

А. М. Бессарабов, А. А. Казаков, В. Е. Трохин,
О. В. Стоянов

ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ГИБКИЕ CALS-СИСТЕМЫ МНОГОАССОРТИМЕНТНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКТИВОВ И ОСОБО ЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ

Ключевые слова: CALS-технологии, химические реактивы, особо чистые вещества, гибкие системы.

Разработана методология синтеза и практической реализации гибких технологий получения химических реактивов и особо чистых веществ на базе концепции CALS. Разработаны типовые CALS-проекты универсальных модульных установок на примере ассортимента алифатических углеводородов и петролейных эфиров реактивной квалификации.

Keywords: CALS-technologies, chemical reagents, high purity substances, flexible systems.

The methodology of synthesis and practical realization of flexible technologies for the obtaining of chemical reagents and high purity substances was developed on the basis of the CALS concept. Standard CALS projects of universal modular apparatuses on the example of the assortment of aliphatic hydrocarbons and petroleum ethers of the reactive qualification were developed.

Введение

Применение веществ особой чистоты тесно связано с развитием наиболее наукоемких инновационных отраслей промышленности и с современными научными исследованиями в области естественных наук. Проблематика технологии особо чистых веществ очень сложна и многогранна, - только учет всех факторов ведет к успешному разрешению поставленной проблемы. Это во многом связано с применением информационных систем поддержки (что сокращает объем рутинных работ, аккумулирует все имеющиеся в этой области интеллектуальные знания) и автоматизацией процедуры принятия оптимального аппаратурно-технологического решения [1].

В настоящее время, предприятия, производящие сложную наукоемкую продукцию (в т.ч. высокочистые материалы), находятся в условиях острой конкурентной борьбы и постоянно увеличивающейся динамики рыночных отношений, что создает необходимость непрерывного усовершенствования технологий производства, ускорения исследований и проектирования, повышение технического обслуживания. Решение этих задач затруднительно без использования современной информационной поддержки жизненного цикла продукции на основе стандартизации методов представления данных на каждой стадии жизненного цикла продукции и безбумажного электронного обмена данными. Для этих целей наиболее перспективной системой компьютерной поддержки является CALS-технология (Continuous Acquisition and Life cycle Support - непрерывная информационная поддержка жизненного цикла продукта) [2].

Разработка гибких технологий химических реактивов и особо чистых веществ в рамках международных информационных CALS-стандартов (ISO-10303) является значимой научной и практической задачей, решение которой позволяет получать особо чистые продукты, с показателями качества не уступающими зарубежным аналогам, а также существенно сокращает время разработки, снижает затраты на проектирование, изготовление, эксплуатацию и

ремонт оборудования, имеющего компьютерную техническую документацию в соответствии с требованиями международных стандартов [3].

Проведенные исследования выполнялись в рамках конкурсных проектов федеральных органов управления России: Минобрнауки РФ (№№ 02.513.12.3072, 02.513.12.3073 в рамках ФЦНТП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2007-2012 годы») и Минпромторга (№16.1CA.12.8003 в рамках ФЦП «Разработка, восстановление и организация производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов и малотоннажной химии для вооружения, военной и специальной техники на 2009-2011 годы и на период до 2015 года»).

1. Структура гибких многоассортиментных производств в предметной области «химические реактивы и особо чистые вещества»

При создании многоассортиментных производств химических реактивов и особо чистых веществ нами рассматриваются четыре иерархических уровня: номенклатурный, производственно-технологический, организационно-технологический и организационно-производственный. Созданной иерархической структуре соответствуют три вида гибкости: технологическая, структурная и организационная [4].

При рассмотрении структуры цеха с точки зрения его реконструкции возникает вопрос о создании отделения с новой структурой, базирующегося не на индивидуальных химико-технологических системах (ИХТС), а включающего в себя многоцелевые (по их использованию) узлы ХТС, совмещенные ХТС или гибкие ХТС. Поскольку ИХТС всех отделений, входящих в цех, имеют общие циклы производства, очевидна целесообразность объединения (реконструкции) ИХТС каким либо из четырех способов:

- объединение циклов подготовки сырья на основе общих физико-химических процессов, осуществляемых при обработке (подготовке) исходных

ингредиентов (растворение, фильтрация, дробление, измельчение, обжиг и т.д.);

- объединение технологических циклов по общности химизма процессов, однотипности используемого оборудования;
- организация общего фасовочного центра гибкого производства (ГП), который составит из трех операционно-технологических модулей упаковки ГП: в контейнеры, в картонные барабаны, в мешки (крафт-, полиэтиленовые и т.д.);
- совокупность всех объединенных циклов.

Необходимым условием организации цеха по принципу гибкой системы является создание отделения типа "полного объединения".

Организация общего фасовочного центра ГП, как и объединенного цикла подготовки сырья, является более простой технологической и технической задачей по сравнению с задачей создания объединенного технологического цикла, поскольку при фасовке ГП и при подготовке сырья выполняются однотипные технологические операции и используется одинаковое технологическое оборудование.

Рассмотрим, например, фасовочный цикл ИХТС при условии упаковки ГП в контейнеры. Он включает следующий набор технологических элементов: склад пустых контейнеров, весы для контроля заполнения контейнера (тарирование загруженного продукта), разгрузочное устройство (труба либо другое техническое устройство, соединяющее загрузочный бункер или технологический аппарат с горловиной контейнера), авто- и электропогрузчик для складирования упакованной продукции. Этот набор не зависит от вида ГП и условий упаковки: аналогичным будет процесс фасовки и в барабаны, и в мешки. Меняется только тара, а технологические операции сохраняются.

Сложность организации фасовочного центра заключается в необходимости скомпоновать технологическое оборудование таким образом, чтобы все технологические стадии фасовки ГП обслуживаемых ХТС пространственно сходились в одну территориальную точку, в которой организован фасовочный центр.

При организации объединенного цикла подготовки сырья аппаратурной основой должны быть технологические модули для реализации определенных классов физико-химических процессов. Очевидно, что сложность организации данного цикла определяется последовательностью проведения технологических операций. Поскольку здесь необходимо решать вопрос о химической аналогии обрабатываемых веществ, следует предусмотреть режим промывки используемого технологического оборудования в случае, если за веществом А нельзя непосредственно обрабатывать вещество Б.

Организация объединенного технологического цикла является наиболее сложной задачей, так как при ее решении возникают вопросы совмещения выпускаемых продуктов не только на основе сходства их физико-химических свойств, применяемого способа получения, но и на основе принадлежности их к определенному классу веществ. В производстве высокочистых веществ в зависимости от степени

чистоты целевого продукта различают два основных класса веществ: химические реактивы и особо чистые вещества. Перед началом работы по созданию гибких производств необходимо выяснить: химический состав целевого продукта, его класс и состав лимитируемых примесей; способ получения продукта и реализации технологического процесса; типы используемого оборудования.

Одной из важных проблем является обоснование необходимости организации производства по принципу ГПС. Нами рассмотрены различные критерии эффективности ГПС. Рекомендовано в качестве критерия эффективности применять отношение приращения затрат на организацию производства по принципу ГПС к приращению потребительской ценности ассортимента производимой продукции. Такой подход имеет смысл, когда речь идет о создании нового производства для нового ассортимента. В условиях же реконструкции действующего производства основным показателем является сравнительная оценка себестоимости выпускаемых продуктов до и после реконструкции.

Для получения количественной оценки целесообразности синтеза ГПС необходимо провести анализ действующего производства с целью выделения групп процессов, для которых это целесообразно. Первым этапом анализа является декомпозиция выпускаемого ассортимента на основе иерархического подхода по трем основным признакам: по технологическому сходству, химическому сходству и по классам целевых продуктов.

Каждый из перечисленных признаков имеет свои уровни градации. Так, технологическое сходство подразделяется на сходство способов подготовки сырья (растворение, фильтрация, дробление и т.д.), способов производства (тип превращения сырья в целевой продукт, однотипность технологических операций и используемого оборудования), способов фасовки ГП.

Химическое сходство определяется прежде всего принадлежностью соединений к одному и тому же классу (кислота, основание, соль, эфир и т.д.), внутри которого выделяются подуровни на основании физико-химических свойств соединений данного класса. Например, соли группируются по характеру кислотного остатка (нитраты, сульфаты, фосфаты и т.д.).

Вторым этапом анализа является агрегирование процессов по технологическому сходству. При этом объединяются различные циклы производства: подготовки сырья, получения продуктов (целевых веществ) и фасовки ГП. Каждый цикл организуется в виде отдельных совмещенных схем, где продукты производятся с учетом их физико-химических признаков, выделенных выше. Система гибких взаимосвязей между совмещенными узлами позволяет организовать производство в виде гибкой ХТС.

С позиций системного анализа структура цеха, реконструированного на основе ГПС, имеет четыре иерархических уровня: номенклатурный (I), производственно-технологический (II), организационно-технологический (III) и организационно-

производственный (IV). Иерархической структуре соответствуют три вида гибкости: технологическая,

структурная и организационная (рис. 1).

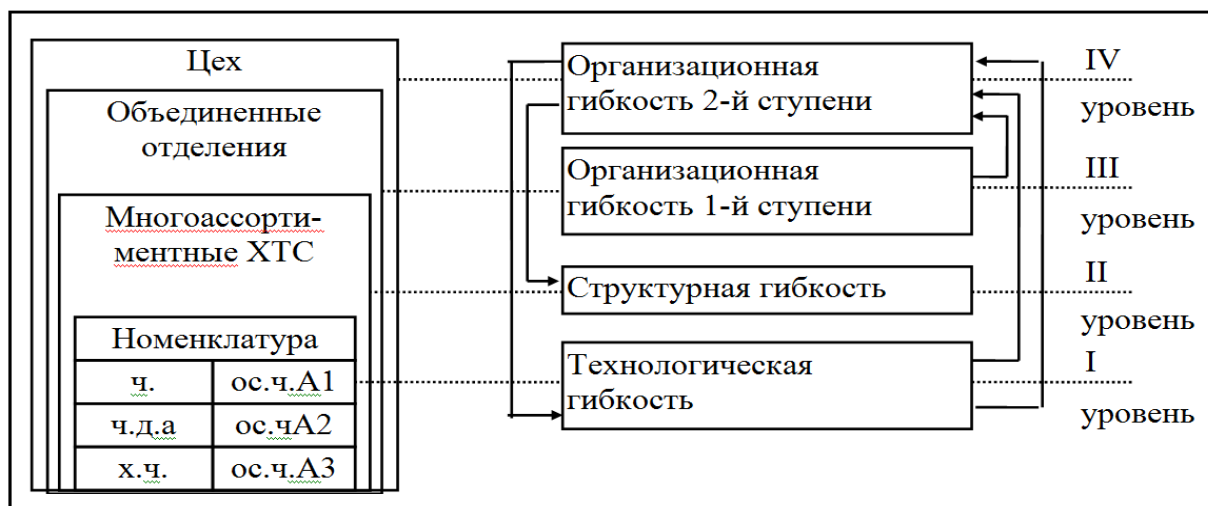


Рис. 1 – Иерархическая цеховая структура на основе гибких производственных систем для предметной области «химреактивы и особо чистые вещества»

Нами предложены следующие характеристики уровней:

Номенклатурный уровень. Признак: продукт одного вида или одна технологическая стадия. Задачи: расширение набора (пакета) квалификаций одного продукта; варьирование мощности технологической стадии. Функционирование данного уровня обеспечивается технологической гибкостью, которая определяется способностью на имеющемся оборудовании выполнять несколько технологических задач за счет гибких технологических способов получения заданных веществ (по номенклатуре) или при незначительных затратах на переналадку оборудования (остановка на промывку, перекоммутация трубопроводов и прочие операции).

Производственно-технологический уровень. Признак: многоассортиментное производство. Задачи: оптимальное использование полупродуктов и общих исходных реагентов; использование элементов гибкости с целью расширения производственных групп по наименованиям; варьирование мощности всего технологического процесса. Реализация данного уровня обеспечивается структурной гибкостью, которая характеризуется возможностью наращивания системы на основе модульного принципа, а также свойствами аппаратов периодического действия (АПД) (многофункциональное использование одного и того же аппарата).

Организационно-технологический уровень. Признак: объединенное отделение. Задачи: оптимизация аппаратного оформления; минимизация производственного цикла. Действие данного уровня обеспечивается организационной гибкостью 1-й ступени, которая дает возможность осуществить максимальную загрузку технологического оборудования при реализации производственного цикла. Его введение обусловлено тем, что все объединенные отделения в пределах цеха связаны между собой как материальными, так и информационными потоками.

Организационно-производственный уровень. Признак: цех как сложная кибернетическая система. Задачи: стабилизация материальных и информационных потоков между объединенными отделениями; распределение сырьевых, энергетических и трудовых ресурсов. Функционирование этого уровня обеспечивается организационной гибкостью 2-й ступени, в которую входит комплекс задач гибкого календарного планирования и оперативно-диспетчерского управления с централизованным распределением работ.

Для основного из рассматриваемых в нашей работе производственно-технологического уровня в качестве примера была приведена разработка гибкого многоассортиментного производства алифатических углеводородов и петролейных эфиров реактивной квалификации [5].

2. Гибкая технология алифатических углеводородов и петролейных эфиров реактивной квалификации

Выпускаемые нами алифатические углеводороды (пентан, гексан, гептан, нонан, изооктан, декан) и петролейные эфиры (40-70, 70-100, 65-75, 90-110), находят широкое применение в различных отраслях науки и техники: органический и элементоорганический синтез; фармацевтика и парфюмерия; составление, испытание и аттестация различных видов моторного топлива; очистка и обезжиривание деталей и оборудования. Особое место занимает их использование в химическом и физико-химическом анализе, экстракции примесей различной природы из анализируемых объектов, применение в качестве стандартов в газожидкостной и высокоэффективной жидкостной хроматографии. Широкий круг отраслей и направлений применения обуславливает большое разнообразие требований к качеству данных продуктов, для выполнения которых невозможно ограничиться каким-либо одним

методом очистки.

Технологическое производство алифатических углеводородов строится по обычной схеме от сырья (растворители технических марок) к продуктам более высоких квалификаций («чистый», «чистый для анализа», «химически чистый»). Для получения химических веществ реактивной квалификации необходимо специализированное оборудование, позволяющее добиваться требуемого качества с помощью специальных перемешивающих устройств, конструктивных материалов, совмещения стадий и др. Особенно перспективно в этом направлении применение аппаратных модулей глубокой очистки.

Конструктивно технологическая схема строится из последовательности стандартизованных аппаратных модулей, на каждом из которых реализуется процесс очистки от определенной группы примесей и выделение основного продукта. Выбор

модулей, последовательность их использования, организация и формирование технологических потоков определяются достижением необходимого уровня качества и выбором сырья.

Созданная нами технология получения ассортимента алифатических углеводородов и петролейных эфиров (рис. 2) базируется на 5 типовых аппаратных модулях: адсорбции, химической очистки, предварительной ректификации, точной ректификации и финишной ректификации. Модули адсорбции и химической очистки не являются выпускающими, т.е. с них производится вывод соответствующей готовой продукции. Модули предварительной, точной и финишной ректификации являются выпускающими, т.е. с них производится вывод соответствующей готовой продукции. Между ними и модулями ректификации существуют технологические потоки (т.н. внутренние), с которых отбор продукции не производится.

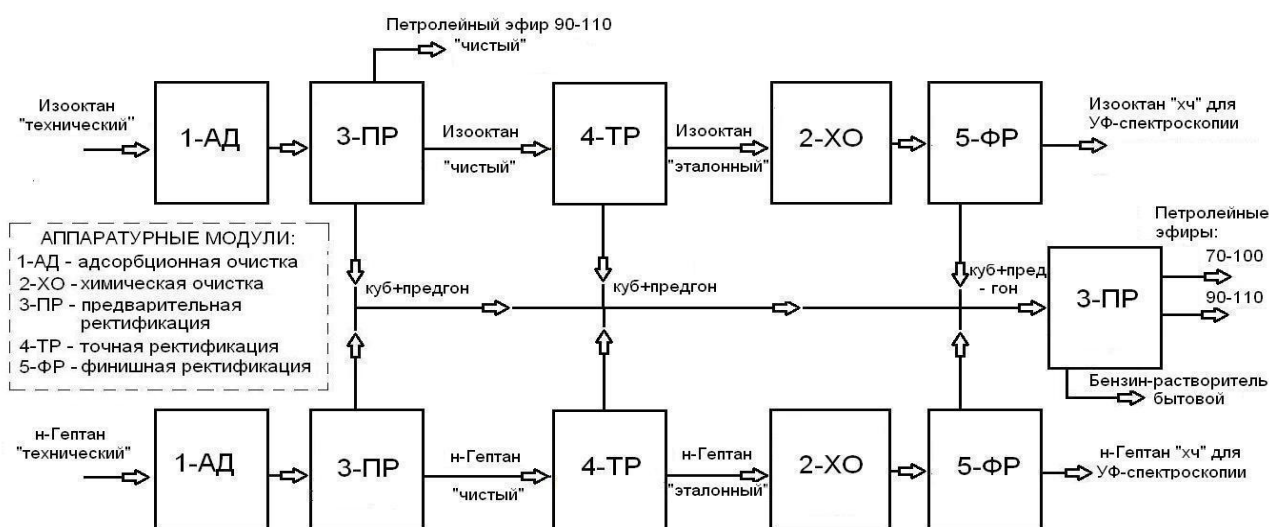


Рис. 2 – Гибкая схема технологии получения алифатических углеводородов и петролейных эфиров реактивной квалификации

В типовой модульной технологической схеме (рис. 2), на примере переработки н-гептана и изооктана, показаны связи между отдельными технологическими модулями, пересечение и объединения технологических потоков (основных, побочных и возвратных). Основным технологическим потоком является последовательный процесс очистки технологического сырья (н-гептана «технического»; изооктана «технического») до химического реактива низких квалификаций (н-гептан «чистый», изооктан «чистый»), более высоких (н-гептан «эталонный» по ГОСТ 25828-83, изооктан «эталонный» по ГОСТ 12433-83), до реактивов специальной очистки (н-гептан «химически чистый» для УФ-спектроскопии; изооктан «химически чистый» для УФ-спектроскопии).

Побочными потоками являются технологические процессы получения петролейных эфиров марок 70-100, 90-110, которые получают путем переработки и переквалификации отходов основного технологического потока. При этом квалификация получаемого продукта, первоначально прини-

маемая как «чистая» (петролейный эфир 70-100 «чистый» и 90-110 «чистый»), путем доочистки может быть повышена до более высокой.

3. Разработка аппаратных модулей на основе концепции CALS

Разработка аппаратных модулей осуществлялась в рамках наиболее современной и перспективной системы компьютерной поддержки – CALS-технологии. В основе концепции CALS лежит комплекс единых информационных моделей, стандартизация способов доступа к информации и ее корректной интерпретации.

CALS-технологии, в частности стандарт ISO 10303 STEP, предлагают способ решения проблемы электронного представления проектно-конструкторской информации при помощи использования стандартизованного интегрированного описания изделия. Данные о конструкции в формате STEP (Standard for the Exchange of Product model data) могут быть использованы для технической подготовки и управления производством, планиро-

вания потребностей и т.д.

Для разработки аппаратных модулей на основе информационного CALS-стандарта ISO 10303 STEP использована типовая схема (протокол применения) для постоянного технологического регламента [6]. В основе информационной структуры лежит «Положение о технологических регламентах производства продукции на предприятиях химического комплекса» от 6 мая 2000 г.

В качестве примера типового CALS-проекта нами рассматривается модуль химической очистки (ХО), входящий в гибкую технологию алифатических углеводородов реактивной квалификации (рис.2).

Модуль химической очистки (рис. 3) предназначен для очистки технологического сырья от

примесей, имеющих большую химическую активность, чем отделяемое вещество [7]. При очистке алифатических углеводородов модуль химической очистки можно использовать для отделения непредельных углеводородов, ароматических углеводородов, активных соединений, соединений серы, фосфора, тяжелых углеводородов. Процесс обычно ведется в две стадии: собственно химической обработки (обработка сырья химическим реактивом, в процессе которой примесь переводится в более легкоотделимую от основного вещества форму) и отмывки, в процессе которой удаляется избыток химического реактива (действующего агента) и происходит отделение продуктов реакции примесей с химическим реактивом.

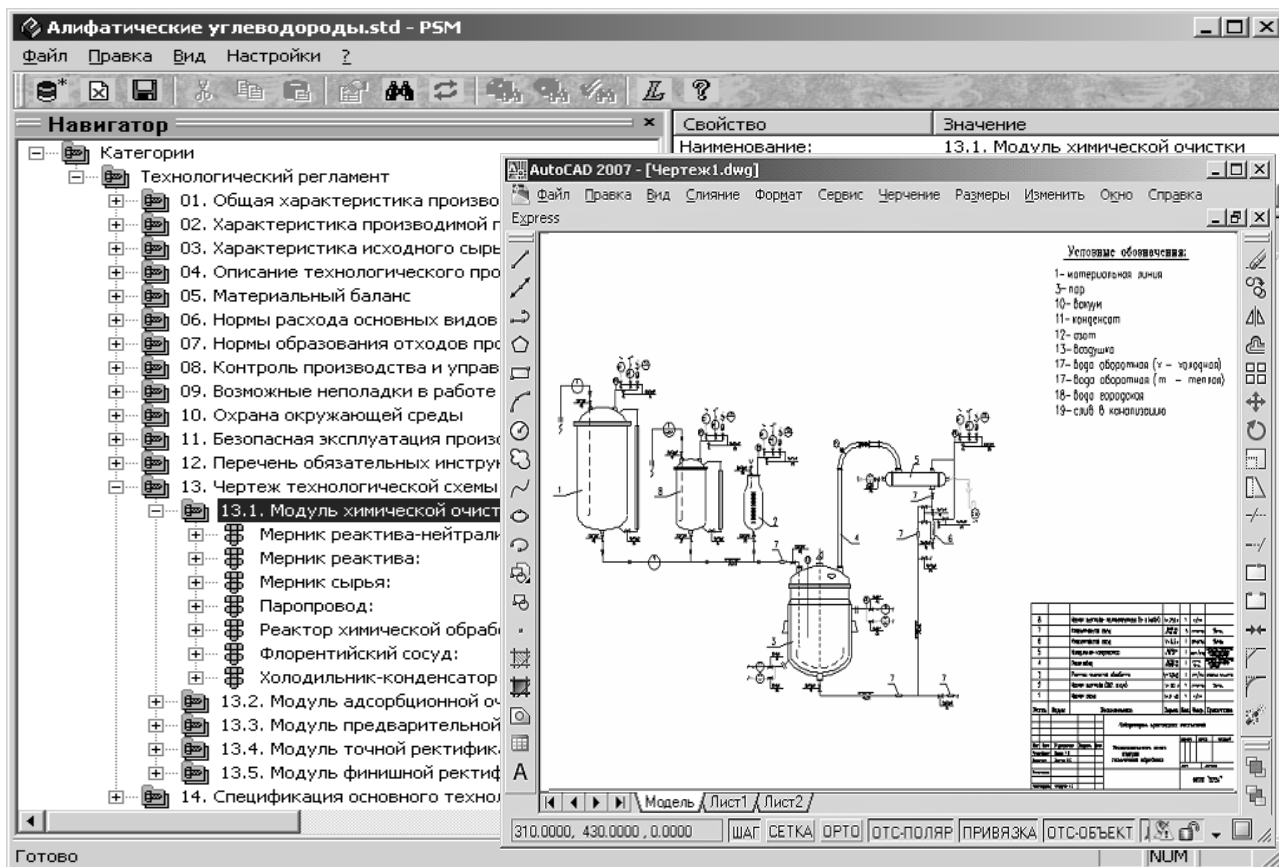


Рис. 3 – Элемент CALS-проекта модуля химической очистки

Основой модуля химической очистки является обычный реактор смешения, объем которого выбирается по условиям производительности и иным технико-экономическим показателям. Выбор конструкционных материалов определяется тем, что в процессе химической обработки используются агрессивные и химически активные вещества. Определенную трудность может представлять тот факт, что характер коррозионного воздействия на разных стадиях различен (кислота и щелочь). Однако из сравнения степени воздействия можно заключить, что определяющим фактором является воздействие реактива – действующего агента (бром, олеум), а не нейтрализатора (раствор щелочи).

В технологическую схему модуля очистки (рис. 3) входят: реактор смешения, эмалированный,

снабженный якорной мешалкой, а также оборудованный донным затвором, термометром, пароводяной рубашкой, с возможностью нагрева и охлаждения; емкость сырья – вертикальная емкость, выполненная из стали 12X18H10T и предназначенная для приемки сырья с последующим его дозированием в реактор; емкость химического реактива (действующего агента) – вертикальная емкость из стекла Simax, предназначенная для приемки и дозирования в реактор химического реактива – действующего агента (брома, олеума); емкость отмывочной жидкости (реактор щелочи) – вертикальная емкость из нержавеющей стали 12X18H10T, предназначенная для приемки, хранения и дозирования в реактор отмывочного щелочного раствора.

Реактор снабжен обратным холодильником,

в качестве которого может быть любой аппарат такого рода с коррозионно-стойкими рабочими поверхностями – футерованными фторопластом, эмалированными, изготовленный из инертных конструкционных материалов (графита, карбида кремния, стекла, фторопласта). Нами использован кожухотрубчатый теплообменник фирмы «Поликс+» с обечайкой футерованной фторопластом и трубками из карбида кремния. Возможно использование пластинчатых теплообменников из графита (блочного или пластинчатого типа), теплообменников с рабочими поверхностями из фторопласта типа ТФК, а при малых нагрузках и небольшом объеме раствора (до 0,5м³) удобно воспользоваться стеклянными теплообменниками из стекла Simax.

Паропровод составной, монтируется из стеклянных фасованных деталей Simax с переходниками, уплотнениями, сильфонным компенсаторами из фторопласта-4. Возможно применение металлических деталей трубопровода дифурированных фторопластом. Линия возврата конденсата из холодильника обратно в реактор оснащается расслаивателем для возможности отделения воды по методу Дина–Старка.

В настоящее время выпуск конкурентоспособной продукции невозможен без информационной поддержки на базе компьютерных CALS-технологий, то есть с использованием единого стандартизированного информационного пространства

на всех этапах жизненного цикла продукции – от проектирования до эксплуатации. Внедрение информационных CALS-технологий при разработке аппаратных модулей позволяет не только повысить качество исследовательских и конструкторских работ, но и обеспечить полное компьютерное сопровождение, включающее всю необходимую документацию в электронном виде

Литература

1. А.М. Бессарабов *Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов получения высокочистых твердофазных продуктов*, Реактивы и особо чистые вещества, М.: НИИТЭХИМ, 1988. 50 с.
2. A. Saaksvuori, A. Immonen *Product Lifecycle Management*, 3rd edition, Springer, 2010. 257p
3. Е.В. Судов, *Управление качеством*, 5, 24-25 (2009)
4. A. Bessarabov, I. Bulatov, A. Kvasyuk, A. Kochetygov, *Chemical Engineering Transactions*, **25**, 435-440 (2011)
5. В.Е. Трохин, А.Г. Вендило, А.М. Бессарабов, А.А. Казаков, Т.И. Степанова, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, **48**, 5, 4-9 (2012)
6. Т.И. Степанова, А.М. Бессарабов, М.А. Гришин, А.В. Поляков, О.В. Стоянов, Г.Е. Заиков, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 14, 218-225 (2013)
7. А.М. Бессарабов, М.Ю. Фенина, А.И. Кузнецов, С.С. Иевлева, *Высокочистые вещества*, 1, 120-122 (1988)

© **А. М. Бессарабов** – д-р тех. наук, проф., заместитель директора по науке, Научный центр «Малотоннажная химия» (НЦ МТХ), bessarabov@nc-mtc.ru; **А. А. Казаков** – аспирант, Научный центр «Малотоннажная химия» (НЦ МТХ); **В. Е. Трохин** – к.х.н., директор, Научный центр «Малотоннажная химия» (НЦ МТХ); **О. В. Стоянов** – д-р тех. наук, проф., зав. каф. технологии пластических масс КНИТУ, ov_stoyanov@mail.ru.