

УДК 665-658-2

<https://www.doi.org/10.47813/dnit.4.2025.3003>

EDN

[MBCNWP](#)

Моделирование установки каталитической гидроочистки и депарафинизации ДТ в среде Aspen Hysys

А.Д. Шапошников*, Ю.Х. Усманова

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
пр. Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия

*E-mail: 20b.shaposhnikovad@fnnh.ru

Аннотация. В статье рассматривается использование цифровых инструментов для моделирования реальных производственных объектов. Нефтегазовая отрасль на сегодня является одним из ключевых секторов экономики страны, обеспечивая значительную часть энергетических ресурсов и сырья для промышленности. Цифровизация играет важную роль в развитии российской нефтегазовой отрасли. Говоря о стабильной и эффективной работе нефтеперерабатывающих заводов, отметим важность процесса гидроочистки. Гидроочистка является одним из ключевых процессов на нефтеперерабатывающих заводах, играя решающую роль в улучшении качества нефтепродуктов. Это связано с ужесточением экологических требований к товарным топливам, необходимостью уменьшения содержания каталитических ядов (металлов, мышьяк, кремний) в прямогонных фракциях и повышения химической и физической стабильности топлив. На нефтеперерабатывающих заводах процесс депарафинизации чаще применяется к дизельным и масляным фракциям. Улучшение низкотемпературных свойств - результат процесса депарафинизации, позволяет применять нефтепродукты в зимний период и на территории крайнего Севера. Сырьем установки является прямогонная дизельная фракция 180-340 °С, состоящая из парафиновых и нафтеновых углеводородов, содержащая преимущественно серу. Рассматриваемая цифровая модель позволяет оценивать эффективность режима работы установки, в зависимости от выбранной марки ДТ (летнее, зимнее, арктическое). Также модель позволяет прогнозировать выход и качество продукции, что помогает оптимизировать условия процесса для достижения желаемых результатов; в дальнейшем, она может быть использована для проектирования новых установок или модернизации существующих с учетом оптимальной технологической схемы реакторного блока. Это позволяет выбрать наиболее эффективные решения для минимизации загрузки катализатора и улучшения качества продукции.

Ключевые слова: Aspen Hysys, гидроочистка, гидродепарафинизация, цифровое моделирование.

Modelling of catalytic hydrotreating and dewaxing of diesel fuel in Aspen Hysys environment

A.D. Shaposhnikov, Y.H. Usmanova

Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx Ave., Kazan,
420015, Russia

*E-mail: 20b.shaposhnikovad@fnnh.ru

Abstract. The article discusses the use of digital tools for modelling real production facilities. The oil and gas industry today is one of the key sectors of the country's economy, providing a significant part of energy resources and raw materials for industry. Digitalization plays an important role in the development of the Russian oil and gas industry. Speaking about the stable and efficient operation of oil refineries, we note the importance of the hydrotreating process. Hydrotreating is one of the key processes at refineries, playing a crucial role in improving the quality of petroleum products. This is due to the tightening of environmental requirements for commercial fuels, the need to reduce the content of catalytic poisons (metals, arsenic, silicon) in straight-run fractions and increase the chemical and physical stability of fuels. At oil refineries the dewaxing process is more often applied to diesel and oil fractions. Improvement of low-temperature properties - the result of dewaxing process - allows to use oil products in winter period and in the territory of the extreme North. The raw material of the unit is straight-run diesel fraction 180-340 °C, consisting of paraffin and naphthenic hydrocarbons, containing mainly sulphur. The digital model under consideration allows estimating the efficiency of the plant operation mode, depending on the selected grade of diesel oil (summer, winter, arctic). The model also allows to predict the yield and quality of products, which helps to optimize the process conditions to achieve the desired results; in the future, it can be used to design new units or modernize existing ones, taking into account the optimal technological scheme of the reactor unit. This allows selecting the most efficient solutions to minimize catalyst loading and improve product quality

Keywords: Aspen Hysys, hydrotreating, hydrodeparaffinisation, digital modelling.

1. Введение

Нефтегазовая отрасль на сегодня является одним из ключевых секторов экономики страны, обеспечивая значительную часть энергетических ресурсов и сырья для промышленности. В последние годы отрасль переживает значительные изменения, связанные с модернизацией производственных процессов и внедрением новых технологий.

На протяжении долгого времени моторные топлива, в том числе дизельное, являлись основной статьей дохода любого нефтеперерабатывающего завода. Улучшение низкотемпературных свойств и удаление гетероатомных соединений, позволяет продукту одновременно соответствовать современным экологическим требованиям (ЕВРО, экологический класс) и применяться во всех климатических зонах, в том числе районах крайнего севера. На установке гидроочистки и гидродепарафинизации получают стабильный гидрогенизат, насыщенный нафтенами и низкомолекулярными алканами, который после добавления керосиновой фракции и присадок, становится товарным продуктом, соответствующим всем требованиям, предъявляемым к ДТ [1-2].

Современные требования к содержанию серы и ПЦА в дизельном топливе становятся все более жесткими, что требует повышения эффективности процесса гидроочистки. Развитие технологии гидроочистки вместе с цифровыми решениями открывает новые возможности для повышения качества дизельного топлива при одновременном снижении экологического воздействия производства.

Согласно Распоряжению Правительства РФ от 7 ноября 2023 г. № 3113-р стратегическое направление в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности, относящейся к сфере деятельности Министерства промышленности и торговли Российской Федерации – ускорение технологического развития российских компаний и обеспечение конкурентоспособности разрабатываемых ими продуктов и решений на российском и мировом рынках; обеспечение устойчивого функционирования производственных и технологических процессов и непрерывности управления ими, в том числе.

2. Постановка задачи (Цель исследования)

В ходе данной работы необходимо было построить цифровую модель установки каталитической гидроочистки и гидродепарафинизации дизельного топлива в программном пакете Aspen Hysys [3].

Цифровая модель установки гидроочистки может существенно помочь в ведении реального процесса за счет:

- возможности прогнозирования выхода и качества продукции;
- возможности определения оптимальной загрузки катализатора;
- модели могут работать в реальном времени, корректируя параметры процесса на основе текущих данных с датчиков и лабораторных анализов;
- выявление возможности увеличения производительности установок за счет оптимизации условий гидроочистки без значительных капитальных вложений;
- использования для проектирования новых установок или модернизации существующих с учетом оптимальной технологической схемы реакторного блока.

Моделирование позволяет выбрать наиболее подходящие параметры реакторов, такие как температура, давление и расход сырья, что существенно влияет на качество очистки топлива, также можно оценить влияние изменений в конструкции реакторов на процесс гидроочистки. Например, переход от двухреакторной к трехреакторной схеме может снизить общий объем загрузки катализатора.

В перспективе, цифровые модели могут быть интегрированы в системы управления процессом для мониторинга текущих параметров и корректировки условий работы установки в реальном времени и, используя данные из цифровых моделей, можно предсказать необходимость технического обслуживания оборудования или замену компонентов до возникновения аварийных ситуаций.

2.1. Описание технологической схемы

Модель состоит из четырех блоков. Первый блок - подогрева сырья, в который входят теплообменники Т-201 – Т-203 и печь П-201. Сырьевая дизельная фракция смешивается с ЦВСГ и последовательно проходит трубное пространство теплообменников и печь, где нагревается до температуры около 370 °С. Второй блок установки – реакторный блок, который состоит из реакторов Р-201 – Р-203. Газосырьевая смесь последовательно проходит через три реактора. Первый реактор – реактор гидроочистки, второй реактор верхняя половина слоя загружена катализатором гидроочистки, нижняя часть – депарафинизации, третий реактор имеет 2/3 слоя катализатора депарафинизации, после чего 1/3 – финишная гидроочистка. Между первым и вторым и между вторым и третьим реакторами предусмотрен ввод

захламляющего потока – квенча. Третий блок – блок стабилизации, в который входят сепараторы С-201 – С-202, колонна – К-201, теплообменник – Т-204, холодильники – Х-201, ХВ-201. Газосырьевая смесь попадает в горячий сепаратор С-201, где разделяется на два потока. Жидкий поток поступает на нижнюю питательную тарелку стабилизационной колонны К-201, верхний поток охлаждается в теплообменнике Т-204, холодильнике ХВ-201 и Х-201, после чего поступает в холодный сепаратор С-202, где аналогично делится на два потока, нижний поток, подогреваясь в теплообменнике Т-204, подается на верхнюю питательную тарелку колонны К-201, а верхний поток, идет на очистку и концентрирование ЦВСГ. Колонна К-201 является типичной ректификационной колонной, с куба которой выходит гидроочищенный и депарафинизированный компонент дизельного топлива, подающийся на узел смешения, для получения товарного ДТ Четвертый блок – блок десорбции состоит из колонны десорбера К-201. Побочный продукт процесса депарафинизации бензин-отгон, поступающий с низу дефлегматора К-201, подается в колонну десорбции для удаления сероводорода, засчет отдува из бензин-отгона водородсодержащим газом. После отдува бензин-отгон поступает на узел смешения за пределами установки [5].

3. Построение цифровой модели

Исходными данными для моделирования процесса являлись компонентный состав сырьевой дизельной фракции, ЦВСГ, а также продуктовых потоков установки, температура давления и массовые расходы потоков. В качестве пакета моделирования использовался программный пакет Peng-Robinson, поскольку он наиболее точно описывает модели, где в качестве компонентов используются углеводородные смеси с водой. Подобные вещества присутствуют на установках гидроочистки. Реакторный блок был смоделирован через утилиту «реактор конверсии». Набор реакций выбирался на основе фракционного и компонентного состава дизельной фракции. Фракционный состав, был условно разделен на несколько блоков. Для каждого диапазона температур, были выбраны индивидуальные углеводороды, которые подвергались реакциям гидроочистки и гидродепарафинизации, согласно химизму процесса. Выбранные реакции были разделены по реакторам, с учетом загрузки катализатора [6].

Технологическая схема смоделированного процесса представлена на рисунке 1.

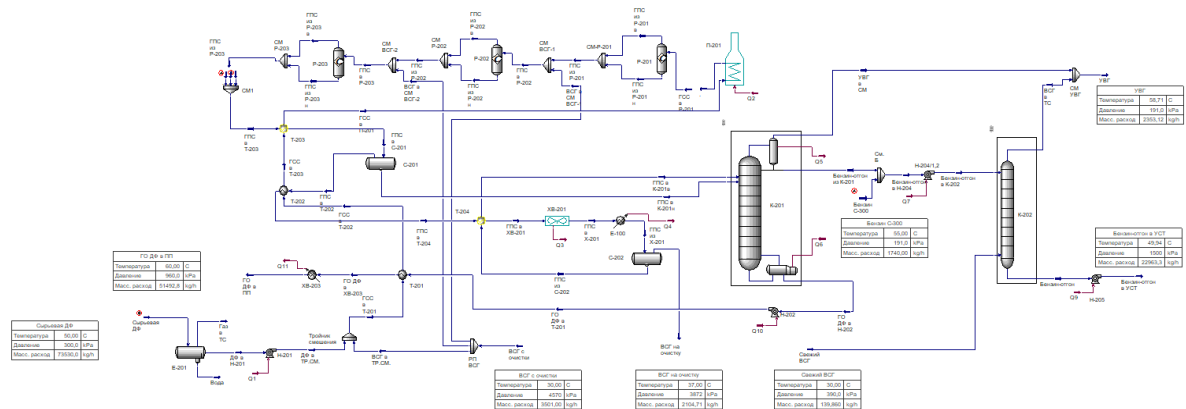


Рисунок 1. Технологическая схема процесса каталитической гидроочистки и гидродепарафинизации дизельного топлива.

4. Полученные результаты

Проанализируем эффективность работы спроектированной модели при помощи сравнения составов и физико-химических свойств потоков. Сырьевого потока ДФ и полученного в ходе расчета модели потока. Состав потоков представлен в таблице 1.

Таблица 1. Состав сырьевого и продуктового потока дизельной фракции.

Состав	Сырьевая ДФ		Гидроочищенная и депараф. ДФ	
	кг/ч	% мас	кг/ч	% мас
H ₂ S	0,00	0,00	0,00	0,0005
H ₂	0,00	0,00	0,00	0,00
CH ₄	0,00	0,00	0,00	0,00
C ₂ H ₆	0,00	0,00	0,00	0,00
C ₃ H ₈	0,00	0,00	0,00	0,00
и-C ₄ H ₁₀	0,00	0,00	0,00	0,00
н-C ₄ H ₁₀	0,00	0,00	0,00	0,00
и-C ₅ H ₁₂	0,00	0,00	0,00	0,00
н-C ₅ H ₁₂	0,00	0,00	0,00	0,00
Н-C ₆ H ₁₄	0,00	0,00	0,00	0,00
130°С	529,2	0,72	0,00	0,00
140°С	477,75	0,65	0,00	0,00
150°С	720,3	0,98	22,05	0,03
160°С	624,75	0,85	808,5	1,10
170°С	712,95	0,97	1470,0	2,00
180°С	1146,6	1,56	2866,5	3,9
190°С	1234,8	1,68	2528,4	3,44
200°С	1381,8	1,88	2219,7	3,02
210°С	1359,75	1,85	5012,7	6,82
220°С	2182,95	2,97	5071,5	6,90
230°С	2021,25	2,75	4189,5	5,70
240°С	4336,5	5,9	3689,7	5,02

250°С	5042,1	6,86	6769,35	9,21
260°С	7158,9	9,74	4704,0	6,40
270°С	6093,15	8,29	3395,7	4,62
280°С	6453,3	8,78	7482,3	10,18
290°С	5637,45	7,67	8930,25	12,15
300°С	4211,55	5,73	3491,25	4,75
310°С	5600,7	7,62	1653,75	2,25
320°С	4270,35	5,81	2726,85	3,71
330°С	4020,45	5,47	882,0	1,20
340°С	3410,4	4,64	1793,4	2,44
350°С	2682,75	3,65	2646,0	3,60
360°С	2190,3	2,98	1146,6	1,56
Итого	73500,00	100,00	7350,00	100,00

Сравнив составы сырьевого и продуктового потока, можно заметить уменьшение количества компонентов, выкипающих при температуре, более 300 °С. Это косвенно подтверждает успешность проведения реакций гидродепарафинизации. Высокомолекулярные парафины после реакций «крекирования» уменьшили длину углеродного скелета, тем самым понизив температуру кипения. Также можно заметить уменьшение количества фракций выкипающих в диапазоне температур 130-150 °С. Это можно объяснить повышенной степенью стабилизации дизельной фракции, после колонны К-201.

Кроме фракционного состава, для определения эффективности работы цифровой модели следует сравнить физико-химические свойства двух потоков. Физико-химические свойства потоков представлены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства сырьевого и продуктового потока дизельной фракции.

Свойство	Ед. измерения	Сырьевая ДФ	Гидроочищенная и депарафин. ДФ
Плотность при 20 °С	кг/м ³	810	842
Вязкость кинематическая при 40°С	мм ² /с	2,92	2,51
Предельная температура фильтруемости	°С	-5	-41
Содержание общей серы	%	0,028	0,0032
Цетановое число	-	56	47

Аналогичное «улучшение» показателей качества косвенно подтверждают физико-химические свойства потоков, содержание серы соответствует экологическому

классу – K5, низкотемпературные свойства позволяют использовать данную фракцию как компонент любого, в том числе арктического дизельного топлива.

5. Выводы

Таким образом, полученная модель, описывает процесс каталитической гидроочистки и депарафинизации дизельной фракции. В дальнейшем цифровая модель может использоваться для проверки эффективности нового катализатора, обучения рабочего персонала физико-химическим основам управления процесса, расчета материального баланса, при изменении состава сырья, поступающего на установку.

Список литературы

1. Терентьева, Н. А. Гидроочистка топлив: учебное пособие / Н. А. Терентьева, Н. Л. Солодова. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2008. – 63 с.
2. Ахметов, С. А. Лекции по технологии глубокой переработки нефти в моторные топлива: учебное пособие / С. А. Ахметов. – СПб: Недра, 2007. – 312 с.
3. Некрасов, И. Моделирование процесса гидрокрекинга при получении дизельных топлив в системе Aspen Hysys / И. Некрасов, В. Тынченко, Я. Тынченко, Т. Панфилова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2021. – № 12. – С. 214-216.
4. Жилина, В. А. Направления модернизации установок гидроочистки дизельного топлива / А. В. Жилина, Н. А. Самойлов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2017. – № 2. – С. 90-109.
5. Шафилов, Р. Р. Сравнение гидравлических характеристик прямоточно-центробежных элементов сепараторов газоконденсатных месторождений / Р.Р. Шафилов, Л.Н. Шагаев, Э.В. Гарифуллина, В.В. Бронская // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 8. – С.104-108.
6. Патрихин, М. Ю. Моделирование трехфазного равновесия по уравнению Пенга-Робинсона с учетом полярных компонентов / М. Ю. Патрихин // Химия и химическая технология в XXI веке. – 2023. – № 1. – С. 101-102.
7. Распоряжение Правительства РФ от 7 ноября 2023 г. № 3113-р. – Москва. – С. 67.