

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202090045 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2020.04.20

(51) Int. Cl. C10G 35/24 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2018.06.26

(54) РАБОТА УСТАНОВОК КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

(31) 17178519.9

(72) Изобретатель:

(32) 2017.06.28

Стасенка Дмитрий (BY), Рубель
Торстен (DE)

(33) EP

(86) PCT/EP2018/067161

(74) Представитель:

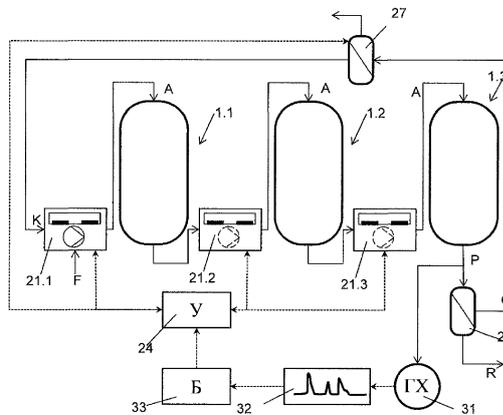
(87) WO 2019/002320 2019.01.03

Харин А.В., Буре Н.Н., Стойко Г.В.
(RU)

(71) Заявитель:

СВИСС РР ЭНГИНИРИНГ ГРУП АГ
(CH)

(57) Предложен способ оптимизации работы установки каталитического риформинга. Установка имеет множество содержащих катализатор реакторов, через которые последовательно течет рабочий газ, при этом состав рабочего газа в реакторах изменяется, на выходной стороне последнего из реакторов получают продукт. Согласно способу сначала получают конкретные постоянные характеристики и начальные рабочие параметры установки, имеющиеся в течение работы. Затем осуществляется компьютерное моделирование химических процессов в реакторах, причем помимо постоянных характеристик и полученных начальных рабочих параметров также учитывают результаты измерения химического состава продукта, получаемого на выходной стороне последнего реактора. После этого выполняют компьютерные моделирования химических процессов в реакторах с различающимися измененными рабочими параметрами, причем в качестве измененных рабочих параметров, помимо расхода молекулярного водорода, также отдельно регулируют различающиеся температуры рабочего газа на входе каждого реактора. Из вычисленного химического состава продукта определяют набор оптимизированных рабочих параметров.



202090045 A1

202090045 A1

РАБОТА УСТАНОВОК КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА

Изобретение относится к области нефтепереработки. В частности, оно относится к области переработки нефти, а именно - к каталитическому риформингу с целью
5 увеличения октанового числа и получения молекулярного водорода и углеводородов с короткой цепью (обычно называемых "LPG", т.е. сжиженным нефтяным газом) из сырого бензина, получаемого в результате перегонки сырой нефти, и при необходимости также для увеличения доли ароматических соединений.

Для осуществления каталитического риформинга известны, в частности,
10 традиционные реакторы с неподвижным слоем, а также несколько более сложные регенеративные, так называемые CCR реакторы. Как правило, реакторы обоих типов имеют ротационно цилиндрический объем, в котором катализатор - с консистенцией ка у песка - расположен между внешней газопроницаемой стенкой и внутренней газопроницаемой стенкой, при этом в общем случае снаружи внутрь через него течет
15 газовая смесь с испарившимся сырым бензином (нафта), подлежащим риформингу, а также с циркуляционным газом, содержащим молекулярный водород. В ходе процесса газовая смесь меняет свой состав. Далее газовая смесь, протекающая через реактор или реакторы, называется рабочим газом.

Рабочий газ в общем случае последовательно протекает через множество ступеней
20 реактора, прежде чем его фракционируют в качестве продукта риформинга на этапе пост-обработки, после чего продукты, полученные при фракционировании (газовая смесь водорода, из которой выделяют циркуляционный газ; риформат, LPG, пар, отходящий газ и т.д.), могут быть извлечены или дополнительно обработаны. В так называемой полурегенеративной установке ступени реактора образованы отдельными реакторами с
25 неподвижным слоем, тогда как в регенеративной (CCR) установке ступени реактора образованы расположенными друг над другом субреакторами, через которые течет катализатор.

Производительность реакторов зависит от ряда параметров, в том числе от рабочего давления, создаваемого компрессорами, рабочей температуры (как правило,
30 плюс минус 500 ° C), состава и состояния катализатора, и состава рабочего газа.

Известно применение управляющего программного обеспечения в установках каталитического риформинга. Такое программное обеспечение управляет (замкнутая система управления) рабочим давлением и рабочей температурой посредством
35 нагревательных элементов, а также насосов установки, необходимых для данного процесса, на основе результатов газовой хроматографии продукта риформинга,

получаемого после последней ступени реактора. Такое управляющее программное обеспечение обладает тем преимуществом, что обеспечивается возможность быстрой реакции на изменение условий в установке (что на практике, однако, имеет мало смысла, по меньшей мере, после процесса запуска). Однако такое управляющее программное
5 обеспечение лишь ограниченного подходит для оптимизации процесса, не в последнюю очередь потому, что требование реакций в реальном времени позволяет лишь получать и обрабатывать очень неточные данные.

Также известны кинетические модели реактора, позволяющие выполнять лишь очень неточное обобщенное моделирование установок, т.е. на основе общей информации
10 об используемых компонентах, применением статистических значений.

Выигрыш в оптимизации в несколько процентов или даже в диапазоне одной десятой процента оправдывает значительные усилия, вследствие очень высоких объемов производства и очень высоких эксплуатационных расходов установок рафинирования. Таким образом, существует запрос на решения, которые бы позволяли дополнительно
15 улучшить эффективность существующих или еще проектируемых установок каталитического риформинга. Соответственно, задачей настоящего изобретения является такое улучшение эффективности.

Настоящее изобретение, среди прочего, исходит из того, что компьютерное определение рабочих параметров для работы установки в равновесном состоянии (с
20 постоянными рабочими параметрами) является предпочтительным для каталитического риформинга, в частности, если, среди прочего, температуры рабочего газа на входе каждого реактора могут быть по отдельности отрегулированы в качестве рабочих параметров, которые действительно можно отрегулировать.

Соответственно, предложен способ работы установки каталитического
25 риформинга, причем указанная установка имеет множество реакторов, содержащих катализатор, причем через реакторы последовательно течет рабочий газ, содержащий углеводороды и молекулярный водород, при этом состав рабочего газа в реакторах изменяется, а на выходной стороне последнего из реакторов получают продукт.

Согласно способу на первом этапе получают конкретные постоянные
30 фиксированные характеристики и рабочие параметры уже введенной в эксплуатацию установки и путем измерения определяют химический состав продукта или порции продукта (например, без молекулярного водорода).

На втором этапе (первая фаза моделирования) выполняют моделирование химических процессов в реакторах, учитывая различающиеся условия в разных реакторах,

причем помимо геометрических характеристик и рабочих параметров измеренный химический состав также вводят в моделирование.

На третьем этапе (вторая фаза моделирования) выполняют моделирование химических процессов с измененными рабочими параметрами без необходимости в дополнительных измерениях. Согласно одному аспекту изобретение характеризуется тем, что помимо расхода циркуляционного газа (или молекулярного водорода в качестве компонента циркуляционного газа) также отдельно регулируют температуры рабочего газа на входе каждого реактора в качестве рабочих параметров и регулирующих переменных.

Моделирование согласно третьему этапу используют для оптимизации рабочих параметров, так что набор рабочих параметров (включая отдельные температуры рабочего газа на входе каждого реактора), оптимизированный с учетом заданной цели, определяется путем изменения рабочих параметров.

Оптимизация рабочих параметров на третьем этапе может быть выполнена с использованием известных приемов. Одна из возможностей заключается в том, что сначала задают целевое значение. Целевое значение может представлять собой простое значение, например, октановое число, общее количество риформата, количество газообразного водорода или подобное. Однако, она также может быть более сложной и состоять, например, из значения, результирующего из целевой функции A характеристических величин продукта на стороне выхода продукта - в простом примере это может быть средневзвешенное значение нормированных параметров (октановое число, количество газообразного водорода, пропорция нафтенов, пропорция парафинов, и т.д.). Это целевое значение затем максимизируют путем изменения рабочих параметров, например, сначала ступенчато по грубой шкале, а затем в окрестности максимального значения или по более мелкой шкале и т.д. Также предусмотрена возможность использования других способов максимизации, известных из численного интегрирования, таких как, например, выбор случайных чисел в качестве начальных значений.

Примеры целевых функций:

Максимизация выхода риформата при заданном октановом числе:

$$A(T_i, G, Q, P) \rightarrow \max;$$

Максимизация октанового числа при неизменном количестве риформата:

$$O_k(T_i, G, Q, P) \rightarrow \max;$$

Максимизация выхода водорода (H_2) при заданном ограничении октанового числа или выхода риформата:

$$H_2(T_i, G, Q, P) \rightarrow \max;$$

Максимизация выхода одного или более углеводородов (ароматических соединений) в риформате, с ограничением остальных параметров продукции.

$$Y_a, Y_H, Y_{II} (T_i, G, Q, P) \rightarrow \max;$$

5 Диапазоны, в которых изменяются рабочие параметры, основаны на технологически разумных пределах, известных и документированных для реакторов:

$T_{\min} < T_i < T_{\max}$, (T_{\min} , T_i , T_{\max} - диапазоны изменения температуры в каждом реакторе в его документированных предельных значениях). Нижнее предельное значение определяется, например, температурой реакции катализатора, верхнее предельное значение - его термостойкостью. Например, $T_{\min} = 457^\circ \text{C}$, $T_{\max} = 520^\circ \text{C}$.

10 $P_{\min} < P_i < P_{\max}$ (P_{\min} , P_i , P_{\max} - диапазоны изменения давления для каждого реактора в его документированных предельных значениях)

$n_{\min} < n < n_{\max}$, (n_{\min} , n_i , n_{\max} - изменяющееся отношение циркуляционного газа к сырью в документированных предельных значениях). Пример: $1000-1800 \text{ Нм}^3/\text{м}^3$

$$O_k = O_{k0}, (O_k, O_{k0} - \text{полученное и заданное октановое число})$$

15 $G_{\min} < G_i < G_{\max}$, (G_{\min} , G_i , G_{\max} - изменяющееся использование объема реакторного блока с входной газовой смесью (подача) в документированных предельных значениях)

Q - объемный расход циркуляционного газа на входе реакторного блока

i - значение внутри пределов изменения

T_i , P_i , могут иметь при этом отдельное значение для каждого реактора блока.

20 На четвертом этапе реактор настраивают таким образом, что он работает с оптимизированными рабочими параметрами, а именно, среди прочего, с различающимися целевыми температурами рабочего газа на входе каждого реактора.

Постоянные характеристики установки включают в себя геометрию установки, состав катализатора, другие характеристики физических компонентов установки (например, тип установки, реакторы с неподвижным слоем или установка CCR; наличие одного или более компрессоров, направление потока через реакторы и т.д.). Таким образом, постоянные характеристики представляют собой весьма конкретные характеристики соответствующей установки, подлежащей моделированию, которые определяются на основе измерений или на основе существующих спецификаций для конкретной установки (например, планы, спецификации катализатора и т.д.), в отличие от уровня техники, где лишь общие значения применяются, например, для каждого компонента данного типа.

35 Рабочие параметры представляют собой значения, по меньшей мере частично регулируемые оператором установки, такие как давление, температуры, поток материалов через реакторы, расход циркуляционного газа (в частности: расход молекулярного

водорода; помимо него, циркуляционный газ может иметь дополнительные компоненты, например, азот, благородные газы и т.д.).

Таким образом, способ оптимизации для установки упомянутого типа включает следующие этапы:

- 5 - получают конкретные постоянные характеристики и рабочие параметры установки,
- моделируют химические процессы в реакторах на первой фазе, учитывая различающиеся условия в разных реакторах, причем помимо постоянных характеристик и заданных рабочих параметров (например, давление, температура, поток материалов через
- 10 реакторы) в моделирование также вводят измеренный химический состав продукта, получаемого на выходной стороне последнего реактора, или порции продукта,
- на второй фазе моделируют химические процессы в реакторах с измененными рабочими параметрами, при этом помимо расхода циркуляционного газа (или молекулярного водорода в качестве компонента циркуляционного газа) также отдельно
- 15 регулируют температуры рабочего газа на входе каждого реактора в качестве рабочих параметров, причем в качестве результата моделирования рассчитывают химический состав продукта.

Из результатов второй фазы определяют набор оптимизированных рабочих параметров, в частности, путем сравнения рассчитанных химических составов с учетом

20 конкретной задачи на основе заданных критериев и тех рабочих параметров, которые дают наилучшие результаты с учетом выбранной задачи, вручную или автоматически.

При создании изобретения было обнаружено, что использование температур на входе реактора в качестве регулирующих переменных независимо друг от друга является особенно успешным для оптимизации. Это позволяет осуществлять работу, которая

25 специально адаптирована к кинетике реакции в соответствующем реакторе, в то же время учитывая тот факт, что состав рабочего газа различается от реактора к реактору.

Другим рабочим параметром является давление. В вариантах осуществления изобретения, если установка оборудована соответствующим образом (например, один компрессор предусмотрен для каждого реактора), давление в качестве рабочего параметра

30 также устанавливается отдельно, различное для каждого реактора. Эта возможность возникает, в частности, для реакторов с неподвижным слоем, а также установок CCR с расположением реакторов бок о бок.

В частности, способ осуществляется офлайн, т.е. упомянутые данные (постоянные характеристики, рабочие параметры, результаты измерений) собирают один раз, после

35 чего выполняются другие этапы, без необходимости в обратной связи от установки для

этих других этапов. Хотя онлайн регулировки (управление по замкнутому контуру) создают впечатление, что они способны быстрее реагировать на изменения, и возможности в этом отношении больше из-за доступных производительностей вычислительных машин, было обнаружено, что в данном контексте предпочтительным является офлайн решение.

С одной стороны, за счет данного приема могут быть использованы газохроматографические анализы высокого разрешения без необходимости предварительной группировки в грубо определенные группы веществ на основе требуемых скоростей. В известных из уровня техники системах регулирования с управлением по замкнутому контуру результаты газовой хроматографии в общем случае должны быть доступны в течение приблизительно 5 минут, поэтому можно лишь принять в расчет широко определенные группы веществ, например, лишь одноразрядное количество групп веществ. Однако, было обнаружено, что рассмотрение большего количества имеющихся в рабочем газе групп веществ, - например, без предварительной группировки, т.е. с учетом точности всего измерения газового хроматографа и/или при значительном количестве, в частности, по меньшей мере, 30 веществ и групп веществ – влечет за собой не только улучшение точности описания протекающих процессов, но и дает возможность оптимизации с эффективным, измеримым улучшением эффективности всей установки.

Это не исключает, что измеренные и подаваемые вещества/группы веществ могут быть сгруппированы с помощью модели в подгруппы, имеющие значение для моделирования.

С другой стороны, было обнаружено, что офлайн решение лучше подходит для определения оптимального равновесного состояния, чем управление по замкнутому контуру с обратной связью, возможно не в последнюю очередь просто из-за размера обычных установок и соответствующей инерции.

Таким образом, в вариантах осуществления изобретения вышеупомянутые этапы выполняются офлайн, без выполнения этапов измерения, которые выполняют на этапах моделирования и которые заново вводят в вычисление. Дополнительно или альтернативно, как упомянуто выше, учитывают результаты газохроматографического анализа без предварительной группировки. Таким образом, в отличие от уровня техники, данные газовой хроматографии используются не непосредственно в качестве сигнала обратной связи для управления процессом (разумеется, не исключено, что это совершается дополнительно к процедуре, соответствующей изобретению), а опосредованно, через описанный процесс, в котором измеренные данные уже не вводят

непосредственно в оптимизацию (вторая фаза). Было обнаружено, что данная процедура, кажущаяся менее прямой, является более эффективной. Это обусловлено тем фактом, что возможен более точно принять в расчет также кинетику реакции и в целом более точное, более надежное моделирование равновесного состояния. Адаптируемые рабочие параметры могут включать в себя:

- температуру рабочего газа на входе каждого реактора (может быть выбрана отдельно, например, с небольшим увеличением от реактора к реактору);

- давление; опционально различающееся от реактора к реактору, если установка позволяет это;

10 - скорость подачи (т.е. количество сырого бензина в единицу времени);

- количество газа H_2 в единицу времени.

Фактические этапы моделирования характеризуются, в частности, тем, что кинетику реакции принимают в расчет с реальными данными, полученными от установки и с учетом характеристик катализатора, при этом может быть использована и длительность пребывания молекул газа на поверхности катализатора. Таким образом, того они отличаются от статистических способов, известных из уровня техники, в которых рабочие параметры существующей установки пытаются оценить на основе экспериментальных значений и данных различных установок сходного типа.

Химические процессы в реакторе для каталитического риформинга, равно как и основные формулы для соответствующей кинетики, сами по себе известны, понятны и поэтому не являются частью настоящего изобретения. По этой причине они здесь не рассматриваются, и вместо них делается ссылка на документ "das Lexikon der Chemie" см. ключевое слово "Reformieren" ("риформинг") (1998, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (издатель), который в настоящее время доступен в Интернете по адресу <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/reformieren/7875>) или в самом общем виде на техническую литературу.

Способы выполнения компьютерных моделирований каталитического риформинга также уже известны и поэтому не являются предметом настоящего изобретения. Одним из примеров является публикация A. Askari et al., Petroleum & Coal 54 (1), 76-84 (2012). Цитируемые в этой публикации ссылки 2-12, а также глава 2.1 относятся к основным кинетическим моделям.

В вариантах осуществления изобретения для моделирования - на первой и на второй фазе - объем соответствующего реактора разделяют на множество коаксиальных полых цилиндрических объемов. Таким образом, учитывается в целом по существу по меньшей мере локально осесимметричная геометрия реакторов, а также характеристики

потока, причем поток рабочего газа в реакторе в каждом случае идет через катализатор снаружи вовнутрь или, возможно, наоборот, изнутри наружу.

Для моделирования предполагается, что концентрации количеств газа веществ и/или групп веществ в рабочем газе постоянны в одном полом цилиндрическом объеме, однако потенциально различаются от одного полого цилиндрического объема к другому полному цилиндрическому объему. Также в каждом полом цилиндрическом объеме потенциально может быть другая температура, чем в смежных полых цилиндрических объемах. Химические реакции применяются, в частности, например, к по меньшей мере 30 группам веществ, в которые группируют имеющиеся (и измеряемые) вещества.

На первой фазе моделирования адаптируют в особенности параметры модели, при этом в качестве постоянных вводят постоянные характеристики реакторов, а также рабочие параметры, при которых было проведено измерение. Параметры модели могут быть чисто феноменологическими (например, коэффициенты, без конкретных физических характеристик, в уравнениях или формулах), или они могут иметь физический смысл (например, характеризовать сопротивление потоку и т.д.). В вариантах осуществления изобретения присутствуют как чисто феноменологические, так и физические параметры. Например, с целью адаптации параметров модели выполняют моделирование химических реакций, начиная с набора начальных значений параметров модели, основанного на эмпирических значениях с другими установками, после чего сравнивают получаемый в результате реакции продукт с продуктом, характеристики которого фактически получены при измерении. Затем, начиная с начальных значений, систематически изменяют параметры модели для максимального согласования вычисленного результата с измеренными значениями (показаниями). Как только - количественно определено критерием прекращения - характеристики продукта в соответствии с моделированием становятся достаточно близки к измеренным характеристикам, первая фаза завершается, а параметры модели, с которыми достигнуто это согласование, сохраняются. Они служат в качестве постоянных на второй фазе способа моделирования, в котором изменяют рабочие параметры.

Без каких-либо затруднений может быть найдена мера того, насколько близко находятся друг к другу реальные и вычисленные характеристики продукта. Например, концентрации групп веществ могут быть представлены математически в виде вектора многомерного векторного пространства, причем в этом векторном пространстве может быть определена метрика, например, евклидова метрика, при необходимости со специальным взвешиванием компонентов, при этом компоненты, более важные для

характеристик продукта или даже встречающиеся лишь в небольших концентрациях, могут быть взвешены в более сильной степени, чем другие.

Например, после завершения первой фазы может быть сгенерирована компьютерная программа, включающая в себя программу моделирования, используемую для первой фазы, которая, однако, содержит параметры модели и неизменяющиеся константы, в то время как рабочие параметры являются изменяемыми. Такая компьютерная программа является специальной программой для конкретной установки, которая соответственно содержит физическую/химическую модель, адаптированную под конкретную установку. Она может быть передана оператору установки, например, в скомпилированном и/или кодированном виде.

На второй фазе затем выполняют моделирования с измененными рабочими параметрами, но с постоянными параметрами модели, с целью оптимизации процесса. При этом имеется возможность автоматического поиска параметров - т.е. компьютерная программа, выполняющая вторую фазу способа, систематически изменяет рабочие параметры под управлением соответствующего алгоритма - или может быть также выполнена ручная регулировка параметров пользователем, причем и в этом случае фактическое моделирование с выбранными пользователем рабочими параметрами осуществляется, разумеется, с помощью технических средств, т.е. компьютером. Выбор оптимизированных рабочих параметров, с помощью которых установка может эффективно работать, может осуществляться автоматически на основе заранее заданных критериев оптимизации, например, взвешиванием значения достигнутых оптимизаций различных величин (октановое число, выход H_2 , выход риформата, выход сжиженного нефтяного газа, выход ароматических соединений, уменьшение закоксовывания катализатора и т.д.), или же сходным образом вручную оператором.

Способы вычисления в соответствии с подходом настоящего изобретения необходимо выполнять с помощью компьютера, для чего требуется большая вычислительная мощность. Однако поскольку они могут выполняться, в частности, офлайн, минимальные требования к производительности вычислительных машин не являются строгими. Может использоваться стандартная современная мощная компьютерная система, в частности с несколькими процессорами или ядрами процессора.

Настоящее изобретение также относится к компьютерной программе для осуществления способа, описанного в данном документе.

Оно также относится к компьютерной программе под конкретную установку, которая содержит результаты первой фазы в виде фиксированных, уже не адаптируемых параметров и в которой рабочие параметры могут быть настроены автоматически или

вручную для выполнения второй фазы моделирования. В частности, компьютерная программа под конкретную установку может содержать параметры в кодированном виде.

Компьютерная программа для осуществления всего способа оптимизации, а также компьютерная программа под конкретную установку могут быть сконфигурированы согласно любому аспекту и для любого варианта осуществления изобретения, описанного в данном документе, т.е. все относящиеся к способу варианты осуществления, описанные в этом документе, применимы и к компьютерным программам.

Изобретение также относится к способу осуществления работы установки описанного выше типа каталитического риформинга, в котором целенаправленно различным образом регулируют различающиеся температуры рабочего газа на входе каждого реактора, а именно, в частности, на основе результата моделирований, в частности, в соответствии со способом оптимизации, описанным в данном документе.

Далее со ссылками на чертежи раскрыты некоторые принципы и варианты осуществления настоящего изобретения, при этом на чертежах показано следующее:

- 15 фиг.1 - схематический вид в разрезе реактора;
- фиг.2 - схематически, также на виде в разрезе, разделение на коаксиальные полые цилиндрические объемы;
- фиг.3 - упрощенная блок-схема установки с реактором с неподвижным слоем;
- фиг.4 - еще более упрощенная блок-схема установки CCR;
- 20 фиг.5 - упрощенная блок-схема первой фазы процесса моделирования; и
- фиг.6 - упрощенная блок-схема второй фазы процесса моделирования.

На фиг.1 схематично показан принцип работы реактора 1. Во внешнем резервуаре 2 с впускным отверстием 3 между внешней газопроницаемой стенкой 5 и внутренней газопроницаемой стенкой 9 образован объем, по меньшей мере частично заполненный катализатором 6. Рабочий газ течет внутрь этого объема через внешнюю газопроницаемую стенку 5 и снова выходит из него наружу через внутреннюю газопроницаемую стенку 9 (направление потока обозначено стрелками 7; не исключается работа с потоком в другом направлении, изнутри наружу). На пути через этот объем имеющиеся в рабочем газе молекулы многократно абсорбируются на поверхности катализатора и снова десорбируются от нее. Продолжительность пребывания на поверхности катализатора зависит от температуры, а скорость адсорбции и траектории потока зависят от температуры и давления; обе они влияют на кинетику реакции. При этом данные характеристики - включая текущее состояние; степень коксования и т.д. - катализатора вводятся в кинетику реакции.

Согласно изобретению предлагается, как упомянуто выше, моделировать кинетику реакции, в частности моделировать в офлайн режиме, на основе известных химических реакций, и регулировать изменяемые параметры "рабочая температура в реакторе", "давление, в частности в реакторе", "поток" и "отношение подача/циркуляционный газ" на основе этой модели.

Химические реакции в ходе каталитического риформинга могут быть разделены на три основные группы:

- a) дегидратация нафтенов с получением ароматических соединений
- b) дегидратация и циклополимеризация парафинов с получением нафтенов
- c) гидрокрекинг нафтенов с получением коротких парафинов

Результатом является система линейных уравнений.

Кинетика этих реакций может быть моделирована известным способом на основе закона действующих масс, в зависимости от давления и преобладающей температуры, а также от активности катализатора. При этом температура, концентрации отдельных реагентов в рабочем газе и, в определенной степени, давление могут зависеть от положения внутри реактора. Согласно одному аспекту изобретения предлагается учитывать это в модели путем деления объема, заполненного катализатором δ , на кольцеобразные подобъемы, что схематически показано на фиг.2. На фиг.2 схематично показаны, как и на фиг.1 в горизонтальном разрезе, коаксиальные полые цилиндрические объемы 11, соответственно имеющие, например, одинаковую толщину. Также не исключаются другие деления размеров полых цилиндрических объемов, например, когда содержимое объемов выбирают одинаковым, в результате чего получаются разные толщины.

Входящие в моделирование параметры, например, температуры T и концентрации C_k разных веществ в рабочем газе и, возможно, также давление P могут различаться от одного полого цилиндрического объема к другому полному цилиндрическому объему (индекс i). В частности, в случае потока газа в показанном направлении (фиг.1) температура может уменьшаться снаружи вовнутрь, поскольку происходящие в реакторе реакции являются в целом эндотермическими.

На фиг.3 показана установка полу-регенеративного типа (т.е. регенерация катализатора в установке возможна, но только при отключении рассматриваемого реактора). Установка имеет три последовательно соединенных реактора 1, а именно - реакторы 1.1, 1.2, 1.3 с неподвижным слоем. Выше по потоку от них в каждом случае расположено кондиционирующее устройство (которое физически не обязательно выполнено в виде одного узла и, например, может иметь множество отдельных элементов)

21.1, 21.2, 21.3. Кондиционирующее устройство содержит регулируемый (замкнутое управление) нагреватель рабочего газа, а также насосное устройство (в общем случае компрессор; если необходимо также может использоваться подающий насос частей, которые еще находятся в жидком состоянии). В вариантах осуществления установки не
5 каждое кондиционирующее устройство имеет нагреватель, но, например, только одно из них. По этой причине на фиг.3 символы насосов кондиционирующих устройств 21.2, 21.3 для второго и третьего реактора показаны пунктирной линией, т.е. показаны как опциональные.

На стороне входа рабочий газ А образуется из подачи F, уже переведенной
10 нагреванием в газообразное состояние или же испарившейся в первом кондиционирующем устройстве 21.1, а также из циркуляционного газа К. Рабочий газ последовательно проводится через три реактора 1.1, 1.2, 1.3, где он изменяет свой состав. Продукт Р риформинга, получаемый в результате после последнего реактора 1.3, подается в газовый сепаратор 26 после охлаждения (соответствующие теплообменник и охладитель
15 могут быть спроектированы согласно уровню техники и не показаны на фиг.3). Нелетучие компоненты R (риформат) подаются после этого на дальнейшие этапы обработки, которые могут соответствовать уровню техники и поэтому подробно здесь не рассмотрены. Получаемые летучие компоненты G, содержащие большое количество молекулярного водорода, фракционируют во фракционирующем устройстве 27, для чего то же
20 количество газа, что и циркуляционного газа К, снова смешивается с подачей на стороне входа, насколько это необходимо для осуществляемых процессов. Остальная часть газа G отводится и утилизируется в соответствии с требованиями.

Управляющее устройство 24 управляет кондиционирующими устройствами 21,1, 21.2, 21.3, при этом в каждом случае известным образом может присутствовать замкнутый
25 управляющий контур, с измерением кондиционирующими устройствами температуры и/или давления и/или расхода, при этом управляющее устройство конфигурировано так, чтобы настраивать соответствующие устройства и, при необходимости, подстраивать их для достижения заданного соответствующего значения (температура/давление/расход и т.д.).

30 По своей конструкции установка в целом может быть выполнена аналогично уже известным установкам данного типа. Однако она отличается от уровня техники, в частности, по меньшей мере, конфигурацией управляющего устройства 24.

На выходной стороне последнего реактора (с присоединением непосредственно к
последнему реактору или же после него, перед или после газового сепаратора 26)
35 расположен газовый хроматограф 31, выходные данные 32 которого поступают в рабочие

данные, используемые для управления установкой описанным ниже способом. Влияние данных М измерения на управляющее устройство 24, которое, согласно описанной здесь процедуре, является лишь опосредованным, представлено на фиг.3 блоком 33.

На фиг.4 в еще более схематичном виде (без показа управляющего устройства и
5 газового хроматографа) изображен вариант, в котором установка выполнена как регенеративная установка, а реакторы 1.1, 1.2, 1.3 расположены друг над другом, так что катализатор, как очень схематично показано стрелками, медленно транспортируется в течение работы через реакторы под действием силы тяжести: после удаления из
10 последнего реактора катализатор регенерируется; регенерированный материал катализатора непрерывно подается в первый реактор 1.1 в течение работы.

Такая установка отличается от установки того типа, что показан на фиг.3, в частности, также тем, что вследствие замены материала катализатора рабочие давления в реакторах не могут контролироваться полностью независимо друг от друга. Таким образом, второе и третье кондиционирующие устройства 21.2, 21.3 показаны на фиг.4 без
15 автономных насосных средств.

Установки, показанные схематично и упрощенно на фиг.3, 4, следует рассматривать лишь в качестве примеров. Процедура согласно изобретению также относится к другим установкам, например, к установкам с более (или, опционально, менее) чем тремя реакторами, к регенеративным установкам с расположенными рядом
20 друг с другом реакторами (и с транспортной системой для катализатора, выполненной для этой цели) и т.д.

На фиг.5 показан порядок выполнения первой фазы способа оптимизации процесса. "St" обозначает начало процесса. На первом этапе С считывают постоянные реальные параметры установки (геометрия реакторов, заправляемое количество и т.д.).
25 Затем (этап В) считывают рабочие параметры, применяемые в установке перед оптимизацией процесса; к этим рабочим параметрам относятся давление процесса, температура процесса, поток циркуляционного газа и т.д. После этого считывают данные М измерения, а именно полученные от газового хроматографа данные о составе продукта Р или риформата R (см. фиг.3). В отличие от известных из уровня техники управляющих
30 систем, здесь вся газовая хроматограмма учитывается в пределах точности разрешения газового хроматографа, т.е. отсутствует предварительная группировка соединений, как это выполняют согласно уровню техники, для получения необходимой скорости анализа.

На следующем этапе Par выбирают параметры модели (этап Par). Начальные параметры модели могут, например, всегда выбираться одинаковыми, или же могут грубо
35 оцениваться оператором или программным обеспечением на основе данных (константы,

рабочие параметры, измеренные значения). Затем выполняют моделирование S с параметрами модели и квантифицируют (этап A) отклонение значений, полученных с помощью модели, от измеренных значений. Если отклонение не соответствует критерию прекращения (т.е. если отклонение больше заданного значения; точка разветвления K), параметры модели адаптируют (возврат к этапу Par) и моделирование происходит заново. Это осуществляется до тех пор, пока параметры модели не будут выдавать достаточно небольшое отклонение от реальных данных. Как только критерий прерывания соблюден (K), сохраняют текущие результативные параметры модели (Sa) и завершают первую фазу способа оптимизации процесса (Stp).

10 Результат первой фазы, в частности, может быть введен, в виде программного обеспечения, в способ, подогнанный под конкретную установку, с сохраненными параметрами модели. Уже в этом программном обеспечении рабочие параметры могут быть адаптированы автоматически или вручную в серии тестов специализированными пользователями того подхода, который предлагается в изобретении, или операторами
15 установки.

На фиг.6 показана вторая фаза способа оптимизации процесса. Сначала (этапы C, B) заново считывают постоянные и рабочие параметры, которые также могут быть получены на первой фазе способа оптимизации процесса. Аналогично, получают параметры MP модели, определенные и сохраненные (этап Sa) на первой фазе способа
20 оптимизации процесса. Затем выполняется моделирование (этап S), с анализом результатов (этап An) с точки зрения оптимизации, которую надлежит осуществить. Если все еще распознается потенциал для оптимизации (точка разветвления O), осуществляют модификацию рабочих параметров (ModB), после чего заново выполняют моделирование. Этот процесс повторяют путем систематического изменения рабочих параметров, до
25 исчезновения сколь-либо заметного потенциала оптимизации. Лишь затем сохраняют (Sa') и выводят рабочие параметры, распознанные как оптимизированные, с завершением таким образом второй фазы способа оптимизации процесса.

Характеристиками оптимизации могут быть:

- повышение выхода риформата
- 30 - повышение октанового числа
- повышение выхода молекулярного водорода
- повышение выхода сжиженного нефтяного газа
- повышение производства определенных ароматических соединений
- увеличение срока службы катализатора (меньшее закоксование)

Каждая из этих характеристик относится к сравнению с осуществлению работы без оптимизации процесса. Эти характеристики частично расходятся друг с другом, и в зависимости от конкретных требований может быть определено, какая из характеристик является первостепенной, а какая из характеристик является лишь приемлемой или трудно реализуемой, или вообще не может быть реализована. Вместе с тем, было обнаружено, что до определенной степени все или, по меньшей мере, почти все характеристики могут быть реализованы для многих установок благодаря потенциалу оптимизации, причем с увеличением в одноразрядном процентном диапазоне или – учитывая срока службы катализатора – даже выше.

10 Затем, на следующем этапе способа оптимизации процесса работа установки осуществляется с адаптированными рабочими параметрами. Для этой цели выполняют медленную, контролируруемую адаптацию. Реализовать это можно автоматически или вручную, задействовав управляющее устройство 24.

15 В принципе существует опция, что после последнего этапа способа оптимизации процесса способ оптимизации процесса выполняется еще раз, начиная с первой фазы, чтобы еще раз адаптировать параметры модели с измерениями в оптимизированном состоянии (на первой фазе), и с адаптированными параметрами модели еще раз определить, есть ли потенциал для оптимизации. Однако, как правило, в этом нет необходимости, поскольку модель способна надежно обеспечивать адаптацию рабочих параметров.

20 Пример: примерные вычисления для оптимального режима процесса каталитического риформинга были выполнены согласно изобретению для установки с тремя реакторами с неподвижным слоем. Выборка результатов представлена в приведенной ниже таблице:

Q	Y_a	Y_H	Y_{II}	T^1 n	T^2 n	T^3 n	G	Ok
	% масс. ароматич. соединений	% масс. нафтенов	% масс. парафинов					
105	0.12	0.33	0.55	469.2	493.6	530.0	105000	78.9
105	0.12	0.33	0.55	478.4	506.1	530.0	105000	85.0
80	0.12	0.33	0.55	465.7	488.3	530.0	80000	85.0
90	0.12	0.33	0.55	469.9	493.1	530.0	90000	85.0
100	0.12	0.33	0.55	474.7	499.0	530.0	100000	85.0
120	0.12	0.33	0.55	486.4	512.8	529.6	120000	85.0
105	0.22	0.33	0.45	472.6	500.2	530.0	105000	85.0
105	0.12	0.43	0.45	475.1	504.7	529.8	105000	85.0

В данной таблице Q (в $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$) обозначает объемный расход циркуляционного газа, T^i - температуру на входе соответствующего реактора, G - подачу (в $\text{м}^3/\text{ч}$), соответствующую Q , и Ok - октановое число.

5 Путем оптимизации выход продукта риформата может быть увеличен на 3-5% по сравнению с базовым режимом, и выход в 83,1-85,6% был достигнут путем оптимизации на основе выхода, составляющего 78-82% (базовый режим).

Указанная модель для многопараметрической оптимизации каталитического риформинга имеет следующие преимущества по сравнению с другими оптимизациями процесса:

10 - повышение эффективности используемого катализатора путем использования технологически аномальных областей зоны реакции, которые прежде не полностью участвовали в реакциях;

15 - повышение выхода продукта на 3-5% (возможно до 8%) и улучшение его качества путем обеспечения равномерного гидродинамического сопротивления через всю область катализатора с одновременным повышением отношения активной области катализатора к массе парагазовой смеси, протекающей через него.

- влияние на кинетику термохимических реакций внутри парагазовой смеси во время контакта с катализатором путем определения и выбора оптимальных рабочих параметров блока риформинга в выбранных кольцеобразных объемах.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ оптимизации работы установки каталитического риформинга, причем указанная установка имеет множество реакторов, содержащих катализатор, причем через реакторы последовательно течет рабочий газ, содержащий углеводороды и молекулярный водород, при этом состав рабочего газа в реакторах изменяется, причем на выходной стороне последнего из реакторов получают продукт, при этом способ содержит следующие этапы:

- получают конкретные постоянные характеристики и начальные рабочие параметры установки, имеющиеся в течение работы,

- осуществляют компьютерное моделирование химических процессов в реакторах на первой фазе, при этом учитывают различающиеся условия в разных реакторах, причем помимо постоянных характеристик и полученных начальных рабочих параметров в моделирование вводят также результаты измерения химического состава продукта, полученного на выходной стороне последнего реактора, или порции этого продукта,

- осуществляют компьютерные моделирования химических процессов в реакторах с различающимися, измененными рабочими параметрами на второй фазе, следующей за первой фазой, с учетом результатов первой фазы, причем помимо расхода молекулярного водорода в качестве измененных рабочих параметров отдельно регулируют различающиеся температуры рабочего газа на входе каждого реактора, при этом в качестве результата компьютерного моделирования вычисляют химический состав продукта (который зависит от рабочих параметров),

- определяют набор оптимизированных рабочих параметров из результатов второй фазы.

2. Способ по п.1, в котором на второй фазе также изменяют рабочее давление в реакторе в качестве рабочего параметра.

3. Способ по п.2, в котором на второй фазе в качестве изменяемых рабочих параметров также регулируют по отдельности различающиеся давления в каждом реакторе.

4. Способ по любому из п.п.1-3, в котором компьютерные моделирования на первой и на второй фазах выполняют офлайн.

5. Способ по любому из п.п.1-4, в котором измерение химического состава включает в себя газохроматографический анализ.

6. Способ по п.5, в котором для первой фазы результаты газохроматографического анализа получают без предварительной группировки.

7. Способ по любому из п.п.1-6, в котором постоянные характеристики реакторов, а также рабочие параметры сохраняют постоянными для моделирования на первой фазе, как результат определяют вычисленный химический состав продукта в зависимости от параметров модели и сравнивают его с результатами измерения, при этом моделирование повторяют с систематически изменяемыми параметрами модели до тех пор, пока отклонение вычисленного химического состава продукта от результатов измерения не будет соответствовать критерию прекращения, после чего те параметры модели, с которыми был достигнут критерий прекращения, сохраняют как параметры модели, постоянные на второй фазе.

8. Способ по любому из п.п.1-7, в котором после завершения первой фазы генерируют компьютерную программу, причем указанная компьютерная программа содержит программу моделирования для моделирования на второй фазе, а также параметры модели в качестве констант, которые определены на первой фазе.

9. Способ по любому из п.п.1-8, в котором на второй фазе систематически изменяют рабочие параметры для оптимизации продукта в соответствии с заданными критериями оптимизации.

10. Способ по любому из п.п.1-9, в котором объемы реакторов разделяют на коаксиальные полые цилиндрические объемы для первого моделирования, а также для второго моделирования, при этом для моделирования предполагают, что концентрации количеств газа веществ и/или групп веществ в рабочем газе постоянны для одного полого цилиндрического объема, но потенциально различаются от полого цилиндрического объема к полному цилиндрическому объему.

11. Способ осуществления работы установки каталитического риформинга, причем указанная установка имеет множество реакторов, содержащих катализатор, причем через реакторы последовательно течет рабочий газ, содержащий углеводороды и молекулярный водород, при этом состав рабочего газа в реакторах изменяется, причем на выходной стороне последнего из реакторов получают продукт,

при этом работу установки сначала осуществляют постоянным образом с начальными рабочими параметрами, после чего выполняют способ по любому из п.п.1-10,

после чего регулируют работу установки путем замены начальных рабочих параметров на оптимизированные рабочие параметры.

12. Способ, в частности, по п.11, осуществления работы установки каталитического риформинга, причем указанная установка содержит множество реакторов, содержащих катализатор, причем через реакторы последовательно течет рабочий газ, содержащий углеводороды и молекулярный водород, при этом состав

рабочего газа в реакторах изменяется, причем на выходной стороне последнего из реакторов получают продукт, при этом различающиеся температуры рабочего газа по-разному регулируют на входе каждого реактора.

13. Компьютерная программа, выполненная с возможностью загрузки на устройство обработки данных или на систему устройств обработки данных, при исполнении побуждающая устройство обработки данных или систему устройств обработки данных выполнять способ по любому из п.п.1-10.

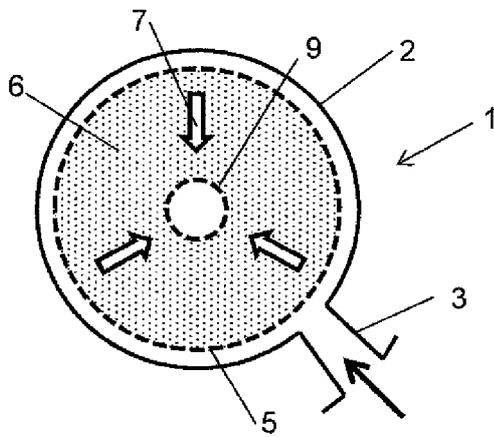
14. Носитель данных, содержащий компьютерную программу по п.13.

15. Компьютерная программа под конкретную установку, предназначенная для оптимизации работы установки каталитического риформинга, причем указанная установка имеет множество реакторов, содержащих катализатор, причем через реакторы последовательно течет рабочий газ, содержащий углеводороды и молекулярный водород, при этом состав рабочего газа в реакторах изменяется, причем на выходной стороне последнего из реакторов получают продукт,

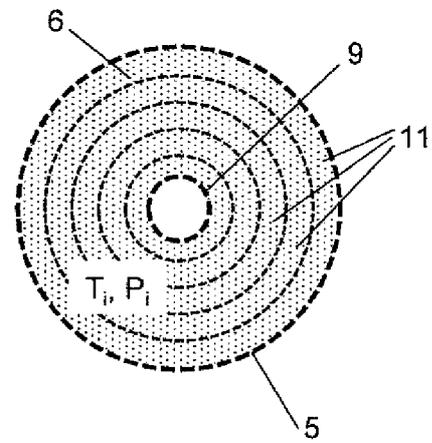
при этом компьютерная программа выполнена с возможностью загрузки на устройство обработки данных или систему устройств обработки данных и конфигурирована для выполнения компьютерного моделирования химических процессов в реакторах с различающимися, измененными рабочими параметрами и для вычисления химического состава продукта,

причем компьютерная программа специально создана для данной установки посредством того, что она содержит параметры модели, являющиеся результатом компьютерного моделирования химических процессов в реакторах, в котором учтены различные условия в разных реакторах и в которое, помимо постоянных характеристик и полученных начальных рабочих параметров, введены результаты измерения химического состава продукта, полученного на выходной стороне последнего реактора, или порции этого продукта.

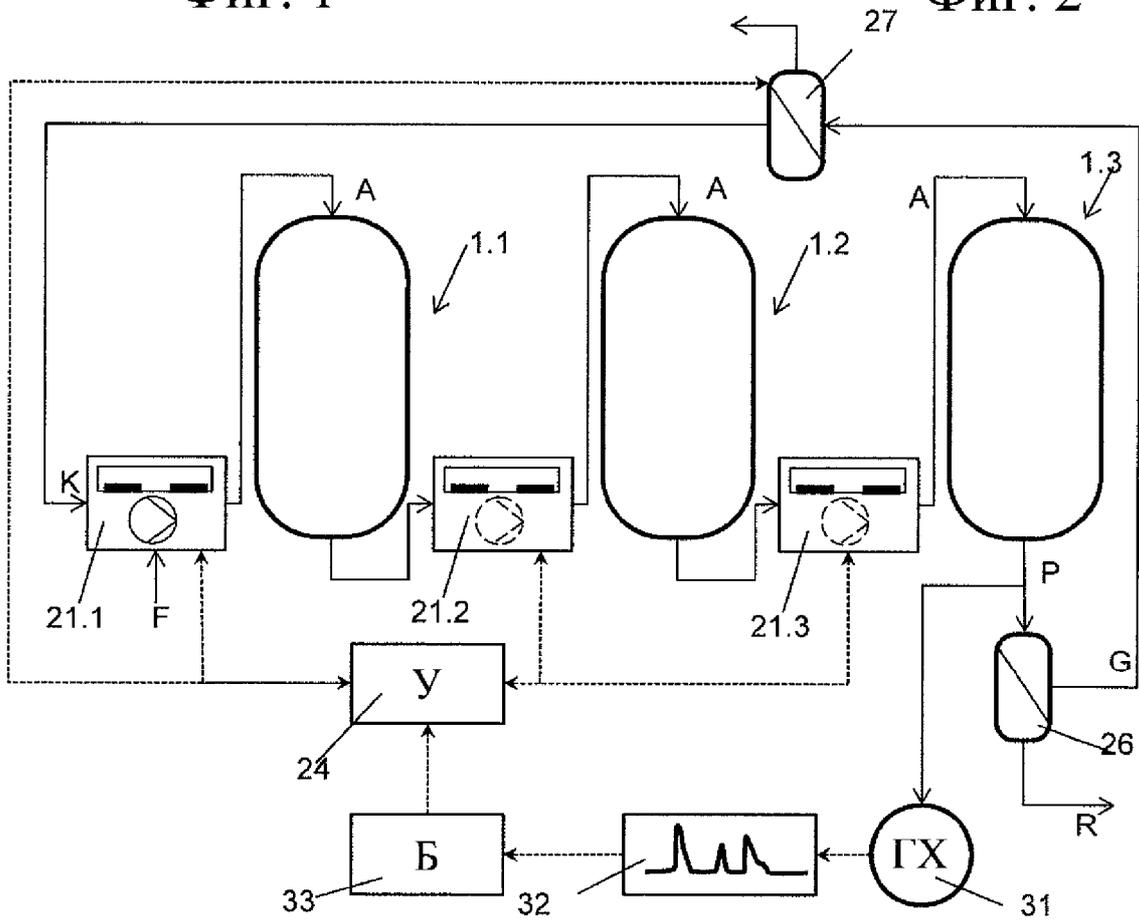
16. Носитель данных, содержащий компьютерную программу по п.15.



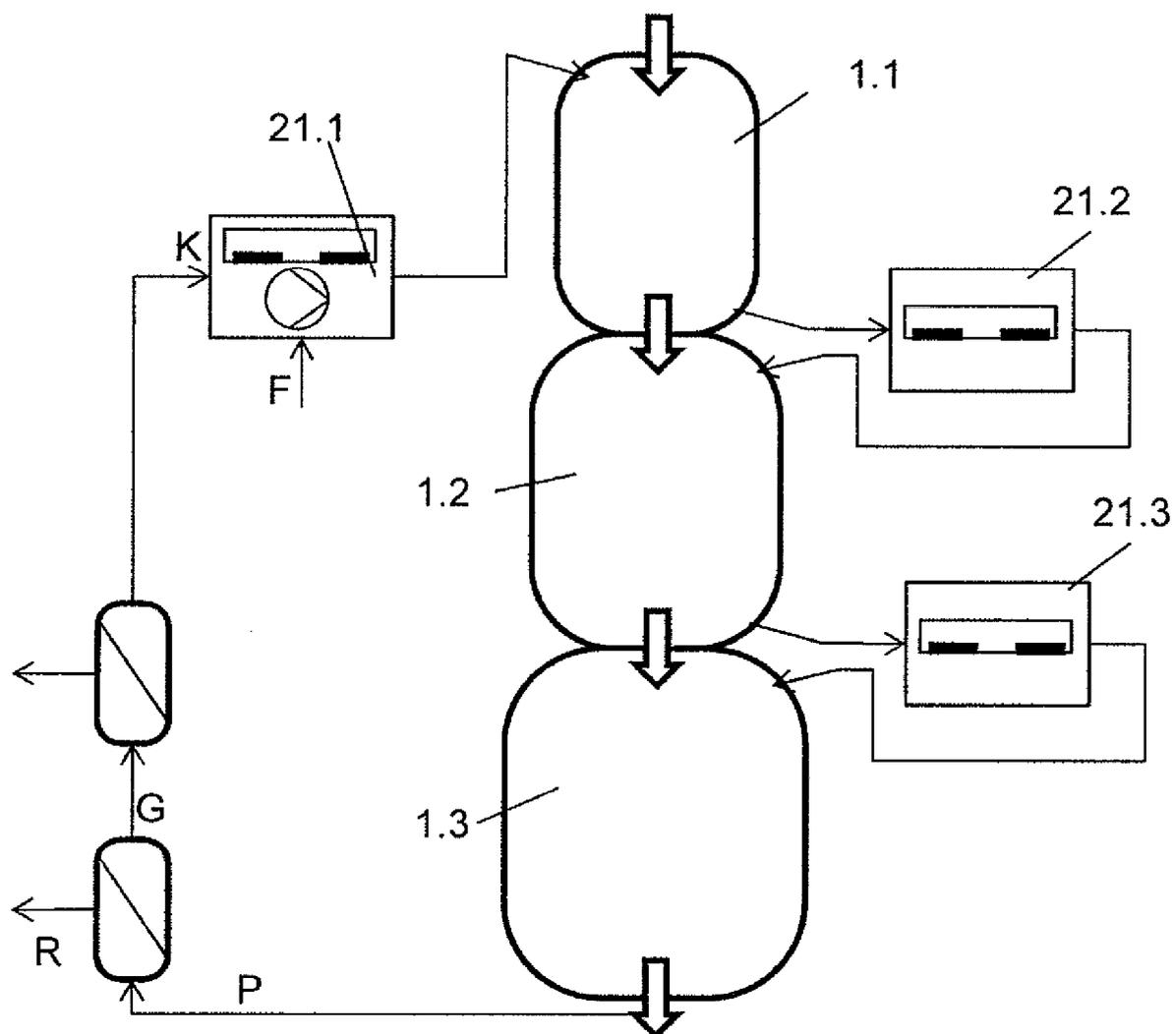
Фиг. 1



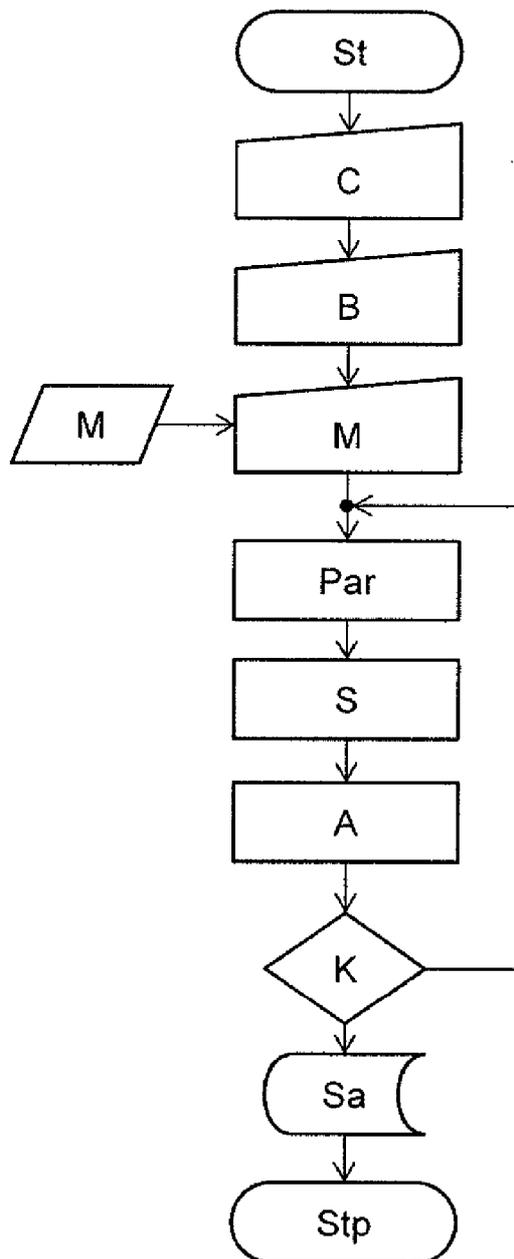
Фиг. 2



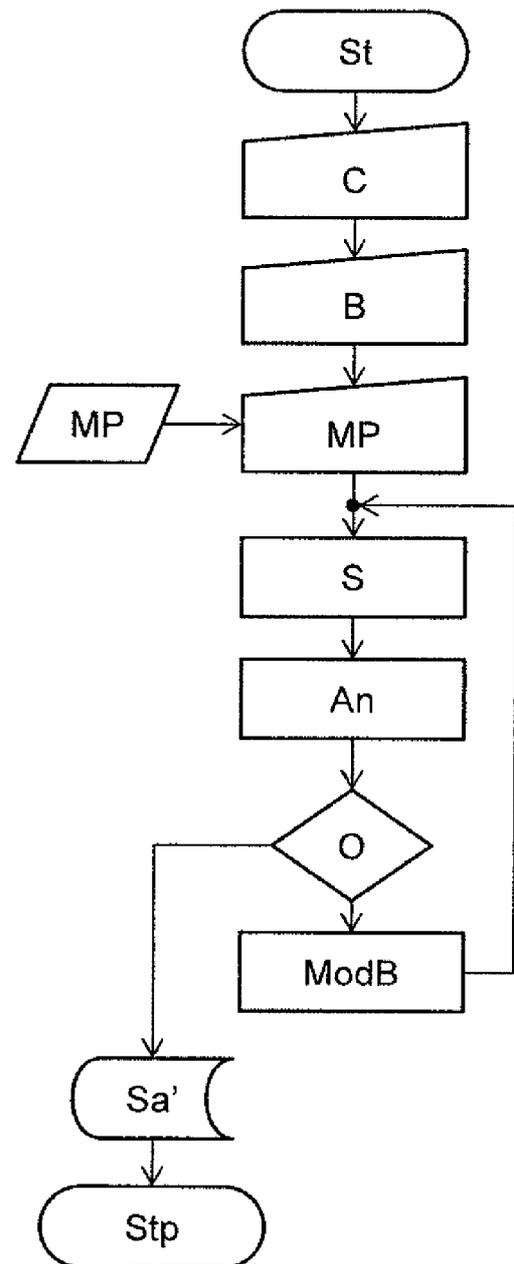
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6