

В.С. ПАСТУШЕНКО, А.А. СТОПАКЕВИЧ

Одесский национальный политехнический университет

А.А. СТОПАКЕВИЧ

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В МЕТАНОЛ И СИСТЕМЫ ЕГО АВТОМАТИЗАЦИИ

Рассмотрено использование подхода к проектированию технологического процесса утилизации углекислого газа в метанол, при котором интегрируются задачи моделирования статике и динамики технологического процесса на основе универсальных пакетов технологического моделирования с задачами синтеза системы автоматического управления.

Ключевые слова: углекислый газ, метанол, технологический процесс, система управления, проектирование.

V.S. PASTUSHENKO, A.A. STOPAKEVICH

Odessa National Polytechnic University

A.A. STOPAKEVICH

O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

INFORMATION COMPUTER SYSTEM FOR DESIGN OF RECYCLING CARBON DIOXIDE IN METHANOL TECHNOLOGICAL PROCESS AND ITS CONTROL SYSTEM

A concept of an integrated approach to the development of the methanol production process based on utilization of carbon dioxide obtained from boilers and the power plants, as well as the automation of this technological process is considered. The basic contradictions of the methanol production technological process are analyzed from the perspective of an integrated approach. A list of the main tasks that need to be solved is formulated. The capabilities of existing software for the solution of the problem are analyzed. The main difficulties that may arise with the accuracy and adequacy of the implementation and settlement problems of mathematical modelling are spotlighted. It is shown that the solution of all tasks, in relation to the methanol production technological process, requires a certain combination of universal package technology simulation, specialized software and mathematical packages.

Keywords: carbon dioxide, methanol, technological process, control system, design

Постановка проблемы. Утилизация углекислого газа котельных и ТЭС в горючее, которое можно повторно использовать, является актуальной проблемой энергетики и экологии Украины. Продуктом, который позволяет эффективно утилизировать углекислый газ, является метанол. В последнее время метанол все чаще используется и в качестве топлива для ТЭС, и как моторное топливо, заместитель автомобильного бензина. Из-за высокого октанового числа метанол часто используется в двигателях гоночных автомобилей.

Нерешенные задачи. Самый современный каталитический процесс утилизации углекислого газа в производство метанола имеет следующий вид: смесь углекислого газа и водорода подается в смеситель, нагревается в теплообменнике отходящими газами и попадает в реактор синтеза (РС). Продукты синтеза охлаждаются в холодильнике, сконденсированный метанол собирается в сепараторе, а непрореагировавший газ смешивается со свежим газом (рецикл) и снова направляется в реактор синтеза. Метанол-сырец из сепаратора подается в ректификационную колонну (РК), верхним продуктом которой является товарный метанол. Однако, для расчета процесса и его подстройки под практически бесплатные выбросы углекислого газа тепловых станций и котельных, необходимо иметь инструмент расчета регламента технологического процесса (ТП), параметров оборудования и системы автоматического управления (САУ). Подход, связанный с одновременным расчетом оборудования и системы управления, назовем интегрированным. Для реализации такого подхода требуется осуществить выбор соответствующего программного обеспечения (ПО).

Анализ литературы. Сейчас доступен ряд видов ПО, с помощью которого можно осуществить интегрированный подход. Это Aspen HYSYS [1], Aspen Plus [2], UniSim [3], ChemCAD [4], Pro-II [5], COCO [6]. Из перечисленных пакетов полнофункциональными, т.е. позволяющими моделировать весь цикл от конструктивного расчета технологических аппаратов до моделирования динамики технологических процессов в них, являются только первые четыре. В ПО Aspen Plus максимально широко представлены возможности для моделирования сложных случаев ректификации, сделан акцент на точность моделирования технологических аппаратов. Преимуществом ПО ChemCAD является удобство работы и отсутствие разделения режимов статике и динамики (что позволяет избежать повторных операций преобразования моделей). Преимуществом ПО HYSYS является внимание к взаимодействию технологических аппаратов в схеме, точность моделирования технологических аппаратов, наличие развитых интерфейсов для взаимодействия с другим программами, удобный пользовательский интерфейс. UniSIM – это ПО, базированное на лицензированном коде HYSYS, адаптированное под технические средства автоматизации и программное обеспечение компании Honeywell. В последние несколько лет возможности расчета и моделирования в Aspen Plus и Aspen HYSYS сближаются, поскольку ими теперь занимается одна

компания. Таким образом, анализ приведенной литературы показывает, что наилучшим образом для интегрированного расчета технологического процесса производства метанола подходит ПО Aspen HYSYS.

Цель статьи. В статье разработана методика использования такого подхода к расчету технологического процесса производства метанола, при котором на основе универсальных пакетов технологического моделирования (УПТМ) интегрируются задачи расчета режима ТП, моделирования статики и динамики ТП и синтеза системы автоматического управления.

Основное содержание. Интегрированный подход позволяет выявить и преодолеть следующие противоречия, возникающие в процессе расчета ТП и САУ ТП:

- между достижением оптимальности рабочего режима каждого агрегата и оптимальностью всего ТП, включающего рециркулирующие потоки,
- между достижением оптимальности технологического расчета и оптимальностью управления с точки зрения разработчика системы автоматизации,
- между удобством использования линейных математических моделей и регуляторов при построении САУ и нелинейным поведением реальных технологических объектов.

Обобщенная схема действий в рамках разработанной методики интегрированного подхода показана в виде диаграммы процесса разработки (BPMN), приведенной на рис. 1.

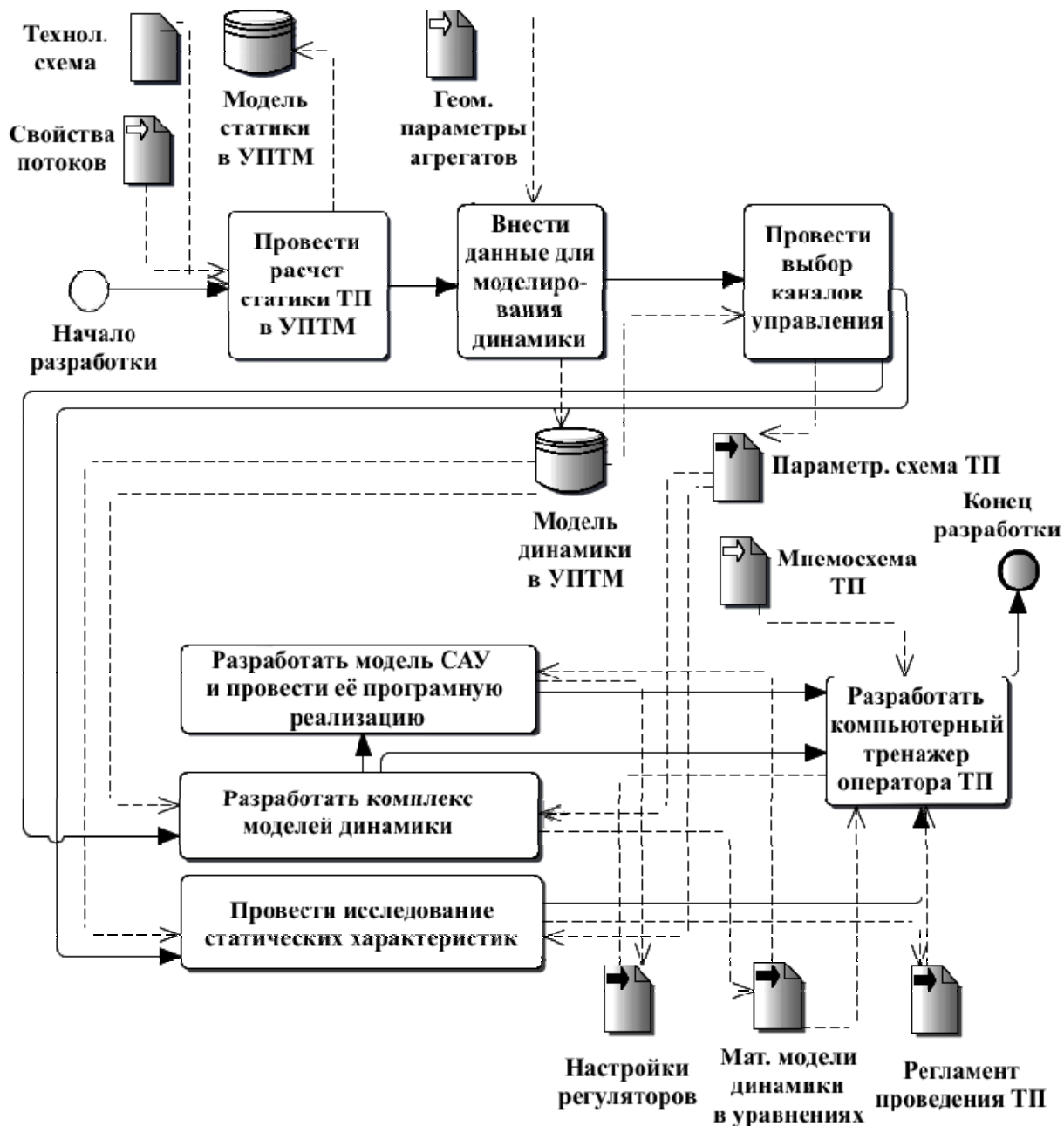


Рис. 1. BPMN-диаграмма процесса разработки с использованием интегрированного подхода

ТП производства метанола включает два сложных и ответственных технологических агрегата – реактор синтеза (РС) и ректификационную колонну (РК). Вспомогательными агрегатами являются

теплообменники и сепаратор.

Задача управления РС в рабочем режиме может быть удовлетворительно решена с помощью ПИД-регулирования температуры или концентрации. Математическая модель канала в рабочем режиме в таком случае может быть с достаточной точностью описана как передаточной функцией второго порядка, так и первого порядка с запаздыванием. Однако диапазон адекватности такой линейной модели сравнительно мал в силу экспоненциальной зависимости скорости реакции от температуры в реакторе. Поэтому САУ на базе ПИД-регулятора не достаточно хорошо справляется с возмущениями [7]. В рассмотренном ТП проблема усугубляется наличием рециркулирующего потока, который приводит к постоянному изменению концентрации поступающей в реактор смеси, что увеличивает требования к системе управления. Компенсация возмущения по концентрации в силу нелинейности статической зависимости выходной концентрации и температуры от входной в первую очередь должна решаться на этапе технологического расчета. Это возможно путем изменения физических размеров реактора и/или добавлением дополнительных смесителей, которые стабилизируют входную концентрацию агрегатов. Таким образом, для достижения управляемости при расчете ТП необходимо определить оптимальную величину рецикла и концентрации, геометрические размеры реактора, а также запас расхода хладагента, чтобы САУ реактора способна была справиться с возмущениями.

Применительно к бинарной РК для метанола-сырца указанное противоречие проявляется в проблеме выбора количества тарелок, номера питающей тарелки, способа обогрева, от чего зависит экономическая эффективность ТП и качество очистки конечного продукта. Известно, что в терминах модели первого порядка с запаздыванием, увеличение количества тарелок приводит к увеличению постоянной времени и времени запаздывания в каналах объекта, связанных с концентрацией, температурой и давлением [8], что делает объект не только более инерционным в терминах линейных моделей, но и более управляемым с точки зрения разработки систем управления из-за большего интервала линейности в статических характеристиках.

Задача выбора номера питающей тарелки как показано в [9] тесно связана с возможностью системы управления справляться с различными возмущениями. Для рассматриваемой РК критически важным параметром является концентрация верхнего продукта (товарного метанола), потери метанола в нижнем продукте менее критичны. Для этого случая в работе [9] показано, что для наиболее легкого поддержания концентрации верхнего продукта питающую тарелку необходимо размещать ближе к верху РК, что позволяет более легко компенсировать возмущения, как по расходу, так и по концентрации питания. Это объясняется неравномерным распределением жидкости на тарелках в реальной РК, что обычно не учитывается в классических технологических расчетах РК и не отображается во многих математических моделях динамики РК, которые описывают динамику потарелочно.

Отдельно стоит отметить, что задача выбора переменных системы управления РК при использовании децентрализованных регуляторов ПИД-семейства также не относится к классу однозначно решаемых. Можно выделить три подзадачи при такой постановке: управление уровнями и давлением, управление концентрациями и управление температурным режимом. В работе [10] приведено обобщение большинства правил и рекомендаций. Отдельное решение задачи управления уровнями с помощью управления отбором продуктов РК не приводит к получению достаточно точной системы управления. Решение всех подзадач часто сводится к вычислительно сложной оптимизационной задаче поиска минимум 8-10 настроек регуляторов (для децентрализованной системы с 4-5 ПИ-регуляторами), по причине сильного взаимного влияния каналов друг на друга, особенно в РК, рассчитанных оптимально с точки зрения типовых критериев технологических расчетов. Альтернативой является использование многомерных регуляторов, задача синтеза которых тем не менее также требует внимание к вопросам точности моделирования и робастности [11].

С точки зрения интегрированного подхода, применительно к ТП производства метанола, необходимыми требованиями к УПТМ являются:

- 1) возможность адекватного расчета статики ТП,
- 2) наличие удобного интерфейса для межпрограммного взаимодействия,
- 3) возможность оптимизации параметров отдельных технологических агрегатов,
- 4) возможность симуляции динамики технологического процесса с целью получения математических моделей динамики и тестирования работы САУ, SCADA-систем, компьютерных тренажеров.

Адекватность расчета статики зависит от трех факторов:

- наличие точной базы данных параметров химических компонентов и их связей,
- возможность использовать подходящее уравнение состояния,
- наличия точных математических моделей технологических агрегатов.

Применение интегрированного подхода к теплообменным аппаратам разработано нами в работе [12]. Разработанный алгоритм и программное обеспечение показывает, что использование специализированных математических пакетов и специализированного программного обеспечения достаточно для расчета оптимальных конструктивных параметров теплообменника и расчета робастной САУ его температурным режимом.

Применение УПТМ HYSYS для технологического расчета параметров химического реактора

позволяет получить достаточно точные результаты с минимальным количеством исходных параметров. В работе [13] показано, что в Aspen Plus и HYSYS, при наличии ряда экспериментальных данных, можно достичь практически полного совпадения модели с поведением реактора.

Математические модели РК в пакете HYSYS позволяют учесть как сложные варианты процессов ректификации, так и рассчитать бинарную РК метанола-сырца. В работе [14] показано, что модификация Соаве уравнения состояния Редлиха-Квонга (SRK) достаточно точно подходит для представления термодинамических параметров метаноловых смесей. Использование при моделировании метанольной РК этого уравнения с точными исходными в УПТМ HYSYS дает отличные результаты.

УПТМ достаточно совместима с программным интерфейсом межпрограммного взаимодействия CAPE-Open. Также взаимодействие возможно с помощью технологии ActiveX Automation и DDE. Наличие указанных программных интерфейсов позволяет легко реализовывать их взаимодействие со специализированными математическими пакетами (СМП), такими как Matlab и SciLab, а также с программным обеспечением, написанным на языках общего назначения ОС Windows и офисными пакетами.

Хотя рассмотренные пакеты технологического моделирования имеют встроенные языки программирования, для решения задач интегрированного подхода иногда лучше их использовать в сочетании с специализированным программным обеспечением и со специализированными математическими пакетами. Так, при расчете РК пакет Chemser автоматически способен решить задачу поиска оптимального количества тарелок, номера питающей тарелки, флегмового числа, требуемые давления конденсатора и ребойлера. Эти исходные данные можно затем использовать в HYSYS для проверки возможности достичь требуемой концентрации продукта при условии более точного моделирования процессов разделения, в том числе учитывающего ряд конструктивных особенностей РК (геометрические размеры, тип тарелок, температура производственного помещения и т.п.). СМП при взаимодействии с УПТМ могут быть использованы для решения задач построения моделей статики конкретных ТП, оптимизации параметров технологических объектов с использованием оптимизационных алгоритмов, трудно реализуемых в языках программирования общего назначения.

Отличительной возможностью УПТМ HYSYS является симуляция динамики ТП. Результаты сравнительного анализа версии УПТМ HYSYS десятилетней давности показывают достаточно близкие, хотя и не полностью совпадающие, результаты симуляции динамики и реального поведения РК [15,16]. Кроме того, УПТМ HYSYS позволяет проводить симуляцию в реальном времени с указанным коэффициентом ускорения, что позволяет путем разработки несложного дополнительного программного обеспечения, обеспечивать его взаимодействие с пакетом Simulink, SCADA-системами, компьютерными тренажерами, ПЛК и т.п. А это, в свою очередь, позволяет избежать проблем, которые могут возникнуть из-за использования некачественных алгоритмов, неточных преобразований сигналов и т.п. Проявятся такие недостатки могут только в момент наладки системы автоматизации на реальном производстве, что не является приемлемым.

Выводы. Сформулирована методика и программное обеспечение интегрированного подхода к расчету технологического процесса производства метанола на основе утилизации углекислого газа котельных и ТЕС, а также автоматизации указанного ТП. Проведен анализ основных противоречий ТП производства метанола с точки зрения интегрированного подхода. Проведен анализ возможностей существующих программных средств для осуществления такого подхода. Показаны основные трудности, которые могут возникнуть с точность и адекватностью выполнения расчетных задач и математического моделирования. Показано, что для решения всех поставленных задач, применительно к ТП производства метанола, необходимо определенное сочетание универсального пакета технологического моделирования HYSYS, специализированного программного обеспечения и математических пакетов.

Литература

1. Кузнецов О.А. Основы работы в программе Aspen Hysys / О.А.Кузнецов. – М. : Директ-Медиа, 2015. – 153 с.
2. Luyben W. Distillation design and control using Aspen Plus simulation / W.Luyben. – Hoboken, N.J. : Wiley, 2013. – 489 p.
3. UniSim design dynamic modelling. Reference guide. – London : Honeywell, 2005. – 226 p.
4. Зиятдинов Н.Н. Математическое моделирование химико-технологических систем с использованием программы ChemCAD /Н.Н.Зиятдинов. – Калининград : КГТУ, 2008. – 159 с.
5. Шибитова Н.В. Моделирование и расчет процесса ректификации с использованием программы Pro-II / Н.В. Шибитова, Н.С. Шибитов // Известия ВолгГТУ. – 2011. – Т. 1. – № 4. – С. 118–120.
6. Baten J. Flowsheting for free with COCO / J. Baten, H. Kooijman, R. Taylor. – Delft, Netherlands : Cache news, 2007.
7. Upadhyay R. Analysis of CSTR Temperature Control with Adaptive and PID Controller (A Comparative Study) / R. Upadhyay, R. Singla // IACSIT International Journal of Engineering and Technology. – 2010. – Vol. 2, No. 5. – P. 453–458.
8. Мандельштейн М.Л. Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации / М.Л. Мандельштейн. – М. : Пищевая промышленность, 1975.

9. Cantrell J. Effect of Feed Characteristics on the Controllability of Binary Distillation Columns / J. Cantrell, T. Elliott, W. Luyben // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1995. – No. 34(9). – P. 3027–3036.
10. Skogestad S. The Dos and Don'ts of Distillation Column Control / S. Skogestad // *Chemical Engineering Research and Design.* – 2007. – No.1 (85). – P. 13–23.
11. Стопакевич А. Разработка робастной системы управления колонной атмосферной перегонки нефти / А. Стопакевич // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2015. – № 2 (77). – С. 49–57.
12. Стопакевич А. Разработка модели и программных средств для создания робастной системы управления теплообменником / А. Стопакевич // *Автоматизация технологических и бизнес-процесов.* – 2015. – № 3. – Т. 7. – С. 51–60.
13. Barrera R. Use of advanced simulation software Aspen Plus as teaching tool in chemical reaction engineering / R. Barrera, Y. Agudelo // *Revista Educación en Ingeniería.* – 2015. – No.19. – Vol. 10. – P. 57–68.
14. Lundstrøma C. Comparison of the SRK and CPA equations of state for physical properties of water and methanol / C. Lundstrøma, M. Michelsena, G. Kontogeorgisa, K. Pedersen, H. Sørensen // *Fluid Phase Equilibria.* – 2006. – No. 247(1). – P. 149–157.
15. Rueda L. Modeling and Control of Multicomponent Distillation Systems Separating Highly Non-Ideal Mixtures // PhD Dissertation, The University of Texas at Austin, USA. – 2005.
16. Rueda L. On-line Parameter Estimation and Control for a Pilot Scale Distillation Column / L. Rueda, T. Edgar, R. Eldridge // *AIChE Annual.* – 2004.

Рецензія/Peer review : 4.11.2016 р.

Надрукована/Printed : 15.12.2016 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кадацкий А.Ф.