

**Казанский Федеральный Университет**  
**Кафедра высоковязких нефтей и природных битумов**  
**Kazan Federal University,**  
**Department of high-viscosity oils and natural bitumen**  
**Анализ процесса каталитической изомеризации пентан-гексановой**  
**фракции бензинов**  
**Analysis of the process of catalytic isomerization of the pentane-hexane fraction**  
**of gasoline**

Ахметзянов Рустам Русланович, Akhmetzyanov Rustam Ruslanovich <sup>a</sup>

Валиев Динар Зиннурович, Valiev Dinar Zinnurovich <sup>b</sup>

Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich <sup>c</sup>

Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich <sup>d</sup>,

магистрант группы 03-018 <sup>a</sup>

старший преподаватель <sup>b</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры высоковязких нефтей и природных битумов,

Член Экспертного совета РГО, и.о. руководителя группы «Водородная и альтернативная энергетика» <sup>c</sup>

доктор технических наук, профессор кафедры высоковязких нефтей и природных битумов<sup>d</sup>

Казань, Россия

E-mail: ra315281@gmail.com <sup>a</sup>, valievdz@bk.ru <sup>b</sup>, kemalov@mail.ru <sup>c</sup>, alim.kemalov@mail.ru <sup>d</sup>,

**Аннотация:** Статья посвящена комплексному исследованию процесса каталитической изомеризации пентан-гексановой фракции бензинов. Были рассмотрены теоретические основы процесса изомеризации, технологические схемы с рециклом и без рецикла. Продуктом каталитической изомеризации является катализат с высоким октановым числом и высокой испаряемостью, что подтверждает исключительную важность установки изомеризации. Целью статьи являлось проектирование установки каталитической изомеризации. С этой целью были выполнены расчеты материального баланса установки и отдельных блоков, тепловой баланс реактора, конструктивный расчет и гидравлический расчет реактора по методике, приведенной в учебно-методическом пособии «Каталитическая изомеризация легких парафиновых

углеводородов и легких бензиновых фракций» авторов: Пильщиков В.А. и др. Используемая методика показала свою эффективность, по окончании расчетов были получены адекватные результаты, которые могут быть применены на реально действующем предприятии. Кроме того, использованная методика может быть применена при расчетах других каталитических процессов с реакторами со стационарным слоем катализатора.

**Ключевые слова:** Каталитическая изомеризация, октановое число, проектирование, анализ, расчет.

**Abstract:** The article is devoted to a comprehensive study of the process of catalytic isomerization of the pentane-hexane fraction of gasolines. The theoretical foundations of the isomerization process, technological schemes with and without recycle were considered in the article. The product of catalytic isomerization is a catalysis with a high octane number and high volatility, which confirms the exceptional importance of an isomerization unit. The aim of the article was to design a catalytic isomerization unit. For this purpose, the calculations of the material balance of the unit and individual blocks, the thermal balance of the reactor, the constructive calculation and hydraulic calculation of the reactor were carried out according to the methodology given in the training manual "Catalytic isomerization of light paraffinic hydrocarbons and light gasoline fractions" by the authors: Pil'shchikov V.A. et al. The used methodology has shown its effectiveness; adequate results were obtained at the end of the calculations, which can be applied at a really operating enterprise. In addition, the technique used can be applied in the calculations of other catalytic processes with reactors with a fixed catalyst bed.

**Keywords:** Catalytic isomerization, octane number, design, analysis, calculation.

### **Введение (Introduction)**

Ранние промышленные процессы изомеризации были предназначены для получения изобутана из н-бутана на хлористом алюминии при мягком температурном режиме (90–120 °С). Изобутан далее алкилировали бутиленами

и в результате получали изооктан [1].

Целевым назначением процессов каталитической изомеризации в современной нефтепереработке является получение высокооктановых изокомпонентов автобензинов путем структурного изменения углеродного скелета или сырья нефтехимии, прежде всего изопентана для синтеза изопренового каучука.

Высокая эффективность процессов изомеризации заключается в том, что в качестве сырья используются низкооктановые компоненты нефти - фракции н.к. - 62 °С и рафинаты каталитического риформинга, содержащие в основном н-пентаны и н-гексаны. На сегодняшний день изомеризация возможна только легких алканов бутана, пентана и гексана. Это фракция нефти с пределами выкипания 28 - 70 °С называется легкая нефть, петролейный эфир, газовый бензин. Проводятся серьезные исследования возможности изомеризации более тяжелых алканов [2].

Это сырье (а также фракции C<sub>5</sub> и C<sub>6</sub>, получаемые с ГФУ) изомеризуется в среде водорода в присутствии бифункциональных катализаторов. Высокие детонационная стойкость и испаряемость продуктов (табл.1) изомеризации углеводородов C<sub>5</sub> и C<sub>6</sub> обуславливают их исключительную ценность в качестве низкокипящих высокооктановых компонентов неэтилированных автобензинов.

Таблица 1

#### Октановые числа некоторых алканов

Алкан	Октановое число И.М.
Нормальный пентан	61,8
Изопентан	93
Нормальный гексан	24,8
2,2 - диметилбутан	91,8

Реакции изомеризации парафинов являются обратимыми, протекают без изменения объема, с небольшим экзотермическим эффектом (6-8 кДж/моль). Поэтому термодинамическое равновесие зависит только от температуры: низкие температуры благоприятствуют образованию более разветвленных изомеров и получению, следовательно, изомеризата с более высокими октановыми числами. При этом равновесное содержание изомеров при данной

температуре повышается с увеличением числа атомов углерода в молекуле n-парафина [3].

На бифункциональных катализаторах, обладающих дегидрогидрирующей и кислотной активностями, изомеризация протекает по следующей схеме:



Вначале происходит дегидрирование n-парафина на металлических центрах катализатора. Образовавшийся олефин на кислотном центре превращается в карбений-ион, который легко изомеризуется. Изомерные карбений-ионы, возвращая протон кислотному центру катализатора, превращаются в соответствующие олефины, которые затем гидрируются на металлических центрах катализаторов изомеризации.

Активные центры как металлические, так и кислотные в отсутствие водорода быстро отравляются в результате закоксовывания катализатора. Для подавления побочных реакций крекинга процесс проводится под повышенным давлением при циркуляции водородсодержащего газа.

В современных бифункциональных катализаторах изомеризации n-алканов в качестве металлического компонента используются платина и палладий, а в качестве носителя - фторированный или хлорированный оксид алюминия, а также алюмосиликаты или цеолиты, внесенные в матрицу оксида алюминия. Алюмоплатиновые фторированные катализаторы (как отечественные ИП-62 с содержанием 0,5 % Pt) позволяют осуществить процесс изомеризации при 360 - 420 °С и называются высокотемпературными. Цеолитные катализаторы (как отечественный ИЦК-2, содержащий 0,8 % Pt на цеолите CaY) используются при 230 - 380 °С (в зависимости от типа цеолита) и названы среднетемпературными. Алюмоплатиновые катализаторы, промотированные хлором (такие, как НИП-66 и НИП-74) применяют при 100 - 200 °С и названы низкотемпературными. Используемый ранее в качестве катализатора хлорид алюминия в настоящее время не применяется [4].

Наибольшее распространение в нефтепереработке получили низко- и высокотемпературные процессы изомеризации n-парафинов C<sub>4</sub> - C<sub>6</sub> на основе

алюмоплатиновых катализаторов, промотированных хлором или фтором [5].

В состав установки каталитической изомеризации входят два основных блока - блок предварительной гидроочистки сырья и блок изомеризации (рис.1):



Рисунок 1 - Состав установки каталитической изомеризации

В нефтеперерабатывающей промышленности реализовано две технологические схемы изомеризации алканов: 1. Однопроходная 2. С рециклом и фракционированием исходного сырья.

1. Базовым вариантом технологии блока изомеризации является схема «за проход» (рис.2), принципиальное построение технологической схемы в этом варианте идентично построению технологической схемы установки гидроочистки бензинов в составе реакторного узла, узла сепарации ВСГ и стабилизации изомеризата.

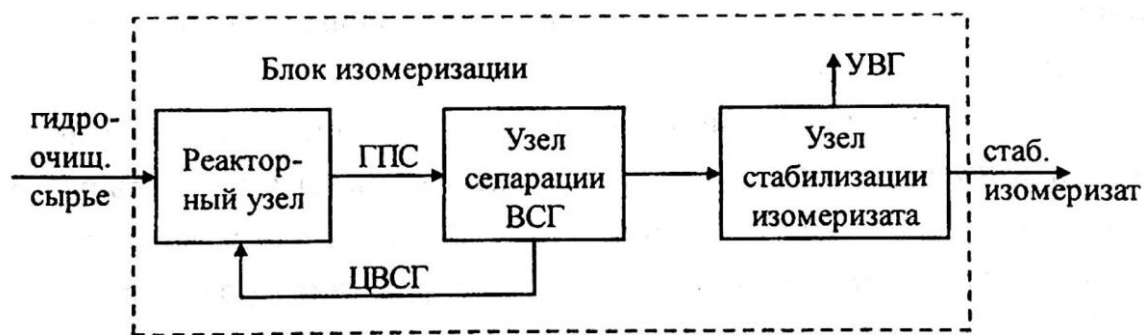


Рисунок 2 - Блок - схема процесса «за проход»

*Однопроходная изомеризация* позволяет повысить октановое число И.М. фракции с 70 до 83 пунктов. Смесь углеводородов до и после однопроходной изомеризации представлена в табл.2 [6].

## Смесь углеводородов до и после однопроходной изомеризации

Компоненты (% об.) и ИОЧ смеси	Сырье	Продукт
Изопентан	10,3	26,9
Нормальный пентан	24,8	8,4
Изогексан	23,2	47,8
Нормальный гексан	25,6	5,7
Циклические у/в	5,6	11,2
Бензол	10,5	0
<b>Октановое число И.М</b>	69	83

2. С целью повышения эффективности процесса базовый вариант технологии блока изомеризации дополняют узлами фракционирования исходного сырья и изомеризата для увеличения концентрации линейных парафиновых углеводородов в сырье реакторного узла и организации их рецикла, соответственно, с целью наиболее полной конверсии в изомеры.

Базовый вариант с предварительным выделением ректификацией изо-пентана из исходного сырья приведен на рисунке 3.

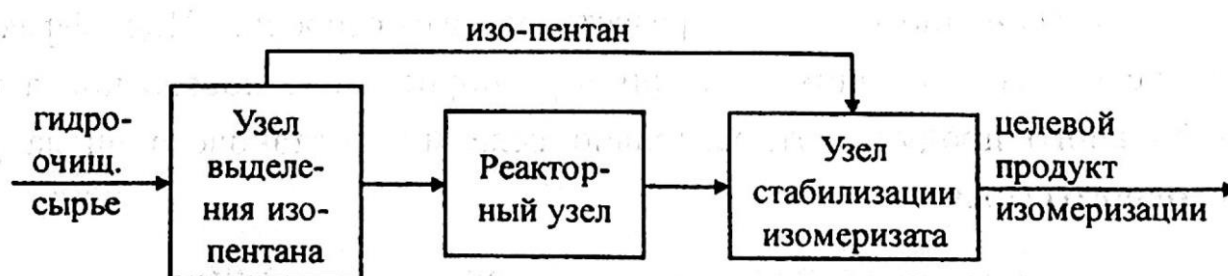


Рисунок 3 - Блок-схема процесса с деизопентанизацией сырья

Вариант с рециклом *n*-пентана при его выделении ректификацией из стабильного изомеризата представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 - Блок-схема процесса с рециклом *n*-пентана и деизопентанизацией сырья

Вариант с рециклом *n*-гексана (либо в смеси с метил-пентанами) при его выделении ректификацией из стабильного изомеризата представлен на рисунке 5.

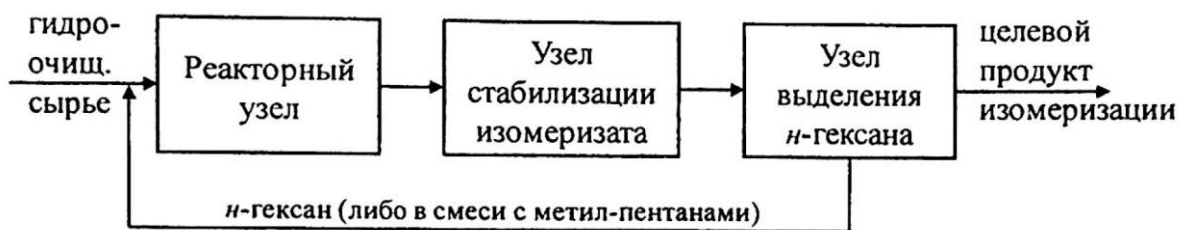


Рисунок 5 - Блок-схема процесса с рециклом *n*-гексана

Вариант с рециклом *n*-пентана и *n*-гексана (в смеси с метил-пентанами) при их последовательном выделении ректификацией из стабильного изомеризата представлен на рисунке 6.



Рисунок 6 - Блок-схема процесса в рециклом *n*-пентана и *n*-гексана

Вариант с выделением *n*-пентана и *n*-гексана методом адсорбции из сырья и стабильного изомеризата представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 - Блок-схема процесса с выделением *n*-пентана и *n*-гексана методом адсорбции из сырья

Поскольку изомеризаты являются ценнейшими компонентами товарных бензинов, обеспечивающими высокие экологические и теплотворные характеристики, хорошие пусковые свойства и высокое октановое число, то

установка изомеризации является важнейшей установкой на НПЗ, практически ни одно НПЗ не обходится без установки изомеризации. Каталитическая изомеризация уникальный процесс, не имеющий аналогов, так как продукты переработки фракции нк-62 °С на установках каталитического риформинга, цеоформинга уступают по качеству установок каталитической изомеризации.

В связи с высокой важностью процесса каталитической изомеризации уделяется большое внимание проектированию установки каталитической изомеризации.

Целью исследования является проектирование установки каталитической изомеризации. С этой целью необходимо провести расчет материального и теплового баланса, конструктивный расчет реактора, гидравлический расчет реактора.

### **Материалы и методы исследования (Materials and Methods)**

Работа выполнена в соответствии со стандартными методами теоретических, а также со стандартными и разработанными методиками проведения расчетов процесса производства водорода. Обработка данных проводилась с помощью методов математической статистики использованием компьютерных программ MathCAD и Excel.

Технологический расчет оборудования рассчитывался по методике, приведенной в учебно-методическом пособии «Каталитическая изомеризация легких парафиновых углеводородов и легких бензиновых фракций» авторов: Пильщиков В.А. и др [8].

1. Проектирование начинается с формирования группы исходных данных для разработки. Таковыми являются:

- производительность установки по сырью или целевой продукции;
- качество сырья;
- требования к качеству и характеристики качества целевой продукции;
- характеристика побочных продуктов;
- характеристика катализаторов.

2. Выполняются расчеты материальных балансов сначала отдельных



узлов и блоков, а затем всей установки по технологии «за проход». Это основа всех последующих расчетов технологического оборудования. Материальные балансы узлов и блоков рассчитываются (составляются) с использованием допущений о селективности процесса, конверсии сырья, степени отбора компонентов при разделении продуктов и т.д., материальный баланс установки составляется по итогам расчетов балансов узлов и блоков с учетом потерь, возникающих при эксплуатации установки в промышленных условиях [7].

3. Выполняется технологический расчет реактора с целью определения размеров реакционной зоны и гидравлического сопротивления слоя катализатора, при составлении теплового баланса реактора определяют температуру реакционной смеси на выходе из аппарата. По результатам расчетов устанавливается количество и конструктивные особенности реакторов.

### Результаты (Results)

Исходные данные расчетов:

Производительность блока изомеризации по сырью – 65000 кг/ч

Катализатор платиноцеолитный СИ-1

Температура на входе в реактора – 250 °С

Давление в реакторе – 2 МПа

Объемная скорость подачи сырья – 1,5 ч<sup>-1</sup>

Мольное соотношение «водород:сырье» = 3:1

Плотность сырья – 650 кг/м<sup>3</sup>

Молекулярная масса сырья – 80 кмоль/кг

Компонентный состав сырья представлен в таблице 3.

Таблица 3

#### Компонентный состав гидроочищенной фракции нк- 70 °С

№ п/п	Компоненты	Содержание, %мас.
1	изобутан	0,02
2	н-бутан	1,07
3	изо-пентан	21,69
4	н-пентан	31,42
5	циклопентан	3,76

6	2,2-диметилбутан	0,39
7	2,3-диметилбутан	2,63
8	2-метилпентан	13,29
9	3-метилпентан	8,53
10	н-гексан	11,34
11	метилциклопентан	3,73
12	бензол	1,42
13	циклогексан	0,62
14	2,2-диметилпентан	0,00
15	2,3-диметилпентан	0,02
16	2-метилгексан	0,02
17	3-метилгексан	0,03
18	н-гептан	0,01
19	2,2,3-триметилбутан	0,00
20	3,3-диметилпентан	0,01
	итого	100,00

Состав продуктов изомеризации «за проход» принимаем по литературным данным (табл.4).

Таблица 4

#### Состав нестабильного изомеризата

Компонент	%мас.
C <sub>1</sub> -C <sub>4</sub>	2.00
изо-пентан	29.58
н-пентан	17.40
циклопентан	2.50
2,2-диметилбутан	7.91
2,3-диметилбутан	3.92
2-метилпентан	11.96
3-метилпентан	9.67
н-гексан	6.54
метилциклопентан	7.19
бензол	-
циклогексан	1.33
C <sub>7</sub>	-
<b>Итого:</b>	<b>100.00</b>

### Расчет материального баланса

По данным о составе продуктов были рассчитаны отношения ( $K_i$ ) массовых концентраций изомеров и углеводорода нормального строения для каждой группы алканов  $C_5$  и  $C_6$  (глубина изомеризации).

Количество и состав продуктов изомеризации рассчитывались, исходя из суммарного содержания в сырье и в продуктах углеводородов каждой группы и значений констант (глубины изомеризации), с учетом селективности (вклада побочных реакций). Состав и расход продуктов изомеризации представлен в таблице 5.

Таблица 5

#### Состав и расход продуктов изомеризации

№ п/п	Компоненты	Содержание, %мас.	Расход, кг/ч
1	метан	0,04	23,4
2	этан	0,04	23,4
3	пропан	0,64	417,3
4	изо-бутан	1,09	709,8
5	н-бутан	1,28	834,6
6	изо-пентан	33,44	21735,76
7	н-пентан	19,67	12785,74
8	циклопентан	3,76	2444
8	2,2 - диметилбутан	10,25	6660,37
9	2,3 - диметилбутан	8,28	5385,1
10	2 - метилпентан	6,78	4404,98
11	3 - метилпентан	3,36	2183
12	н-гексан	5,6	3642,04
13	метилциклопентан	4,87	3165,03
14	бензол	0	0
15	циклопентан	0,9	585,47
16	$C_7>$	0	0
Итого		100	65000

Для расчета баланса работы колонны стабилизации были приняты допущения по доле отбора компонентов сырья колонны в дистиллят. Материальный баланс колонны стабилизации приведен в табл.6. В результате расчета были получены расход и состав целевого продукта установки (без учета ВСТ).

**Материальный баланс колонны стабилизации**

Компоненты	Нестабильный катализат		Отбор в дистилят	Дистилят		Стабильный катализат	
	% мас.	кг/час		%мас.	кг/час	%мас.	кг/час
метан	0,04	23,4	1,0	0,99	23,4	0	0
этан	0,04	23,4	1,0	0,99	23,4	0	0
пропан	0,64	417,3	1,0	17,61	417,3	0	0
изобутан	1,09	709,8	0,8	23,97	567,84	0,23	141,96
н-бутан	1,28	834,6	0,3	10,57	250,38	0,93	584,22
изо-пентан	33,44	21735,76	0,05	45,87	1086,79	32,97	20648,97
н-пентан	19,67	12785,74	0,0	0	0	20,41	12785,74
циклопентан	3,76	2444	0,0	0	0	3,9	2444
2,2-диметилбутан	10,25	6660,37	0,0	0	0	10,63	6660,37
2,3-диметилбутан	8,28	5385,1	0,0	0	0	8,6	5385,1
2-метилпентан	6,78	4404,98	0,0	0	0	7,03	4404,98
3-метилпентан	3,36	2183	0,0	0	0	3,49	2183
н-гексан	5,6	3642,04	0,0	0	0	5,82	3642,04
метилциклопентан	4,87	3165,03	0,0	0	0	5,05	3165,03
бензол	0	0	0,0	0	0	0	0
Циклогексан	0,9	585,47	0,0	0	0	0,93	585,47
	0	0	0,0	0	0	0	0
Итого:	100	65000		100,00	2369,11	100,00	62630,89

После расчетов материальных потоков компонентов сырья и продуктов его превращения были выполнены расчеты расходов СВСГ и ЦВСГ, вводимых в реакторы вместе с сырьем. Расход СВСГ при массовой концентрации водорода 29,8% составляет 545,3 кг/ч. Расход ЦВСГ при массовой концентрации водорода 27,2% составляет 17922,79 кг/ч.

По завершении расчетов были составлены материальные балансы реакторного узла с учетом СВСГ и ЦВСГ, пересчитывался материальный баланс колонны стабилизации с учетом СВСГ, затем составлялись материальный баланс блока изомеризации и установки с учетом потерь.

Материальный баланс реакторного узла с учетом СВСГ приведен в табл.

### Материальный баланс реакторного узла с учетом СВСГ

Компоненты	СВСГ		Гидроочищенная фракция нк – 70 °С		Нестабильный изомеризат	
	% мас.	кг/час	%мас.	кг/час	%мас.	кг/час
водород	29,8	162,5	0	0	0,16	102,5
метан	27,9	152,14	0	0	0,27	175,54
этан	22,5	122,69	0	0	0,22	146,09
пропан	15,7	85,61	0	0	0,79	518,91
изобутан	1,0	5,45	0,02	13	1,12	737,25
н-бутан	3,1	16,9	1,07	695,5	1,33	873,5
изо-пентан	0	0	21,69	14098,5	33,16	21735,76
н-пентан	0	0	31,42	20423	19,51	12785,74
циклопентан	0	0	3,76	2444	3,73	2444
2,2-диметилбутан	0	0	0,39	253,5	10,16	6660,37
2,3-диметилбутан	0	0	2,63	1709,5	8,22	5385,1
2-метилпентан	0	0	13,29	8638,5	6,72	4404,98
3-метилпентан	0	0	8,53	5544,5	3,33	2183
н-гексан	0	0	11,34	7371	5,56	3642,04
метилциклопентан	0	0	3,73	2424,5	4,82	3165,03
бензол	0	0	1,42	923	0	0
Циклогексан	0	0	0,62	403	0,89	585,47
C <sub>7</sub> >	0	0	0,09	58,5	0	0
Итого	100	545,3	100	65000	100	65545,3

Материальный баланс колонны стабилизации с учетом СВСГ приведен в табл. 8

Таблица 8

### Материальный баланс колонны стабилизации нестабильного изомеризата (с учетом ВСГ)

Компоненты	Нестабильный катализат		Отбор в дистиллят	Газы стабилизации		Стабильный изомеризат	
	% мас.	кг/час		%мас.	кг/час	%мас.	кг/час
водород	0,16	102,5	1,0	3,56	102,5	0	0
метан	0,27	175,54	1,0	6,09	175,54	0	0
этан	0,22	146,09	1,0	5,07	146,09	0	0
пропан	0,79	518,91	1	18,01	518,91	0	0

изобутан	1,12	737,25	0,8	20,47	589,8	0,24	147,45
н-бутан	1,33	873,5	0,3	9,09	262,05	0,98	611,45
изо-пентан	33,16	21735,76	0,05	37,71	1086,79	32,95	20648,97
н-пентан	19,51	12785,74	0,0	0	0	20,4	12785,74
циклопентан	3,73	2444	0,0	0	0	3,9	2444
2,2-диметилбутан	10,16	6660,37	0,0	0	0	8,59	6660,37
2,3-диметилбутан	8,22	5385,1	0,0	0	0	7,03	5385,1
2-метилпентан	6,72	4404,98	0,0	0	0	3,48	4404,98
3-метилпентан	3,33	2183	0,0	0	0	5,81	2183
н-гексан	5,56	3642,04	0,0	0	0	5,05	3642,04
метилциклопентан	4,83	3165,03	0,0	0	0	0	3165,03
бензол	0	0	0,0	0	0	0,93	0
Циклогексан	0,89	585,47	0,0	0	0	0	585,47
C7>	0	0	0	0	0	0	0
Итого:	100	65545,3		100	2881,69	100	62663,62

Материальный баланс блока изомеризации приведен в табл. 9

Таблица 9

### Материальный баланс блока изомеризации

Статьи баланса	кг/ч	% мас.
Приход:		
Гидрогенизат	65000	100
СВСГ	545,3	0,84
- в т.ч. водород	162,5	0,25
Итого	65545,3	100,84
Расход:		
Стабильный изомеризат	62663,62	96,41
Газы стабилизации	2881,69	4,43
Итого	65545,3	100,84

Материальный баланс реактора с учетом ЦВСГ приведен в табл. 10. Этот баланс необходим при технологических расчетах реактора: теплового баланса и гидравлического сопротивления реактора.

Таблица 10

### Материальный баланс реактора изомеризации

Статьи баланса	кг/ч	% мас.
Приход:		
Гидрогенизат	65000	100
СВСГ	545,3	0,84
ЦВСГ	17922,79	27,57
Итого	83466,09	128,41

Расход:		
Стабильный изомеризат	62663,62	96,42
Газы стабилизации	2881,69	4,43
ЦВСГ	17922,79	27,57
Итого	83466,09	128,41

При составлении *баланса установки* учитывался дополнительно расход СВСГ и выход газов стабилизации в блоке гидроочистки. Расход сырья на гидроочистку составляет 65656,57 кг/ч. Расход газов стабилизации на блоке ГО складывался из расхода углеводородных компонентов СВСГ и газов гидрокрекинга. Принят количество потерь 0,4% от массы исходного сырья. Материальный баланс установки изомеризации приведен в табл. 11

Таблица 11

### Материальный баланс установки изомеризации

Статьи баланса	кг/ч	% мас.
Приход:		
Сырье	65656,57	100
СВСГ	985,95	1,5
- в т.ч. водород	293,81	0,45
Итого	66642,52	101,5
Расход:		
Стабильный изомеризат	62401	95,04
Газы стабилизации	3978,9	6,06
Потери	262,63	0,4
	66642,52	101,5

Расчеты показали, что прирост октанового числа (ИМ) в процессе составил 7.4 пункта (10,3%).

#### *Расчет теплового баланса*

Обязательным условием работы аппарата является равенство количеств тепла на входе и на выходе из реактора, т.е. условие теплового баланса [8]:

$$Q_{\text{приход}} = Q_{\text{расход}}$$

Кроме аккумулированного сырьем тепла, в реакционную зону «приходит» теплота экзотермических реакций изомеризации. Количество этой теплоты определял с использованием закона Гесса на основе состава сырья и продуктов реакции при температуре процесса. Расчет теплоты изомеризации приведен в таблице 12.

Таблица 12

## Расчет теплоты процесса изомеризации

Компонент	М	$\Delta fH^\circ$ (газ)			Вход сырья		Вход СВСГ		Выход	
		ккал/моль	кДж/моль	кДж/кг	G, кг/ч	Q, кДж/ч	G, кг/ч	Q, кДж/ч	G, кг/ч	Q, кДж/ч
водород	2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	162,50	0,00	102,50	0,00
метан	16	-17,89	-74,80	-4680,00	0,00	0,00	152,14	-712011,74	175,54	-821523,74
этан	30	-20,24	-84,63	-2820,85	0,00	0,00	122,69	-346098,27	146,09	-412106,13
пропан	44	-24,82	-103,77	-2358,52	0,00	0,00	85,61	-201918,64	518,91	-1223865,57
изо-бутан	58	-32,15	-134,42	-2317,63	13,00	-30129,15	5,45	-12638,07	737,25	-1708677,49
н-бутан	58	-30,15	-126,06	-2173,45	695,50	-1511635,25	16,90	-36740,81	873,50	-1898519,04
изо-пентан	72	-36,92	-154,37	-2143,98	14098,50	-30226833,89			21735,76	-46600928,08
н-пентан	72	-35,00	-146,34	-2032,48	20423,00	-41509322,02			12785,74	-25986751,69
циклопентан	70	-18,46	-77,18	-1102,62	2444,00	-2694793,02			2444,00	-2694793,02
2,2-диметилбутан	86	-44,35	-185,43	-2156,18	253,50	-546592,53			6660,37	-14360989,91
2,3-диметилбутан	86	-42,49	-177,65	-2065,76	1709,50	-3531408,35			5385,10	-11124302,20
2-метилпентан	86	-41,66	-174,18	-2025,40	8638,50	-17496440,60			4404,98	-8921858,32
3-метилпентан	86	-41,02	-171,51	-1994,29	5544,50	-11057326,85			2183,00	-4353527,54
н-гексан	86	-39,96	-167,08	-1942,75	7371,00	-14320032,19			3642,04	-7075592,31
метилциклопентан	84	-25,50	-106,62	-1269,26	2424,50	-3077326,93			3165,03	-4017259,76
бензол	78	19,82	82,87	1062,43	923,00	980621,26			0,00	0,00
циклогексан	84	-29,43	-123,05	-1464,88	403,00	-590345,93			585,47	-857635,49
C7 >	72	-46,00	-192,33	-2671,26	58,50	-156268,61			0,00	0,00
Итого:					65000,00	125767834,07	545,30	1309407,52	65545,30	132058330,30



Температура на выходе из реактора составила 270,5 °С, что на 20,5 °С выше исходного сырья. В случаях прироста температуры больше, чем на 25°С рекомендуется охладить реакционную смесь по ходу ее движения в слое катализатора.

#### *Расчёт реакторного блока*

Конструктивные характеристики реактора в результате расчета составили:

Диаметр – 3 м. при линейной скорости движения паров 0,35 м/с

Сечение колонны составляет 7,07 м<sup>2</sup>

Высота катализатора в реакторе составляет 9,43 м.

Объем катализатора в реакторе – 66,67 м<sup>3</sup>

Высота цилиндрической части реактора – 14,15 м.

Общая высота ректора – 17,2.

#### *Гидравлический расчет реактора*

Характеристика используемого катализатора:

- насыпная плотность – 700 кг/м<sup>3</sup>;
- кажущаяся плотность – 1250 кг/м<sup>3</sup>;
- средний диаметр частиц –  $1,75 \cdot 10^{-3}$  м

Гидравлическое сопротивление от слоя используемого катализатора составляет 0,154 МПа, потеря напора катализатора не превышает предельно допустимых значений 0,2–0,3 МПа.

#### **Обсуждение (Discussion)**

Данные показывают, что методика проектирования установки каталитической изомеризации является правильной, поскольку данные по материальному балансу, тепловому балансу, размеру реактора и гидравлическому расчету реактора согласуются с реально действующими установками каталитической изомеризации, поэтому эта методика может использоваться для расчета важного процесса в нефтепереработке. Кроме того, методика может быть использована и для расчета реакторов со

стационарным слоем катализатора, например, таких процессов как каталитический риформинг, гидроочистка. Расчет материального баланса установки каталитической изомеризации с рециклом непревращенных алканов имеет свою специфику, поэтому данная методика не может применяться для технологических схем с рециклом, но на тепловой баланс, конструктивный расчет и гидравлический расчет реактора это не влияет. Использование другого типа катализатора влияет на температуру осуществления изомеризации, так же изменяется глубина и селективность процесса изомеризации, вследствие этого изменяется материальный баланс установки, тепловой баланс, конструктивные параметры реактора и гидравлическое сопротивление в реакторе.

### **Заключение (Conclusions)**

В работе проанализировано современное состояние процесса каталитической изомеризации: теоретические основы, технологические схемы. Была достигнута цель исследования – спроектирована установка каталитической изомеризации. Был рассчитан материальный баланс установки и отдельных блоков установки, рассчитан тепловой баланс, конструктивный расчет реактора, гидравлический расчет реактора. Результаты расчета оказались адекватными, применяемая методика показала свою эффективность и может применяться для проектирования не только каталитической изомеризации, но и других процессов нефтепереработки с реакторами со стационарным слоем катализатора.

## Список литературы (References)

1. Ахметов С.А. Технология глубокой переработки нефти и газа: Учебное пособие для вузов. Уфа: Гилем, 2002. 672 С.
2. Клим О.В. Приборы и методы контроля качества продукции на предприятиях ТЭК, нефтехимической и пищевой промышленности. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 81 с.
4. Технологический регламент установки изомеризации легкой нефти. URL: <https://cyberpedia.su/17x2431.html> (дата обращения 10.11.21)
5. Изомеризация. URL: <https://studfile.net/preview/2186392/> (дата обращения 10.12.21)
6. Химия и технология вторичных процессов переработки нефти. URL: [https://ozlib.com/926351/himiya/himiya\\_i\\_tehnologiya\\_vtorichnyh\\_protssesov\\_pererabotki\\_nefti](https://ozlib.com/926351/himiya/himiya_i_tehnologiya_vtorichnyh_protssesov_pererabotki_nefti) (дата обращения 10.12.21)
7. Изомеризация. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Изомеризация> (дата обращения 10.12.21)
8. В.Л. Пильщиков, Ал.А. Пимерзин, А.А. Пимерзин. Каталитическая изомеризация легких парафиновых углеводородов и легких бензиновых фракций: учеб. -метод. пособие - Самара: Самар, гос. техн. ун-т, 2016. - 55 с.