

Серия «ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ И НЕСПЕЦИАЛИСТОВ»

---

**Уильям Л. Леффлер**

**Переработка  
нефти**



Издательство «Олимп-Бизнес»  
Москва, 2022

# Содержание

К ЧИТАТЕЛЮ .....	9
ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ .....	11
I. ВВЕДЕНИЕ .....	13
II. ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРОЙ НЕФТИ .....	15
Состав сырой нефти .....	—
Кривые разгонки .....	16
Фракции .....	18
Фракционирование сырой нефти .....	19
Плотность .....	21
Содержание серы .....	23
Измерение объема сырой нефти .....	24
Упражнения .....	26
III. ПЕРЕГОНКА НЕФТИ .....	27
Простой перегонный куб .....	—
Ректификационная колонна .....	29
Орошение и повторное испарение .....	33
Границы кипения фракций .....	35
Установление границ фракций .....	37
Упражнения .....	39
IV. ВАКУУМНАЯ ПЕРЕГОНКА .....	41
Явление крекинга .....	—
Влияние пониженного давления .....	44
Вакуумная перегонка .....	—
Упражнения .....	47
V. ХИМИЯ НЕФТИ .....	48
Атомы и молекулы .....	—
Углеводороды .....	49
Нафтенy .....	51
Олефиновые и ароматические углеводороды .....	52
Упражнения .....	55
VI. КАТАЛИТИЧЕСКИЙ КРЕКИНГ .....	56
Технологический процесс .....	—
Реактор .....	58

Регенератор .....	59
Ректификационная колонна крекинга .....	60
Выходы продуктов крекинга .....	63
Параметры процесса .....	64
Упражнения .....	67
<b>VII. ГАЗОФРАКЦИОНИРУЮЩИЕ</b>	
<b>УСТАНОВКИ .....</b>	<b>68</b>
Установка фракционирования насыщенного газа .....	—
Назначение .....	73
Установка фракционирования крекинг-газа .....	75
Водород .....	—
Складское оборудование .....	76
Упражнения .....	78
<b>VIII. АЛКИЛИРОВАНИЕ .....</b>	<b>80</b>
Химическая реакция .....	—
Технологический процесс .....	81
Выходы продуктов .....	83
Упражнения .....	86
<b>IX. КАТАЛИТИЧЕСКИЙ РИФОРМИНГ .....</b>	<b>88</b>
Химические реакции .....	—
Оборудование .....	92
Регенерация .....	93
Параметры процесса .....	94
Упражнения .....	96
<b>X. УМЕНЬШЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОСТАТКА .....</b>	<b>98</b>
Термический крекинг .....	—
Коксование .....	100
Легкий крекинг (висбрекинг) .....	104
Упражнения .....	105
<b>XI. ГИДРОКРЕКИНГ .....</b>	<b>107</b>
Технологический процесс .....	—
Оборудование и химические реакции .....	108
Упражнения .....	112
<b>XII. КОМПАУНДИРОВАНИЕ БЕНЗИНА .....</b>	<b>113</b>
Давление насыщенных паров .....	115
Октановое число .....	119

Этилированный бензин .....	125
Спирты и кислородсодержащие добавки .....	128
Компаундирование бензина и его влияние на технологические операции .....	133
Упражнения .....	135
<b>XIII. ДИСТИЛЛЯТНЫЕ ТОПЛИВА .....</b>	<b>137</b>
Дизельный двигатель .....	—
Дизельное топливо .....	138
Печное топливо .....	140
<b>XIV. НЕФТЯНОЙ БИТУМ И ОСТАТОЧНОЕ ТОПЛИВО .....</b>	<b>143</b>
Нефтяной битум .....	—
Прямогонный нефтяной битум .....	144
Окисленный битум .....	146
Дистиллятный раствор битума .....	—
Битумные эмульсии .....	147
Остаточные топлива .....	148
Получение остаточного топлива .....	149
<b>XV. ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА, СЕРЫ И ГИДРООЧИСТКА .....</b>	<b>152</b>
Гидроочистка .....	—
Получение водорода .....	155
Получение серы .....	158
Упражнения .....	160
<b>XVI. ИЗОМЕРИЗАЦИЯ .....</b>	<b>161</b>
Изомеризация бутана .....	—
Технологический процесс .....	—
Изомеризация C <sub>5</sub> /C <sub>6</sub> .....	162
<b>XVII. ИЗВЛЕЧЕНИЕ АРОМАТИКИ РАСТВОРИТЕЛЯМИ .....</b>	<b>165</b>
Применение .....	—
Технологический процесс .....	166
Выделение бензола .....	168
<b>XVIII. ПРОИЗВОДСТВО ЭТИЛЕНА .....</b>	<b>170</b>
Взаимосвязь между операциями .....	171

Технологический процесс .....	173
Упражнения .....	175
<b>XIX. ПРОСТАЯ И СЛОЖНАЯ ПЕРЕРАБОТКА</b>	
<b>НЕФТИ</b> .....	176
Новый взгляд на сложность .....	181
Отраслевая модель .....	187
«Моментальный снимок» .....	188
Отраслевые тенденции .....	189
<b>XX. СЫРАЯ НЕФТЬ, ГАЗОКОНДЕНСАТ</b>	
<b>И ГАЗОВЫЙ БЕНЗИН</b> .....	191
Добыча нефти на промыслах .....	—
Установки газофракционирования .....	193
Транспортировка и использование .....	194
<b>XXI. ЦЕННОСТЬ ТОПЛИВА —</b>	
<b>ЕГО ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ</b> .....	196
Теплосодержание .....	—
Номограмма сравнительной ценности топлив .....	198
<b>ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ</b> .....	200
<b>ГЛАВА II</b> .....	—
<b>ГЛАВА III</b> .....	—
<b>ГЛАВА IV</b> .....	202
<b>ГЛАВА V</b> .....	—
<b>ГЛАВА VI</b> .....	204
<b>ГЛАВА VII</b> .....	206
<b>ГЛАВА VIII</b> .....	207
<b>ГЛАВА IX</b> .....	209
<b>ГЛАВА X</b> .....	212
<b>ГЛАВА XI</b> .....	213
<b>ГЛАВА XII</b> .....	214
<b>ГЛАВА XV</b> .....	216
<b>ГЛАВА XVIII</b> .....	218
Предметный указатель .....	220

# I

## ВВЕДЕНИЕ

*Начало — самая важная часть работы.*

*Платон. «Республика»*

Если Вы открыли эту книгу, Вам уже не требуется введение в ее предмет — Вы и так им занимаетесь. Вряд ли эту книгу станет читать кто-нибудь, кому это не нужно.

Книга устроена так, что может выполнить три различных задачи. Во-первых, ее можно использовать как справочник, так как в начале имеется подробное оглавление, а в конце — хороший указатель. Кроме того, ее можно рассматривать как учебник. Сочетание лекций, чтения книги и решения задач может оказаться очень эффективным. Но поскольку большинству людей недоступна такая роскошь, как послушать лектора, то эта книга рассчитана в основном на тех, кто будет учиться самостоятельно. Вследствие этого, довольно сухой материал разбавлен некоторой долей легкомыслия и, по возможности, приближен к практике.

Если Вы будете изучать материал самостоятельно, могут оказаться полезными следующие советы. Глава II, посвященная сырой нефти, является самой важной. В главе III, рассказывающей о перегонке нефти, приводится много технических подробностей, которые не так существенны, поэтому не стоит их пугаться. Главы по вакуумной перегонке (глава IV), каталитическому крекингу, алкилированию, риформингу, переработке нефтяных остатков и гидрокрекингу имеют принципиальное значение. Изучение технических приспособлений, которые используются на нефтеперерабатывающем заводе (глава VII), не так уж важно.

Глава, касающаяся компаундирования бензина, может оказаться наиболее интересной и полезной, потому что в ней обсуждается нечто хорошо знакомое, но тем не менее

загадочное: двигатель автомобиля. И, наконец, очень важной может оказаться глава XIX, появившаяся только в последнем издании и посвященная различиям между простой и сложной переработкой нефти. Эта глава объединяет все предыдущие, так как эти различия определяются именно процессами, описанными в главах III—XVII.

Главы XIII—XVIII, XX и XXI — что-то вроде *lagningarpe* (это слово означает небольшой подарок, который торговец преподносит клиенту во время продажи). Информация, приведенная в этих главах, полезна, но не жизненно важна. Короче говоря, Вашего внимания должно хватить хотя бы на первые двенадцать глав.

И последнее замечание: когда Вы прочтете книгу, у Вас должно появиться не меньше вопросов, чем их было до чтения... возможно, вопросов будет даже больше. Это замечание — попытка авторов стимулировать активность читателей, а не оправдаться. Лучше всего найдите грамотного нефтепереработчика, которому можно будет задавать вопросы, возникающие по мере изучения книги.

## II

# ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРОЙ НЕФТИ

*Позволь им описать неопишуемое.  
Дж. Г. Байрон. «Паломничество Чайлд-Гарольда»*

Что такое сырая нефть? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно прежде всего сказать, чем она *не* является. Нефть — не индивидуальное химическое соединение, а смесь соединений. Наиболее интересное свойство, характеризующее поведение нефти, проявляется при нагревании. Если нагреть нефть до температуры кипения и выдерживать ее в этом состоянии, она полностью не испарится.

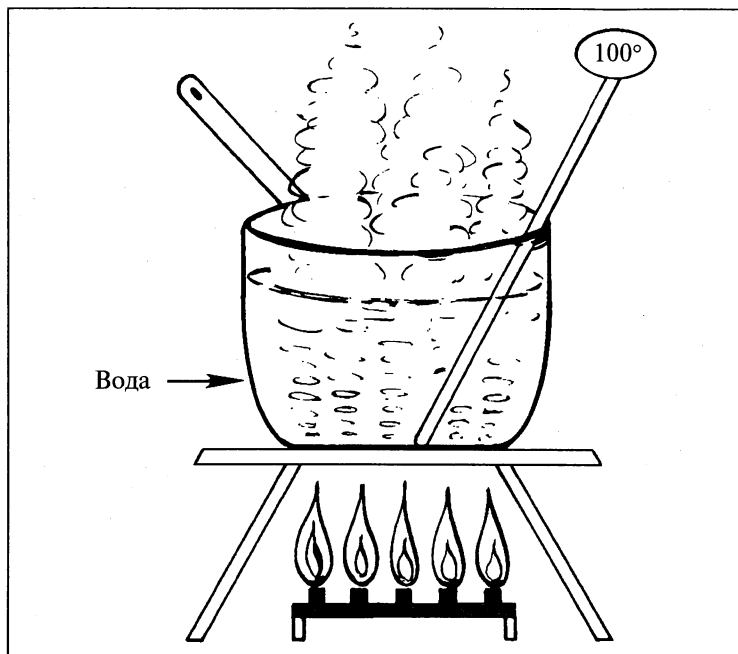
Для сравнения рассмотрим воду. Нагреем сосуд с водой до  $100^{\circ}\text{C}$  ( $212^{\circ}\text{F}$ ) и сохраним подогрев. Что произойдет? Вода начнет кипеть и постепенно испаряться, и в конце концов, если продолжать нагревание — она вся выкипит.

Если бы в сосуде с водой был термометр, Вы бы обнаружили, что перед испарением последней порции воды температура все еще остается на уровне  $100^{\circ}\text{C}$ . Так получилось, потому что химическое соединение  $\text{H}_2\text{O}$  кипит именно при этой температуре. При атмосферном давлении температура кипения воды —  $100^{\circ}\text{C}$ , не больше и не меньше.

### Состав сырой нефти

Вернемся к нефти. В отличие от воды, это не одно химическое соединение, а смесь нескольких тысяч разных соединений. Некоторые из них очень простые, например,  $\text{CH}_4$  (метан); а некоторые — сложные, как, например,  $\text{C}_{85}\text{H}_{60}$ . Формулы  $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_{85}\text{H}_{60}$  — это шифры (брутто-





**Рис. 2.1.** Температура кипения воды  $100^{\circ}\text{C}$  ( $212^{\circ}\text{F}$ ).

формулы) определенных химических соединений, понятные для химика. Более подробно мы обсудим этот вопрос позднее (чтобы не увязнуть раньше времени). Большинство веществ, входящих в состав нефти, — это определенные комбинации атомов углерода и водорода, которые называются углеводородами. Важно, что *каждое* из этих соединений характеризуется своей собственной температурой кипения, и в этом заключается самое полезное и наиболее широко используемое в нефтеперерабатывающей промышленности физическое свойство нефти.

### Кривые разгонки

Чтобы все стало понятно, возьмем тот же сосуд и заполним его сырой нефтью средней плотности. Затем

поднесем к нему горелку и начнем нагревать нефть. Когда температура достигнет 65°C (150°F), сырая нефть закипит. Теперь мы продолжим нагревание, так чтобы температура оставалась на этом уровне. Через некоторое время мы заметим, что нефть перестала кипеть.

Следующий шаг состоит в том, чтобы прибавить пламя горелки и нагреть нашу нефть приблизительно до 230°C (450°F). Она снова начнет кипеть, а через некоторое время опять перестанет.

Такие шаги можно повторять снова и снова, и все меньше нефти будет оставаться в сосуде. Возможно, Вы уже поняли, что происходит. На первой стадии испарились соединения с температурами кипения ниже 65°C (150°F); те, что кипят в интервале от 65 до 230°C (450°F), испарились на второй стадии, и так далее.

Таким образом мы получили так называемую *кривую разгонки* нефти. Это график, на одной оси которого откладывается температура, а на другой — общий объемный процент выкипевшей нефти. Каждый вид сырой нефти характеризуется своей собственной уникальной кри-

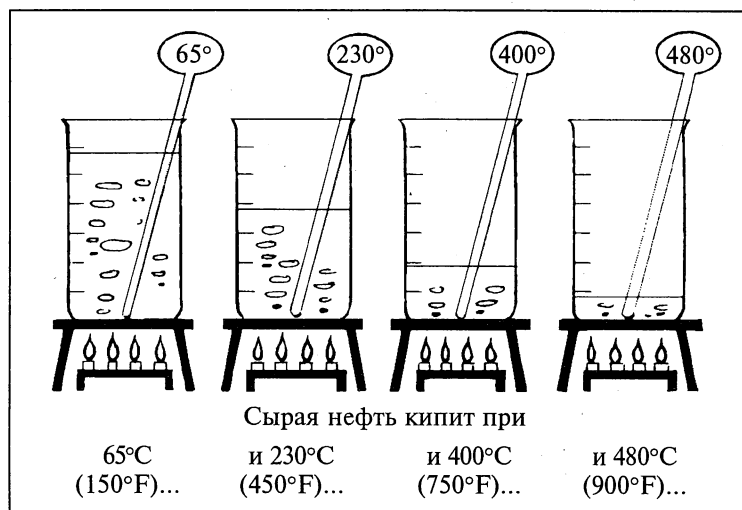


Рис. 2.2. Температура кипения сырой нефти.

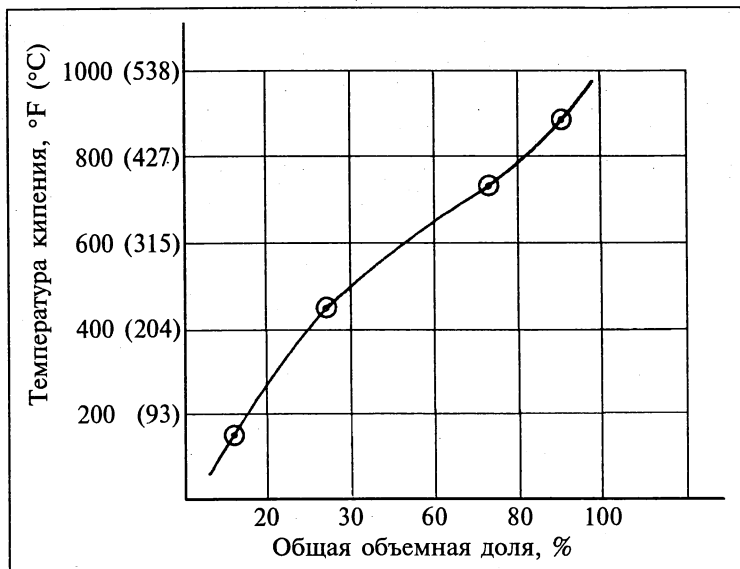


Рис. 2.3. Кривая разгонки сырой нефти.

вой разгонки, которая помогает определить, какие химические соединения содержит данная нефть. Как правило, чем больше атомов углерода в соединении, тем выше его температура кипения, как показывает следующий пример:

Соединение	Брутто-формула	Температура кипения, °C	Плотность lbs/gal* (г/см <sup>3</sup> )
пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-42,0	4,2 (0,50)
бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-0,5	4,9 (0,59)
декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	174,0	6,1 (0,73)

\* lbs/gal = фунт/галлон (0,1198 г/см<sup>3</sup>).

## Фракции

Для дальнейшего обсуждения характеристик сырой нефти будет полезно собрать определенные соединения в

группы, называемые фракциями. Фракция (или погон) объединяет все соединения, которые кипят между какими-либо двумя температурами, а эти температуры называют границами кипения фракции или пределами выкипания.

Обычно сырая нефть содержит следующие фракции

Температуры кипения	Фракции
менее 32°C (90°F)	углеводородные газы (бутан и более легкие газы)
32—105°C (90—220°F)	бензин (газолин)
105—160°C (220—315°F)	нафта (тяжелый бензин, бензино-лигроиновая фракция, лигроин)
160—230°C (315—450°F)	керосин
230—430°C (450—800°F)	газойль
выше 430°C (800°F)	остаток (мазут)

В других главах много внимания будет уделено характеристикам отдельных фракций, но кое-что понятно уже из названий.

Важно отметить, что различные нефти сильно различаются по составу. В легких нефтях обычно больше бензина, нафты и керосина, а в тяжелых — газойля и мазута. Возможно, Вы уже пришли к выводу, что вес и температура кипения соединения взаимосвязаны. Это и в самом деле так. В целом, чем тяжелей соединение, тем выше его температура кипения. И наоборот, чем выше границы кипения фракции, тем тяжелее фракция.

### Фракционирование сырой нефти

Чтобы собрать воедино все сказанное выше по поводу кривых разгонки, будет полезно проделать некоторые арифметические действия. Возьмем кривые для двух сырых нефтей, показанные на рисунке 2.5, и определим на основании стадий разгонки, в какой из этих нефтей выше содержание керосиновой фракции (большой керосиновый погон). Керосин кипит в интервале 160—230°C (315—450°F).

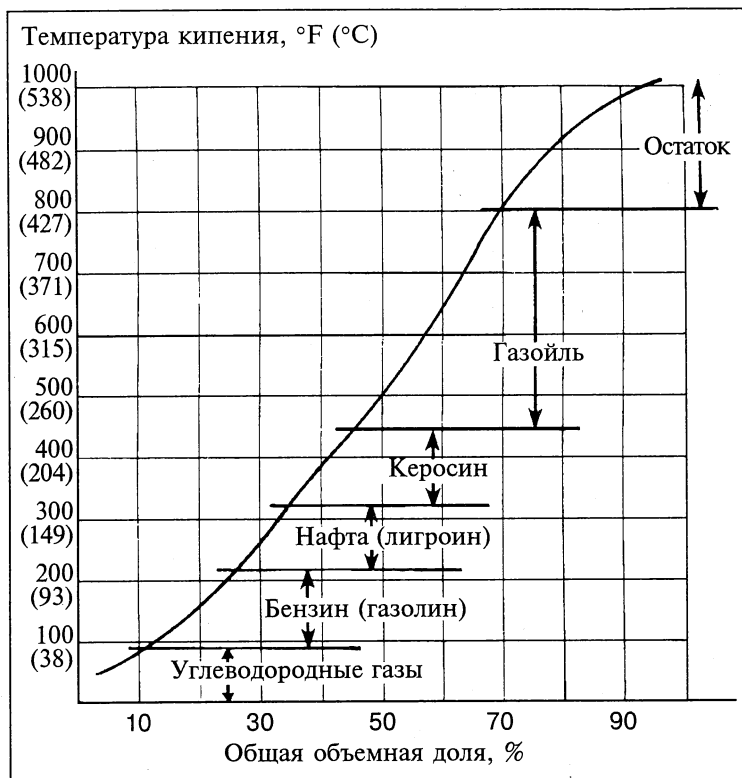


Рис. 2.4. Кривая разгонки сырой нефти и полученные фракции.

Используя рисунок 2.5, сделаем следующие операции:

1. Для более тяжелой нефти начнем от точки  $160^{\circ}\text{C}$  ( $315^{\circ}\text{F}$ ) на оси ординат и будем двигаться вправо до пересечения с кривой разгонки. Точку пересечения обозначим точка А. Точка А соответствует 26% на оси абсцисс.
2. Теперь начнем от  $230^{\circ}\text{C}$  ( $450^{\circ}\text{F}$ ) и будем двигаться вправо до пересечения с той же самой кривой, получив таким образом точку В. Она отвечает 42% на оси абсцисс.

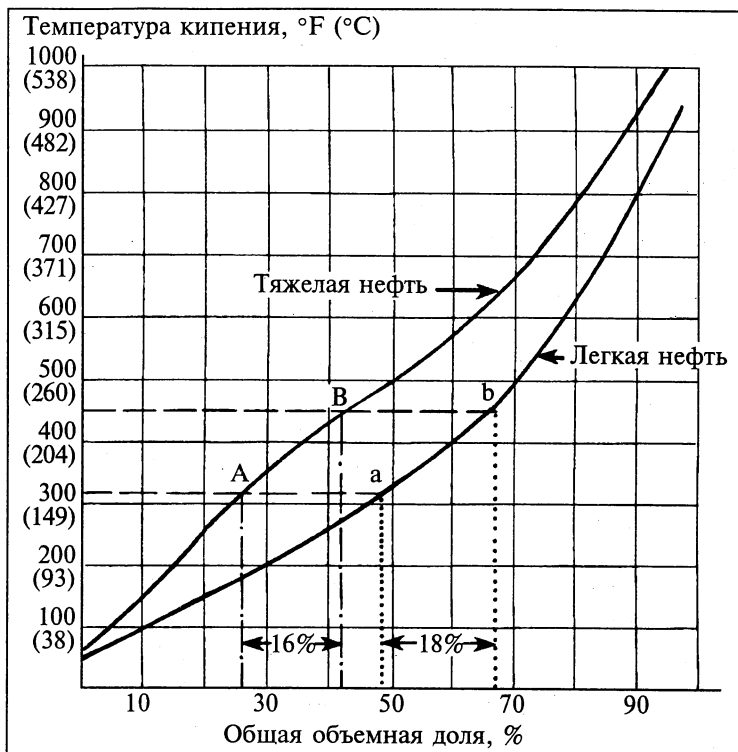


Рис. 2.5. Керосиновая фракция в двух типах сырой нефти.

3. Рассчитаем изменение объемной доли от исходной до конечной точки кипения керосина, что составляет  $42 - 26 = 16\%$ . Таким образом, более тяжелая нефть содержит 16% керосина.

4. А теперь те же самые операции сделаем для легкой нефти и найдем  $66,5 - 48,5 = 18\%$ .

Значит, легкая нефть содержит больше керосина, чем тяжелая.

### Плотность

Плотность характеризует массу соединения. Химики постоянно используют величину, называемую *относи-*

*тельной плотностью*, которая является отношением масс неизвестного вещества и хорошо известного, например воды.

Относительная плотность вещества — это масса некоторого объема этого вещества, деленная на массу того же объема воды.

$$\text{Относительная плотность} = \frac{\text{масса соединения}}{\text{масса воды}}$$

Похоже, химический подход показался технологам слишком примитивным. Действительно, в нефтеперерабатывающей промышленности наиболее широко используется такая хитрая величина, как *API* (плотность, выраженная в единицах Американского института нефти). По какой-то давно забытой причине, плотность *API*, которая измеряется в градусах, находят по следующей формуле:

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{\text{относительная плотность}} - 131,5$$

Если эти формулы повернуть так и сяк, то обнаружатся некоторые факты и зависимости, на которые можно мысленно опереться, обдумывая введенные понятия.

1. Для воды относительная плотность равна 1, а *API* = 10°.
2. Чем больше величина плотности в °*API*, тем легче соединение.
3. Для относительной плотности все наоборот.

Ниже приведены примеры типичных величин плотности:

	Относительная плотность	Плотность <i>API</i>
Тяжелая нефть	0,95	18°
Легкая нефть	0,84	36°
Бензин	0,74	60°
Нефтяной битум	0,99	11°