

А. Д. Шапошников, Н. А. Терентьева, Ю. Х. Усманова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГИДРООЧИСТКИ И ГИДРОДЕПАРАФИНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬНОЙ ФРАКЦИИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ASPEN HYSYS

Ключевые слова: Aspen Hysys, гидроочистка, гидродепарафинизация, цифровое моделирование, программные пакеты моделирования.

В статье рассматривается поэтапное построение цифровой модели процесса гидроочистки и гидродепарафинизации дизельного топлива в специализированной программе Aspen Hysys V14. Нефтегазовая отрасль на сегодняшний день является ключевым сектором экономики Российской Федерации, обеспечивая значительную часть энергетических ресурсов и углеводородного сырья для различных отраслей промышленности. Цифровизация играет важную роль в развитии современной и высокоэффективной российской промышленности. Говоря о стабильной и продуктивной работе нефте- и газоконденсатоперерабатывающих предприятий, отметим важность процессов гидроочистки и гидродепарафинизации. Гидроочистка является ключевым процессом на любом современном заводе, играя решающую роль в улучшении экологического и эксплуатационного качества моторных топлив. Причина этому – ужесточение экологических требований к товарным топливам, необходимость минимального содержания каталитических ядов (металлов, фосфора, мышьяка, кремния) в прямогонных фракциях, а также повышение химической и физической стабильности топлив. На нефтеперерабатывающих заводах процесс депарафинизации чаще применяется для подготовки компонентов масел и дизельных топлив. Улучшение низкотемпературных свойств позволяет применять нефтепродукты в зимний период и областях крайнего Севера. Сырьем моделируемой установки является прямогонная дизельная фракция 180-340 °С, состоящая преимущественно из парафиновых и нафтеновых углеводородов, содержащая в качестве гетерокомпонентов преимущественно серу. Созданная 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.

А. D. Shaposhnikov, N. A. Terent'eva, Yu. Kh. Usmanova

MODELING OF THE HYDRO-CLEANING AND HYDRO-DEPARAFFINIZATION PROCESS OF THE DIESEL FRACTION IN THE ASPEN HYSYS SOFTWARE PACKAGE

Keywords: Aspen Hysys, hydro-cleaning, hydro-deparaffinization, digital modelling, modelling software packages.

The article deals with the step-by-step construction of a digital model of hydrotreating and hydro-deparaffinization of diesel fuel in the Aspen Hysys V14 specialized software. The oil and gas industry today is a key sector of the Russian Federation economy, providing a significant part of energy resources and hydrocarbon raw materials for various industries. Digitalization plays an important role in the development of a modern and highly efficient Russian industry. Speaking about the stable and productive operation of oil and gas condensate refineries, we note the importance of hydrotreating and hydro-deparaffinization processes. Hydrotreating is a key process at any modern refinery, playing a crucial role in improving the environmental and operational quality of motor fuels. The reason for this is the tightening of environmental requirements for commercial fuels, the need to minimize the content of catalytic poisons (metals, phosphorus, arsenic, silicon) in straight-run fractions, and to improve the chemical and physical stability of fuels. At oil refineries, the dewaxing process is more often used to prepare components of oils and diesel fuels. Improvement of low-temperature properties allows oil products to be used in winter and in the regions of the far North. The feedstock of the modelled unit is straight-run diesel fraction 180-340 °C, consisting mainly of paraffin and naphthenic hydrocarbons, containing mainly sulphur as heterocomponents. The created digital model allows estimating the efficiency of the plant operation mode, depending on the selected fuel grade (summer, winter, arctic). The model also makes it possible to predict the yield and quality of the product, which helps to optimize the process conditions to achieve the desired results.

Введение

Нефтегазовая отрасль на сегодня является одним из ключевых секторов экономики страны, обеспечивая значительную часть энергетических ресурсов и сырья для промышленности. За последние 10-15 лет в отрасли сильно возросло влияние цифровых технологий. На данный момент, каждый современный нефтеперерабатывающий или газоперерабатывающий завод имеет в своем арсенале различные цифровые инструменты описания и управления технологическим процессом [1,2].

Из всех видов цифровых инструментов, использование «больших данных – Big Data», 3D-

моделирование, внедрение экономических инструментов, основным и фундаментальным остается цифровое моделирование процессов через специализированные программы [3]. Наиболее известные и доступные программы моделирования – это Aspen Hysys [4], Aspen Plus [5], Unisim Design [6], ChemCAD [7], а также новые инструменты – DWSIM [8] и вышедшая недавно отечественная программа Аэросим [9]. Использование данных программ при моделировании различных процессов переработки, позволяет расчётным способом, с минимальными капитальными затратами и высокой сходимостью результатов спроектировать процесс и

проанализировать его. Каждая программа отмеченная выше имеет свои преимущества, к примеру:

- Aspen Hysys на протяжении долгого времени является лидером рынка в области моделирования процессов нефтегазовой промышленности, а также является частью программного комплекса Aspen Tech, таким образом легко интегрируется с другими продуктами комплекса, к примеру Aspen PIMS;
- Aspen Plus более универсален чем Aspen Hysys особенно при моделировании процессов, в которых задействованы твердые частицы и электролиты, также совместим с другими программами комплекса Aspen Tech;
- Unisim Design – продукт комплекса Honeywell, прямой конкурент комплекса Aspen Tech, имеет аналогичные преимущества, но менее популярен в промышленной среде;
- Аэросим является полностью русской программой, написанной под российские стандарты и оборудование;
- DWSIM является базовым бесплатным симулятором с открытым исходным кодом;

- ChemCAD является более доступным по цене аналогом программ Aspen Hysys и Aspen Plus [10];

В качестве примера создания цифровых моделей будет смоделирована установка гидроочистки и гидродепарафинизации дизельного топлива (УГиГДТ), поскольку это один из ключевых процессов многих НПЗ и его совершенствование особенно актуально на текущий момент. Для задания данной модели использовалась программа Aspen Hysys V14, поскольку она является наиболее подходящей для моделирования процессов превращения углеводородных компонентов [4].

Экспериментальная часть/ объект моделирования

В рамках описываемого решения было принято использовать схему на основе промышленных данных процесса гидроочистки и гидродепарафинизации дизельной фракции. Технологическая схема моделируемого процесса представлена на рисунке 1.

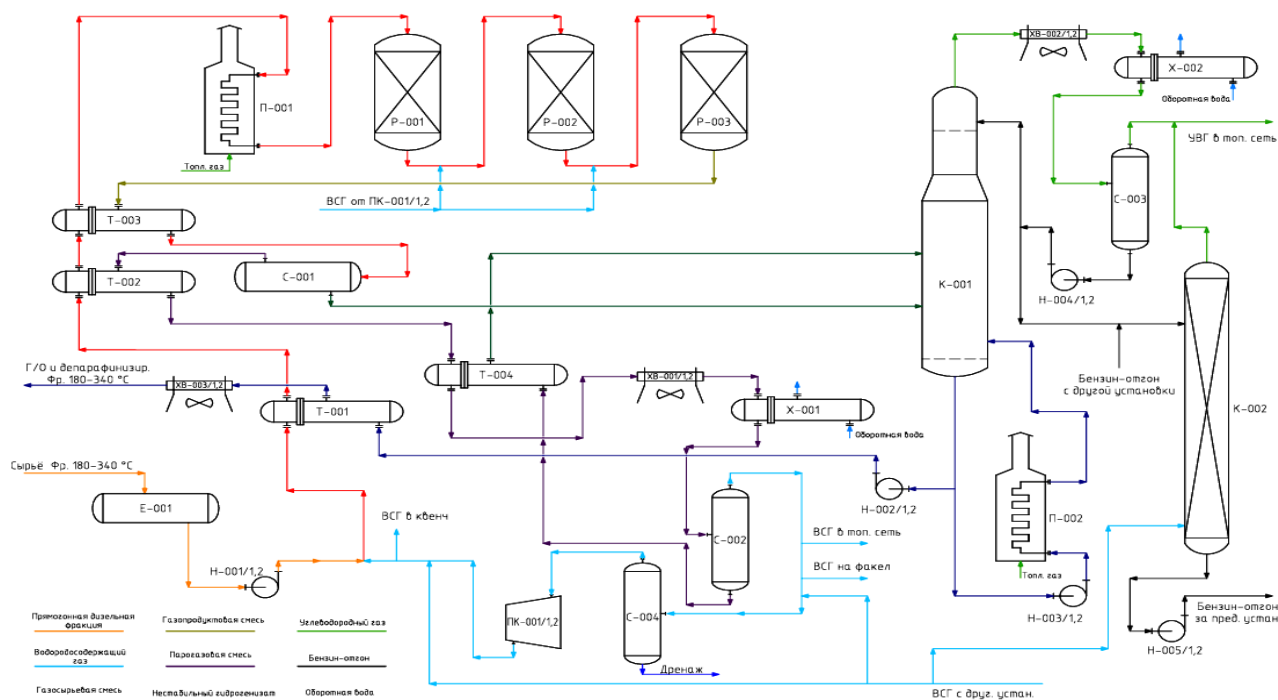


Рис. 1 – Технологическая схема УГ и ГДТ

Fig. 1 – Technological diagram of the hydro-cleaning (HC) and hydro-deparaffinization (HDP) of diesel fuel (DF)

Гидроочистка – процесс обогащения моторных топлив, в ходе которого происходит удаление S-, O-, N- содержащих органических соединений, металлов, а также насыщение непредельных углеводородов [11]. Помимо удаления гетероатомов, для получения компонента товарного дизельного топлива необходимо улучшить низкотемпературные свойства фракции. Добиться этого можно при проведении процесса гидродепарафинизации. Гидродепарафинизация – процесс улучшения низкотемпературных свойств топлив, в ходе которого происходит крекирование и

последующее насыщение водородом парафинистых углеводородов [11]. В исходные для моделирования данные входят следующие показатели:

- Производительность установки по сырью – 600 000 тонн/год;
- Суммарное количество водородсодержащего газа (ВСГ) – 4,76 % от сырья;
- Содержание общей серы в сырьевой дизельной фракции (ДФ) – 0,0278 % масс., в продуктовой ДФ – <10 мг/кг, в бензин-отгоне – 0,0003 % масс..

Реакторный блок моделируемой установки, состоит из трех последовательных реакторов. Данная

особенность обуславливается необходимостью охлаждения реакционной смеси. Поскольку реакции гидроочистки обладают экзотермическим эффектом, необходимо производить съем тепла, благодаря чему поддерживается температурный режим, обеспечивающий оптимальный выход целевого продукта, прекращаются реакции крекинга, приводящие к большому выходу газов и коксообразованию. На моделируемой установке теплосъем организован вводом охлаждающего потока ВСГ между реакторами.

Модель реактора – реактор конверсии. Поскольку существующая в Aspen Hysys V14 модель реактора гидроочистки не учитывала реакции гидродепарафинизации, тем самым давала большую погрешность расчета, было принято решение задать реакторный блок через реактор конверсии, что позволило учесть большую часть видов реакций, протекающих в реакторном блоке промышленной установки. Данный метод также позволяет получить высокое совпадение составов потоков, выходящих из реакторов модели и промышленной установки, за счет введения необходимого числа реакций.

Сходимость погрешности – $1 \cdot 10^{-5}$. Данный показатель сходимости/погрешности является стандартным для расчета моделей аппаратов. В проектируемой модели он не изменялся и составил $1 \cdot 10^{-5}$.

Основная часть/разработка модели

Процесс задания модели установки гидроочистки можно условно разделить на несколько этапов:

1. Добавление «реальных» компонентов
2. Выбор пакета моделирования;
3. Задание гипотетических компонентов;
4. Создание и расчет реакций, добавление наборов реакций в среду моделирования;
5. Построение схемы модели и расчет аппаратов.

Подробнее рассмотрим каждый из них.

Этап 1

Под «реальными» компонентами понимаются индивидуальные соединения (молекулы веществ), которые могут присутствовать в сырье или продуктах моделируемого процесса. Для процесса гидроочистки такими соединениями являются углеводородные газы (УВГ) от C_1 до C_4 , вода, водород, сероводород, аммиак, а также гетероатомные соединения, которые могут находиться в сырье. Добавление гетероатомных компонентов не является обязательным, но, так как реакторный блок установки задается через реактора конверсии, они необходимы для составления реакций химических превращений.

Этап 2

Выбор программного пакета основан на том, какие компоненты (вещества) участвуют в моделируемом процессе, какие поддерживаются давлением и температурой. В программе цифрового моделирования Aspen Hysys V14 представлено 38 пакетов свойств. Условно, они могут быть разделены на 5 групп:

1. Уравнения состояния (Equations of state - EOS) – наиболее популярная группа пакетов свойств. Ее

составляющие чаще используются для моделирования нефтяных, газовых и нефтехимических систем. Примером являются пакеты Пенг-Робинсон и его модификации, пакет «BWRS», «SRK», «Glycol PPkg».

2. Модели активности (Activity Models - AM) – данная группа чаще применяется при моделировании процессов, в ходе которых присутствуют неполярные или слабополярные компоненты. Чаще используется для моделирования экстракционных процессов, систем с растворами солей, кислот и оснований. Примеры – «NRTL» и его модификации, пакет «Wilson» и «UNIQUAC».

3. Модели Чао Сидера и Грейсона Стрида (Chao Seader & Grayson Streed Models) – это 2 полуэмпирических программных пакета, которые чаще используются для моделирования систем с превращением тяжелых углеводородов и высоким содержанием водорода. Они имеют свой диапазон использования, давление не должно превышать 10342 кПа, а температура находится в диапазоне -17,78 до 260 °C.

4. Модели давления пара (Vapor Pressure Models) – данная группа пакетов свойств используется для идеальных смесей при пониженном давлении. В данном случае к идеальным смесям относятся углеводородные системы, такие как смеси спиртов и кетонов. Примеры – пакеты «Antoine» и «Braun K10».
5. Модели «разных» типов (Miscellaneous Types) – данная группа содержит пакеты свойств, которые являются уникальными и не входят в ранее упомянутые группы. К примеру, пакет «ASME Steam» ограничен одним компонентом – водой. «Clean Fuels Pkg» специально разработан для систем, состоящих из тиолов и углеводов [4].

Для моделирования процесса гидроочистки и депарафинизации дизельного топлива была выбрана модификация пакета Пенга-Робинсона – «PRSV», поскольку данный пакет обладает наибольшей сходимостью для углеводородных систем с повышенным давлением и температурой и, в отличие от простого Пенга-Робинсона, может использоваться для умеренно неидеальных систем.

Этап 3

Под заданием гипотетических компонентов подразумевается добавление фракционного состава дизельного топлива. Данное свойство задается через главную панель программы, через утилиту «Диспетчер нефти». На данном этапе задается плотность фракции, истинная температура кипения – ИТК. Это минимальное количество данных, необходимое для корректного расчета потока фракции. Дополнительно, для более реалистичного расчета модели, могут добавляться «легкие фракции» - растворенные в дизельной фракции газы и бензиновая фракция, вязкость при разных температурах, зависимость молекулярного веса от процента выкипания пробы.

Этап 4

Для моделирования этого блока, было создано 3 набора реакций. Набор реакций формировался на основе типа катализатора, загруженного в реактор на промышленной установке. Гетероатомные

соединения и степень конверсии вещества в реакции, подбирались таким образом, чтобы максимально повторить состав продуктового потока, выходящего из реакторного блока. Особенностью сырьевой ДФ на моделируемой установке является наличие в качестве гетероатомных соединений только серосодержащих углеводородов. Типовые реакции гидрокрекинга *n*-парафинов и гидрогенолиза гетероатомных соединений, протекающие в реакторе, представлены на рисунке 2.

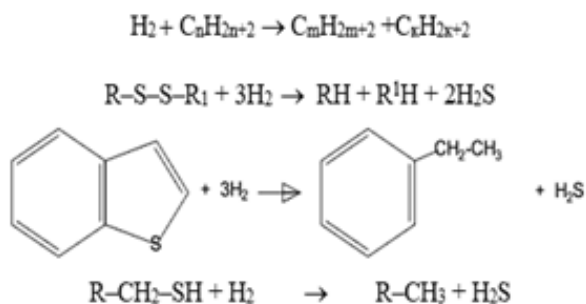


Рис. 2 – Типовые реакции превращения

Fig. 2 – Typical conversion reactions

На основе данных о классах гетероатомных соединений и их концентрации, поток дизельной

фракции был заменен на поток индивидуальных компонентов, в том числе гетероатомных. Аналогичным образом на выходе из реакторного блока, с учетом химических превращений (изменением концентраций индивидуальных компонентов), поток был заменен на продуктовую дизельную фракцию.

Для задания реакции конверсии необходимо добавить сырьевые и продуктовые компоненты, затем расставить положительные и отрицательные стехиометрические коэффициенты, для уравнивания реакции. После этого необходимо задать степень конверсии. Ее можно задать через число – процент превращения, или через уравнение, в котором степень конверсии является функцией температуры [4]. Далее, после задания всех реакций в данном наборе, набор необходимо добавить в среду моделирования, а затем уже при построении схемы выбрать его в модели реактора конверсии.

Этап 5

Построение технологической схемы.

Смоделированную установку гидроочистки и депарафинизации условно можно разделить на 5 блоков. Схема смоделированной модели представлена на рисунке 3.

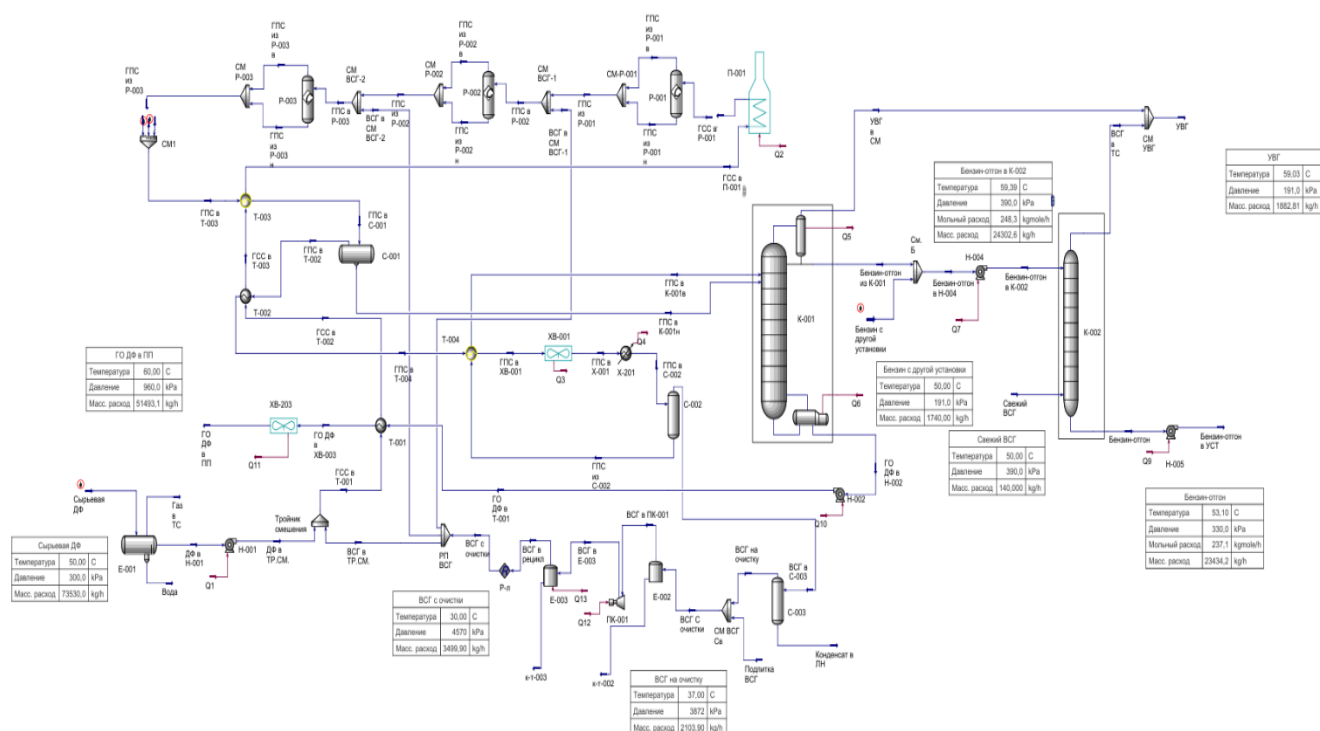


Рис. 3 – Технологическая схема модели УГиГДТ

Fig. 3 – Technological diagram of the DF HC and HDP model

Первый блок – подготовки и подогрева сырья, который состоит из сырьевой емкости E-001, насоса H-001, тройника смешения, теплообменников T-001 – T-003 и печи П-001. Сырьевая дизельная фракция из емкости насосом подается в тройник смешения, куда также подается балансовое количество

циркулирующего водородсодержащего газа - ЦВСТ, поступающего с блока подготовки ЦВСТ. Сырьевая смесь последовательно проходит трубное пространство рекуперативных теплообменников и печь, где последовательно нагревается до температуры реакции около 370-390 °C. Второй

блок установки – реакторный блок, который состоит из реакторов Р-001 – Р-003 и системы подачи квенча (захламляющего потока водородсодержащего газа – ВСГ с блока подготовки ЦВСГ). Газосырьевая смесь последовательно проходит через три реактора конверсии. Первый реактор – реактор гидроочистки, в котором протекают реакции гидрооблагораживания. Второй реактор загружен двумя видами катализаторов, послойно. Верхняя половина слоя загружена катализатором гидроочистки, нижняя часть – депарафинизации. Третий реактор имеет сверху 2/3 слоя катализатора депарафинизации, после чего 1/3 слоя – финишная гидроочистка. Между Р-001 и Р-002, и между Р-002 и Р-003 предусмотрен ввод захламляющего потока – квенча, который позволяет уменьшить реакции коксообразования и увеличить выход гидрогенизата [9]. Третий блок – блок стабилизации гидрогенизата, в который входят сепараторы С-001 – С-002, колонна – К-001, теплообменники – Т-002 – Т-004, холодильники – Х-001, ХВ-001. Газопродуктовая смесь, после реакторного блока охлаждается в теплообменнике и попадает в горячий сепаратор, где разделяется на два потока. Жидкий поток дизельной фракции поступает на нижнюю питательную тарелку колонны стабилизации К-001, паровой поток охлаждается в двух теплообменниках Т-003 и Т-004, воздушном и водяном холодильниках ХВ-001 и Х-001, после чего поступает в холодный сепаратор С-002, где делится на два потока. Из углеводородной фазы верхним потоком улетучивается ВСГ, идущий в блок подготовки ЦВСГ. Сконденсировавшаяся углеводородная фаза выходит снизу сепаратора и поступает в теплообменник Т-004. Затем подается на верхнюю питательную тарелку стабилизационной колонны К-001. Колонна К-001 является типичной ректификационной колонной, с двухпоточными клапанными тарелками. С куба колонны выходит гидроочищенный и депарафинизированный компонент товарного дизельного топлива, который после охлаждения подается на узел смешения за пределами установки. Четвертый блок – блок десорбции состоит из насадочной колонны десорбера К-002. В качестве насадки используются фарфоровые седла «Инталокс». Побочный продукт процесса депарафинизации бензин-отгон, образующийся в ходе реакций мягкого гидрокрекинга, выделяется с низу рефлюксной емкости колонны стабилизации и подается в колонну десорбции для удаления сероводорода методом отдува водородсодержащим газом. Большой ценности, как компонент топлива бензин-отгон не имеет. Поэтому после отдува поступает на узел смешения за пределами установки. Пятый блок – блок подготовки ЦВСГ. В данном блоке представлены следующие аппараты: сепаратор С-003, поршневой компрессор ПК-001, буферные емкости Е-002 и Е-003. ВСГ, поступающий из блока стабилизации, подается в сепаратор отделения капельной жидкости С-003. После сепаратора в поток ВСГ подается свежий газ с высоким

содержанием водорода. Смешанный поток подается на прием поршневого компрессора ПК-001. Для поддержания непрерывной подачи ЦВСГ в компрессор и после компрессора, а также для постепенной остановки в случае аварийной ситуации, предусмотрены буферные емкости Е-002 и Е-003. Выходящий из компрессора ЦВСГ делится на несколько потоков. Основной поток подается в тройник смешения для обеспечения реакций гидрооблагораживания и гидродепарафинизации. Оставшаяся часть подается трубопровод квенча в реакторный блок.

Анализ результатов моделирования

Эффективность процесса оценивается по целевому продукту – гидроочищенной и гидродепарафинизированной дизельной фракции ДФ. Поскольку данный компонент является основным для приготовления товарного дизельного топлива различных марок эффективность процесса будет оцениваться сравнением фракционного состава и физико-химических свойств сырьевой и продуктовой ДФ, а также сравнение ДФ с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к данному топливу [12].

Фракционный состав сырьевой и продуктовой дизельной фракции, представлен в таблице 1. Сравнение физико-химических ФХ свойств сырьевой и продуктовой дизельной фракции представлен в таблице 2.

Сравнение фракционных составов сырьевой и продуктовой дизельной фракции позволяет косвенно доказать эффективность проведенного процесса. Снижение выхода продуктов, выкипающих при температуре выше 300 °С, подтверждает снижение концентрации высококипящих алифатических парафинов, которые ухудшают низкотемпературные свойства дизельного топлива. Также по пункту 15 таблицы 1 ГОСТа, полученная продуктовая дизельная фракция соответствует стандарту [12].

Сравнение ФХ свойств сырьевой и продуктовой ДФ демонстрирует аналогичное улучшение показателей свойств. Снизилось содержание общей серы, что подтверждает эффективность проведенных реакций гидроочистки. Также снизился показатель температуры помутнения до -22 °С, что доказывает эффективность проведенных реакций гидродепарафинизации. Сравнение физико-химических показателей продуктовой ДФ с таблицами 1 и 3 ГОСТа позволяет сделать вывод, что по пунктам 5 таблицы 1 продуктовая ДФ соответствует ГОСТ, по пунктам 2-7 таблицы 2 продуктовая ДФ соответствует зимнему дизельному топливу класса 2 [12].

После задания модели, результаты, полученные в ходе моделирования, были сопоставлены с данными реальной установки. В ходе сравнения выявлена высокая сходимость результатов, что подтверждает достаточную полноту задания, правильность и эффективность всех блоков модели.

Таблица 1 – Фракционный состав сырьевой и продуктовой ДФ

Table 1 – Fractional composition of raw and product DF

Состав	Сырьевая ДФ		Продуктовая. ДФ	
	кг/ч	% мас	кг/ч	% мас
H ₂ S	0,00	0,00	0,00	0,0005
130°C	529,2	0,72	0,00	0,00
140°C	477,75	0,65	0,00	0,00
150°C	720,3	0,98	22,05	0,03
160°C	624,75	0,85	808,5	1,10
170°C	712,95	0,97	1470,0	2,00
180°C	1146,6	1,56	2866,5	3,9
190°C	1234,8	1,68	2528,4	3,44
200°C	1381,8	1,88	2219,7	3,02
210°C	1359,75	1,85	5012,7	6,82
220°C	2182,95	2,97	5071,5	6,90
230°C	2021,25	2,75	4189,5	5,70
240°C	4336,5	5,9	3689,7	5,02
250°C	5042,1	6,86	6769,35	9,21
260°C	7158,9	9,74	4704,0	6,40
270°C	6093,15	8,29	3395,7	4,62
280°C	6453,3	8,78	7482,3	10,18
290°C	5637,45	7,67	8930,25	12,15
300°C	4211,55	5,73	3491,25	4,75
310°C	5600,7	7,62	1653,75	2,25
320°C	4270,35	5,81	2726,85	3,71
330°C	4020,45	5,47	882,0	1,20
340°C	3410,4	4,64	1793,4	2,44
350°C	2682,75	3,65	2646,0	3,60
360°C	2190,3	2,98	1146,6	1,56
Итого	73500,00	100,00	73500,00	100,00

Таблица 2 – Физико-химические свойства сырьевой и продуктовой ДФ

Table 2 – Physical and chemical properties of raw and finished DF

Свойство	Ед. из.	Сырьевая ДФ	Продуктовая. ДФ
Плотность при 20 ° С	кг/м ³	810	814
Вязкость кинемат. при 40° С	мм ² /с	2,92	1,891
Температура помутнения	° С	-5	-22
Содержание общей серы	%	0,028	0,0003
Цетановое число	-	59	48

Заключение

Созданная в программе Aspen Hysys V14 модель установки гидроочистки и гидродепарафинизации дизельного топлива с высокой степенью точности рассчитала процесс получения моторного топлива, которое по качеству соответствует современным нормативным документам. Полученная модель процесса является высокоэффективным инструментом для анализа работы установки, поиска «узких мест» процесса и путей его оптимизации и интенсификации. Также программное обеспечение Aspen Hysys позволяет после задания модели провести гидравлических расчет аппаратов, рассчитать геометрические показатели (габаритные размеры) и экономические показатели эффективности [13].

Цифровая модель установки открывает новые возможности в развитии процесса и отрасли в целом, к примеру:

- Оценка эффективности и отработка путей оптимизации процесса, расчет и дальнейшее использование на промышленной установке максимально эффективных технологических показателей;
- Предсказательная аналитика: возможность предсказывать поведение системы в зависимости от изменений условий, что, в свою очередь, помогает в выборе режима работы оборудования [14];
- Возможность анализа состава, физических, химических и эксплуатационных свойств смеси в любом потоке (любом аппарате) модели;
- Возможность предварительного анализа экономической целесообразности внедрения новых

технологий или модернизации существующих линий [15];

- Создание цифрового двойника установки, где за основу берется цифровая модель, в которую интегрируется 3D-модель, автоматическая система управления технологическим процессом, инструменты экономического расчета, согласно чертежи и нормативная документация.

Литература

1. М.Е. Сироткин, Наука и образование: Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, **8**, 8, 166-180 (2011).
2. О.В. Перерва, Т.Н. Гартман, *Компьютерное моделирование химико-технологических процессов в программе Aspen Plus: практическое руководство для технологов и проектировщиков*. Лань, Санкт-Петербург, 2023. 224с.
3. Л.Г. Тугашова, А.Д. Гапонцев, Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание, **16**, 2, 36-44 (2023).
4. Aspen Hysys: официальный сайт. – Бэдфорд. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys> (дата обращения 09.03.2025)
5. Aspen Plus: официальный сайт. – Бэдфорд. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> (дата обращения 09.03.2025)
6. Honeywell. Unisim Design: официальный сайт. – Шарлотт. URL: <https://honeywell.com/unisim-design> (дата обращения 09.03.2025)
7. ChemCAD: официальный сайт. – Хьюстон. URL: <https://chemstations.com/chemcad> (дата обращения 09.03.2025)
8. DWSIM: официальный сайт. – Хьюстон. URL: <https://dwsim.org/> (дата обращения 09.03.2025)
9. Аэросим: официальный сайт. – Жуковский. URL: <https://aerogas.ru/aerosym/> (дата обращения 09.03.2025)
10. А.М. Байнов, Л.В. Плотнокова, Математические методы в технологиях и технике, **4**, 6, 111-114 (2024).
11. Н.Л. Солодова, Н.А. Терентьева, *Гидроочистка топлива*, Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, Казань, 2008. 63 с.
12. ГОСТ 32511-2013. Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2015-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. Официальное. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 41 с.
13. Т.Н. Гартман, В.А. Данилов, Ф.С. Советин, Д.К. Новикова, Э.А. Шакина, Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт, **45**, 10, 11-20 (2019).
14. Д.Р. Ахмеров, А.Г. Мухаметзянова, Вестник Технол. ун-та, **28**, 1, 127-131 (2025).
15. Р.Х. Азиева, Х.Э. Таймасханов, Методология и инструментарий управления, **1**, 178-185 (2020).

References

1. M.E. Sirotkin, Science and Education: Scientific Publication of Bauman Moscow State Technical University, **8**, 8, 166-180 (2011).
2. O.V. Pererva, T.N. Gartman, Computer Modeling of Chemical and Technological Processes in Aspen Plus: A Practical Guide for Technologists and Designers. Lan, St. Petersburg, 2023. 224 p.
3. L.G. Tugasheva, A.D. Gaponets, System Analysis in Science and Education: Online Scientific Publication, **16**, 2, 36-44 (2023).
4. Aspen Hysys: official website. – Bedford. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys> (accessed 09.03.2025)
5. Aspen Plus: official website. – Bedford. URL: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus> (accessed 09.03.2025)
6. Honeywell. Unisim Design: official website. – Charlotte. URL: <https://honeywell.com/unisim-design> (accessed on 09.03.2025)
7. ChemCAD: official website. – Houston. URL: <https://chemstations.com/chemcad> (accessed on 09.03.2025)
8. DWSIM: official website. – Houston. URL: <https://dwsim.org/> (accessed on 09.03.2025)
9. Aerocsim: official website. – Zhukovsky. URL: <https://aerogas.ru/aerosym/> (accessed on 09.03.2025)
10. A.M. Bainov, L.V. Plotnikova, Mathematical Methods in Technology and Engineering, **4**, 6, 111-114 (2024).
11. N.L. Solodova, N.A. Terentyeva, Hydrocleaning of fuels, Kazan State Technological University Press, Kazan, 2008. 63 p.
12. GOST 32511-2013. EURO diesel fuel. Technical conditions: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2015-01-01 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. – Official publication. – Moscow: Standardinform, 2019. – 41 p.
13. T.N. Gartman, V.A. Danilov, F.S. Sovetin, D.K. Novikova, E.A. Shakina, Oil Refining and Petrochemistry. Scientific and Technical Achievements and Best Practices, **45**, 10, 11-20 (2019).
14. D.R. Akhmerov, A.G. Mukhametzyanova, Herald of Technological University, **28**, 1, 127-131 (2025).
15. R.Kh. Azieva, Kh.E. Taymaskhanov, Methodology and Management Tools, **1**, 178-185 (2020).

© **А. Д. Шапошников** – студент 1 курса магистратуры кафедры Химической технологии переработки нефти и газа (ХТПНГ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, andrsch092@gmail.com; **Н. А. Терентьева** – старший преподаватель кафедры ХТПНГ, КНИТУ, terenteva@kstu.ru; **Ю. Х. Усманова** – кандидат химических наук, доцент кафедры ХТПНГ, КНИТУ, UsmanovaYuKh@corp.knrtu.ru.

© **A. D. Shaposhnikov** – 1-st year Master-Student, Department of Chemical Technology of Oil and Gas Processing (CTOGP), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, andrsch092@gmail.com; **N. A. Terentyeva** – Senior Lecturer, the CTOGP department, KNRTU, terenteva@kstu.ru; **Yu. Kh. Usmanova** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor of the CTOGP department, KNRTU, UsmanovaYuKh@corp.knrtu.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 22.08.25.
Дата принятия рукописи в печать – 30.08.25.