

УДК 665.637.3

## ТЕХНОЛОГИЯ HYDRO-IMP ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ТЯЖЕЛОЙ НЕФТИ

**Хорхе АНЧИТА**

Национальный политехнический институт, Мексиканский институт нефти, Мехико, Мексика

Гидроочистка является одним из наиболее важных процессов в нефтеперерабатывающей отрасли не только для переработки тяжелой нефти, но и для производства топлива с низким содержанием примесей, а также подготовки сырья для различных деструктивных процессов. В работе представлены результаты экспериментов, полученные на стадиях опытного и полупромышленного внедрения переработки тяжелой нефти. Во всех экспериментах использовалась мексиканская тяжелая нефть (10, 13 и 16°API) с высоким содержанием примесей (плотность в градусах API и относительная плотность нефти при базовой температуре 15,6 °C могут быть легко преобразованы: 10°API = 998 кг/м<sup>3</sup>, 13°API = 977,3 кг/м<sup>3</sup>, 16°API = 957,4 кг/м<sup>3</sup>). Гидроочистка последовательно проводилась в двух реакторах с неподвижным слоем катализатора при средней интенсивности реакции. Очистка от серы, металлических примесей и асфальтенов, а также изменения плотности и вязкости отслеживались при различных условиях реакции в режиме рабочего времени. Полученная в результате переработки нефть содержала меньшее количество примесей и имела более высокую плотность, при этом осадкообразование находилось ниже предельно допустимого уровня. Очистка от примесей на стадии полупромышленного внедрения была более эффективной по сравнению с экспериментами на опытной установке. Было доказано, что чем тяжелее сырье, тем большим будет прирост качества продукции. Например, сырая нефть плотностью 10°API после переработки может иметь плотность ~22°API (920 кг/м<sup>3</sup>) ( $\Delta^\circ\text{API} = 12$ ), тогда как сырая нефть плотностью 16°API – плотность до ~25°API (902,3 кг/м<sup>3</sup>) ( $\Delta^\circ\text{API} = 9$ ). Осадкообразование также поддерживалось на уровне менее 0,05 % от общей массы сырья, никаких других проблем (чрезмерный перепад давления в реакторе, закупорка и т.д.) в ходе экспериментов не наблюдалось.

**Ключевые слова:** гидроочистка, тяжелая нефть, переработанная нефть

**Как цитировать эту статью:** Анчита Хорхе. Технология HYDRO-IMP для переработки тяжелой нефти // Записки Горного института. 2017. Т. 224. С. 229-234. DOI: 10.18454/PMI.2017.2.229

**Введение.** Мировое потребление энергии растет с каждым годом. На сегодняшний день 33 % от общемировых поставок электроэнергии приходится на нефть [8] и, вне всякого сомнения, это самый распространенный источник жидкого топлива.

Ожидается, что этот сценарий будет продолжаться следующие 50 лет [1, 2]. Мировое потребление продуктов нефтепереработки значительно выросло за последние 20 лет (рис.1). В частности, за последнее десятилетие использование нефтепродуктов возросло на 12,2 %. Эта тенденция объясняется быстрорастущим спросом на автомобильное и авиационное топливо, особенно в развивающихся странах и регионах, таких как Китай, Россия и Латинская Америка [7].

Растущая добыча тяжелой сырой нефти требует новых методов подготовки и переработки. Тяжелая сырая нефть содержит значительное количество смол, асфальтенов и сложных соединений, которые негативно сказываются не только на качестве нефтепродуктов, но и на работе оборудования. Еще одной отличительной чертой тяжелой нефти является ее высокая вязкость, которая может достигать 10000 мПа·с [6].

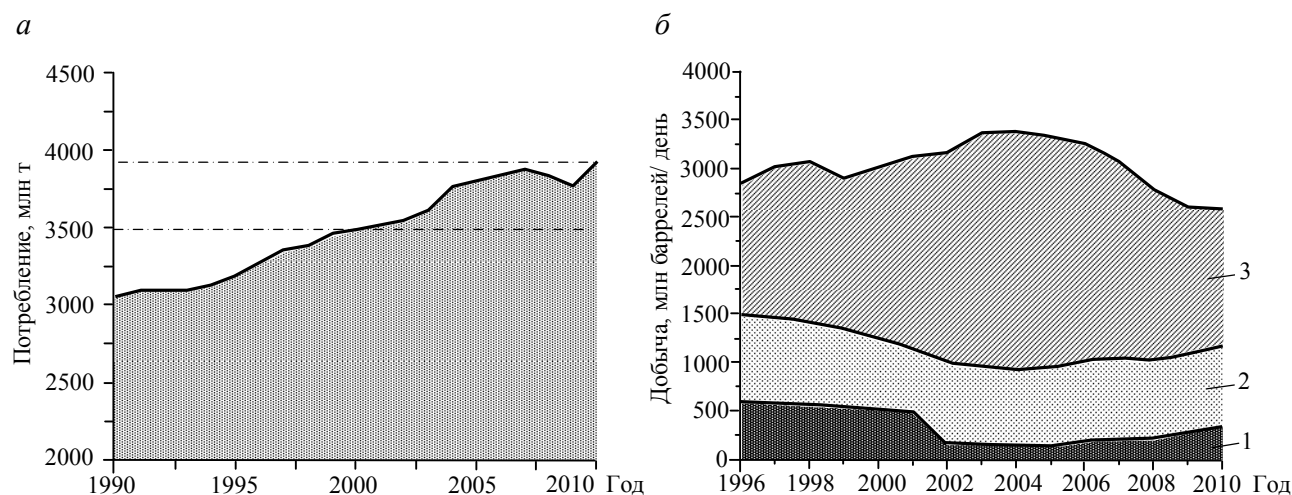


Рис. 1. Мировое потребление продуктов нефтепереработки (а), добыча сырой нефти в Мексике (б)

1 – сверхлегкая; 2 – легкая; 3 – тяжелая



Существует множество исследований, которые пытаются найти наилучший способ переработки тяжелой нефти, один из них – это метод, включающий в себя деасфальтизацию, гидроочистку, замедленное коксование, деметаллизацию и процессы термического разложения, или газификации [10].

Гидроочистка – это проверенная технология, применяемая в нефтеперерабатывающей отрасли на протяжении последних 60 лет для повышения качества углеводородных потоков. Это базовый процесс переработки, используемый для широкого диапазона потоков, от прямогонной нефти до вакуумных остатков или даже тяжелой и сверхтяжелой сырой нефти [9]. Путем гидроочистки тяжелая нефть может быть преобразована в более легкие нефтепродукты и одновременно очищена от серы, металлов и асфальтеновых соединений. Раньше считалось, что гидроочистка экономически нецелесообразна для переработки тяжелой нефти. По крайней мере два фактора ослабляли интерес к технологии: высокая стоимость водорода и способность существующих технологий удовлетворить спрос на высококачественные нефтепродукты за счет переработки обычной сырой нефти. Тяжелая нефть и нефтяные остатки, как правило, считаются низкокачественным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности. Поэтому они часто рассматриваются в качестве исходного материала в различных вариантах переработки. На самом деле существует тенденция снижения качества исходной сырой нефти, поскольку сегодня сырье для нефтепереработки в среднем характеризуется более высокой плотностью и большим содержанием серы, чем нефтяное сырье двадцатилетней давности. Это означает большие объемы остатков и более тяжелую нефть, поступающую в переработку.

Существует несколько веских причин для использования водорода при переработке тяжелой нефти, а именно: снижение содержания, или полное удаление, серы из нефтепродуктов; производство продукции, имеющей приемлемую спецификацию; повышение выхода (и стабильности) бензина; снижение дымности керосина; совершенствование теплотехнических характеристик топливной фракции с учетом экологических требований [4].

В целом за последние 30 лет была зафиксирована растущая зависимость от высокосернистой тяжелой нефти и нефтяных остатков как результат постоянно растущих цен на традиционную сырую нефть и снижения ее доступности в связи с истощением запасов в разных регионах мира. Более того, набирающее силу стремление перерабатывать как можно больше низкокачественного исходного сырья в жидкие нефтепродукты приводит к росту общего содержания серы в конечной продукции. Это значит, что очистительные установки должны по-прежнему удалять существенные объемы серы из более легких продуктов, но остатки и тяжелая сырая нефть представляют собой особенно сложную проблему. На сегодняшний день ясно, что существуют и другие проблемы, связанные с переработкой тяжелого сырья, и это тяжелое сырье, постепенно превращающееся в жидкое топливо будущего, требует особого внимания.

Гидроочистка нефтяных фракций уже давно является неотъемлемой частью нефтепереработки и в той или иной форме используется на каждом современном нефтеперерабатывающем заводе. Процесс происходит за счет каталитической реакции сырья с водородом, в ходе которой образуются углеводородные продукты более высокого качества. Технология гидроочистки хорошо известна для газойлей и низкокипящих продуктов, но нет исчерпывающего источника информации относительно переработки тяжелой сырой нефти и нефтяных остатков. Действительно, переработка тяжелой нефти и остатков сопряжена с некоторыми проблемами, которые отсутствуют при переработке дистиллятов и которые требуют изменения процесса для выполнения ряда особых требований, необходимых для сероочистки тяжелого сырья [5].

Цель данной работы – показать основные аспекты процесса переработки тяжелой нефти и нефтяных остатков, разработанного в Мексике. В работе отмечается, что гидроочистка в реакторе с неподвижным слоем катализатора при средней интенсивности реакции является технически и экономически привлекательным вариантом для переработки мексиканской тяжелой нефти.

**Характеристика процесса HYDRO-IMP.** Мексиканский нефтяной институт разработал каталитический процесс (HYDRO-IMP), основная цель которого заключается в переработке тяжелой и сверхтяжелой сырой нефти. Технология HYDRO-IMP помогает получить продукцию с низким содержанием примесей (серы, металлов, асфальтенов), легко поддающуюся переработке и имеющую более высокую цену на рынке [3].

Процесс HYDRO-IMP основан на каталитической гидроочистке (гидрокрекинге) тяжелой нефти при умеренных условиях эксплуатации и достигает высокой степени очистки от металлов, серы, азота и асфальтенов, а также существенного преобразования тяжелых фракций сырья в более ценные дистилляты, при этом поддерживая осадко- и шламообразование на очень низких уровнях. Наиболее важными характеристиками данного процесса являются относительно низкие инвестиционные и эксплуатационные затраты, а также перспективная доходность вложений.

Основные области применения процесса HYDRO-IMP:

- умеренное преобразование тяжелой и сверхтяжелой сырой нефти в промежуточный дистиллят, имеющий большую ценность на рынке;
- частичное преобразование тяжелой и сверхтяжелой сырой нефти для производства легко-транспортируемых продуктов путем снижения вязкости;
- преобразование нефтяных остатков на НПЗ.

Упрощенная схема процесса HYDRO-IMP приведена на рис.2. Начальный этап представляет собой разделение всего потока тяжелой сырой нефти (ТСН) на легкую и тяжелую фракции (как правило, остаток атмосферной перегонки). Тяжелая фракция подвергается гидроочистке в первом реакторе с фиксированным слоем катализатора, где производится удаление большинства металлов и асфальтенов, а также хотя бы части серы и азота. Далее частично переработанная продукция поступает во второй реактор для достижения требуемых уровней серо- и азотоочистки, а также среднего уровня гидрокрекинга. Выходящий из реактора поток направляется в сепаратор высокого давления, где жидкие нефтепродукты отделяются от газов. Поток жидких нефтепродуктов на выходе из сепаратора подвергается дополнительному отпариванию для удаления оставшегося растворенного сульфида водорода. Газовая смесь из сепаратора попадает в скруббер для очистки от сульфида водорода и аммиака, а выходящий поток, состоящий практически из чистого водорода, заново сжимается и возвращается обратно в систему реакторов. Наконец, либо поток жидких нефтепродуктов смешивается с легкой фракцией для получения нефти более высокого качества, либо оба потока (нефтепродукты из реакторов и легкая фракция после фракционирования) могут быть направлены на дальнейшую переработку нефти. Первый вариант нацелен на производство нефти более высокого качества из коммерческих соображений (сектор разведки и добычи), а задача второго варианта – осуществить предварительную подготовку сырой нефти до ее попадания в колонну атмосферной перегонки.

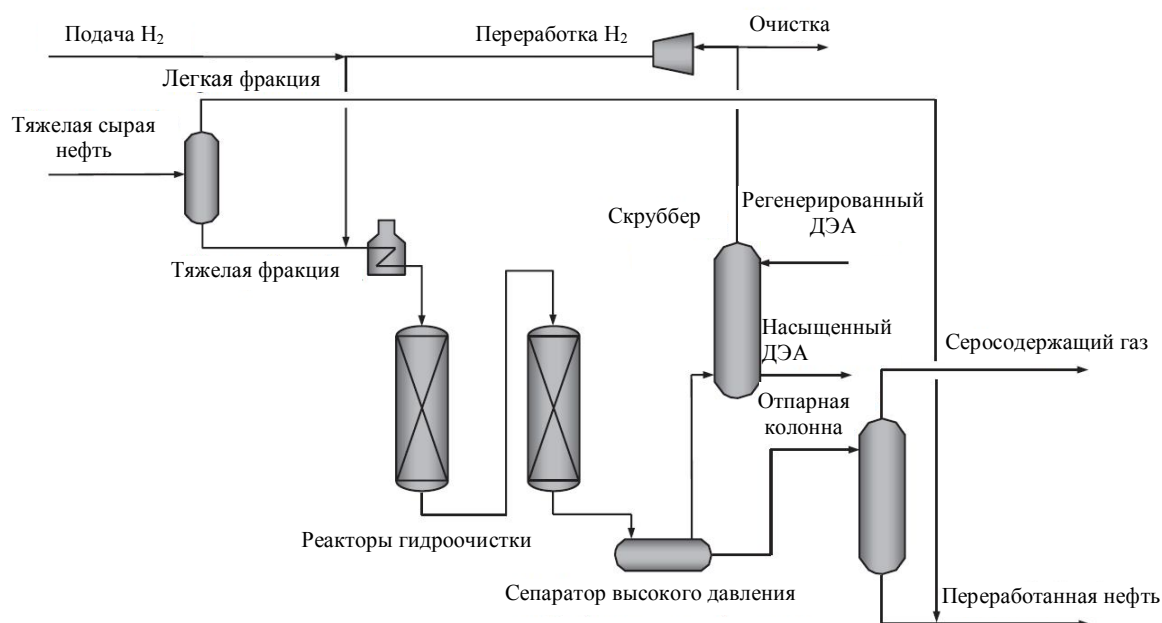


Рис.2. Упрощенная схема процесса HYDRO-IMP для переработки тяжелой нефти и нефтяных остатков

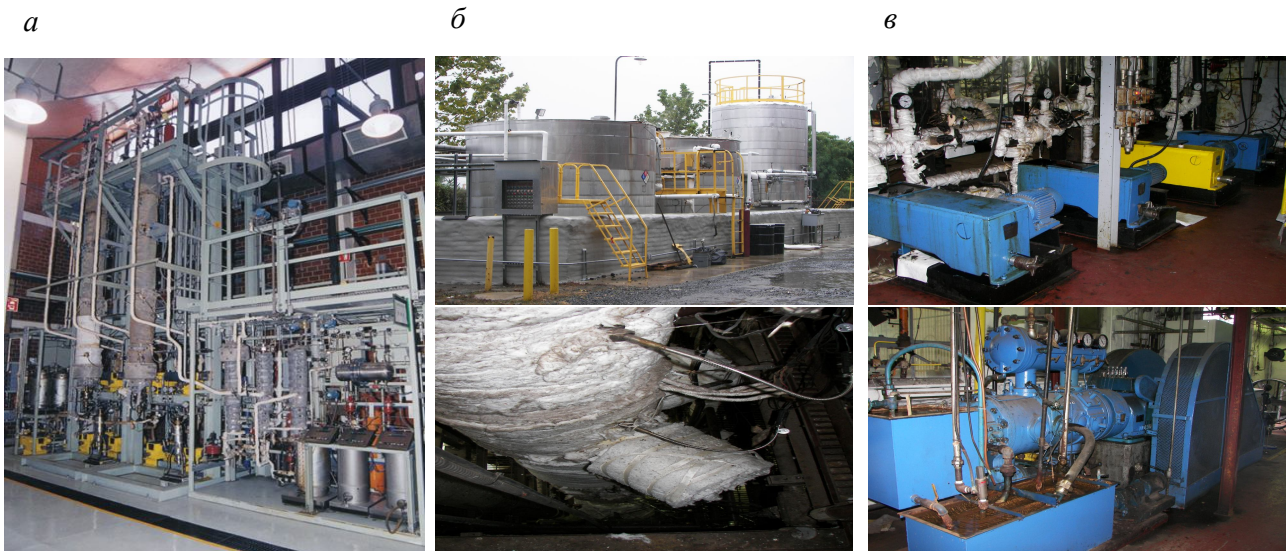


Рис.3. Общий внешний вид экспериментального оборудования  
а – опытная установка; б, в – некоторые секции полупромышленной установки

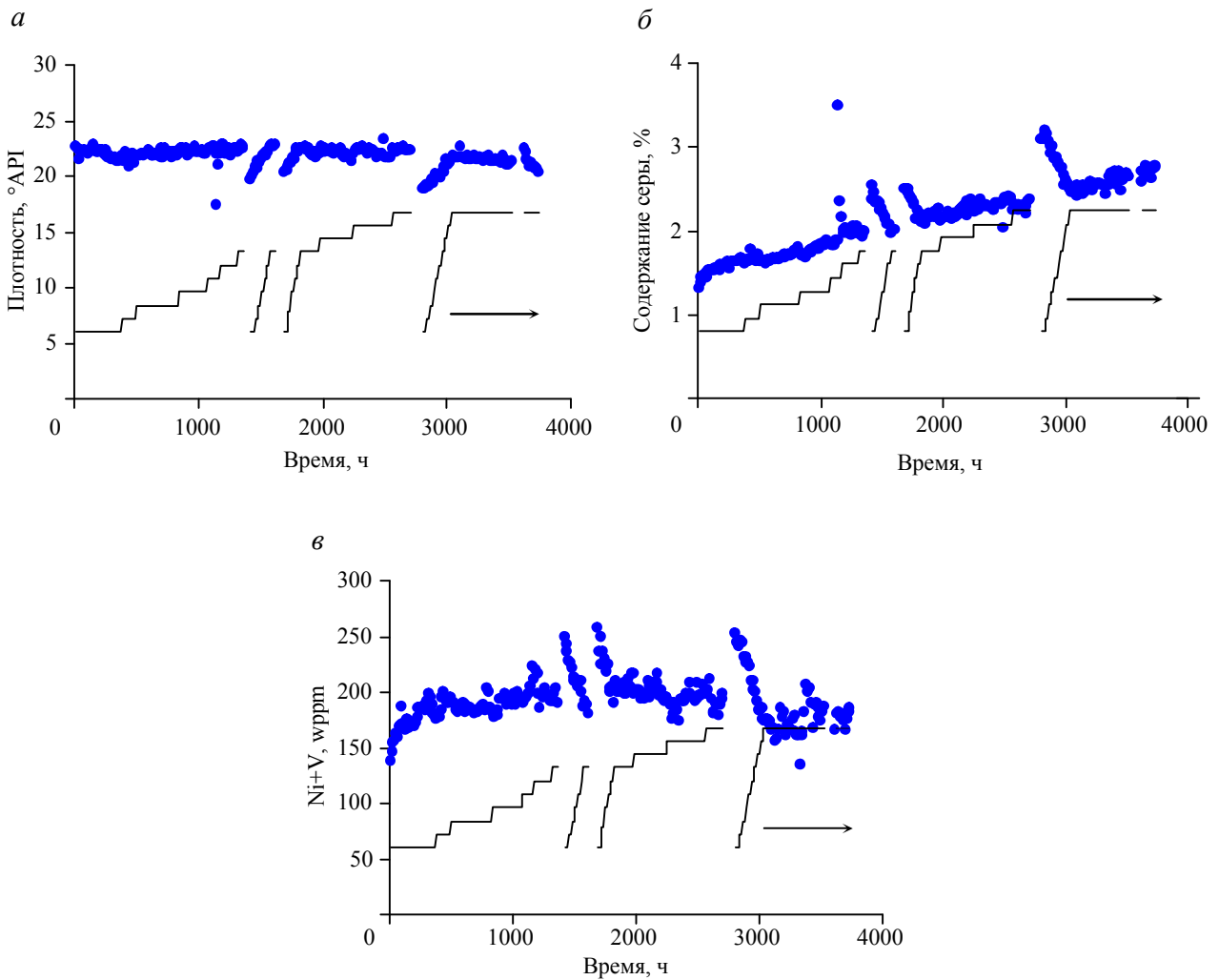


Рис. 4. Экспериментальные результаты, полученные на опытной установке  
а – °API = 12,71; б – массовое содержание серы в сырье = 5,22 %; в – Ni + V в сырье = 507 ppm

**Результаты и обсуждение.** Гидроочистка тяжелой нефти ( $13^{\circ}\text{API}$ ) производилась на опытной установке, расположенной на производственной площадке Мексиканского нефтяного института. Основные характеристики установки следующие: два последовательно расположенных реактора с фиксированным слоем катализатора, 500 мл катализатора на реактор, эксплуатация в изотермическом режиме, производительность порядка 1 барреля/день. Полупромышленные испытания проводились на установке производительностью  $\sim 10$  баррель/день, расположенной в Нью-Джерси (США). Внешний вид обеих установок представлен на рис.3.

**Экспериментальные результаты.** Результаты по изменению плотности, содержания серы и металлов, полученные на опытной установке и представленные как функция от времени, приведены на рис.4. Этот долгосрочный эксперимент продолжался 5 мес., за это время не наблюдалось проблем с осадкообразованием, которое постоянно поддерживалось на уровне менее 0,05 % от общей массы сырья. В ходе эксперимента имелись небольшие эксплуатационные сложности, однако все они были оперативно решены. Температура реакторов постоянно корректировалась для получения переработанной нефти постоянной плотности ( $21\text{--}22^{\circ}\text{API}$ ) из сырья плотностью порядка  $13^{\circ}\text{API}$ . Также было получено принципиально важное снижение содержания серы (с 5,22 до  $\sim 2\text{--}2,5$  % от общей массы) и металлов ( $\text{Ni+V}$ ) (с 507 до  $\sim 200$  ppm).

Результаты, полученные в ходе полупромышленных испытаний с использованием того же сырья (сырая нефть плотностью  $13^{\circ}\text{API}$ ), катализаторов и условий эксплуатации, хорошо согласуются с опытными данными. Фактически, очистка от примесей на стадии полупромышленного внедрения была даже более эффективной по сравнению с экспериментами на опытной установке (массовая доля серы снижена до 1,1 %, металлов – до 98 ppm). На стадии полупромышленных испытаний также была использована другая тяжелая нефть, отличающаяся по своей плотности, при этом наблюдалось аналогичное поведение сырья в различных реакциях. Характерные результаты для изменения плотности нефти, полученные на полупромышленной стадии, а также соответствующие условия реакции представлены на рис.5. Видно, что, чем тяжелее сырье, тем больше прирост качества продукции. Например, сырая нефть плотностью  $10^{\circ}\text{API}$  после переработки может иметь плотность  $\sim 22^{\circ}\text{API}$  ( $\Delta^{\circ}\text{API} = 12$ ), тогда как сырая нефть плотностью  $16^{\circ}\text{API}$  – плотность до  $\sim 25^{\circ}\text{API}$  ( $\Delta^{\circ}\text{API} = 9$ ). Осадкообразование также поддерживалось на уровне менее 0,05 % от общей массы сырья, никаких других проблем (чрезмерный перепад давлений в реакторе, закупорка и т.д.) в ходе экспериментов не наблюдалось.

## Выводы

1. Техничко-экономическое исследование, проведенное для оценки применения технологии на установках переработки тяжелой сырой нефти и на традиционном нефтеперерабатывающем оборудовании, выявило важные преимущества процесса HYDRO-IMP по сравнению с существующими технологиями, экономически эффективными для переработки тяжелых остатков.

2. Улучшение качества тяжелой сырой нефти, полученное за счет применения технологии HYDRO-IMP, характеризуется более высоким выходом дистиллятов, снижением содержания серы, металлов, асфальтенов и предшественников кокса, более низкой кислотностью, коррозионностью, вязкостью и тенденцией к отложению осадков. Эти характеристики упрощают погрузку, транспортировку и переработку тяжелой и сверхтяжелой сырой нефти и увеличивают их рыночную стоимость.

3. Результаты, полученные в ходе полупромышленного внедрения технологии с использованием аналогичного сырья (нефть плотностью  $13^{\circ}\text{API}$ ), катализаторов и условий эксплуатации оборудования, хорошо согласуются с данными опытных испытаний.

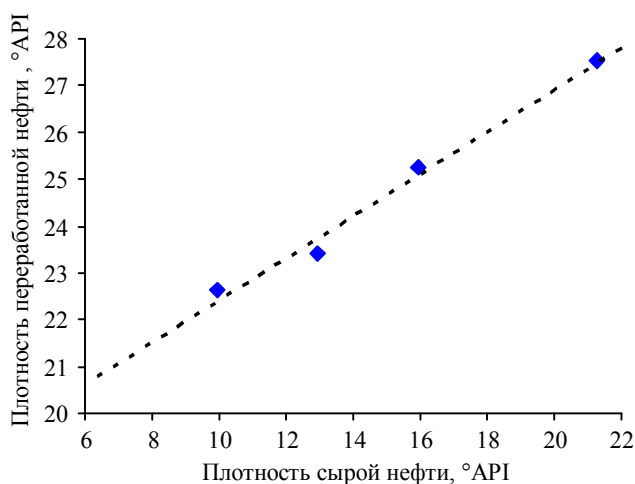


Рис.5. Плотность переработанной нефти как функция плотности исходного сырья



4. Очистка от примесей на стадии полупромышленного внедрения была более эффективной по сравнению с экспериментами на опытной установке (массовая доля серы снижена до 1,1 %, металлов – до 98 ppm).

5. Чем тяжелее сырье, тем больше прирост качества продукции. Например, сырая нефть плотностью 10°API после переработки может иметь плотность ~22°API ( $\Delta^{\circ}\text{API}=12$ ), тогда как сырая нефть плотностью 16°API – до ~25°API ( $\Delta^{\circ}\text{API}=9$ ). Осадкообразование также поддерживалось на уровне менее 0,05 % от общей массы сырья, никаких других проблем (чрезмерный перепад давлений в реакторе, закупорка и т.д.) в ходе экспериментов не наблюдалось.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ancheyta J.* Heavy oils and residua / J.Ancheyta, J.G.Speight. Chapter 1. In Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton. FL, 2007. P. 17-30.
2. *Ancheyta J.* Hydroprocessing chemistry / J.Ancheyta, J.G.Speight. Chapter 3. In Hydroprocessing of Heavy Oils and Residua. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton. FL, 2007. P. 52-68.
3. *Ancheyta J.* Changes in asphaltene properties during hydrotreating of heavy crudes / J.Ancheyta, G.Centeno, F.Trejo, G.Marroquin // *Energy Fuels*. 2003. N 17(5). P. 1233-1238.
4. *Alvarez A.* Modeling residue hydroprocessing in a multi-fixed-bed reactor system / A.Alvarez, J.Ancheyta // *Appl. Catal*, 2008. N 351(2). P. 148-158.
5. *Alvarez A.* A modeling study on the effect of reactor configuration on the cycle length of heavy oil fixed-bed hydroprocessing / A.Alvarez, J.Ancheyta, G.Centeno, G.Marroqui // *Fuel*. 2011. N 90(12). P. 3551-3560.
6. *Boitsova A.* Changes in the properties of heavy oil from yarega oilfield under the action of magnetic fields and microwave radiation / A.Boitsova, N.Kondrasheva // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 50. N 5. P. 847-851.
7. Enerdata // *Global Energy Statistical Yearbook*. 2011. Available on <http://www.enerdata.net>.
8. International Energy Agency // *Key world energy statistics*. 2010. Available at: <http://www.iea.org>.
9. *Jimenez F.* Modeling of trickle bed reactor for hydrotreating of vacuum gas oils: Effect of kinetic type on reactor modeling / F.Jimenez, K.Ojeda, E.Sanchez, V.Karafov, R.Maciel Filho; Ed. V.Plesu, P.S.Agachi // In 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering – ESCAPE17. Elsevier BV, Amsterdam, the Netherlands, 2007. 247 p.
10. *Kondrasheva N.* Research the possibility of obtaining high-quality petroleum coke from heavy Yaregskaya oil / N.Kondrasheva, V.Vasilyev, A.Boytsova // *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016. N 6. P.14-18.

*Автор Хорхе Анчита, д-р техн. наук, профессор, руководитель проекта, jancheyt@imr.mx (Национальный политехнический институт, Мексиканский институт нефти, Мехико, Мексика).*

*Статья принята к публикации 30.11.2016.*