

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОИЗВОДСТВА МЕТИЛ-ТРЕТ-БУТИЛОВОГО ЭФИРА

Ю.О. Мампоря, студент

Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета
(Россия, г. Муром)

DOI:10.24412/2500-1000-2026-3-2-58-64

Аннотация. В работе представлен расчет материального баланса производства метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) мощностью 90000 тонн в год. Процесс основан на реакции каталитического взаимодействия изобутилена с метанолом. Выполнен расчет суточной производительности, определено общее количество изобутилена в составе фракции, рассчитаны образующиеся побочные продукты (ТМК, чистый метанол, непрореагировавший метанол). Проведен анализ потерь компонентов. Рассчитаны технологические показатели: выход целевого продукта, конверсия изобутилена и селективность процесса. Полученные данные являются основой для выбора основного оборудования и последующего энергетического расчета.

Ключевые слова: материальный баланс; метил-трет-бутиловый эфир; технологическая схема; метанол; этанол.

Метил-трет-бутиловый эфир используется в качестве высокооктановой компоненты для получения высокооктановых неэтилированных, экологически чистых бензинов. Бензины, полученные компаундированием высокооктановых углеводородных фракций с добавкой МТБЭ обладают пониженной токсичностью, высокой детонационной стойкостью и стабильностью. Использование МТБЭ как компонента бензинов (октановое число смешения 117, по исследовательскому методу 115-135) [1] позволяет значительно уменьшить использование антидетонатора-тетраэтилсвинца. Кроме того, добавление метил-трет-бутилового эфира обеспечивает более полное сгорание моторного топлива. Ключевым этапом технологического проектирования и анализа любого химического производства является составление материального баланса, который позволяет количественно оценить распределение компонентов по стадиям процесса, определить расходные коэффициенты сырья, выход целевого продукта, а также выявить потенциальные потери и пути их минимизации. Материальный баланс служит основой для последующих инженерных расчетов – теплового, гидравлического, а также для выбора основного технологического оборудования.

Анализ технологической схемы производства МТБЭ

В качестве базового технологического решения в работе рассмотрен процесс произ-

водства метил-трет-бутилового эфира по методу IFP (Institut Français du Pétrole), получивший широкое распространение в мировой нефтехимической промышленности благодаря высокой селективности, гибкости по сырью и возможности достижения конверсии изобутилена до 99,8% [4].

Принципиальная технологическая схема (рис. 1) включает следующие основные узлы:

- Узел подготовки сырья и реакторный блок. Бутан-изобутиленовая фракция (ББФ) и свежий метанол смешиваются с возвратными потоками (непрореагировавшие углеводороды и регенерированный спирт) и последовательно подаются в два реактора с неподвижным слоем кислотного катионообменного катализатора (например, Amberlyst 15 или КУ-2ФПП). Реакция этерификации протекает в жидкой фазе при температуре 50-90 °С и давлении 0,5-1,5 МПа, обеспечивающем отсутствие испарения. Экзотермический характер процесса требует отвода тепла, что реализовано за счет кожухотрубчатой конструкции реакторов с циркуляцией хладагента [2].

- Узел разделения и ректификации. Реакционная смесь после реакторов направляется в ректификационную колонну тарельчатого типа (рис. 1), где происходит разделение на три основных потока:

1. Дистиллят (верх колонны) – легкая фракция, содержащая непрореагировавшие углеводороды C4 и избыточный метанол, ко-

торая после конденсации поступает в сепаратор.

2. Кубовый продукт – целевой МТБЭ с чистотой не менее 99% направляемый на склад готовой продукции.

3. Промежуточный поток – возвратный метанол, направляемый на смешение со свежим сырьем.

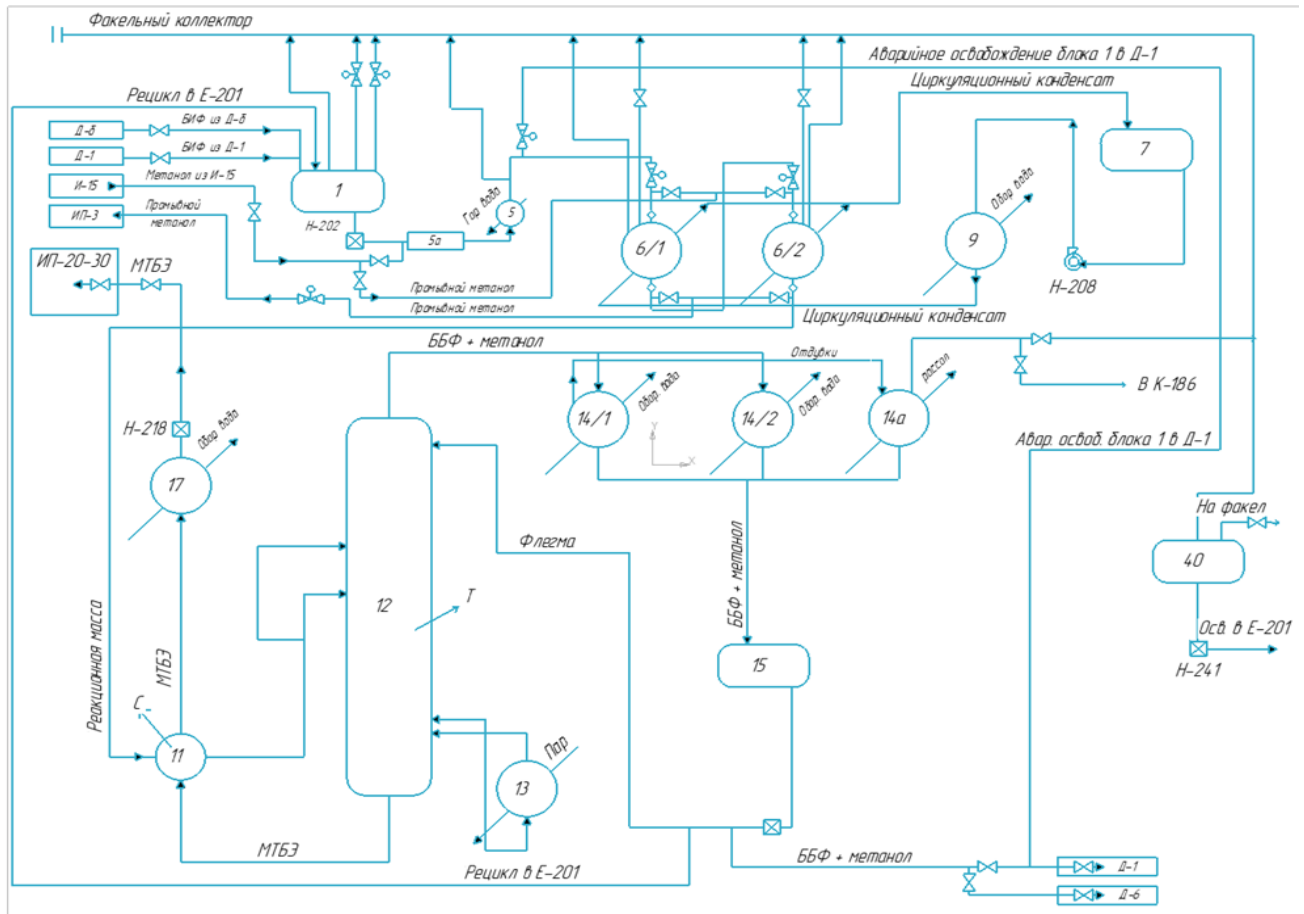


Рис. 1. Технологическая схема синтеза МТБЭ

- Узел регенерации метанола. Для извлечения метанола из углеводородной фракции используется промывка водой в колонне экстракции (поз. 4-5), после чего водно-спиртовая смесь направляется в колонну регенерации (поз. 5), где происходит выделение метанола для возврата в процесс. Вода направляется на повторное использование.

- Система энергообеспечения и безопасности. Для рекуперации тепла в схеме предусмотрены теплообменники (поз. 1, 5, 5а), использующие тепло реакционной смеси для подогрева исходного сырья. Аварийные сбросы газов направляются в факельную систему (поз. 40) для термического обезвреживания.

Технологические особенности выбранной схемы:

- использование двух последовательных реакторов позволяет достичь высокой степени

конверсии изобутилена при стехиометрическом или близком к нему соотношении метанол : изобутилен (1,006);

- отсутствие необходимости в избыточном количестве метанола снижает энергозатраты на его регенерацию;

- применение тарельчатых ректификационных колонн с клапанными тарелками обеспечивает стабильность разделения при колебаниях нагрузок.

Анализ технологической схемы показывает, что производство МТБЭ по методу IFR характеризуется высокой степенью автоматизации, замкнутыми циклами по сырью (рецикл метанола и углеводородов) и минимальным воздействием на окружающую среду, что подтверждается последующими расчетами материального и теплового балансов [3].

Материальный баланс производства МТБЭ

Мощность установки по МТБЭ принимаем 90 тысяч тонн в год.

Исходя из заданной мощности установки рассчитываем суточную производительность по формуле (1):

$$G_{\text{сут}} = \frac{П \cdot 1000}{\tau_{\text{раб}} \cdot 24}, \quad (1)$$

где $G_{\text{сут}}$ – часовая производительность по МТБЭ, кг/ч;

$П$ – производительность установки по МТБЭ, т/год;

$\tau_{\text{раб}}$ – время работы установки за вычетом капитального ремонта, ч.

Результаты расчета по формуле (1):

$$G_{\text{сут}} = \frac{90000 \cdot 1000}{(365 - 15) \cdot 24} = 10714.3 \text{ кг/ч}$$

Рассчитаем количество образующегося МТБЭ по формуле (2):

$$g_{\text{МТБЭ}} = \frac{G_{\text{сут}}}{M_{\text{МТБЭ}}} \quad (2)$$

Результаты расчета по формуле (2):

$$g_{\text{МТБЭ}} = \frac{10714.3}{88} = 121.75 \text{ кмоль/час}$$

Необходимое количество изобутилена, основываясь на уравнении реакции, будем рассчитывать по формулам (3) и (4):

$$g_{\text{изобутилен 1}} = g_{\text{МТБЭ}} \quad (3)$$

$$G_{\text{изобутилен 1}} = g_{\text{изобутилен 1}} \cdot M_{\text{изобутилен}} \quad (4)$$

Результаты расчета по формулам (3), (4):

$$g_{\text{изобутилен 1}} = 121.75 \text{ кмоль/час}$$

$$G_{\text{изобутилен 1}} = 121.75 \cdot 56 = 6818 \text{ кг/ч}$$

Конверсия изобутилена составит 98% на основании выбранного технологического процесса IFR.

Найдем общее количество изобутилена в составе фракции по формуле (5) и (6):

$$G_{\text{изобутилен общ.}} = \frac{G_{\text{изобутилен 1}}}{0.998} \quad (5)$$

$$g_{\text{изобутилен общ.}} = \frac{G_{\text{изобутилен общ.}}}{M_{\text{изобутилен}}} \quad (6)$$

Результаты расчета по формулам (5), (6):

$$G_{\text{изобутилен общ.}} = \frac{6818}{0.98} = 6957.14 \text{ кг/ч}$$

$$g_{\text{изобутилен общ.}} = \frac{6957.14}{56} = 124.23 \text{ кмоль/ч}$$

Количество непрореагировавшего изобутилена составляет 0,21%. Рассчитываем его по (7) и (8) формуле:

$$G_{\text{изобутилен ост.}} = G_{\text{изобутилен общ.}} \cdot 0,0021 \quad (7)$$

$$g_{\text{изобутилен ост.}} = \frac{G_{\text{изобутилен-ост.}}}{M_{\text{изобутилен}}} \quad (8)$$

Результаты расчета по формулам (7), (8):

$$G_{\text{изобутилен ост.}} = 6957.14 \cdot 0,0021 = 21,78 \text{ кг/ч}$$

$$g_{\text{изобутилен ост.}} = \frac{14.6}{56} = 0,26 \text{ кмоль/ч}$$

Так как из изобутилена, в том числе, образуются побочные продукты – ТМК (триметилкарбинол), его необходимо рассчитать, исходя из содержания в продукте производства – 0,09%:

$$G_{\text{ТМК}} = \frac{0,09 \cdot 10719.76}{40,26} = 23.9 \text{ кг/ч}$$

Рассчитаем количество чистого безводного метанола, вносимого в реактор по формуле (9):

$$g_{\text{метанол чист.}} = g_{\text{изобутилен общ.}} \cdot 1,006 \quad (9)$$

Результаты расчета по формуле (9):

$$g_{\text{метанол чист.}} = 124.23 \cdot 1,006 = 124.96 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{\text{метанол чист.}} = 124.96 \cdot 32 = 3998.72 \text{ кг/ч}$$

Количество непрореагировавшего метанола (0,99%) рассчитываем по формуле (10):

$$G_{\text{метанол непрореагировавший}} = G_{\text{метанол чист.}} \cdot 0,0095 \quad (10)$$

Результаты расчета по формуле (10):

$$G_{\text{метанол непрореагировавший}} = 3998.72 \cdot 0,0095 = 37.99 \text{ кг/ч}$$

Количество метанола на побочные реакции рассчитываем по формуле (17):

$$G_{\text{метанол побоч.}} = G_{\text{метанол чист.}} - G_{\text{метанол непрореагировавший}} - G_{\text{метанол на МТБЭ}} \quad (11)$$

Результаты расчета по формуле (17):

$$G_{\text{метанол побоч.}} = 3998.71 - 37.99 - 3896 = 64.72 \text{ кг/ч}$$

Так как на получение МВБЭ из метанола ушло 2,66 кг/ч, то на образование ДМЭ пойдет количество по формуле (15):

$$G_{\text{метанола на ДМЭ}} = 64.72 - 2.24 = 62.48 \text{ кг/ч}$$

$$g_{\text{метанола на ДМЭ}} = \frac{62.48}{32} = 2.95 \text{ кмоль/ч}$$

По уравнению реакции получения ДМЭ (рис. 2):



метанол диметиловый эфир вода

Рис. 2. Реакция получение ДМЭ и воды из метанола

Рассчитаем количество образовавшегося ДМЭ:

$$g_{\text{ДМЭ}} = \frac{1.95}{2} = 0.98 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{\text{ДМЭ}} = 0.98 \cdot 46 = 45.08 \text{ кг/ч}$$

И количество образовавшейся в результате разложения метанола воды:

$$g_{\text{воды получ.}} = g_{\text{ДМЭ}} = 0.98 \text{ кмоль/ч}$$

$$G_{\text{воды получ.}} = 0.95 \cdot 18 = 17.64 \text{ кг/ч}$$

Расчет материального баланса установки производства МТБЭ мощность 90000 в год показал, что для обеспечения часовой производительности 10 714,3 кг/ч целевого продукта требуется 6 957,14 кг/ч изобутилена и 3 998,72 кг/ч метанола. Конверсия изобутилена составляет 98%, что соответствует технологическому регламенту процесса IFR. Количество непрореагировавшего метанола (37,99 кг/ч) и изобутилена (21,78 кг/ч) подтверждает необходимость организации рецикла сырья. Расходные коэффициенты сырья: 0,649 т изобутилена и 0,373 т метанола на 1 т МТБЭ. Полученные данные являются основой для выбора оборудования и теплового расчета.

Обеспечение безопасности труда и окружающей среды

Обеспечение безопасных условий труда и минимизация воздействия на окружающую среду в процессе производства метил-трет-бутилового эфира (МТБЭ) по технологии IFR является комплексной инженерно-технической задачей. Актуальность разработки защитных мероприятий обусловлена физико-химическими свойствами используемых реагентов и спецификой технологического процесса, протекающего в присутствии кислотных ионообменных катализаторов. Основными факторами риска на установке являются

токсичность метанола, пожароопасность и взрывоопасность углеводородных фракций (изобутилена и МТБЭ), а также возможность термической деструкции катализатора при нарушении температурного режима.

В основе системы охраны труда лежит анализ опасных свойств веществ. Метанол, используемый как сырье, относится к 3-му классу опасности, являясь сильным нервно-сосудистым ядом, способным проникать в организм через дыхательные пути и неповрежденную кожу. Изобутилен содержащая фракция С4 представляет собой сжиженный газ, образующий с воздухом взрывоопасные смеси, а при испарении вызывающий обморожения. Конечный продукт – МТБЭ – является легковоспламеняющейся жидкостью с наркотическим действием. В связи с этим производственные помещения, где осуществляется процесс синтеза по методу IFR, оборудуются приточно-вытяжной вентиляцией во взрывозащищенном исполнении, обеспечивающей необходимую кратность воздухообмена. Для непрерывного мониторинга состояния воздушной среды предусматривается установка стационарных газоанализаторов, заблокированных со световой и звуковой сигнализацией, а также с системой аварийной вентиляции, которая автоматически запускается при достижении концентрации паров

выше установленных нормативов ПДК или 20% от нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Технологическая безопасность процесса IFR обеспечивается высокой степенью автоматизации и герметизацией оборудования. Поскольку реакция взаимодействия метанола с изобутиленом является экзотермической, критически важным аспектом является контроль температуры в реакторах. Перегрев катализаторного слоя может привести не только к потере его активности, но и к деструкции с выделением коррозионно-активных агентов (диоксида серы), что повышает риск разгерметизации аппаратуры. Автоматизированная система управления технологическим процессом должна предусматривать блокировки, отсекающие подачу сырья при превышении допустимых температур или давления. Для перекачивания метанола и МТБЭ применяются герметичные насосы с двойным торцевым уплотнением или экранированные насосы, исключающие утечки продукта в рабочую зону. Все технологическое оборудование и трубопроводы подлежат обязательному заземлению для защиты от накопления статического электричества, что особенно актуально при транспортировке диэлектрических жидкостей.

Индивидуальная защита персонала включает использование специальной одежды, обуви и средств защиты органов дыхания и зрения. Учитывая высокую проникающую способность метанола и агрессивность МТБЭ по отношению к некоторым полимерам, перчатки и защитные костюмы должны быть изготовлены из устойчивых материалов, таких как бутилкаучук. При проведении газоопасных работ или ликвидации аварийных разливов персонал обязан использовать изолирующие противогазы, так как фильтрующие средства защиты могут быть неэффективны при высоких концентрациях паров метанола. На территории установки предусматриваются аварийные души и фонтанчики для промывки глаз на случай попадания реагентов на кожу или слизистые оболочки.

Охрана окружающей среды при реализации технологии IFR фокусируется на предотвращении загрязнения атмосферного воздуха и водных ресурсов. Для сокращения выбросов летучих органических соединений резервуарные парки хранения метанола и МТБЭ оборудуются

понтонными, плавающими крышами или системами «газовой обвязки» (уравнивания давления), предотвращающими выбросы паров в атмосферу при операциях слива-налива и «дыхании» резервуаров. Аварийные сбросы газов с предохранительных клапанов колонн ректификации и реакторного блока направляются в закрытую факельную систему для термического обезвреживания, исключая прямое попадание углеводородов в атмосферу.

Особое внимание уделяется защите гидросферы, так как МТБЭ обладает высокой растворимостью в воде и низким порогом органолептического восприятия, что делает его опасным загрязнителем грунтовых вод. Производственная площадка должна иметь твердое водонепроницаемое покрытие с обвалованием, препятствующим проникновению веществ в почву. Система промышленной канализации проектируется закрытой и изолированной от ливневых стоков общего назначения. Сточные воды, содержащие метанол и эфиры, направляются на локальные очистные сооружения, где применяются методы биологической очистки или отпарки, поскольку традиционные механические нефтеловушки не обеспечивают улавливание растворенных фракций МТБЭ. Отработанный катализатор подлежит сбору в специальные контейнеры и передаче на регенерацию или термическую утилизацию на специализированных предприятиях, его размещение на полигонах твердых бытовых отходов запрещено.

Заключение

В ходе выполнения работы был проведен детальный расчёт материального баланса производства метил-трет-бутилового эфира мощностью 90 000 т/год на основе технологии IFR. Полученные результаты позволили количественно оценить расход сырья, выход целевого продукта, образование побочных веществ и уровень технологических потерь.

Установлено, что рассматриваемый процесс характеризуется высокой степенью конверсии изобутилена (до 98%) и значительной селективностью по целевому продукту, что обеспечивает эффективное использование сырьевых ресурсов. Расчёты показали целесообразность организации рецикла непрореагировавших компонентов, что способствует снижению материальных потерь и повышению

общей экономической эффективности производства.

Анализ технологической схемы подтвердил её соответствие современным требованиям нефтехимической промышленности: высокая степень автоматизации, наличие замкнутых потоков сырья, эффективная система теплообмена и минимизация воздействия на окружающую среду.

Таким образом, выполненный материальный баланс является надёжной основой для последующих инженерных расчётов (теплового, гидравлического), выбора оборудования и оптимизации технологического процесса, а также подтверждает перспективность применения данной технологии в промышленности.

Библиографический список

1. Али М.А., Хамид Х. Handbook of MTBE and Other Gasoline Oxygenates. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 381 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.perlego.com/book/2477138/handbook-of-mtbe-and-other-gasoline-oxygenates-pdf>.
2. Митянина О.Е., Сухачева К.Е., Колмогорова В.А. Моделирование промышленного производства МТБЭ в реакционно-ректификационной колонне // Petroleum and Coal. – 2018. – Т. 60, №1. – С. 14-23. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/323256903_Simulation_of_industrial_MTBE_production_in_reactive_distillation_column_using Aspen_HYSYS.
3. Патент № 2709201 Российская Федерация, МПК C08F 2/50, A61K 6/083. Инициатор фотополимеризации и фотоотверждаемая композиция / заявитель ДСМ АйПи АССЕТС Б.В. – № 2018135186; заявл. 05.10.2018; опубл. 17.12.2019. – 12 с. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2709201C1/ru>.
4. Синтез метил-трет-бутилового эфира на цеолитных катализаторах // Chemical Communications. – 1996. – С. 1145-1146. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1996/cc/cc9960001145/unauth>.

MATERIAL BALANCE OF METHYL TERTIARY BUTYL ETHER PRODUCTION

J.O. Mamporiya, *Student*

Murom Institute (branch) Vladimir State University
(Russia, Murom)

Abstract. *This paper presents a calculation of the material balance for a methyl tert-butyl ether (MTBE) plant with a capacity of 90,000 tons per year. The process is based on the catalytic reaction of isobutylene with methanol. The daily throughput was calculated, the total amount of isobutylene in the fraction was determined, and the resulting byproducts (TMC, pure methanol, and unreacted methanol) were calculated. An analysis of component losses was conducted. Process parameters were calculated: target product yield, isobutylene conversion, and process selectivity. The obtained data serve as the basis for selecting the main equipment and subsequent energy calculations.*

Keywords: *material balance; methyl tert-butyl ether; process flow diagram; methanol; ethanol.*