

УДК 665.752.665.753.4

**РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ГИДРООЧИСТКИ
И ЛЁГКОГО ГИДРОКРЕКИНГА**

**RECONSTRUCTION OF A HYDRAULIC CLEANING
AND EASY HYDROCRACKING UNIT**

А.Р. Дашкина, В.Р. Нигматуллин, В.А. Максютов

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

Alina R. Dashkina, Vil R. Nigmatullin, Vil A. Maksyutov

**Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation
e-mail: dashkina_alinochka@mail.ru**

Аннотация: В работе рассматривается реконструкция установки гидроочистки и лёгкого гидрокрекинга для переработки остаточной фракции высокосернистого газового конденсата. Применение гидроочищенных дистиллятов позволяет повысить качество и выход светлых продуктов, в основном бензина, а также существенно уменьшить образование кокса и содержание SO₂ в дымовых газах. Утяжеленное сырье, в частности остатки газового конденсата, являющееся перспективным для установок каталитического крекинга, хуже подвергается гидроочистке, т.к. в высококипящих фракциях увеличивается содержание серо-, азот-, кислородсодержащих соединений, полициклических ароматических углеводородов, органических производных тяжелых металлов, ухудшающих показатели гидроочистки и каталитического крекинга. Именно поэтому в настоящее время ведутся разработки альтернативных процессов переработки остатков газового конденсата на базе отечественных технологий. С целью реконструкции

установки гидроочистки и легкого гидрокрекинга для переработки остатка газового конденсата высокосернистого сырья использована моделирующая программа Unisim Design. Комбинируя нужные операции и потоки программного пакета, можно просчитать довольно широкий спектр технологических схем, связанных с нефтепереработкой, газопереработкой, нефтехимией и химией. Среди доступных операций есть те, которые рассчитывают термодинамические характеристики и тепловые массовые балансы, к примеру, компрессор, сепаратор, теплообменник, а также логические операции, такие как подбор, рецикл, установка. В программном пакете есть несколько способов выполнить один и тот же расчет, а также много методов обзора информации.

Моделирование и расчет реконструкция установки гидроочистки и лёгкого гидрокрекинга для переработки остаточной фракции высокосернистого газового конденсата осуществлены в программе Unisim Design. Предложено использование более эффективных двухпоточных клапанных тарелок, а также гидрогенизационное обессеривание в процессе легкого гидрокрекинга. Увеличение парожидкостной нагрузки, вплоть до значений близких к критическим значениям, в свою очередь, позволило повысить производительность аппарата.

Abstract. In this work, we consider the reconstruction of a hydrotreating and light hydrocracking unit for processing the residual fraction of sour gas condensate. The use of hydrotreated distillates can improve the quality and yield of light products, mainly gasoline, as well as significantly reduce the formation of coke and the content of SO₂ in flue gases. Weighted raw materials, in particular gas condensate residues, which is promising for catalytic cracking plants, are less likely to be hydrotreated, because in high-boiling fractions, the content of sulfur-, nitrogen-, oxygen-containing compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons, organic derivatives of heavy metals, which deteriorate hydrotreatment and catalytic cracking, increase. That is why the development of alternative processes for processing gas condensate residues based on domestic

technologies is currently underway. In order to reconstruct the hydrotreating and light hydrocracking unit, the Unisim Design simulation program was used to process the remainder of the gas condensate of sour raw materials. Combining the necessary operations and flows of the software package, you can calculate a fairly wide range of technological schemes associated with oil refining, gas processing, petrochemicals and chemistry. Among the available operations are those that calculate the thermodynamic characteristics and thermal mass balances, for example, a compressor, a separator, a heat exchanger, as well as logical operations such as selection, recycling, installation. In the software package there are several ways to perform the same calculation, as well as many methods for reviewing information.

Modeling and calculation reconstruction of the hydrotreatment and light hydrocracking unit for processing the residual fraction of sour gas condensate was carried out in the Unisim Design program. The use of more efficient dual-flow valve plates, as well as hydrogenation desulfurization in the process of light hydrocracking, is proposed. An increase in the vapor-liquid load, up to values close to critical values, in turn, made it possible to increase the productivity of the apparatus.

Ключевые слова: гидрокрекинг; гидроочистка; остаток газового конденсата высокосернистого сырья; Automaxx 9400; двухпоточные клапанные тарелки; гидрогенизат; метод Ньютона-Рафсона

Key words: hydrocracking; hydrotreating; residue of gas condensate of sour raw materials; Automaxx 9400; double flow valve plates; hydrogenate; Newton-Raphson method

На сегодняшний день традиционные технологии переработки остаточных фракций имеют весьма ограниченное применение. Значительная часть остаточных фракций газового конденсата не перерабатывается и отгружается в виде котельных топлив [1–4].

Современные тенденции развития мировой и российской нефтегазопереработки предполагают глубокую переработку тяжёлых нефтяных и газоконденсатных остатков с получением моторных топлив и других видов нефтепродуктов и минимизацией выпуска энергетического котельного топлива [5].

В данной исследовательской работе в качестве сырья используется высокосернистый остаток газового конденсата в смеси с ранее перерабатываемым тяжелым вакуумным газойлем ЭЛОУ-АВТ.

Исключительно важное значение перед началом моделирования процесса имеет подбор исходных данных, конкретно для данного случая, фракционный состав остатка, на основании которого подбираются гипотетические компоненты со средними температурами кипения, молекулярной массой и плотностью [6]. Важен также подбор Пакета свойств.

Для определения фракционного состава нами использовалась полуавтоматическая установка Automaxx 9400 с дополнительным блоком Potstill для дистилляции тяжелых углеводородных смесей по ASTM D5236, которая позволяет достичь значения максимальной атмосферно-эквивалентной температуры 565 °С.

Для расчета основного оборудования установки гидроочистки, включая расчет сепараторов, колонного, емкостного, теплообменного, насосного, печного оборудования, нами смоделирован процесс гидроочистки (рисунок 1).

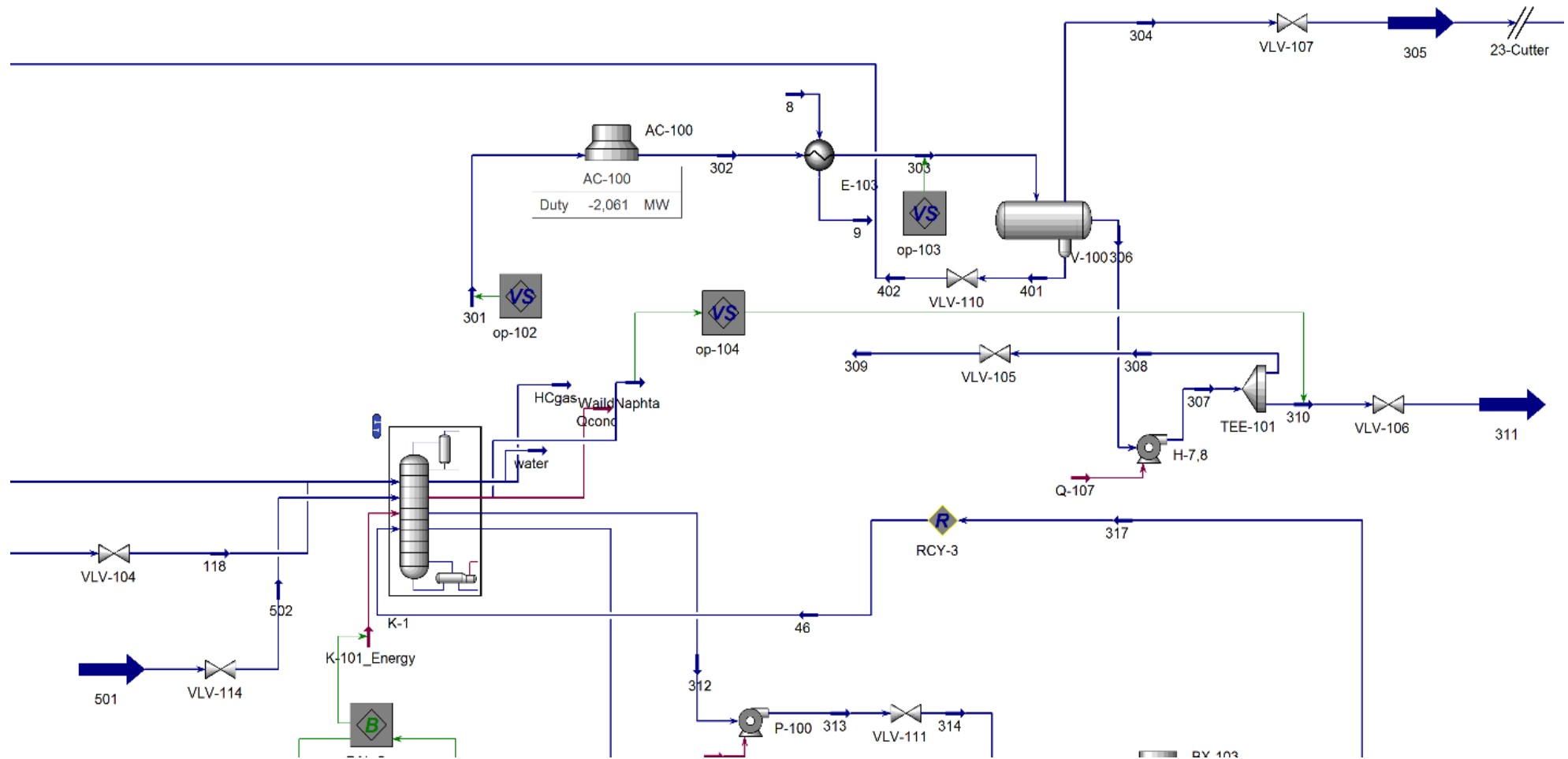


Рисунок 1. Фрагмент модели блока гидроочистки

Включение оборудования в схему ведется с использованием норм технологического режима, используемых на производстве. Данные технологические нормы дают возможность параметризации оборудования (ввод давления, температуры, удельных расходных норм сырья и вспомогательных материалов и т.п.) [7]. Подключение аппаратов к потокам ведется «вручную».

Создаем гипотетические компоненты сырья со средними температурами кипения, молекулярными массами и плотностями (рисунок 2).

Поток нестабильного гидрогенизата поступает в колонну стабилизации. Стабильный гидрогенизат откачивается из кубовой части колонны, прокачивается через ребойлер отпарной колонны дизельного топлива, через сырьевые теплообменники, где отдает тепло. Пары верха колонны охлаждаются в холодильниках воздушного охлаждения, конденсируются в концевых водяных холодильниках и направляются в флегмовую емкость, нестабильный бензин из флегмовой емкости насосом направляется на орошение колонны, а балансовое количество выводится из установки [8].

Дизельное топливо выводится из колонны стабилизации в отпарную колонну, где стабилизируется путем отпарки паров с помощью термосифонного ребойлера внизу колонны.

Углеродородный газ с верха флегмовой емкости отправляется на аминовую очистку.

Целью технологического расчета ректификационной колонны является определение давлений и температур в сечениях аппарата, потарелочных нагрузок по парам и жидкости, количества и качества получаемых продуктов, размеров аппарата.

Hypotheticals Manager

Summary Settings

Group	Hypo Name	Normal Boiling Pt [C]	Molecular Weight	Liquid Density [kg/m3]	Tc [C]	Pc [MPag]	Vc [m3/kgmole]	Accentricity
HypoGroup3	NBP[3]167*	166,89	139,73	780,9	355,0	2,37	0,54	0,
HypoGroup3	NBP[3]181*	180,96	148,44	788,7	369,3	2,27	0,57	0,
HypoGroup3	NBP[3]196*	195,53	155,96	795,0	383,6	2,15	0,61	0,
HypoGroup3	NBP[3]210*	209,65	165,79	802,6	397,7	2,06	0,64	0,
HypoGroup3	NBP[3]224*	224,04	177,54	811,0	412,2	1,97	0,68	0,
HypoGroup3	NBP[3]236*	236,04	187,18	817,5	424,1	1,90	0,71	0,
HypoGroup3	NBP[3]251*	250,80	199,63	825,4	438,5	1,82	0,75	0,
HypoGroup3	NBP[3]266*	265,86	213,11	833,3	453,0	1,75	0,79	0,
HypoGroup3	NBP[3]280*	279,78	226,39	840,5	466,4	1,68	0,83	0,
HypoGroup3	NBP[3]294*	293,71	239,86	847,5	479,6	1,61	0,87	0,
HypoGroup3	NBP[3]307*	307,42	254,17	853,8	492,3	1,55	0,91	0,
HypoGroup3	NBP[3]321*	321,14	268,49	859,9	504,9	1,49	0,95	0,
HypoGroup3	NBP[3]335*	335,19	283,86	866,1	517,7	1,43	0,99	0,
HypoGroup3	NBP[3]349*	348,95	299,22	870,3	529,4	1,36	1,04	0,
HypoGroup3	NBP[3]364*	364,41	320,62	871,4	541,0	1,27	1,11	0,
HypoGroup3	NBP[3]378*	377,51	336,14	874,4	551,6	1,21	1,17	0,
HypoGroup3	NBP[3]392*	391,68	353,02	877,6	563,0	1,15	1,23	0,
HypoGroup3	NBP[3]406*	405,58	371,55	883,6	575,3	1,10	1,28	0,
HypoGroup3	NBP[3]419*	419,11	391,51	889,4	587,2	1,07	1,33	0,
HypoGroup3	NBP[3]441*	440,71	418,26	897,2	605,6	1,00	1,42	0,
HypoGroup3	NBP[3]471*	471,27	462,38	910,2	632,4	0,92	1,54	1,
HypoGroup3	NBP[3]501*	501,27	503,52	922,1	658,4	0,86	1,66	1,
HypoGroup3	NBP[3]532*	531,79	546,36	934,1	684,9	0,79	1,79	1,
HypoGroup3	NBP[3]555*	554,58	580,28	943,2	704,8	0,75	1,89	1,

307.4 C
585.4 F

Delete Group Delete Hypo Move Hypos...
 Import Export

Рисунок 2. Состав сырья

В ходе технологического расчета определено необходимое число реальных тарелок в двух колонных аппаратах и параметры технологического режима, при которых обеспечивается достижение заданного качества получаемого продукта.

В качестве модели расчёта используется неравновесная модель тарелок, которая учитывает процессы массообмена, происходящие в аппаратах колонного типа.

Расчетная модель использует КПД тарелки по Мэрфи (паровая фаза). КПД (эффективность) тарелки зависит от коэффициентов массопереноса и от конструкции тарелки.

Формула для вычисления КПД произвольной тарелки многотарельчатой секции, а также система уравнений, описывающих поведение тарелки, приведены ниже. Подобную систему уравнений приходится решать совместно для всех тарелок каждой колонны схемы. Для решения применяется модифицированный метод Ньютона-Рафсона.

В результате расчета определяются температуры, составы и потоки пара и жидкости для каждой тарелки [9].

КПД тарелки определяется с помощью следующего соотношения:

$$\eta = \frac{(V_j + SV_j)Y_j - V_{j+1}Y_{ij+1}}{(V_j + SV_j)K_{1j}X_{ij} - V_{j+1}Y_{ij+1}}, \quad (1)$$

где η – КПД тарелки;

i – номер компонента;

j – номер тарелки;

K – константа равновесия;

V – мольный расход пара;

X – мольная доля в жидкой фазе;

Y – мольная доля в паровой фазе.

КПД тарелки зависит от кинетических параметров реакций между каждым из кислых газов и амином, физико-химических свойств раствора амина, давления, температуры и параметров конструкции тарелки, таких как ее диаметр, высота и длина перегородки [10].

Неравновесная модель.

Общий материальный баланс:

$$F_j + L_{j-1} - (L_j + SL_j) - (V_j + SV_j) = 0. \quad (2)$$

Покомпонентный материальный баланс:

$$F_j z_{ij} + L_{j-1} x_{ij-1} + V_{j+1} Y_{ij+1} - (L_j + SL_j) x_{ij} - (V_j + SV_j) y_{ij} = 0. \quad (3)$$

Энергетический баланс:

$$F_j H_{Fj} + Q_j + L_{j-1} h_{j-1} + V_{j+1} H_{j+1} - (L_j + SL_j) h_j - (V_j + SV_j) H_i = 0. \quad (4)$$

Уравнение равновесия:

$$\eta_{ij} K_{ij} x_{ij} (V_j + SV_j) - (V_j + SV_j) y_{ij} + (1 - \eta_{ij}) V_{j+1} y_{ij+1} = 0. \quad (5)$$

Уравнение нормирования концентраций:

$$\sum y_{ij} - 1.0 = 0. \quad (6)$$

В колоннах стабилизации и в колонне отпарки для обеспечения эффективного массообмена предусматривается замена внутренних контактных устройств на высокоэффективные двухпоточные клапанные тарелки. С учетом практического опыта такую эффективность массообмена обеспечивают клапанные тарелки. В секции 200 предусмотрена колонна отпарки кислой воды. В таблице 1 приведены технические характеристики тарелок.

По известным данным характеристик ректификационной колонны мы моделируем ректификационную колонну, а точнее дизайн ректификационной колонны (рисунок 3). Затем в программу Unisim Design вводим значения для точности расчета. Вводимые данные показаны на рисунках 3–5.

Таблица 1. Техническая характеристика клапанных тарелок для колонн

Характеристика	Колонна стабилизации	Отпарная колонна	Колонна отпарки кислой воды
Диаметр колонны, мм	2600	1000	D _{верх} =1200 D _{ниж} =2500
Тип внутренних устройств	двухпоточные клапанные тарелки	однопоточные клапанные тарелки	однопоточные клапанные тарелки
Количество тарелок, шт.	23	8	30
Межтарельчатое расстояние, мм	600	500	500
Перепад давления по массообменной части колонн не превысит, кгс/см ²	0,3	0,2	0,2
Материал внутренних устройств	AISI 304L/AISI 321	AISI 304L/AISI 321	AISI 304L/AISI 321

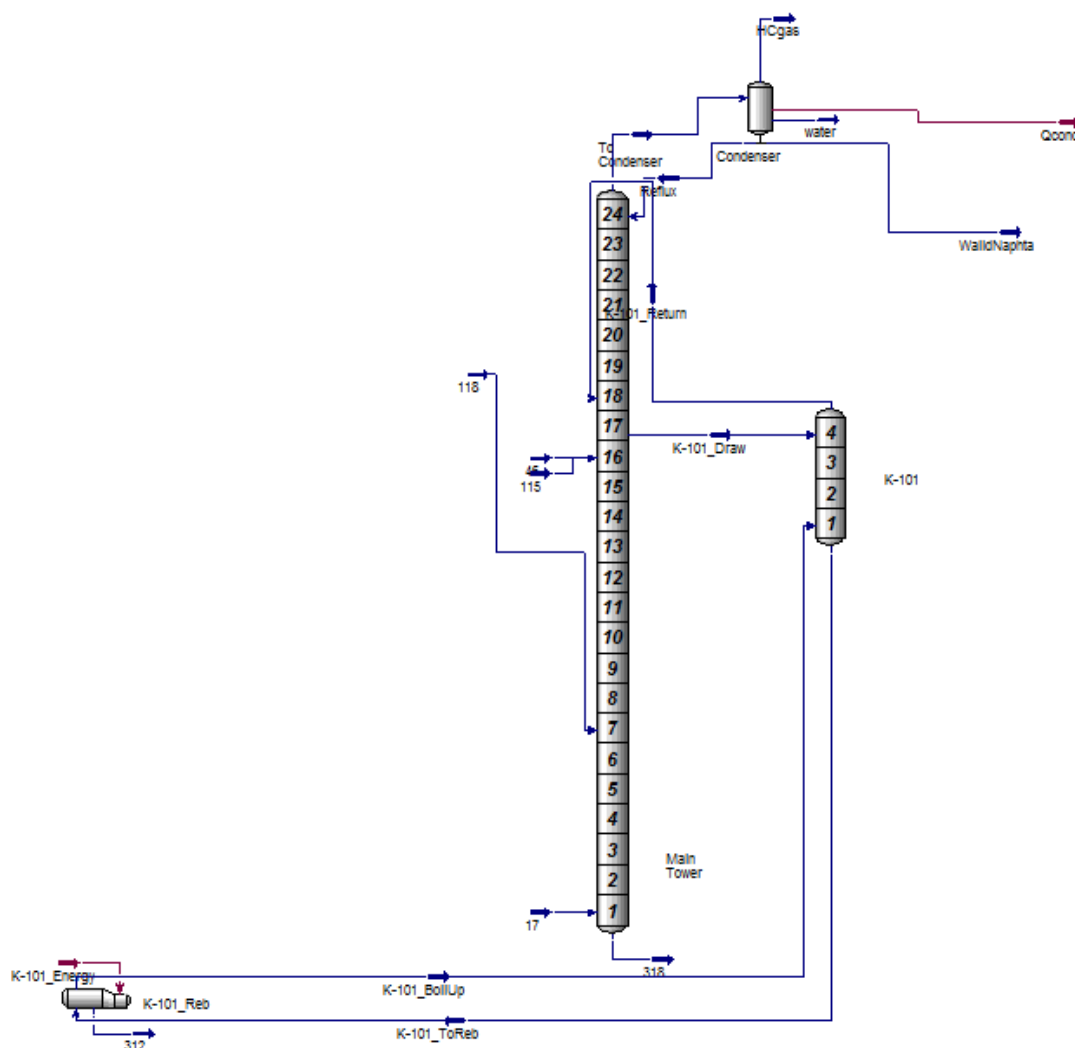


Рисунок 3. Модель ректификационной колонны

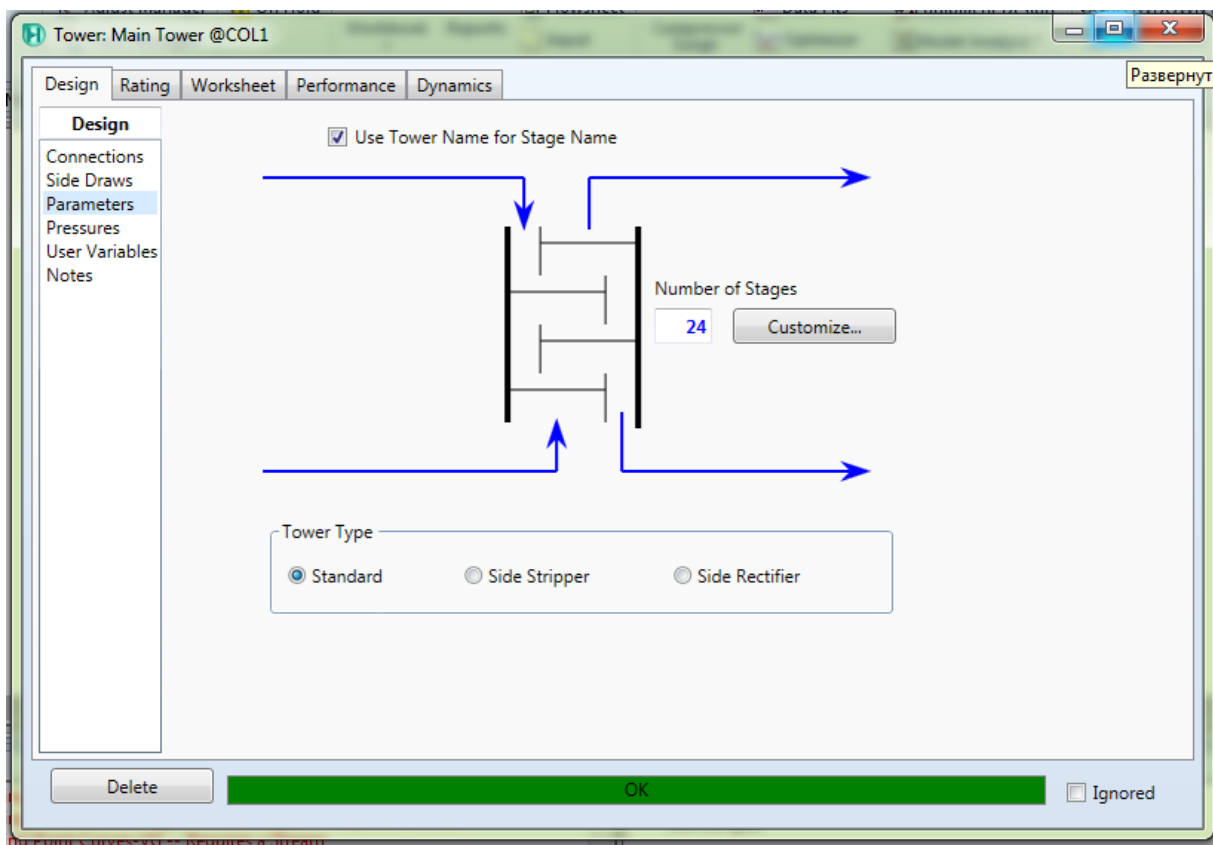


Рисунок 4. Количество тарелок ректификационной колонны

Далее, чтобы рассчитать парожидкостную нагрузку ректификационной колонны, вводим входные параметры нестабильного гидрогенизата и компонентный состав (таблица 2).

Таблица 2. Входные параметры нестабильного гидрогенизата

Показатель	Значение
Производительность по сырью, кг/ч	216 751,0
Температура сырья на входе в колонну, °С	315,0
Температура сверху колонны, °С	123,7
Давление внизу колонны, кгс ² /см	1,5

Модель парожидкостной нагрузки представлена на рисунке 6.

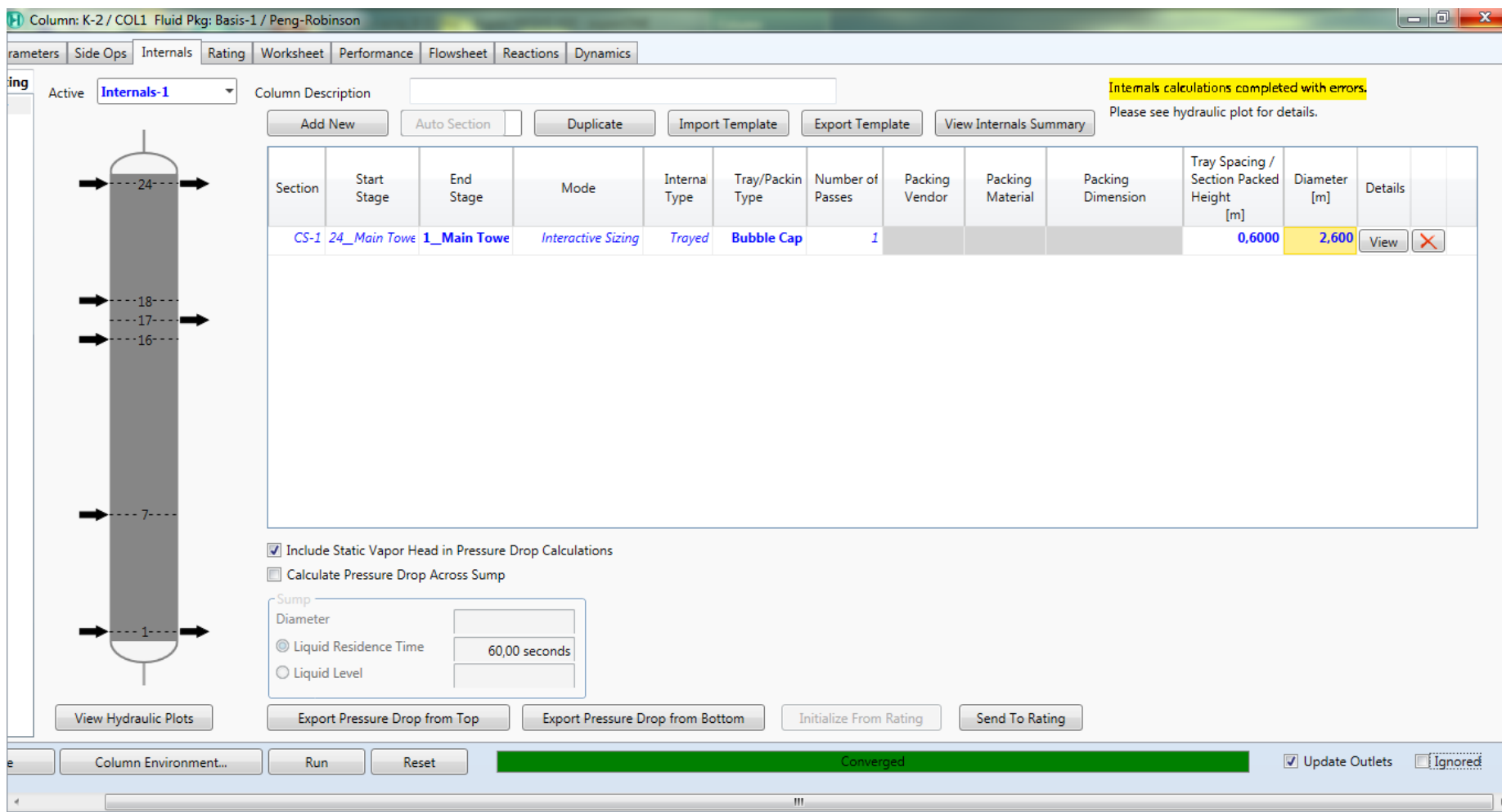


Рисунок 5. Параметры тарелок в ректификационной колонне

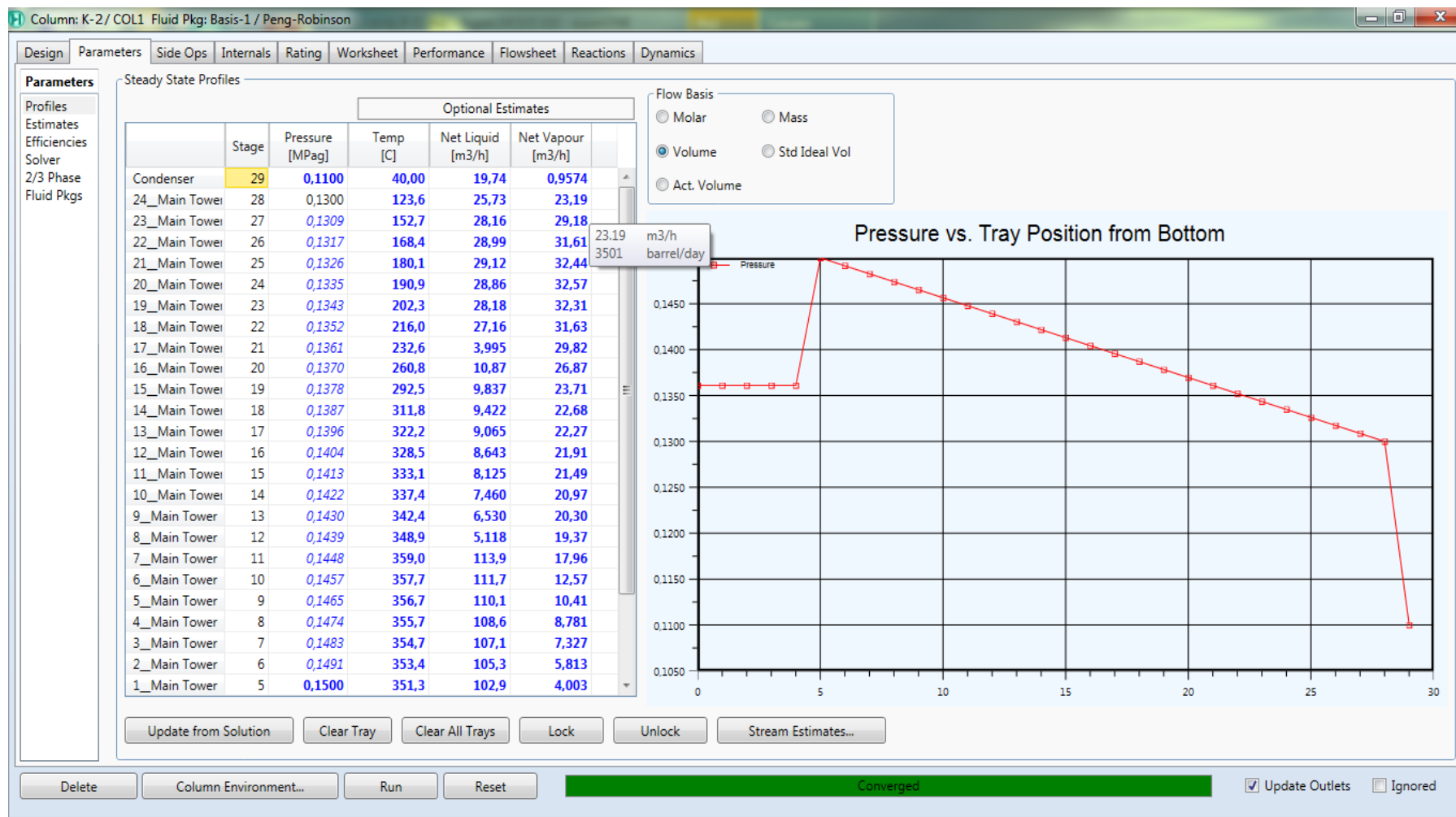


Рисунок 6. Модель парожидкостной нагрузки

Данные рисунка 6 показывают, что при правильным выборе параметров ректификационной колонны происходит увеличение парожидкостной нагрузки, что дает возможность повысить производительность аппарата и выход качественного продукта.

Расчет материального баланса установки после реализации проекта приведен в таблице 3.

Таблица 3. Материальный баланс установки

Наименование сырья, продуктов	Выход, % масс.	Расход тыс. т/год	Количество, кг/ч
<i>Взято</i>			
ВГО	60,22	606,14	72160,00
ВСГ (свежий)	1,27	12,77	1520,53
ОГКВС	39,78	400,33	47657,92
<i>Итого</i>	<i>101,27</i>	<i>1019,24</i>	<i>121338,45</i>
<i>Получено</i>			
Углеводородный газ	0,35	3,53	420,69
Нестабильная нефтя	0,51	5,12	609,71
ДСГКС (Газойль)	9,35	94,14	11207,57
ГО ВГО	89,11	896,87	106770,55
H ₂ S и NH ₃ в составе МДЭА	1,85	18,60	2214,63
Потери	0,10	0,97	115,28
<i>Итого</i>	<i>101,27</i>	<i>1019,23</i>	<i>121338,43</i>

Выводы

Сырьем для данной установки являются тяжелый вакуумный газойль ЭЛОУ-АВТ и остаток газового конденсата высокосернистого сырья.

С целью получения высококачественных продуктов проведена реконструкция установки путем использования более эффективных двухпоточных клапанных тарелок, а также за счет условий гидрогенизационного обессеривания в процессе легкого гидрокрекинга. Увеличение парожидкостной нагрузки, вплоть до значений близких к

критическим значениям, в свою очередь, позволило повысить производительность аппарата.

Целый ряд существенных компонентов (весьма обширный список моделируемых технологических операций и большое количество методов расчета фазового равновесия и свойств), которые входят в программу Unisim Design, делают ее мощным инструментом моделирования стационарных режимов работы технологических схем, что позволяет надежно рассчитывать широкий класс технологических объектов. Не менее важным является и тот факт, что организация взаимодействия «программа – пользователь» позволяет инженеру при проведении расчетов гораздо глубже понять процессы, происходящие в моделируемой схеме.

Список используемых источников

1. Topsøe H., Clausen B.S., Massoth F.E., Hydro Treating Catalysis. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 269 p.
2. Scott C.E., Perez-Zurita M.J., Carbognani L.A., Molero H., Vitale G., Guzman H.J., Pereira-Almao P. Preparation of NiMoS Nanoparticles for Hydrotreating // Catalysis Today. 2015. Vol. 250. P. 21-27. DOI:10.1016/j.cattod.2014.07.033.
3. Wang W., Li L., Wu K., Zhang K., Jie J., Yang Y. Preparation of Ni–Mo–S Catalysts by Hydrothermal Method and Their Hydrodeoxygenation Properties // Applied Catalysis A: General. 2015. Vol. 495. P. 8-16. DOI: 10.1016/j.apcata.2015.01.041.
4. Calderon-Magdaleno M.A., Mendoza-Nieto J.A., Klimova T.E. Effect of the Amount of Citric Acid used in the Preparation of NiMo/SBA-15 Catalysts on Their Performance in HDS of Dibenzothiophene-Type Compounds // Catalysis Today. 2014. Vol. 220-222. P. 78-88. DOI: 10.1016/j.cattod.2013.06.002.

5. Humbert S., Izzet G., Raybaud P. Competitive Adsorption of Nitrogen and Sulphur Compounds on a Multisite Model of NiMoS Catalyst: A Theoretical Study // *Journal of Catalysis*. 2016. Vol. 333. P. 78-93. DOI: 10.1016/j.jcat.2015.10.016.
6. Иванова Л.С., Илалдинов И.З. Проектирование установки гидроочистки дизельного топлива // *Вестник КГТУ*. 2013. № 7. С. 229-231.
7. Бойкова К.И., Гариева Ф.Р. Повышение эффективности установки АГФУ // *Вестник КГТУ*. 2013. № 16. С. 208-209.
8. Шпак О.С., Фаизов А.Р., Чуракова С.К., Кантор Е.А. Математическое моделирование технологического процесса в среде Unisim Design и Aspen Pims // «Интенсификация тепломассообменных процессов»: матер. 3 Всеросс. конф. Казань: КНИГУ, 2012. С 248-352.
9. Горшков В.Г. Тепловые насосы. Аналитический обзор // *Справочник промышленного оборудования*. 2004. № 2. С.47-80.
10. Долгополова В.Л., Кривошеев В.П., Ануфриев А.В. Моделирование установки первичной перегонки нефти в режиме энергосбережения // *Молодой ученый*. 2016. № 24. С. 59-68.

References

1. Topsøe H, Clausen B.S., Massoth F.E., *Hydro Treating Catalysis*. Berlin, Springer-Verlag, 1996. 269 p.
2. Scott C.E., Perez-Zurita M.J., Carbognani L.A., Molero H., Vitale G., Guzman H.J., Pereira-Almao P. Preparation of NiMoS Nanoparticles for Hydrotreating. *Catalysis Today*, 2015, Vol. 250, pp. 21-27. DOI:10.1016/j.cattod.2014.07.033.
3. Wang W., Li L., Wu K., Zhang K., Jie J., Yang Y. Preparation of Ni–Mo–S Catalysts by Hydrothermal Method and Their Hydrodeoxygenation Properties. *Applied Catalysis A: General*, 2015, Vol. 495, pp. 8-16. DOI: 10.1016/j.apcata.2015.01.041.

4. Calderon-Magdaleno M.A., Mendoza-Nieto J.A., Klimova T.E. Effect of the Amount of Citric Acid used in the Preparation of NiMo/SBA-15 Catalysts on Their Performance in HDS of Dibenzothiophene-Type Compounds. *Catalysis Today*, 2014, Vol. 220-222, pp. 78-88. DOI: 10.1016/j.cattod.2013.06.002.
5. Humbert S., Izzet G., Raybaud P. Competitive Adsorption of Nitrogen and Sulphur Compounds on a Multisite Model of NiMoS Catalyst: A Theoretical Study. *Journal of Catalysis*, 2016, Vol. 333, pp. 78-93. DOI: 10.1016/j.jcat.2015.10.016.
6. Ivanova L.S., Ilaldinov I.Z. Proektirovanie ustanovki gidroochistki dizel'nogo topliva [Design of Diesel Fuel Hydrotreating Unit]. *Vestnik KGTU – Herald of Kazan Technological University*, 2013, No. 7, pp. 229-231. [in Russian].
7. Boikova K.I., Garieva F.R. Povyshenie effektivnosti ustanovki AGFU [Improving the Efficiency of Installation of the AGFA]. *Vestnik KGTU – Herald of Kazan Technological University*, 2013, No. 16, pp. 208-209. [in Russian].
8. Shpak O.S., Faizov A.R., Churakova S.K., Kantor E.A. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa v srede Unisim Design i Aspen Pims [Mathematical Modeling of the Process in an Environment Unisim Design and Aspen Pims]. *Materialy 3 Vserossiiskoi konferentsii «Intensifikatsiya teplomassoobmennykh protsessov»* [Materials of the 3rd All-Russian Conference «The Intensification of Heat and Mass Transfer Processes»]. Kazan, KNIGU Publ., 2012. pp. 248-352. [in Russian].
9. Gorshkov V.G. Teplovye nasosy. Analiticheskii obzor [Heat Pump. Analytical Review]. *Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya – Directory of Industrial Equipment*, 2004, No. 2, pp.47-80. [in Russian].
10. Dolgopolova V.L., Krivosheev V.P., Anufriev A.V. Modelirovanie ustanovki pervichnoi peregonki nefti v rezhime energosberezheniya [Simulation of Primary Oil Distillation Unit in Energy Saving Mode]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2016, No. 24, pp. 59-68. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Дашкина Алина Рафаиловна, студент кафедры «Технология нефти и газа», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Alina R. Dashkina, Student of Technology of Oil and Gas Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: dashkina_alinochka@mail.ru

Нигматуллин Виль Ришатович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Комплексный инжиниринг и компьютерная графика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Vil R. Nigmatullin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of Integrated Engineering and Computer Graphics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: Wr_n@mail.ru

Максютов Виль Аглямович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Комплексный инжиниринг и компьютерная графика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Vil A. Maksyutov, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Integrated Engineering and Computer Graphics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: maksyutovvil@yandex.ru