых углеводородов ограничено 18,0% масс. Кроме того, иногда в бензинах каталитического крекинга содержание серы превышает 0,001% масс. Поэтому для достижения требуемых показателей бензины каталитического крекинга подвергают гидроочистке. Установка в целом похожа на установки гидроочистки дизельных топлив, только температуры значительно ниже. В итоге в доочищенной бензиновой фракции снижается не только содержание олефиновых углеводородов, но и серы (например, с 0,004% масс до 0,0004% масс). Только такая гидроочищенная бензиновая фракция позволяет производить бензин класса Евро-5 и выше, в котором содержание серы ограничено 0,001% масс. Аналогичную процедуру с теми же целями, только на другой установке, проходит и дизельная фракция, полученная на установке каталитического крекинга.

В целом установки гидроочистки относятся к разряду суперсовременных, поскольку вырабатывают компоненты моторных топлив самых высоких качественных показателей.

Пока установки гидроочистки бензинов каталитического крекинга работают только на нескольких отечественных заводах – Московском и Омском НПЗ.



В бензинах класса Евро-5 содержание олефиновых углеводородов ограничено 18,0% масс.

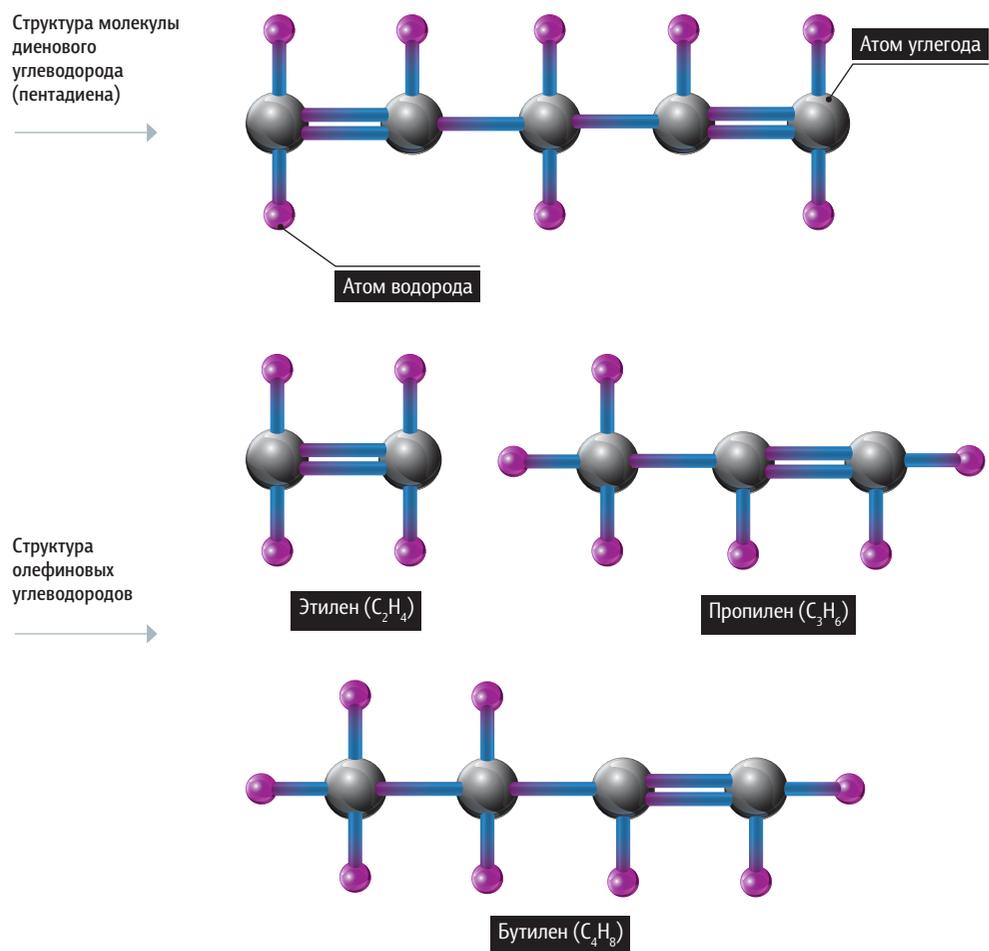


Рис. 23.  
Структура олефиновых  
и диеновых  
углеводородов

Необходимо признать, что если в нашей стране будет построено несколько установок изомеризации дизельных топлив, крылатая фраза «работает, как дизель в Заполярье» потеряет всякий смысл. Дизели в Заполярье не выключают, опасаясь, что при охлаждении двигателя из топлива выпадут в виде кристаллов парафины и забьют фильтры в топливной системе. Но если подвергнуть парафины в топливе *изомеризации*, решаются сразу несколько проблем: в топливе сохраняется высокое содержание водорода, оно имеет низкую температуру застывания и нет необходимости покупать и вводить в топливо дорогие депрессорные присадки (их описание – в главе 5).

В результате резко возрастет выпуск не только зимних, но и арктических дизельных топлив. И тогда в Заполярье дизельные двигатели можно будет глушить без опасения, что завтра они не заведутся.

## ГЛАВА 5. Синтез высококачественных компонентов бензинов и присадок для моторных топлив

## 5.1. Алкилирование и олигомеризация

Алкилированием принято называть химическую реакцию присоединения олефинового углеводорода (имеющего двойную связь) к другому углеводороду – как правило, насыщенному (то есть не имеющему двойной связи). Если взять компонент газа, выделяемого, в частности, на установке каталитического крекинга, – *бутилен*, то, используя катализатор, его можно присоединить к другому компоненту заводского газа – *изобутану*. Таким образом можно получить один из самых хороших компонентов бензина – *изооктан*. Октановое число у изооктанов различной структуры по моторному и исследовательскому методу одинаковое и составляет 100 единиц (в таких случаях говорят, что у компонента низкая чувствительность к методике определения октанового числа).

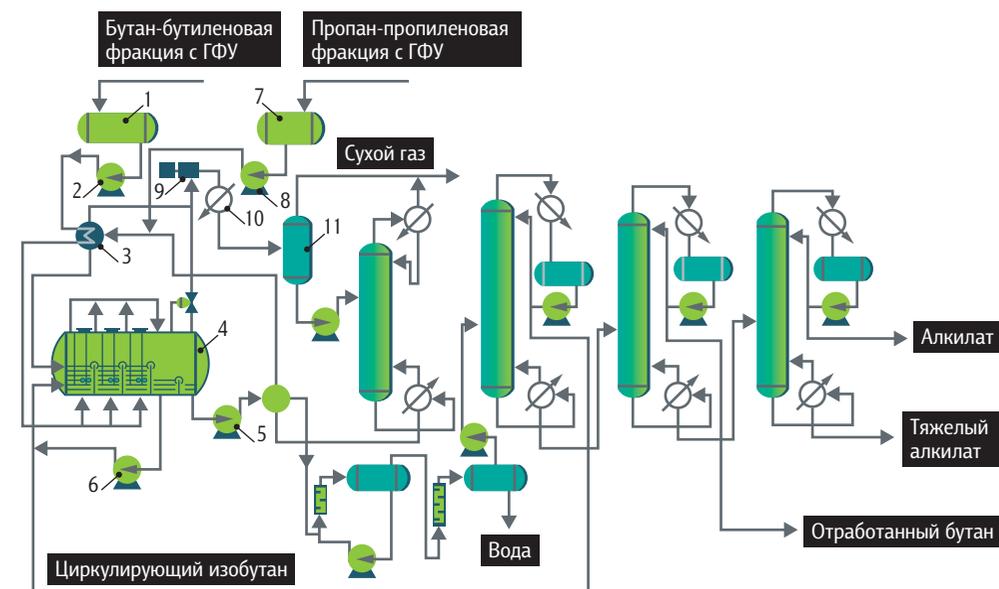


Рис. 24. Схема установки сернокислотного алкилирования  
1 – емкость для исходного сырья; 2 – насос для подачи сырья; 3 – переохладитель ББФ; 4 – самоохлаждающийся реактор с мешалками; 5 – насос для подачи продуктов алкилирования на защелачивание; 6 – насос для циркуляции серной кислоты; 7 – емкость для ППФ; 8 – насос для подачи ППФ в холодильный блок; 9 – компрессор; 10 – конденсатор; 11 – газосепаратор

Температура кипения изооктанов близка к 100 °С, и они обеспечивают бензиновому двигателю хорошую приемистость – быстрый набор мощности при увеличении подачи топлива.

*Алкилаты* – целевые продукты установок алкилирования – производители бензинов называют «жидким золотом», поскольку этот компонент товарных бензинов не имеет недостатков и может применяться для производства бензинов высших классов. Алкилаты совсем не содержат ароматических углеводородов, серы, олефиновых углеводородов, и поэтому с помощью этих компонентов можно улучшить качество любого бензина.

На рисунке 24 приведена схема установки сернокислотного алкилирования. Установка называется так по типу катализатора – жидкой серной кислоты 96–100%-ной концентрации. На установках другого типа в качестве катализатора применяют фтористый водород (плавиковую кислоту). Известно, что эти кислоты чрезвычайно агрессивны, и поэтому основные аппараты установок изготовлены

Таблица 11. Выходы целевого продукта в процессе алкилирования

ПОСТУПИЛО СЫРЬЯ, % МАСС	ВАРИАНТ 1	ВАРИАНТ 2
Бутан-бутиленовая фракция (ББФ)	66,0	54,4
Пропан-пропиленовая фракция	–	29,7
Изобутан	34,0	15,9
Всего	100,0	100,0
ПОЛУЧЕНО		
Легкий алкилат (в бензин)	79,1	69,5
Тяжелый алкилат (в дизтопливо)	3,4	5,9
Пропан	2,1	14,0
Отработанная ББФ	15,4	10,6
Всего	100,0	100,0

из нержавеющей стали. Это значительно повышает стоимость оборудования. Кроме того, в процессе работы установки кислота теряет степень концентрации, и отработанную кислоту надо выводить с установки и освежать катализатор. Приходится строить дополнительно секцию по утилизации кислоты-катализатора и производству свежей кислоты. Это также увеличивает стоимость оборудования.

Отличительным свойством реакции алкилирования является то обстоятельство, что нормальный бутан или пентан не алкилируются олефинами, а вот изобутан алкилируется хорошо. Поэтому в процессе алкилирования получается именно изооктан, имеющий высокое октановое число, а не нормальный октан, октановое число которого очень низкое.

❗ Реакция алкилирования проходит при невысоких температурах (до 10 °С) и давлениях (до 1,2 МПа – только для того, чтобы удерживать газы в жидком состоянии). Реакция идет с выделением тепла, и поэтому зону реакции все время охлаждают.

Активно перемешивая специальными механическими мешалками смесь кислоты и жидких газов в соотношении 1:1 в течение получаса, добиваются наиболее полного протекания реакции. Серная кислота и жидкие углеводородные газы очень плохо смешиваются друг с другом, да и плотность очень разная – поэтому образующуюся при их смешении эмульсию надо все время активно перемешивать.

Сырьем процесса может быть бутан-бутиленовая фракция, полученная на установке каталитического крекинга, или ее смесь

с пропан-пропиленовой фракцией с той же установки. В таблице 11 показаны балансы выхода целевого алкилата.

❗ Полученный в процессе алкилирования целевой продукт – *алкилат* – имеет октановое число до 96 единиц и пределы выкипания 94–140 °С, что позволяет получать при его добавлении товарные бензины очень высокого качества.

*Олигомеризацией* принято называть реакцию ограниченной полимеризации, когда небольшое количество молекул олефинов соединяются в одну большую молекулу. Продукт реакции олигомеризации пропилена – *олигомеризат* (чаще его называют *полимербензином*) – имеет высокое октановое число (96-97 единиц), но низкую химическую стабильность. Основным продуктом олигомеризации являются также *олефины* (то есть в молекулах есть двойная связь), поэтому они относительно легко окисляются, что в свою очередь может вызвать образование отложений в топливной системе двигателей. Поэтому содержание олефинов в современных товарных бензинах ограничивается 18,0% масс. Это является причиной того, что установки олигомеризации сегодня строят не очень активно, но если завод имеет установку гидроочистки бензинов каталитического крекинга (как, например, Омский или Московский НПЗ), полимербензин можно подвергать гидроочистке (двойная связь насыщается водородом), и тогда по качеству он не будет уступать алкилату.



Если завод имеет установку гидроочистки бензинов каталитического крекинга, полимербензин можно подвергать гидроочистке, и тогда по качеству он не будет уступать алкилату

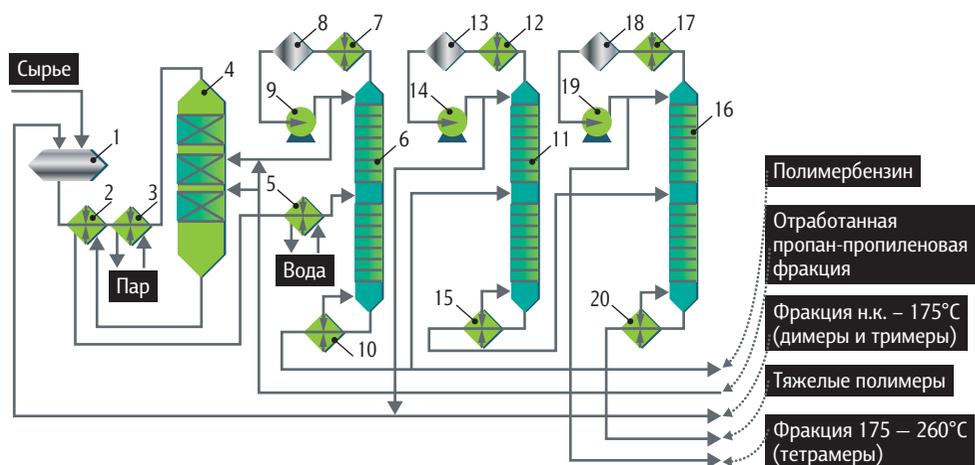


Рис. 25.

Схема установки олигомеризации  
 1, 8, 13, 18 – емкости;  
 2 – теплообменники;  
 3 – подогреватель;  
 4 – реактор;  
 5 – холодильник;  
 6, 11, 16 – колонны;  
 7, 12, 17 – конденсаторы-холодильники;  
 9, 14, 19 – насосы;  
 10, 15, 20 – кипятильники

На рисунке 25 приведена схема установки каталитической олигомеризации. Применяемый катализатор представляет собой специальный порошок, пропитанный фосфорной кислотой. Процесс протекает в проточном реакторе при температуре 180–230 °С и довольно высоком давлении 7,5–8,5 МПа. В таблице 12 представлен материальный баланс процесса олигомеризации.

Полученный полимербензин имеет в составе до 70% масс олефиновых углеводородов и довольно большое количество фактических смол – выше 5 мг/100 мл. Если его вовлекать в состав бензина, необходимо применять антиокислительную присадку. Иначе товарный бензин не пройдет испытания по показателю «индукционный период окисления». Более радикальным способом улучшения качества полимербензина является его гидроочистка.

Таблица 12. Материальный баланс процесса олигомеризации

ПОСТУПИЛО СЫРЬЯ	% МАСС
Пропан-пропиленовая фракция	100,0
ПОЛУЧЕНО	
Полимербензин (30–205 °С)	32,4
Остаток выше 205 °С (в дизтопливо)	3,6
Отработанная пропан-пропиленовая фракция	64,0
Всего	100,0

## 5.2. Производство МТБЭ и ТАМЭ

Ужесточение требований к октановому числу бензинов и их экологическим характеристикам (ограничение содержания ароматических углеводородов), жесткий запрет применения металлосодержащих антидетонаторов (в том числе тетраэтилсвинца) привели к необходимости вовлечения в состав бензинов других перспективных среди этих компонентов (это именно компоненты, а не присадки) являются *метил-трет-бутиловый эфир* (МТБЭ) и *метил-трет-амиловый эфир* (ТАМЭ). В таблице 13 приведены характеристики этих продуктов.

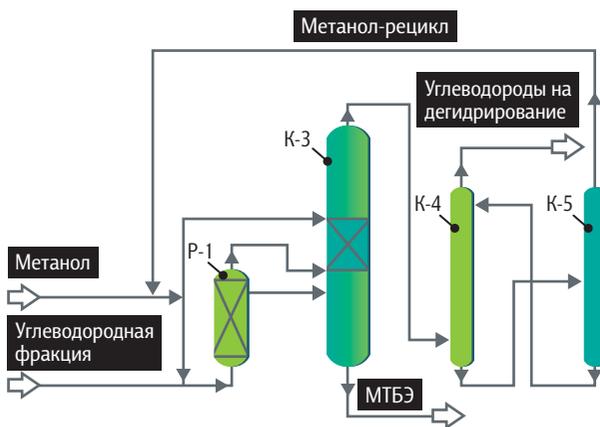
Таблица 13. Характеристика МТБЭ\* и ТАМЭ\*\*

ПОКАЗАТЕЛЬ	МТБЭ	ТАМЭ
Температура кипения, °С	55	86
Плотность, кг/м <sup>3</sup> при 20 °С	740	770
Растворимость в воде, % масс	1,3	0,6
Октановое число (исследовательский метод)	116	108
Максимально допустимое содержание в товарных бензинах, % масс	15,0	15,0

\* МТБЭ – метил-трет-бутиловый эфир, \*\* ТАМЭ – метил-трет-амиловый эфир

Сырьем для производства МТБЭ являются *метанол* и *изобутилен*. Источником изобутилена является бутан-бутиленовая фракция (поэтому МТБЭ производят либо непосредственно на НПЗ, имеющих установки каталитического крекинга, откуда получают сырье, либо на нефтехимических предприятиях, где есть иные источники получения изобутилена), а метанол получают из природного газа – метана, ресурсы которого в нашей стране не ограничены.

На рисунке 26 представлена схема установки производства МТБЭ. Синтез МТБЭ проходит при температурах 50–80 °С и давлении до 12,0 МПа в реакторе, заполненном твердым кислотным катализатором – гранулами диаметром до 15 мм. Разработанные Ярославским ООО «НИИ Ярсинтез» технологические установки имеются на целом ряде НПЗ в Российской Федерации и на ряде нефтехимических производств.



МТБЭ позволяет корректировать октановое число товарных бензинов до очень высоких значений, не ухудшая других показателей. Считается, что добавление в бензины МТБЭ может привести к отравлению водных бассейнов при возможной утечке бензинов из резервуаров вследствие частичной растворимости МТБЭ в воде. Однако утечки бензинов в водные бассейны в большом количестве маловероятны.

Рис. 26. Схема установки производства МТБЭ

❗ Главным недостатком МТБЭ как топлива следует считать довольно высокое содержание в нем кислорода – 18,2% масс. Если МТБЭ вводить в бензин в большом количестве – снижается теплотворная способность, поэтому его содержание в бензинах ограничивают 15,0% масс.

Сырьем для производства ТАМЭ являются метанол и амилен (фракция, содержащая большое количество изопентена). Молекулярная масса ТАМЭ несколько выше, чем у МТБЭ, содержание кислорода несколько ниже. Установка по производству ТАМЭ в целом не отличается от установки синтеза МТБЭ, не отличается и катализатор. Иногда синтез МТБЭ и ТАМЭ ведут совместно. В этом случае получают ВЭК – высокооктановый эфирсодержащий компонент, представляющий собой смесь МТБЭ, ТАМЭ и углеводородов.

ТАМЭ имеет октановое число несколько ниже, чем у МТБЭ, но его теплотворная способность выше, потому его можно вовлекать в состав товарных бензинов в несколько больших количествах.

## 5.3. Присадки для улучшения качества топлив

Поскольку в состав бензинов вовлекают большое количество компонентов вторичного происхождения – бензиновых фракций каталитического крекинга, гидрокрекинга, коксования, висбрекинга, – товарные бензины становятся склонными к окислению при контакте с воздухом с образованием смолообразных кислородсодержащих продуктов. Для предотвращения этого явления в состав бензинов вводят специальные антиокислительные присадки. Наиболее часто применяют *дибутилпаракрезол* (4-метил, 2,6-дитретбутилфенол) в концентрации до 0,1% масс на бензин. Товарные присадки имеют наименование *Агидол*, *Ионол* и другие. Индукционный период окисления бензина в этом случае увеличивается в несколько раз.

В России присадки типа *Ионол* и *Агидол* для бензинов производятся в виде концентрированных растворов в толуоле, что очень удобно для применения при смешении с другими компонентами бензинов.

Системы питания современных бензиновых двигателей очень чувствительны к образованию в них смолообразных отложений. Для предотвращения отложений в бензины вводят специальные моющие присадки. На самом деле эти присадки нужно называть предотвращающими отложения, но традиционно их много лет называют моющими. Эти присадки представляют собой ПАВ – *поверхностно-активные вещества* – самой различной структуры. Эти вещества вводят в бензины в концентрациях до 0,1% масс. Они адсорбируются на поверхности



Для предотвращения отложений в бензины вводят специальные моющие присадки – поверхностно-активные вещества



Первая в РФ установка каталитической депарафинизации дизельного топлива пущена в эксплуатацию на Омском НПЗ в 2012 году

металлов и препятствуют отложению смол. По составу наиболее перспективными мощными присадками для бензинов являются *полиэфирамины*.

ⓘ Наиболее крупнотоннажным типом присадок к моторным топливам следует признать *депрессорные присадки к дизельным топливам*. Эти присадки улучшают низкотемпературные свойства дизельных топлив – понижают температуру застывания и температуру предельной фильтруемости.

Парафиновые углеводороды, входящие в состав прямогонной дизельной фракции, являются ценными компонентами, поскольку содержат наибольшее количество водорода и обеспечивают топливу высокую теплотворную способность. Кроме того, они имеют высокое цетановое число и обеспечивают плавную работу дизельных двигателей. Но эти углеводороды имеют высокую температуру застывания, склонны к образованию кристаллов парафинов, выпадению их на топливных фильтрах и нарушению подачи топлива в двигатель. При высоких концентрациях и низких температурах окружающей среды парафины могут образовывать в топливе пространственную

структуру, полностью лишаящую его подвижности – топливо застывает. Депрессорные присадки адсорбируются на поверхности кристаллов парафинов и препятствуют их росту. В результате не только не образуются пространственные структуры (топливо не застывает), но маленькие кристаллы хорошо фильтруются через ячейки фильтров.

ⓘ Депрессорные присадки к дизельным топливам в основной массе – это сополимеры винилацетата с этиленом. Они представляют собой высоковязкую пластичную массу, что технологически не очень удобно для введения в топливо.

Топливо для введения присадки необходимо нагреть до 40–50 °С, иначе присадка не растворится. Обычная рабочая концентрация депрессора составляет 0,2–0,5% масс. Для облегчения процедуры ввода присадки в топливо без нагрева заранее готовят 10–15%-ные концентраты присадки в дизельном топливе, которые потом вводят в топливо по расчету. Температура застывания обычно снижается введением депрессора на 20–30 °С, а температура предельной фильтруемости – на 15–20 °С. В будущем применение депрессорных присадок, может, и не потребуются, поскольку дизельные фракции будут подвергаться каталитической изомеризации в процессе производства. Дело в том, что изопарафины имеют значительно меньшие температуры застывания, чем парафиновые. Дизельные фракции, подвергнутые изомеризации, позволяют производить зимние дизельные топлива без введения депрессорных присадок. Первая в РФ установка каталитической депарафинизации дизельного топлива пущена в эксплуатацию на Омском НПЗ в 2012 году.

Гидроочистка прямогонных дизельных фракций и гидроочистка дизельных фракций каталитического крекинга увеличивают содержание в современных дизельных топливах парафиновых углеводородов, что в целом повышает цетановое число дизельных топлив. Тем не менее иногда в состав дизельных топлив вводят цетанповышающие присадки. Наиболее перспективной из них следует считать *изопропилнитрат*. Введение 1,0% масс этой присадки увеличивает цетановое число дизельного топлива на 10 единиц. Это



Введение 1,0% масс изопропилнитрата увеличивает цетановое число дизельного топлива на 10 единиц.

особенно важно, когда планируется применение топлива в высокооборотных дизельных двигателях.

Снижение содержания серы в дизельных топливах значительно ухудшило их противоизносные свойства. Дело в том, что топливные насосы высокого давления в дизелях имеют высокоточные плунжерные пары с минимальными зазорами. Это обеспечивает высокое давление в системах впрыска топлив. Смазываются плунжерные пары самим топливом, и даже незначительный износ плунжера и гильзы может привести к снижению давления топлива на впрыске за счет роста зазора. Сера является естественной противоизносной присадкой, защищающей поверхности плунжера и гильзы от износа в процессе работы. Но сера из топлив удалена по описанным выше причинам. Для защиты от износа деталей топливных насосов в дизельные топлива вводят *синтетические депрессорные присадки* на основе кислот, спиртов или эфиров. При незначительных кон-

центрациях в топливе (до 0,1% масс) эти вещества способны, адсорбируясь на трущихся поверхностях, защищать их от износа.

центрациях в топливе (до 0,1% масс) эти вещества способны, адсорбируясь на трущихся поверхностях, защищать их от износа.



Для защиты от износа деталей топливных насосов в дизельные топлива вводят специальные кислородсодержащие противоизносные присадки на основе специально синтезированных эфиров.

Эффективность действия присадок контролируется показателем износа на специальном приборе. Норматив – не более 460 мкм диаметра пятна износа на испытательном стержне – заложен в требования к качеству современных топлив.

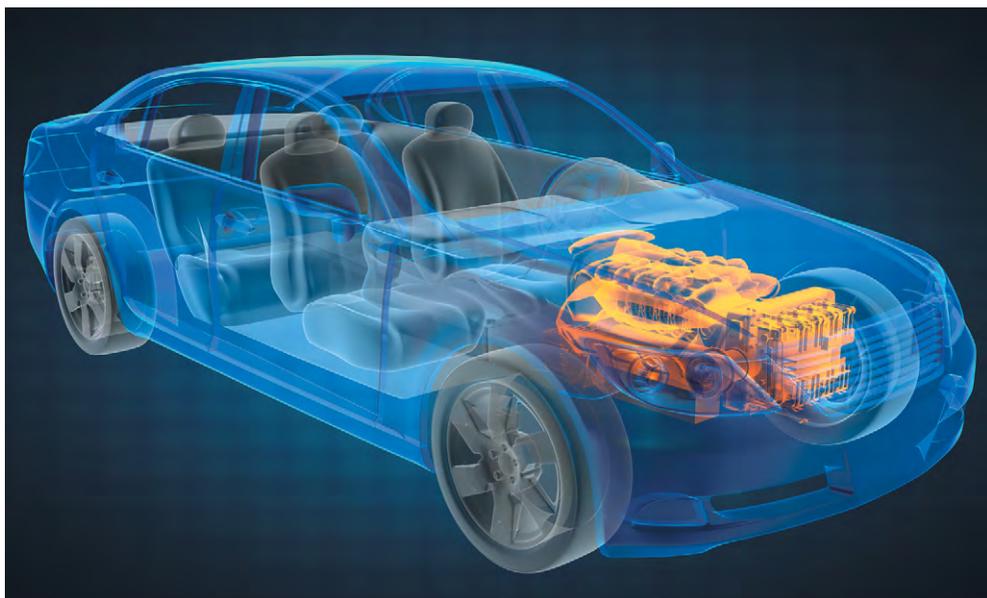
Кроме описанных выше, для повышения качества топлив в прошлом разработан огромный ассортимент других присадок. Это промоторы горения, антидымные присадки, антисажевые присадки, стабилизаторы, деактиваторы, нейтрализаторы и т.п. Однако с развитием процессов, улучшающих качество топлив непосредственно в процессе их производства, необходимость в применении этих присадок постепенно отпадает. Связано это, в основном, с увеличением содержания в топливах водорода и уменьшением содержания углерода, серы, кислорода и азота. Достигается такое изменение состава топлив применением различных гидропроцессов, описанных выше.

## ГЛАВА 6.

# Современные двигатели, требования к ним и топливам для них

## 6.1. Требования к бензинам и бензиновым двигателям

**А**втомобильными бензинами принято называть углеводородные топлива, применяемые в поршневых двигателях с принудительным воспламенением. Такие двигатели устанавливают на автомобилях и летательных аппаратах небольших размеров. Поэтому бензины принято разделять на автомобильные и авиационные. На самом деле область распространения бензиновых двигателей значительно шире – их устанавливают на суда небольшого размера (лодки, катера, скутеры и т.п.), на мотоциклы, мопеды, мотороллеры; бензиновыми двигателями оснащены небольшие электрогенераторы, бензопилы, газонокосилки и т.п. Во всех этих двигателях применяют, как правило, обычный автомобильный бензин.



*Размер поршней бензиновых двигателей ограничен, так как при превышении диаметра поршня 130 мм возрастает склонность к самопроизвольному взрыву топливно-воздушной смеси, сопровождающемуся повышением интенсивности изнашивания двигателя и резким увеличением расхода бензина.*

Мощность бензиновых двигателей составляет от одной лошадиной силы (ручная газонокосилка) до 1500 лошадиных сил (спортивные самолеты). Дальнейшее увеличение мощности бензиновых двигателей связано с очень серьезными конструктивными сложностями и представляется нецелесообразным. Дело в том, что размер поршней бензиновых двигателей ограничен тем обстоятельством, что при превышении диаметра поршня 130 мм резко возрастает склонность двигателя к детонации – самопроизвольному взрыву топливно-воздушной смеси, сопровождающемуся повышением интенсивности изнашивания двигателя и резким увеличением расхода бензина. Поэтому особо мощные бензиновые двигатели имеют очень сложную в изготовлении и обслуживании звездообразную компоновку цилиндров.

Самым распространенным видом бензиновых двигателей, безусловно, являются автомобильные двигатели. Их мощность составляет от 40 до 800 лошадиных сил, но самых массовых – от 80 до 150 лошадиных сил. Всего в мире в настоящее время эксплуатируется не менее 700 млн автомобилей с бензиновыми двигателями. Поэтому автомобильные бензины составляют один из самых массовых видов топлива – всего в год потребляется почти миллиард тонн автомобильных бензинов.

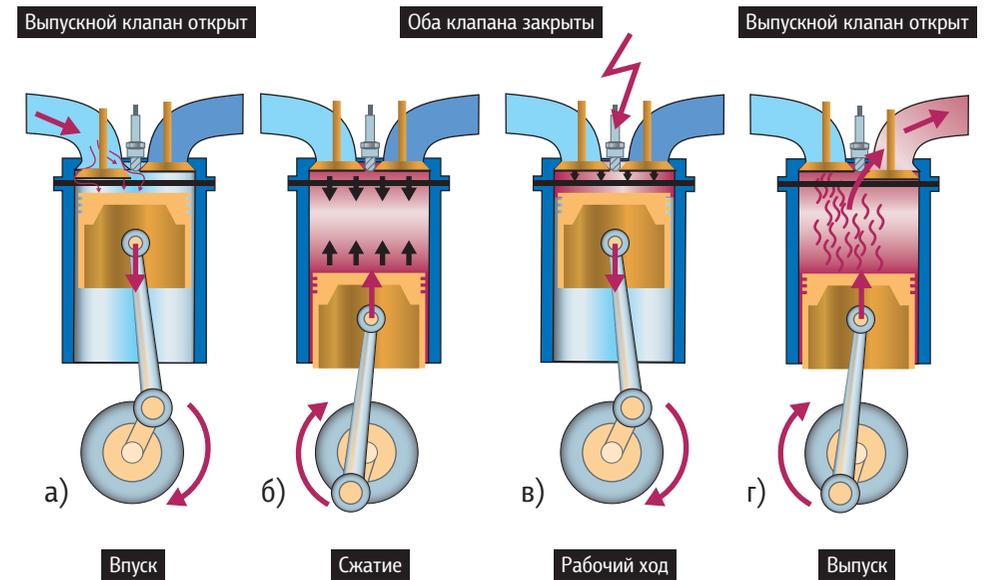
Таблица 14. Потребление автомобильных бензинов в 2015 году

СТРАНА	ПОТРЕБЛЕНИЕ, ТЫС. Т В ГОД	НАСЕЛЕНИЕ, МЛН	ТОНН НА ЧЕЛОВЕКА В ГОД	ДОЛЯ В МИРОВОМ ПОТРЕБЛЕНИИ, %
США	374 100	337,42	1,110	37,52
Япония	37 500	124,45	0,302	3,76
Германия	34 200	79,36	0,431	3,43
Россия	33 500	142,52	0,230	3,36
Великобритания	22 700	58,00	0,391	2,28
Франция	18 200	57,53	0,316	1,82
Китай	127 600	1374,58	0,093	13,00
Весь мир	997 000	7157,46	0,139	100,00

Широкое распространение бензиновых двигателей объясняется их относительной дешевизной, простотой обслуживания, доступностью и относительной дешевизной топлива, высокой надежностью и хорошими экологическими характеристиками.

Первый практически пригодный бензиновый двигатель – четырехтактный двигатель внутреннего сгорания – был построен немецким инженером Николаусом Отто в 1876 году. Он имел мощность всего 5,2 лошадиных силы, но зато значительно превосходил применявшиеся широко в то время паровые двигатели по коэффициенту полезного действия (КПД), удельной мощности (отношение мощности двигателя к его массе) и удельной массе (отношение массы двигателя к мощности). Именно это обстоятельство и привело к появлению и бурному развитию новой отрасли машиностроения – автомобилестроения. Автомобиль сделал жизнь человека намного проще. Открытие в Соединенных Штатах Америки крупнейших нефтяных месторождений сделало очень доступным автомобильный бензин, и появился новый социальный строй – углеводородное общество. Более 70% населения США переехало на жительство в пригороды, в каждом домохозяйстве количество автомобилей превысило количество взрослых членов семьи, это вызвало невиданный рост промышленности, в том числе производство и потребление бензинов. В настоящее время США, имея около 5% населения планеты, потребляют свыше 37% производимых в мире автомобильных бензинов (таблица 14).

Рассмотрим работу *четырёхтактного бензинового двигателя*. В каждом цилиндре имеются впускной и выпускной клапаны (рис. 27). Поршень движется внутри цилиндра с небольшим зазором,



поскольку иначе при нагревании поршень заклинит в цилиндре. Для перекрытия зазора в верхней части поршня устанавливают в специальных канавках компрессионные кольца, которые за счет собственной упругости постоянно прижаты к поверхности цилиндра. Первый такт работы двигателя – *впуск* – начинается с открытия впускного клапана и движения поршня вниз – от верхней мертвой точки к нижней. Двигаясь вниз, поршень создает в цилиндре пониженное давление (разрежение), благодаря этому в цилиндр поступает воздух, в который специальным инжектором впрыскивается расчетное количество топлива. Количество подаваемого в цилиндр воздуха всегда несколько превышает необходимое для полного сгорания топлива, чтобы обеспечить полноту сгорания топлива. А вот количество подаваемого в цилиндр топлива регулируется положением педали акселератора водителем в зависимости от дорожной обстановки и желаемой скорости автомобиля. Чем больше топлива подается в цилиндр, тем быстрее и с большей мощностью газы сгорания толкают поршень и тем больше мощность двигателя и скорость вращения коленчатого вала (обороты). После того как поршень достигает крайнего нижнего положения (нижней мертвой точки), начинается второй такт – *сжатие*. Впускной клапан закрывается, и поршень, двигаясь вверх, сжимает топливно-воздушную смесь. От сжатия смесь нагревается, и бензин полностью испаряется, хорошо смешиваясь с воздухом и образуя однородную (гомогенную)

Рис. 27. Схема работы четырехтактного бензинового двигателя

топливно-воздушную смесь. Когда поршень достигает крайнего верхнего положения (верхней мертвой точки), между электродами свечи зажигания, установленной в камере сгорания, подается высокое напряжение и создается мощная искра. Топливо-воздушная смесь воспламеняется, и начинается третий такт работы двигателя – *рабочий ход*. Нарастающая температура приводит к увеличению давления над поршнем, и он двигается вниз, передавая крутящий момент через шатун на коленчатый вал двигателя. Как только поршень достигает нижней мертвой точки, начинается последний такт работы двигателя – *выпуск*, открывается выпускной клапан, и поршень начинает двигаться вверх, выдавливая отработавшие газы сгорания в выпускной коллектор. По достижении поршнем верхней мертвой точки начинается первый такт следующего цикла работы двигателя.

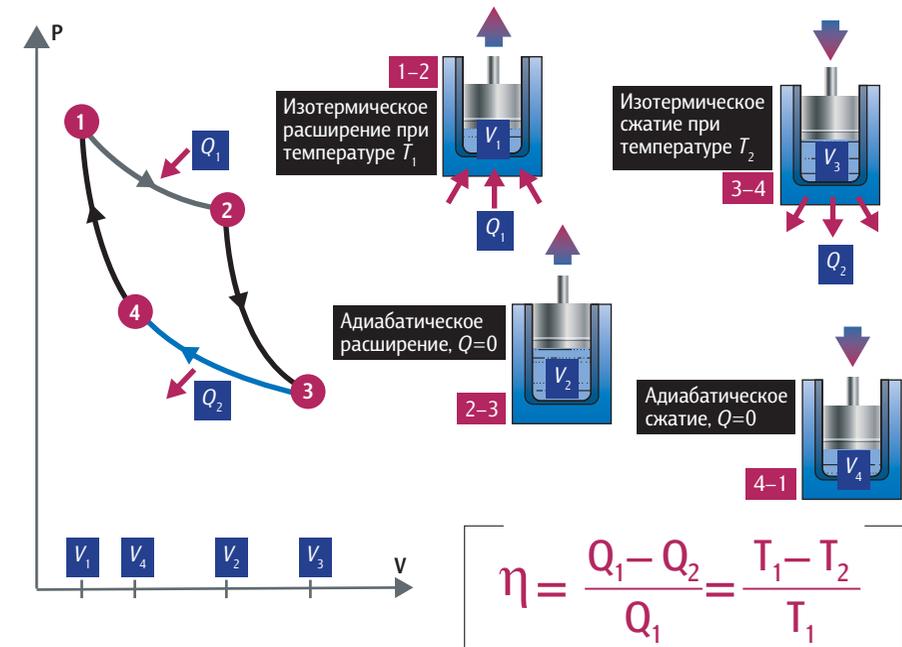


Бензины состоят из углеводородов. При их сгорании (окислении) в воздухе образуются углекислый газ и вода

Главное преимущество автомобильных бензинов как топлив – их высокая удельная теплотворная способность. Бензины состоят из углеводородов. При их сгорании (окислении) в воздухе образуются углекислый газ и вода.

❗ При окислении водорода выделяется 33 730 ккал/кг сжигаемого водорода. А при окислении углерода – только 8000 ккал/кг. Таким образом, теплотворная способность бензина зависит от количества водорода в нем – чем больше водорода, тем бензин лучше.

Количество водорода в бензине можно регулировать при производстве. Наибольшее количество водорода содержится в алканах – нормального и изостроения (около 16% масс). Меньше всего водорода в аренах (ароматических углеводородах) – около 7% масс. Циклоалканы занимают промежуточное положение. Если в состав бензинов вовлекать больше алканов, их теплотворная способность будет увеличиваться. При этом улучшаются и экологические характеристики бензинов – меньше выбрасывается с газами сгорания углекислого газа и больше воды, которая экологически безопасна.



Собственно, на этом построена классификация бензинов по экологическим классам – Евро-2, 3, 4, 5 (таблица 15).

Другим жестким требованием современных экологических норм к бензинам является общее содержание серы. При сгорании сернистых соединений в двигателе образуется сернистый ангидрид, который очень негативно влияет на окружающую среду. Для удаления сернистых соединений бензиновые фракции подвергают гидроочистке на установках изомеризации, каталитического крекинга и риформинга, а также на специальных установках гидроочистки.

❗ Помимо теплотворной способности важнейшей характеристикой бензинов является их детонационная стойкость – способность не взрываться при сильном сжатии в смеси с воздухом.

Бензиновые двигатели – классический вид тепловых двигателей, КПД которых определяется зависимостью давления от объема – так называемого цикла Карно (рис. 28). Стремление двигателестроителей к увеличению КПД неизбежно ведет к увеличению степени сжатия топливно-воздушной смеси, а это, в свою очередь, – к ужесточению требований к детонационной стойкости бензинов.

Рис. 28. Схема цикла Карно

Таблица 15. Требования к качеству бензинов разных классов

ХАРАКТЕРИСТИКИ	ЕДИН.	НОРМЫ В ОТНОШЕНИИ КЛАССА			
		2	3	4	5
Массовая доля серы, не более	мг/кг	500	150	50	10
Объемная доля бензола, не более	%	5	1	1	1
Концентрация железа, не более	мг/дм <sup>3</sup>	Отсут.	Отсут.	Отсут.	Отсут.
Концентрация марганца, не более	мг/дм <sup>3</sup>	Отсут.	Отсут.	Отсут.	Отсут.
Концентрация свинца, не более	мг/дм <sup>3</sup>	Отсут.	Отсут.	Отсут.	Отсут.
Массовая доля кислорода, не более	%	–	2,7	2,7	2,7
Объемная доля углеводородов:	%				
Ароматических, не более		–	42	35	35
Олефиновых, не более		–	18	18	18
Октановое число:	–				
по исследоват. методу, не менее		92	95	95	95
по моторному методу, не менее		83	85	85	85
Давление паров, не более:	кПа				
в летний период		–	45–80	45–80	45–80
в зимний период		–	50–100	50–100	50–100
Объемная доля оксигенатов, не более:	%				
метанола		–	Отсут.	Отсут.	Отсут.
этанола			5	5	5
изопропанола		–	10	10	10
третбутанола			7	7	7
изобутанола		–	10	10	10
эфиров, сод. 5 или более ат. углер.		–	15	15	15

Детонационная стойкость бензинов определяется показателем «Октановое число». Октановое число – это сравнительный интегрированный показатель, который определяется на специальной одноцилиндровой двигательной установке. Условно принято считать, что октановое число изооктана составляет 100 единиц (отсюда название показателя). Октановое число другого углеводорода – нормального гептана – принято считать за 0. Таким образом, у любой сложной смеси углеводородов (а именно такой смесью и является

автомобильный бензин) можно определить стойкость к детонации, соответствующую, например, смеси 95% объемных изооктана и 5% объемных гептана. Тогда октановое число бензина будет составлять 95 единиц. Разделяют определение октанового числа по моторному методу (более жесткое испытание на двигателе) и по исследовательскому (менее жесткое, но проводится также на двигателе).

❗ Разница в октановых числах индивидуальных углеводородов по исследовательскому и моторному методу называется чувствительностью. Как правило, октановое число по исследовательскому методу несколько выше, чем по моторному, но есть углеводороды, у которых, наоборот, октановое число по моторному методу выше.

Известны вещества, которые резко повышают детонационную стойкость бензинов даже при введении в очень небольших концентрациях – например, *тетраэтилсвинец* (ТЭС). Введение 0,1% масс ТЭС увеличивает октановое число бензина на 10 единиц. Такие бензины раньше называли этилированными. Но ТЭС чрезвычайно ядовит: попавший в организм человека свинец – тяжелый металл – не выводится из организма и дает кумулятивный (накопительный) токсический эффект, вызывая ряд тяжелых заболеваний. Поэтому сегодня применение ТЭС почти повсеместно запрещено (в РФ с 1 июля 2003 года).

Самым массовым октанповышающим компонентом бензинов в настоящее время является *метил-трет-бутиловый эфир* (МТБЭ), который получают синтезом из метилового спирта и изобутилена. Товарный МТБЭ имеет октановое число 116. Главный недостаток МТБЭ, как и других кислородсодержащих соединений – собственно высокое содержание кислорода, который является инертным с точки зрения выделения тепла при сгорании компонентов бензина. В МТБЭ массовая доля кислорода составляет 18,2%. Кроме МТБЭ применяют эфиры и другого состава, например ТАМЭ (*третамилловый эфир*). В них кислорода меньше, но октановое число у этих эфиров ниже. Поэтому в требованиях технического регламента, введенного в РФ с 2008 года, ограничивают общее содержание кислорода в бензинах не более 2,7% масс с целью обеспечения высокой теплотворной способности бензинов.



Октановое число – это сравнительный интегрированный показатель, который определяется на специальной одноцилиндровой двигательной установке.

Таблица 16. Качество компонентов, вовлекаемых в состав бензинов

КОМПОНЕНТ	ОКТАНОВОЕ ЧИСЛО		СОДЕРЖАНИЕ, % МАСС			
	Иssl.	Мот.	Аром. углеводородов	Бензола	Олефинов	Серы
Риформат	96,5	86,0	56,0	1,3	0,0	0,0
Изомеризат	80,5	79,5	0,01	0,01	0,0	0,0
Катализат	93,7	82,0	26,7	1,1	13,5	0,002
Алкилат	96,7	94,4	0,0	0,0	0,0	0,0
МТБЭ	116,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,001

Таблица 17. Примерный состав бензинов различного качества

КОМПОНЕНТ	АИ-98 ЕВРО-5	АИ-95 ЕВРО-5	АИ-92 К-5
Риформат	41,59	33,96	47,06
Изомеризат	4,73	7,58	24,60
Катализат	34,97	53,65	28,34
Алкилат	4,69	2,79	–
МТБЭ	8,13	0,12	–
Итого, %	100,0	100,0	100,0

Примерный состав товарных бензинов разного качества и свойства входящих в них компонентов приведены в таблицах 16 и 17.

Полученные с разных установок компоненты смешиваются в товарных резервуарах НПЗ в определенных соотношениях в зависимости от требуемого качества бензина. Как правило, главным фактором, ограничивающим концентрацию того или иного компонента, является ограничение по содержанию в бензинах ароматических углеводородов. Нетрудно заметить, что этих углеводородов больше всего в риформатах и катализатах, но эти компоненты имеют высокое октановое число, да и себестоимость этих компонентов ниже, чем у других. Кроме того, и это самое важное обстоятельство – сырьё для установок каталитического риформинга (фракции 85–180 °С) и каталитического крекинга (вакуумного газойля 360–490 °С) на НПЗ значительно больше, и производство компонентов бензинов на этих установках значительно превосходит мощности установок алкилирования, изомеризации и производства МТБЭ, сырья

для которых значительно меньше. Поэтому риформат и катализат являются основными по объемам компонентами товарных бензинов (см. табл. 17).

В Российской Федерации производством бензинов занимаются 26 крупных нефтеперерабатывающих предприятий. Почти все они входят в состав вертикально-интегрированных нефтяных компаний (ВИНК) с известными брендами. Крупнейшим производителем бензинов в РФ является компания «Роснефть», которая производит до 16 млн тонн бензинов год, а в ближайшей перспективе планирует нарастить этот показатель до 20 млн тонн за счет углубления переработки нефти путем строительства комплексов гидрокрекинга. Вторым крупным производителем является «ЛУКОЙЛ» – до 10 млн тонн бензинов в год, осуществивший строительство комплексов каталитического крекинга на заводе в городе Кстово Нижегородской области и комплекса гидрокрекинга в Волгограде. Далее следуют «Газпром нефть» – до 9 млн тонн в год, «Сургутнефтегаз» – до 4 млн тонн.

Необходимо отметить, что требования Евро-5 подразумевают октановое число бензинов не ниже 95, поэтому бензин с октановым числом 92, хотя он и соответствует требованиям Евро-5 по другим характеристикам, к группе Евро-5 не относится.



*Бензин с октановым числом 92 не относится к группе Евро-5.*



Таблица 18. Требования к экологическим показателям бензиновых двигателей в Евросоюзе

НОРМЫ	ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ВЫБРОСЫ, Г/КМ				
	СО	СН/NOX	НЕНАСЫЩ. УГЛЕВОДОР.	АЛЬДЕГИДЫ	ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ
Евро-1, 1993 г.	2,72	0,97	–	–	–
Евро-2, 1996 г.	2,00	0,50	–	–	–
Евро-3, 1999 г.	1,00	0,1/0,1	–	–	–
Евро-4, 2005 г.	0,50	0,1/0,1	0,025	0,005	0,025
Евро-5, 2009 г.	0,35	0,05/0,1	0,020	0,001	0,020

Но жесткие требования предъявляются не только к качеству автомобильных бензинов, но и к качеству самих бензиновых двигателей. В таблице 18 приведены сведения об экологических требованиях к двигателям различных классов. Достижение жестких параметров по выбросам двигателей невозможно без соответствующего качества бензинов. Так, например, вовлечение в состав бензинов большого количества ТАМЭ ведет к увеличению выбросов альдегидов.

❗ Однако главный вклад в достижение экологических параметров все же вносит конструктивное совершенствование бензиновых двигателей и, прежде всего, электронных систем управления впрыском топлива на различных режимах работы бензиновых двигателей.



Самой главной проблемой для автомобильного двигателя является необходимость постоянной работы на переменных мощностях и скоростных режимах. Если бы двигатель работал все время в одном оптимальном режиме, срок его службы вырос бы в несколько раз, значительно снизилось бы потребление топлива и сократились выбросы вредных веществ. Но тогда необходимо обеспечить автомобиль очень сложной трансмиссией, которая позволит при постоянных оборотах и мощности двигателя осуществлять плавное трогание автомобиля с места, быстрый разгон и максимально возможную скорость,



и тогда при любой остановке придется обязательно выключать двигатель (иначе на остановках будет расходоваться на стационарном режиме большое количество топлива).

Для того чтобы обеспечивать приемлемые показатели двигателя на переходных режимах работы, и прежде всего в моменты увеличения мощности, изобретено и внедрено в практику большое количество всевозможных усовершенствований: четырехклапанные системы впуска и выпуска газов, маловязкие энергосберегающие масла, поршни из композитных материалов, имеющих малый коэффициент теплового расширения, позволяющие повысить рабочие температуры и, следовательно, КПД двигателей. Но, безусловно, главные достижения в развитии двигателестроения связаны с компьютеризованными системами управления впрыском топлива и организацией непосредственного впрыска топлива в цилиндры. Эти системы способны учитывать одновременно большое количество характеристик работы двигателей на разных режимах и определять оптимальное количество и время впрыска топлива.

Именно развитие этих систем наряду с ростом качества бензинов и применением каталитических систем дожигания газов сгорания позволяет постоянно ужесточать требования к экологическим характеристикам бензиновых двигателей.

В целом необходимо отметить, что нефтеперерабатывающая промышленность Российской Федерации по качеству бензинов значительно опережает сегодня качество бензиновых двигателей не только основного парка автомобилей в стране, но и новинок – как отечественного автопрома, так и зарубежного.

**Главные достижения в развитии двигателестроения связаны с компьютеризованными системами управления впрыском топлива и организацией непосредственного впрыска топлива в цилиндры**

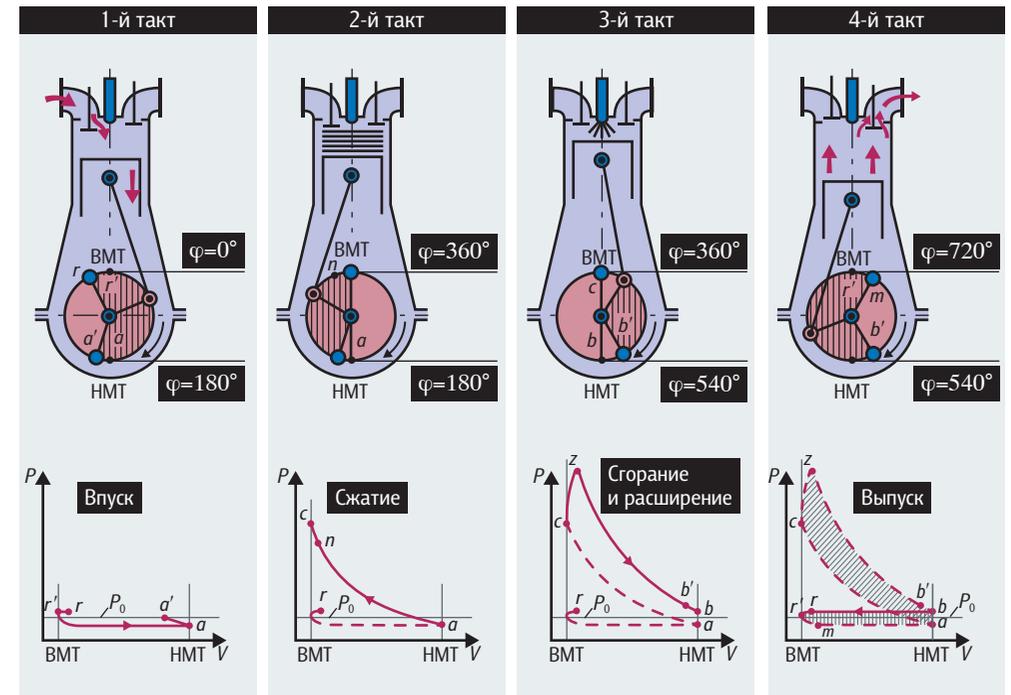
## 6.2. Требования к дизельным топливам и дизельным двигателям

**П**ервый практически пригодный двигатель с воспламенением от сжатия был создан немецким инженером Рудольфом Дизелем в 1894 году, а уже в 1897 году он продал лицензию на их серийное производство русскому нефтепромышленнику Эммануэлю Нобелю. Впоследствии двигатели такой конструкции стали называть дизельными или просто дизелями.



❶ Принципиальное отличие дизельных двигателей от бензиновых – отсутствие системы зажигания. Воспламенение топливно-воздушной смеси происходит не от искры, а вследствие высокой температуры сжатого в цилиндре воздуха.

Рассмотрим цикл работы четырехтактного дизельного двигателя. В первом такте происходит *впуск* в цилиндр свежего воздуха через открытый впускной клапан (рис. 29). После достижения поршнем нижней мертвой точки впускной клапан закрывается и, двигаясь вверх, поршень сжимает в цилиндре воздух. От сильного сжатия воздух нагревается до  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а давление в цилиндре возрастает до 50 атмосфер к концу такта сжатия. При достижении поршнем верхней мертвой точки происходит *впрыск* в цилиндр топлива под очень высоким давлением – не менее 400 атмосфер. Топливо смешивается



с воздухом, испаряется и воспламеняется. Давление над поршнем резко возрастает, и поршень под его воздействием движется вниз, вращая коленчатый вал. Таким образом осуществляется третий такт – *рабочий ход*. После достижения поршнем нижней мертвой точки открывается выпускной клапан и осуществляется четвертый такт – *выпуск* отработавших газов.

Главное преимущество дизельных двигателей перед бензиновыми – более высокий КПД.

Достигается это преимущество за счет более высокой степени сжатия. В отличие от сжатия топливно-воздушной смеси в бензиновом двигателе, в дизельном происходит сжатие воздуха. Воздух при сжатии не подвержен детонации, поэтому степень сжатия в дизелях примерно в два раза больше. Это обеспечивает более высокое давление в такте рабочего хода, а значит – более высокий КПД в соответствии с циклом Карно.

Главный недостаток дизельного двигателя – его плохая приемистость, то есть двигатель медленнее реагирует на увеличение подачи топлива увеличением мощности и числа оборотов коленчатого вала. Объясняется это тем обстоятельством, что в дизельном двигателе

Рис. 29. Схема работы четырехтактного дизельного двигателя



Основное преимущество дизельных двигателей перед бензиновыми – более высокий КПД.

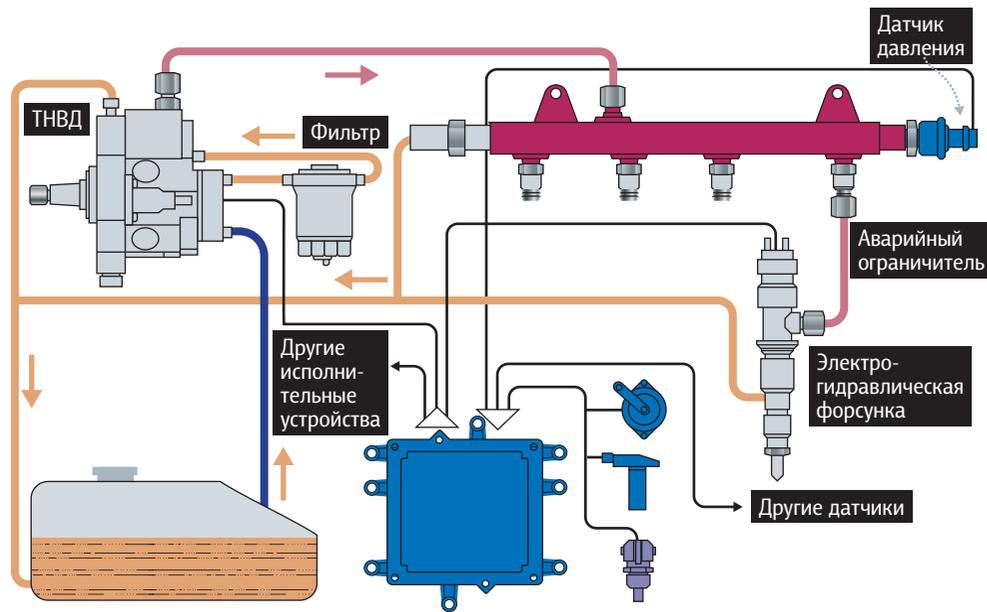


Рис. 30.  
Система Common-Rail

четыре процесса – впрыск топлива, его смешение с воздухом, испарение и воспламенение – происходят одновременно за очень короткий промежуток времени, тогда как в бензиновом двигателе сначала происходит впрыск при двигающемся вниз поршне, затем при двигающемся вверх поршне происходит смешение топлива с воздухом и испарение, и только затем подается искра и происходит воспламенение. В результате бензиновый двигатель имеет более высокие обороты и лучшую приемистость. По этой причине дизельные двигатели устанавливали только на большегрузные автомобили и большие автобусы, а на легковые автомобили, где необходимо быстро менять обороты двигателя, дизельные двигатели устанавливали редко.

В последние двадцать лет конструкторы в значительной степени увеличили приемистость дизельных двигателей. Это удалось сделать изменением конструкции системы впрыска топлива. Раньше впрыск дизельного топлива осуществлялся традиционным топливным насосом высокого давления, установленным на значительном расстоянии от форсунки.

❗ Появление системы Common-Rail (рис. 30) позволило резко увеличить давление впрыска (до 1600 атмосфер) и приблизить зону высокого давления к форсунке.

Таблица 19. Требования к качеству дизельных топлив

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА	Единица измерения	Нормы в отношении			
		класса 2	класса 3	класса 4	класса 5
МАССОВАЯ ДОЛЯ СЕРЫ, НЕ БОЛЕЕ	МГ/КГ	500	350	50	10
ТЕМПЕРАТУРА ВСПЫШКИ В ЗАКРЫТОМ ТИГЛЕ, НЕ НИЖЕ:	°С				
дизельного топлива, за исключением дизельного топлива для арктического климата		40	40	40	40
дизельного топлива для арктического климата		30	30	30	30
Фракционный состав – 95 процентов объемных перегоняется при температуре не выше	°С	360	360	360	360
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, не более	%	–	11	11	8
Цетановое число, не менее	–	45	51	51	51
Цетановое число дизельного топлива для холодного и арктического климата, не менее	–	–	47	47	47
ПРЕДЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ФИЛЬТРУЕМОСТИ, НЕ ВЫШЕ:	°С				
дизельного топлива для холодного климата		минус 20	минус 20	минус 20	минус 20
дизельного топлива для арктического климата		минус 38	минус 38	минус 38	минус 38
Смазывающая способность, не более	мкм	460	460	460	460

В результате время впрыска сократилось в несколько раз, улучшилось смешение топлива с воздухом, ускорилось его испарение. Появление насос-форсунок позволило еще больше увеличить давление и еще больше приблизить зону высокого давления. Таким образом, дизельные двигатели стали более высокооборотистыми и возросла их приемистость. Такие двигатели стали массово устанавливаться на легковые автомобили.

Конечно, новая конструкция систем впрыска сделала дизельные двигатели значительно более сложными и дорогими, но это окупается высокой экономичностью – при одинаковой мощности дизели расходуют на 30–40% меньше топлива. Массовое применение дизелей и усложнение системы подачи топлива потребовало ужесточения требований к качеству дизельных топлив. В таблице 19 приведены современные требования к качеству дизельных топлив.

Снижение содержания серы в дизельных топливах очень положительно сказалось на снижении выбросов сернистого ангидрида,

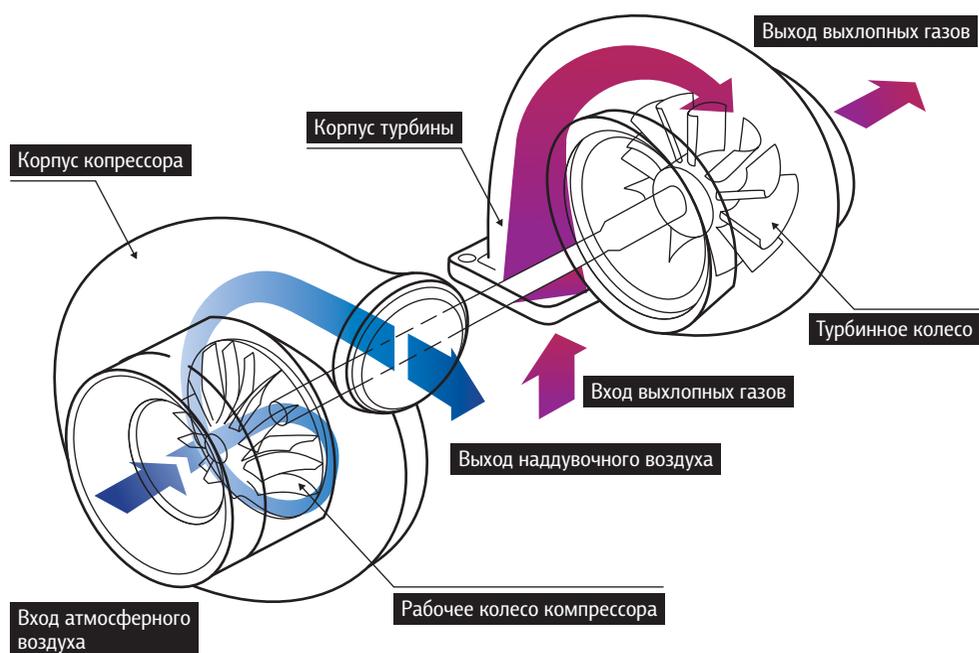


Рис. 31.  
Схема системы турбонаддува

а снижение содержания полициклических ароматических углеводородов снизило выбросы углекислого газа.

Наиболее эффективные современные дизельные двигатели оснащают системами турбонаддува и промежуточного охлаждения наддувочного воздуха (рис. 31). Такие системы позволяют увеличивать КПД двигателей и снижать их удельную массу (отношение массы к мощности). В трубопроводе выхлопных газов устанавливают турбину, которая преобразует часть энергии отходящих газов в крутящий момент. На валу этой турбины, но уже во впускном трубопроводе, устанавливают другую турбину, которая увеличивает поток воздуха, направляющийся в двигатель. Давление во впускном трубопроводе возрастает, и в цилиндры можно подать больше воздуха, а значит, больше топлива – и таким образом увеличить мощность двигателя, не меняя его размеров. Но поскольку воздух при сжатии нагревается и плотность его уменьшается, количество наддувочного воздуха снижается. Чтобы это предотвратить, наддувочный воздух перед подачей в цилиндры охлаждают, увеличивая массу воздушного заряда. В результате, имея один типоразмер двигателя, изменяя степень наддува, можно значительно изменять мощность двигателей, создавая целую линейку мощностей.

Таблица 20. Характеристики двигателей автомобилей КАМАЗ

МОДЕЛЬ	740.70-280	40.71-320	740.72-360	40.73-400	40.74-420	740.75-440
Число цилиндров и расположение	V8					
Диаметр цилиндра и ход поршня, миллиметров	120x130					
Рабочий объем, литров	11,76					
Степень сжатия	16,8					
Мощность, л.с., не менее	280	320	360	400	420	440
Номинальная частота вращения коленчатого вала, мин-1	1900					
Максимальный полезный крутящий момент по Правилам ЕЭК ООН № 85-00, максимальный крутящий момент нетто по ГОСТ 14846-81, кгс×м, не менее	1177	1373	1570	1766	1864	2060
Частота вращения коленчатого вала, соответствующая максимальному крутящему моменту, мин-1	1300+/-50					
Минимальный удельный расход топлива, г/(л.с.×ч)	194,5					
Расход масла на угар на режиме номинальной мощности, в % от расхода топлива, не более	0,06					

В таблице 20 приведены характеристики двигателей грузовиков КАМАЗ – наиболее массовых в нашей стране. Мощность двигателей изменяется от 280 до 440 лошадиных сил, но размер двигателей всего модельного ряда остается постоянным. Это позволяет унифицировать запасные части и упрощает обслуживание двигателей.

Создание модельных рядов двигателей позволяет создавать модельные ряды автомобилей различного назначения и грузоподъемности, поскольку кроме мощности изменяется крутящий момент двигателей, что дает возможность устанавливать различные конфигурации трансмиссий, в том числе и полноприводных автомобилей большой проходимости.

Сегодня дизельные двигатели все активнее устанавливают на легковые автомобили. Увеличение числа оборотов дизелей позволяет применять в них энергосберегающие маловязкие моторные масла, новые конструкционные материалы позволяют увеличивать степень сжатия и температуры, все это дает возможность постоянно улучшать экологические характеристики двигателей.

В последние годы к дизельным двигателям предъявляют все более жесткие экологические требования. В таблице 21 приведены требования к уровню выбросов современных дизельных двигателей.

Таблица 21. Требования Евросоюза к уровню выбросов дизелей

УРОВЕНЬ	ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ВЫБРОСЫ, Г/Л.С.ЖАС				ДАТА ВВОДА
	NOx	СН	СО	ЧАСТИЦЫ	
Евро-1	6,60	0,90	3,60	0,26	01.10.93
Евро-2	5,15	0,81	2,90	0,11	01.10.96
Евро-3	3,70	0,44	1,47	0,74	01.10.99
Евро-4	2,00	0,32	1,00	0,014	01.10.05
Евро-5	1,20	0,20	0,70	0,014	01.10.09

Снижение выбросов несгоревших углеводородов и недогоревшего углерода (угарного газа – СО и твердых частиц сажи) вполне достигается улучшением качества дизельного топлива и процессов управления подачей топлива. А вот снизить количество выбросов NOx с увеличением КПД двигателей становится все труднее: температура в камере сгорания возрастает, и склонность к окислению азота, входящего в состав воздуха, тоже растет. Для снижения выбросов оксидов азота современные дизельные двигатели оборудуют системами нейтрализации окислов азота. На рис. 32 представлена схема нейтрализации окислов азота в дизельных двигателях с помощью специальной жидкости, содержащей аммиак.

Именно отсутствие такой системы нейтрализации в дизельных двигателях автомобилей «Фольксваген», поставлявшихся в США, вызвало вселенский скандал с выплатой клиентам многомиллиардных компенсаций. Американским специалистам было непонятно – каким образом немецким инженерам удастся снизить выбросы NOx при высокой степени сжатия, а значит, и высоких температурах? Никаких специальных приспособлений не обнаружили и решили проверить датчики выброса NOx. Оказалось, что датчики просто загнули и они показывают заниженные значения.

Главным компонентом дизельных топлив на НПЗ являются прямые фракции, подвергнутые гидроочистке. Кроме того, в состав дизельных топлив вовлекают дизельные фракции, полученные на установках каталитического крекинга. В последние годы, в связи с резким увеличением количества дизельных двигателей и потребления дизельных топлив, строят все больше установок гидрокрекинга, которые позволяют не только значительно увеличивать потенциал НПЗ по выпуску дизельных топлив, но и улучшать их качество.

Гидроочистка улучшает еще один важный показатель качества дизельного топлива – повышает цетановое число. *Цетан* – тривиальное

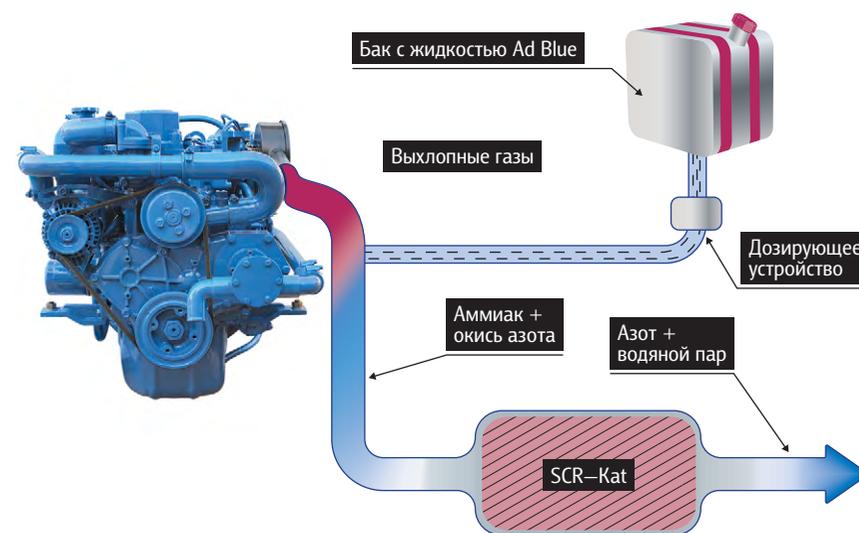


Рис. 32. Схема нейтрализации окислов азота в дизельных двигателях

наименование одного из углеводородов, входящих в состав дизельного топлива – нормального гексадекана ( $C_{16}H_{34}$ ). По условной шкале цетановое число такого углеводорода принято за 100 единиц. У другого углеводорода – *альфаметилнафталина* – цетановое число принято за 0 единиц условной шкалы. При впрыске топлива в сжатый воздух нормальные углеводороды начинают воспламеняться очень быстро и далее сгорают относительно медленно, а полициклические ароматические углеводороды начинают воспламеняться с большой задержкой. В результате в высокоароматических топливах происходит очень быстрое нарастание давления, что приводит к жесткой работе двигателя. Определяют цетановое число дизельных топлив на специальной одноцилиндровой установке, сравнивая скорость нарастания давления при работе двигателя на испытуемом топливе со скоростью нарастания давления на эталонной смеси, содержащей, например, 51% объемный цетана и 49% объемных альфаметилнафталина. Если скорость нарастания давления на обоих топливах одинакова – цетановое число испытуемого топлива принимают за 51.

Ⓢ Высокое цетановое число особенно важно для современных высокооборотных дизелей – топливо быстрее воспламеняется, обеспечивая плавную работу двигателя. Кроме того, на таком топливе двигатель быстрее запускается, поскольку снижается температура его самовоспламенения.

### 6.3. Требования к топливам для авиационных газотурбинных двигателей

Авиационные газотурбинные двигатели значительно превосходят бензиновые и дизельные по показателям «удельная масса» и «удельная мощность». Имея небольшие размеры и массу, эти двигатели развивают очень большие мощности. Именно по этой причине газотурбинные двигатели – реактивные и винтовые – получили самое большое распространение в качестве двигателей летательных аппаратов – самолетов и вертолетов. Топливо для этих двигателей чаще всего называют авиационным керосином, что не совсем правильно. Более правильное наименование этого топлива – топливо для авиационных воздушных газотурбинных двигателей – довольно громоздкое, поэтому будем называть его авиационным керосином.

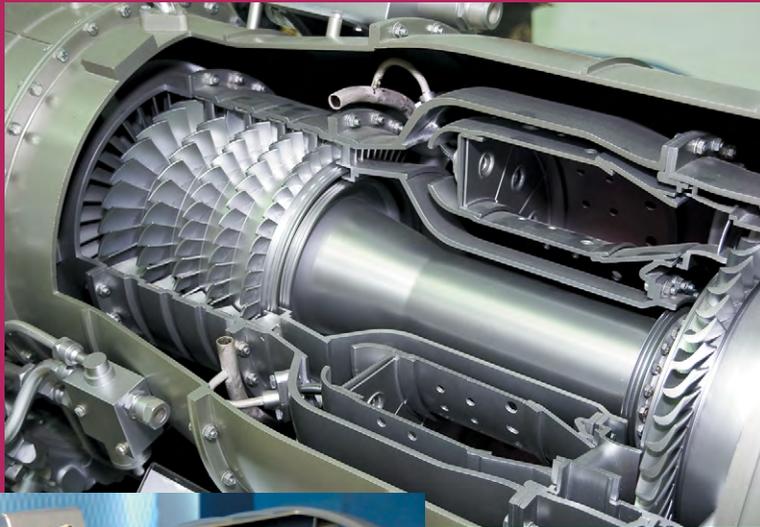
В таблице 22 приведены требования к авиационным керосинам. Как видим, топливо для авиационных двигателей представляет собой фракцию, выкипающую в пределах 200–300 °С. Получается, что керосиновая фракция является как бы частью дизельной фракции. При изготовлении на НПЗ действительно отделяют часть дизельной фракции для производства авиационного керосина. Содержание серы в керосинах не нормируют так жестко, как в дизельных топливах или бензинах, а вот содержание ароматических углеводородов ограничивают значительно жестче.

❗ Так, содержание серы в керосинах для гражданской авиации нормируют не более 0,25% масс, что в 250 раз больше, чем допускается для бензинов или дизельных топлив.



Таблица 22. Требования к авиационным керосинам

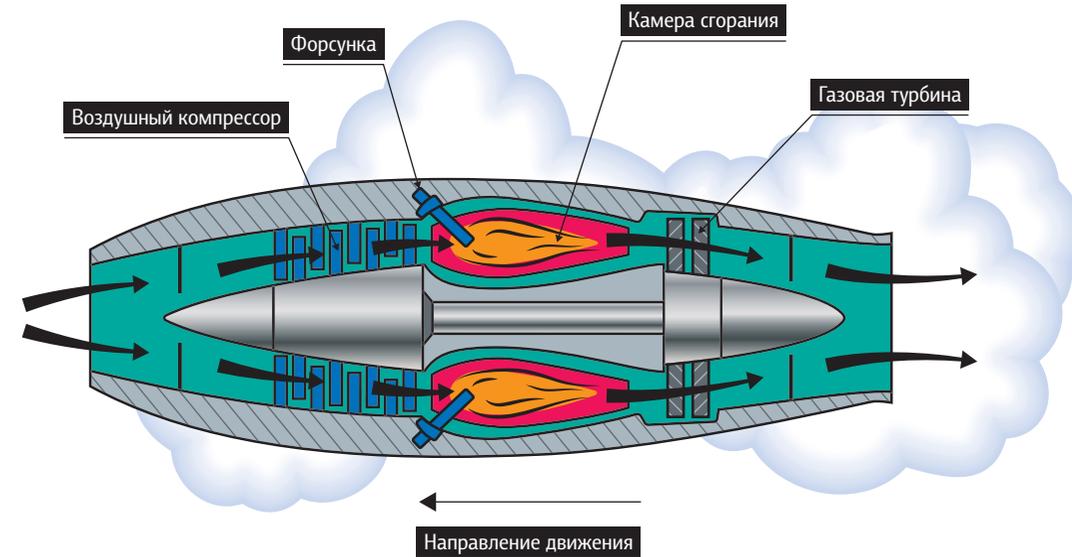
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВА ДЛЯ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	Единица измерения	НОРМЫ В ОТНОШЕНИИ	
		летательных аппаратов с дозвуковой скоростью полета	летательных аппаратов со сверхзвуковой скоростью полета
Кинематическая вязкость при температуре минус 20 °С, не более	мм <sup>2</sup> /с	8	16
Температура начала кристаллизации, не выше	°С	минус 50	минус 50
или			
температура замерзания, не выше	°С	минус 47	минус 47
Содержание механических примесей и воды	–	отсутствие	отсутствие
ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ:			
10 процентов отгоняется при температуре не выше	°С	205	220
90 процентов отгоняется при температуре не выше	°С	300	290
остаток от разгонки, не более	%	1,5	не нормируется
потери от разгонки, не более	%	1,5	не нормируется
Высота некопящего пламени, не менее	мм	25	20
Температура вспышки в закрытом тигле, не ниже	°С	28	28
Объемная доля ароматических углеводородов, не более	%	25	25
Содержание фактических смол, не более	мг/100 см <sup>3</sup>	7	7
Массовая доля общей серы, не более	%	0,25	0,1
Массовая доля меркаптановой серы, не более	%	0,003	0,001
Термоокислительная стабильность при контрольной температуре, не ниже:	°С	260	275
перепад давления на фильтре, не более	мм рт. ст.	25	25
цвет отложений на трубке, баллы по цветовой шкале (при отсутствии нехарактерных отложений), не более	–	3	3
или			
термоокислительная стабильность в динамических условиях:			
температура начала образования отложений, не ниже	°С	80	150
индекс термостабильности, не более	–	6	2
скорость забивки контрольного фильтра, не более	кПа/мин.	0,5	0,2
Удельная электрическая проводимость:	пСм/м		
без антистатической присадки, не более		10	10



*Авиационный керосин используется в качестве топлива практически во всех типах авиационных двигателей.*

❗ Казалось бы, авиационные двигатели более ответственные и для них нужно топливо более высокого качества – а допускается значительно большее содержание серы. Причина достаточно проста – выбросы отработавших газов авиационных двигателей происходят в основном на высоте 10 000 метров, что позволяет рассчитывать на их рассеивание в воздухе до безопасных концентраций сернистого ангидрида.

Вместе с тем содержание серы не выше 0,25% масс гарантирует отсутствие коррозии лопаток газовых турбин и сопловых агрегатов двигателей.



С другой стороны, более жесткое нормирование содержания ароматических углеводородов, а значит, более высокое содержание водорода гарантирует более полное сгорание топлива на любых режимах работы двигателей, почти полное отсутствие сажистых частиц в отработавших газах.

Авиационный керосин используется в качестве топлива практически во всех типах авиационных двигателей. Это объясняется тем, что процесс сгорания топлива в разных типах газотурбинных двигателей мало различается. На рис. 33 представлена схема работы одноконтурного турбореактивного двигателя. Воздух попадает в двигатель по кольцевому каналу осевого воздушного компрессора и, продвигаясь в сторону камеры сгорания, постепенно сжимается компрессором и нагревается до температуры выше 400 °С. Топливо непрерывно подается в камеру сгорания через форсунки, установленные по окружности камеры сгорания двигателя. При сгорании топлива температура и давление возрастают. Газы сгорания, двигаясь с большой скоростью под большим давлением, вращают газовую турбину, находящуюся на одном валу с компрессором. Далее газы сгорания вырываются из двигателя, создавая реактивную тягу, направленную в сторону, противоположную их движению. Эта тяга и является движущей силой реактивного

Рис. 33. Схема работы одноконтурного турбореактивного двигателя



*Турбореактивные самолеты наиболее эффективны на большой высоте, где плотность воздуха невысока.*

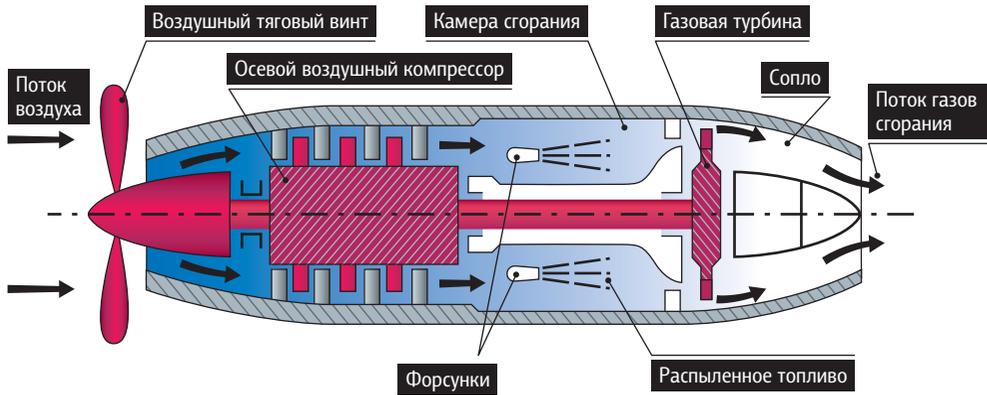


Рис. 34.  
Схема работы турбовинтового двигателя

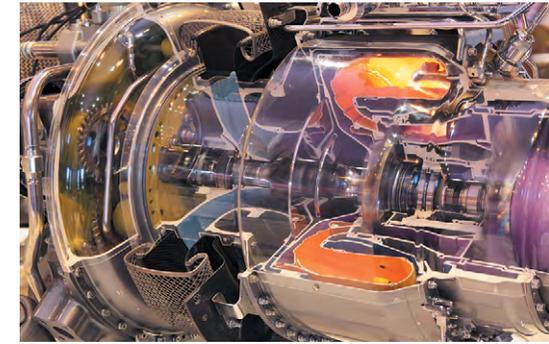
самолета. Только 10% энергии сгорающего топлива в турбореактивном двигателе расходуется на привод компрессора, остальные 90% расходуется на создание реактивной тяги. Турбореактивные самолеты наиболее эффективны на большой высоте, где плотность воздуха невысока.

В турбовинтовом двигателе (рис. 34) газы сгорания вращают газовую турбину с большим количеством лопаток, поскольку крутящий момент необходим не только для привода компрессора, но главное – для привода воздушного винта, установленного перед компрессором. Более 90% энергии в турбовинтовом двигателе расходуется на вращение газовой турбины. Большую сложность при работе турбовинтового двигателя представляет необходимость снижения оборотов воздушного винта. Дело в том, что вал газовой турбины вращается с огромной скоростью – до 20 000 об/мин, а воздушный винт самолета наиболее эффективно работает при скорости вращения до 1500 об/мин. Задача снижения оборотов винта решается установкой между валом двигателя и валом воздушного винта специального планетарного редуктора, который располагается соосно, имеет небольшие размеры и отличается высокой надежностью.



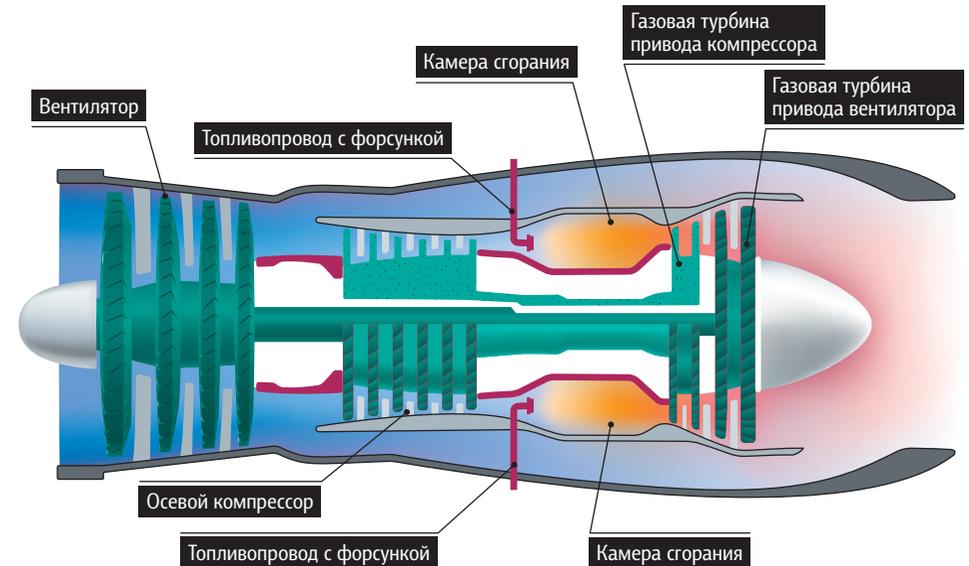
ⓘ Турбовинтовые самолеты наиболее эффективны при полетах на небольшой (до 7000 м) высоте со скоростью до 700 км/ч и поэтому используются в ближнемагистральных перевозках.

В последние 40 лет наиболее популярными на самолетах гражданской авиации являются двухконтурные турбореактивные двигатели, в каком-то смысле представляющие собой гибрид турбореактивных и турбовинтовых двигателей (рис. 35). В передней части двухконтурного двигателя внутри корпуса устанавливают несколько рядов воздушного компрессора, диаметр которого значительно превышает диаметр основного воздушного компрессора. Этот компрессор иногда называют вентилятором. Создаваемый им воздушный поток в основном направляется во второй, внешний контур двигателя, представляющий собой полый кольцевой канал. Другая часть воздушного потока направляется в основной воздушный компрессор и далее в камеру сгорания. Основной движущей силой является энергия реактивной струи, но значительная часть движущей силы создается потоком воздуха, двигающегося по внешнему контуру. Если общая площадь кольцевого канала превышает площадь основного реактивного сопла – такие двигатели называют турбовентиляторными, а отношение площадей принято называть степенью двухконтурности. В современных пассажирских самолетах степень двухконтурности двигателей доходит до 8. Такие двигатели имеют характерные



Наиболее популярными на самолетах гражданской авиации являются двухконтурные турбореактивные двигатели

Рис. 35.  
Схема работы двухконтурного турбореактивного двигателя



очертания: очень широкая передняя часть – воздухозаборник с вентилятором большого диаметра – и относительно малого диаметра реактивное сопло.

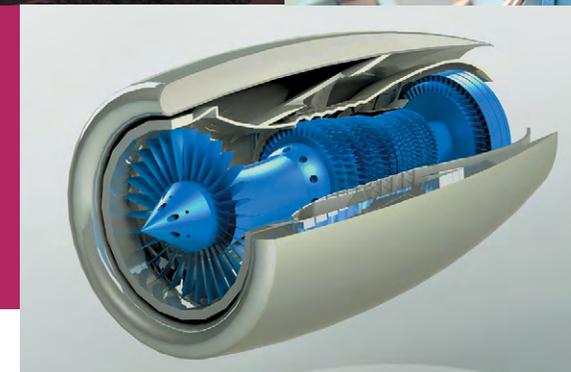
❶ Турбовентиляторные двигатели вследствие большого лобового сопротивления эффективны только до скорости 1000 км/ч, но зато в диапазоне скоростей 800–1000 км/ч они значительно (почти на 40%) экономичнее одноконтурных турбореактивных двигателей.

Объясняется это достаточно просто – внешний кольцевой канал сжатого воздуха имеет большой объем и при малом давлении создает достаточно большую тягу, а внутренний поток газов сгорания имеет большое давление и скорость, но, двигаясь внутри кольцевого потока, создает меньше трения и меньше шума. Малошумность важна не только для пассажиров, но и для жителей прилегающих к аэропортам районов.

Особые требования предъявляются к газотурбинным двигателям вертолетов – они должны иметь минимально возможную массу при достаточно большой мощности, поскольку подъемная сила вертолетов создается вращением несущего винта. Для обеспечения высокой надежности в вертолетах чаще всего устанавливают два газотурбинных двигателя (рис. 36). Вся энергия сгоревшего топлива направляется на лопатки турбин для создания крутящего момента,



*Топливо для авиационных двигателей представляет собой фракцию, выкипающую в пределах 200–300 °С.*



который коническим редуктором преобразуется во вращение несущего винта.

Поскольку к авиационным двигателям предъявляют очень жесткие требования по надежности, тщательному контролю подвергают не только технологический процесс производства авиационных топлив, но и процессы их транспортировки и заправки самолетов и вертолетов. Наиболее эффективны в этом смысле специальные аэропортовые заправочные комплексы, принадлежащие вертикально-интегрированным компаниям – то есть производитель топлива обеспечивает всю дальнейшую цепочку заправки и несет полную ответственность за качество топлива, попадающего в двигатели. Это полностью исключает вероятность загрязнения топлива в процессе транспортировки, а также всякую возможность авиационных происшествий по вине топлива.



## Заключение

Итак, мы познакомились с основными процессами нефтепереработки, позволяющими получать автомобильные топлива очень высокого качества, соответствующие самым высоким международным стандартам. В каком направлении будет развиваться автомобилестроение и чего потребует от производителей топлив в будущем? Внимательное рассмотрение всех тенденций указывает на необходимость дальнейшего повышения степени сжатия в бензиновых двигателях и, соответственно, повышения октанового числа бензинов. Этот процесс будет сопровождаться требованием к повышению теплотворной способности бензинов при одновременном снижении вредных выбросов, что потребует повышения содержания водорода в бензинах. Удовлетворить эти требования можно только путем дальнейшего снижения содержания ароматических углеводородов и олефинов.

Популярность дизельных двигателей будет расти вследствие их высокой топливной экономичности и возрастающей приемистости. Производители дизелей тоже потребуют в будущем увеличения теплотворной способности дизельных топлив, а значит – снижения содержания не только полициклических ароматических углеводородов, но и вообще ароматических углеводородов. Производители топлив смогут ответить на этот вызов, запустив в эксплуатацию мощные установки гидрокрекинга.

А не приведет ли развитие технологий к тому, что углеводородные топлива станут вообще не нужны? Например, двигатели внутреннего сгорания автомобилей будут полностью заменены электродвигателями. В ближайшие десятилетия это не представляется возможным. Дело в том, что при транспортировке углеводородов практически не происходит потерь энергии, а при транспортировке электроэнергии потери превышают половину всей транспортируемой энергии. Решить эту проблему на сегодняшнем уровне развития науки и техники сколько-нибудь экономически целесообразными методами не представляется возможным. А это значит – будем совершенствовать двигатели внутреннего сгорания и топлива для них еще несколько десятилетий, как минимум.

# Глоссарий

## Словарь терминов, упоминаемых в книге

### А

*Абсорбция* – объемное поглощение газов или паров жидкостью с образованием раствора.

*Авогадро закон* – один моль любого газа при нормальных условиях занимает объем, равный 22,4 л.

*Автол* – устаревшее название моторного масла.

*Адгезия* – процесс прилипания к твердой поверхности жидкостей, полимеров, пластичных смазок.

*Адсорбция* – процесс поглощения твердым телом жидкости ли газа. Твердое тело называется адсорбентом, поглощенная жидкость или газ – адсорбатом.

*Азеотропная смесь* – нераздельнокипящая смесь жидкостей, имеющих разную температуру кипения (например, смесь воды и этилового спирта).

*Азот* – газ, составляющий 78,09% объемных воздуха. В камере сгорания двигателей происходит образование достаточно опасных для здоровья человека оксидов азота, выбросы которых сокращают разложением на специальных устройствах в выхлопных системах.

*Алканы* – насыщенные углеводороды, в молекулах которых все валентности углерода заполнены водородом. Первый в ряду алканов – метан. Нормальные алканы имеют неразветвленную линейную структуру. Алканы, имеющие разветвленную структуру, называются изоалканами.

*Алкилат* (алкилбензин) – смесь изоалканов, полученная соединением изобутана с бутиленом на установке алкилирования (сырьем служит газ каталитического крекинга). Наиболее ценный компонент товарных бензинов.

*Альдегиды* – вещества, содержащие группу СНО (например, формальдегид НСНО). Содержатся в выбросах бензиновых двигателей, опасны для здоровья человека.

*Антиоксиданты* – вещества, предотвращающие окисление топлив и образование в них смол.

*Арены* – ароматические углеводороды, имеют циклическую структуру и двойную связь между молекулами углерода. Содержат минимальное количество водорода. Входят в состав бензинов и дизельных топлив.

*Асфальтены* – наиболее высокомолекулярные компоненты нефти, твердые хрупкие вещества черного цвета.

### Б

*Бензины* – смеси углеводородов, выкипающих в пределах 30–205 °С. Служат топливом для бензиновых двигателей.

*Бензол* – бесцветная жидкость с характерным запахом. Температура кипения 80 °С, плотность 879 кг/м<sup>3</sup> при 20 °С. Родоначальник ароматических углеводородов. Молекула бензола содержит шесть атомов углерода и шесть атомов водорода.

*Бенз(а)пирен* – полициклический углеводород, содержащий пять колец. Светло-желтые кристаллы. Содержится в каменноугольной смоле и выхлопных газах бензиновых двигателей. Один из наиболее сильных канцерогенов. Снижение содержания в бензинах бензола снижает риск образования в выхлопных газах опасных концентраций бенз(а)пирена.

### В

*Висбрекинг* – один из процессов нефтепереработки, разновидность термического крекинга; посредством висбрекинга из гудронов получают топочные мазуты и незначительное количество бензиновых фракций.

*Водород* – бесцветный газ без вкуса и запаха, плотность водорода 0,090 кг/м<sup>3</sup>. Теплота сгорания – 143 000 кДж/кг. При сгорании водорода образуется вода. Самый простой способ получения водорода – конверсия метана, содержащего 25% масс водорода.

*Воспламенение* – начальная стадия горения, в течение которой энергия, подводимая к системе от внешнего источника, приводит к резкому ускорению химической реакции окисления. Различают самовоспламенение (приводит к объемному горению) и зажигание (приводит к волне горения).

*Вспышки температура* – самая низкая температура жидкого топлива, при которой в условиях закрытого тигля над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания. Устойчивого горения при этом не возникает.

*Вязкость* – свойство жидкости сопротивляться относительному перемещению ее слоев при сдвиге.

## Г

*Гептаны* – насыщенные углеводороды (алканы), имеющие в структуре молекулы 7 атомов углерода. Нормальный гептан имеет температуру кипения 98 °С и октановое число, равное 0. У разветвленных изогептанов температура кипения ниже, а октановое число выше.

*Гидроочистка* – процесс нефтепереработки, в котором происходит два вида процессов – насыщение непредельных углеводородов водородом и удаление серо-, азот- и кислородсодержащих соединений из нефтяных фракций.

*Гидрокрекинг* – процесс нефтепереработки, при котором происходит трансформация тяжелых нефтяных фракций в легкие за счет крекинга (разрыва) больших молекул углеводородов и одновременное насыщение их водородом, сопровождаемое очисткой от серо-, азот- и кислородсодержащих соединений.

*Горение* – окислительный процесс, при котором превращение вещества сопровождается интенсивным выделением тепла.

*Горючесть* – способность вещества к распространению пламени.

## Д

*Двигатель* – машина, преобразующая энергию в механическую работу.

*Декан* – насыщенный углеводород, имеющий десять атомов углерода в структуре, входит в состав бензинов. Температура кипения 174 °С, плотность 730 кг/м<sup>3</sup>.

*Диены* – углеводороды, имеющие в структуре две двойные связи между атомами углерода. Содержатся в бензиновых фракциях, полученных каталитическим крекингом. Крайне неустойчивы к воздействию кислорода, приводят к образованию смол в бензинах. Устраняются в процессе гидроочистки бензинов каталитического крекинга.

*Дизельные топлива* – смеси углеводородов, выкипающих при температурах 180–360 °С. Используются в качестве топлив для высокооборотных (свыше 1000 об/мин) дизельных двигателей. В состав входят прямогонные фракции, подвергнутые гидроочистке,

дизельные фракции каталитического крекинга, дизельные фракции гидрокрекинга.

*Дистилляция* – разделение жидких смесей на отличающиеся по составу фракции. Осуществляется путем частичного испарения жидкости и последующей конденсации паров. Отогнанная фракция называется дистиллятом, неиспарившаяся часть – кубовым остатком. На основе процесса дистилляции осуществляется разделение нефти на бензиновые, керосиновые и дизельные фракции.

## И

*Изобутилен* – газообразный углеводород, в большом количестве содержится в бутан-бутиленовой фракции, получаемой при каталитическом крекинге. Используется как сырье для производства метилтрет-бутилового эфира – высокооктанового компонента бензинов.

*Изомеризат* – техническое название смеси углеводородов с пятью и шестью атомами углерода в молекуле, имеющих разветвленную структуру. Получают в процессе изомеризации легкой бензиновой фракции (нафты). За счет изомеризации нормальных углеводородов возрастает октановое число при сохранении в молекулах максимального количества водорода.

*Изомеры* – углеводороды одинаковой молекулярной массы и состава, но разные по структуре и свойствам.

*Изооктан* – углеводород с восемью атомами углерода в молекуле, имеющий разветвленную структуру (2,2,4-триметилпентан). Имеет температуру кипения 99 °С, плотность 692 кг/м<sup>3</sup> при 20 °С. Антидетонационная стойкость этого углеводорода принята за эталон (равняется 100 единицам октанового числа).

## К

*Катализаторы* – вещества, значительно ускоряющие скорость химических реакций, но не входящие в состав продуктов реакции.

*Каталитический крекинг* – нефтехимический процесс, позволяющий получать значительные объемы светлых нефтепродуктов и газов из тяжелого нефтяного сырья (вакуумного газойля или мазута).

*Коксование* – нефтехимический процесс, позволяющий получать из самого тяжелого нефтяного сырья (гудронов) значительное количество бензиновой и дизельной фракций, а также газов.

*Коррозия металлов* – повреждение поверхностных слоев металлов и сплавов под воздействием агрессивных веществ, приводящее к потере работоспособности машин и механизмов.

*Котельные топлива* – смеси тяжелых углеводородов, образующихся в процессах переработки нефти. Дальнейшая переработка этих углеводородов экономически нецелесообразна, и их используют в качестве топлив в печах, оборудованных форсуночными горелками.

*Крекинг* (от англ. Cracking – расщепление) – высокотемпературная переработка тяжелых нефтяных фракций с целью получения продуктов меньшей молекулярной массы – бензиновых и дизельных фракций, а также газов.

*Ксилолы* – ароматические углеводороды (диметилбензолы), входящие в состав бензинов. Имеют высокое октановое число. Температура кипения ксилолов 138–144 °С.

## М

*Метанол* – метиловый спирт. Получают синтезом из природного газа. Может служить компонентом товарных бензинов. Имеет высокое октановое число – 111. Применение запрещено по причине высокой токсичности.

*Метил-трет-бутиловый эфир* (МТБЭ) – компонент товарных бензинов, имеет высокое октановое число – 116. Температура кипения 55 °С, плотность 740 кг/м<sup>3</sup>.

*Молекула* – микрочастица, состоящая из двух или более атомов. Состав и структура молекулы определяют свойства любого вещества. Сумма масс всех атомов, входящих в состав молекулы, называется молекулярной массой.

*Моторные топлива* – термин, обобщающий все виды топлив для двигателей: бензины, авиатоплива, дизельные и газотурбинные топлива.

*Мутагены* – химические вещества, способные вызывать наследственные изменения у живых организмов. К их числу относятся некоторые вещества, содержащиеся в отработавших газах двигателей. Для снижения выброса мутагенов ограничивают в составе топлив содержание компонентов, сгорание которых приводит к их образованию.

## Н

*Насыщенные углеводороды* – углеводороды, в которых атомы углерода соединены между собой только одинарными связями. Называются насыщенными, поскольку содержат максимально возможное количество водорода (насыщены водородом). Наиболее желательны в составе топлив по причине высокой теплотворной способности.

*Нафтенy* – насыщенные углеводороды циклического строения. В бензиновых и дизельных фракциях содержится более 80 индивидуальных

нафтенy, содержащих от 5 до 12 атомов углерода. В наибольших количествах присутствуют метилциклогексан, циклогексан и метилциклопентан.

*Ненасыщенные углеводороды* – углеводороды, в которых некоторые атомы углерода соединены двойной связью. Способны легко присоединять водород по этим связям (насыщаться). В бензинах, полученных каталитическим крекингом, содержится большое количество олефиновых (с одной двойной связью) и диеновых (с двумя двойными связями) углеводородов. Их насыщают водородом в процессах гидроочистки.

*Нефтепереработка* – крупнотоннажное производство, основанное на превращении нефти в товарные нефтепродукты – в основном топлива. Различают первичную переработку нефти – разделение на фракции путем дистилляции и вторичную переработку, имеющую два основных направления – получение дополнительного количества светлых фракций (углубление переработки нефти) и улучшение качества товарных продуктов.

*Нефтехимические производства* – крупнотоннажные производства, основанные на синтезе новых продуктов из сырья, полученного в процессах нефтепереработки (например, производство алкилбензинов или МТБЭ).

*Нефть* – сложная смесь углеводородов и других веществ, добываемая из пористых пород земной коры. По внешнему виду – темная маслянистая жидкость со специфическим запахом.

*Нормальные углеводороды* – углеводороды, имеющие неразветвленную (прямоцепочную) структуру молекул. Нормальные углеводороды с числом атомов углерода в структуре молекулы больше 16 при комнатной температуре представляют собой твердые вещества (парафины).

## О

*Обезвоживание и обессоливание нефти* – подготовка нефти к переработке путем удаления из нее воды, солей и механических примесей.

*Оксигенаты* – обобщенное название кислородсодержащих веществ, применяемых в качестве компонентов топлив (спиртов и эфиров).

*Октановое число* – показатель, характеризующий антидетонационную стойкость бензинов (способность не взрываться самопроизвольно в смеси с воздухом при сжатии). Численно равно содержанию изооктана в смеси с нормальным гептаном, имеющей такую же антидетонационную стойкость в стандартных условиях. Различают исследовательское ОЧ (определяют в относительно мягком режиме

работы одноцилиндрового двигателя) и моторное ОЧ (определяют на жестком режиме работы двигателя). Разницу ИОЧ и МОЧ называют чувствительностью бензина. Обычно ИОЧ бензинов выше, чем МОЧ.

*Октаны* – насыщенные углеводороды, имеющие в структуре молекулы восемь атомов углерода. Имеется 18 изомеров с температурой кипения от 99 °С (2,2,4-метилпентан) до 126 °С (нормальный октан).

*Олефины* – ненасыщенные углеводороды, в молекулах которых имеется одна двойная связь между атомами углерода. За счет этой связи способны присоединяться к насыщенным углеводородам или спиртам. По такому принципу работают установки олигомеризации и алкилирования, а также установки по производству МТБЭ и ТАМЭ.

*Олигомеризация* – нефтехимический процесс соединения нескольких молекул пропилена (обычно трех) в одну с целью получения высокооктанового компонента бензина – олигомеризата.

*Охрана природы* – комплекс производственных, экономических и административно-правовых мероприятий, направленный на сохранение биосферы.

*Пентаны* – углеводороды, имеющие в структуре молекулы пять атомов углерода. Существует три изомера с температурой кипения от 10 °С (неопентан, 2,2-метилпропан) до 36 °С (нормальный пентан). В прямогонных бензиновых фракциях содержится большое количество нормального пентана с низким октановым числом (62). На установках изомеризации n-пентаны трансформируют в изопентан (2-метилбутан), имеющий октановое число 93.

## П

*Печи* – устройства с камерами, огражденными от окружающей среды, в которых происходит нагревание какой-либо среды за счет сгорания топлива. На НПЗ печи предназначены для нагревания нефти и промежуточных продуктов переработки с целью их разделения на фракции или трансформации (например, крекинга).

*Пиролиз* – термическое разложение химических соединений (например, пиролиз бензинов при 800 °С с целью получения этилена).

*Платформинг* – процесс нефтепереработки, направленный на увеличение количества ароматических углеводородов в бензиновых фракциях (разновидность риформинга).

*Плотность* – характеристика однородного вещества, определяемая массой единицы его объема. Для нефти и нефтепродуктов косвенно характеризует их химический состав – чем меньше плотность углеводорода, тем больше в нем содержится водорода.

*Полимербензин* – компонент бензина, полученный олигомеризацией газов (то же, что олигомеризат). Имеет высокое октановое число.

*Присадки к топливам* – синтетические вещества, добавляемые в топлива в незначительных концентрациях (обычно сотые доли % масс) для улучшения их свойств.

## Р

*Ректификация* – разделение жидких смесей углеводородов на фракции, кипящие при разных температурах. Обычно в ректификационных колоннах происходит многократное испарение и конденсация углеводородов. В отличие от дистилляции, когда имеет место однократное испарение, позволяет более четко разделять фракции по температуре кипения.

*Риформат* – бензиновая фракция, содержащая более 60% масс ароматических углеводородов. Риформаты получают путем риформинга прямогонных бензиновых фракций 85–180 °С. Отличаются от исходной фракции высоким октановым числом (до 100).

*Риформинг* – каталитический процесс нефтепереработки, направленный на увеличение содержания в бензиновых фракциях ароматических углеводородов. Различают риформинг для повышения октанового числа бензинов и риформинг для получения ароматических углеводородов.

## С

*Сераорганические соединения* – содержатся в нефтях и прямогонных нефтяных фракциях в виде сульфидов, дисульфидов, меркаптанов. При сгорании образуют сернистый ангидрид и серный ангидрид, приводящие к кислотным дождям, вредно воздействующим на живые организмы. Содержание серы в топливах ограничено 0,001% масс по экологическим причинам.

*Смолистые вещества* – кислородсодержащие соединения, в небольших количествах присутствуют в бензинах и дизельных топливах. Приводят к образованию отложений в системах впрыска топлива. Оказывают негативное влияние на работу двигателей, которое можно устранить с помощью присадок.

*Спирты (алкоголи)* – органические соединения, содержащие в молекуле одну или несколько гидроксильных групп ОН. Спирты с одной гидроксильной группой входят в состав бензинов как высокооктановый компонент. Имеют низкую теплотворную способность, поэтому их содержание в бензинах ограничено.

## Т

*Тепловой эффект реакции* – теплота, выделяемая при прохождении химической реакции. Наибольший тепловой эффект имеет реакция окисления (сгорания) водорода, в том числе входящего в состав углеводородов. Чем больше в топливе водорода – тем выше его теплотворная способность.

*Толуол* – ароматический углеводород, имеющий в структуре 7 атомов углерода (метилбензол). Температура кипения 111 °С, плотность 867 кг/м<sup>3</sup>. Входит в состав бензинов, имеет высокое октановое число (116).

*Топлива* – вещества, которые при сжигании выделяют значительное количество энергии и используются как источники получения энергии.

## У

*Углеводороды* – вещества, состоящие из углерода и водорода в различных сочетаниях. Простейший углеводород – метан (природный газ) – содержит один атом углерода и четыре атома водорода. В большом количестве содержатся в земной коре (метана многократно больше других углеводородов). Углеводороды, содержащие два, три и четыре атома углерода, при нормальных условиях остаются газообразными, содержащие больше 5 атомов углерода – жидкости, больше 16 атомов углерода – могут быть твердыми (парафины) или жидкими, больше 60 атомов углерода – только твердыми.

*Углекислый газ* – диоксид углерода, основной компонент газов сгорания углеводородных топлив. В небольших количествах безопасен (в атмосфере содержится до 0,03% об, в морской воде – до 90 г/м<sup>3</sup>). При концентрации 0,25–1,0% об в атмосфере у человека изменяется функция дыхания и кровообращения, при 2,5–5,0% об наблюдается головная боль и раздражение дыхательных путей, при 7,0% об – головокружение и рвота, выше 20% об – смерть в течение нескольких секунд. Ассимилируется растениями при реакции фотосинтеза. Снижение выбросов углекислого газа – главная экологическая проблема человечества.

## Х

*Химия* – наука, изучающая строение веществ и их превращения, сопровождающиеся изменением состава и свойств.

## Ц

*Цепные реакции* – химические превращения, в которых появление промежуточной активной части (свободного радикала) вызывает цепь превращений исходных веществ. Типичный пример – детонация бензинов.

*Цетановое число* – показатель, характеризующий воспламеняемость и сгорание топлива в дизельном двигателе. Численно равно содержанию в % об цетана (нормального гексадекана, ц.ч. 100) в его смеси с  $\alpha$ -метилнафталином (ц.ч. 0), которая по воспламеняемости и сгоранию в стандартных условиях идентична данному топливу.

*Циклоалканы* – насыщенные моноциклические углеводороды. Циклопентан и циклогексан входят в состав бензинов.

## Э

*Этанол* – этиловый спирт. Температура кипения 78 °С, плотность 790 кг/м<sup>3</sup>. Имеет высокое октановое число (108), может входить в состав товарных бензинов. Содержание этанола в бензинах ограничено по причине низкой теплотворной способности.

*Этилированный бензин* – товарный бензин, в который для повышения октанового числа введена этиловая жидкость (тетраэтилсвинец в смеси с другими веществами). Применение этилированных бензинов в России запрещено с 2003 года.

*Эфиры октанповышающие* – компоненты товарных бензинов. Метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) и метил-трет-амиловый эфир (ТАМЭ) получают реакцией метанола с изобутиленом (МТБЭ) или изопентаном (ТАМЭ). Имеют высокое октановое число и относительно низкую теплотворную способность. Концентрация в бензинах ограничена 15% масс.

# Популярная нефтепереработка

Издатель: ООО «ЦСП «Платформа».  
119072, г. Москва, Берсенеvский пер., д. 3/10, строение 2, тел. +7(495) 123 3989.

Подписано в печать 08.12.2016 г.  
Тираж 3000 экз.

Использованы фото Dreamstime.

Отпечатано с электронных носителей издательства.  
ОАО «Тверской полиграфический комбинат».  
170024, г. Тверь, пр-т Ленина, д. 5, тел. +7(4822) 44 5203.

ISBN 978-5-9907855-2-6



9 785990 785526

Авторский коллектив РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина  
под руководством к.т.н. Л.Н. Багдасарова

## ПОПУЛЯРНАЯ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА

**О переработке нефти – доступно и без сложностей**

Книга «Популярная нефтепереработка» предназначена современным автолюбителям – покупателям бензинов и дизельных топлив. В простой и доступной не специалистам форме книга рассказывает об особенностях состава и свойств современных моторных топлив, а также о технологии их производства. Информационной основой книги является учебная дисциплина, которая читается студентам в Российском государственном университете нефти и газа им. И.М. Губкина – «Химмотология». Этот термин, не самый известный широкой общественности, объединяет несколько научных направлений и может быть расшифрован как «теория и практика рационального производства и применения нефтепродуктов». За прошедшие пять-шесть лет в этом направлении в России усилиями нефтепереработчиков достигнуты очень большие успехи, качество нефтепродуктов в стране резко улучшилось. Именно поэтому авторы книги считают, что эта очень важная информация должна стать достоянием широкого круга потребителей топлив и просто любознательных читателей.