

УДК 004.896
МРНТИ 28.23.27

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2025-22-3-36-48>

¹Самигулин Т.И.,
PhD, ассоциированный профессор, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719,
e-mail: t.samigulin@kbtu.kz
^{1*}Маратұлы Т.,
магистрант, ORCID ID: 0009-0001-3850-6221,
*e-mail: t.maratuly@kbtu.kz

¹Казахстанско-Британский технический университет, г. Алматы, Казахстан

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССА СБОРКИ И ОЧИСТКИ КИСЛОЙ ВОДЫ

Аннотация

В нефтегазовой отрасли сбор и очистка кислой воды при дистилляции сырого газа является важным технологическим процессом. Оптимальное управление данным процессом позволит повысить эффективность производства, снизить экологические выбросы кислот и углекислого газа в окружающую среду и рациональнее использовать природные ресурсы на фоне растущих потребностей нефтегазовой индустрии. Данная работа посвящена проектированию цифрового двойника с использованием программного обеспечения компании Honeywell Unisim Design. Основное внимание уделено разработке и внедрению системы управления с разделением диапазона (англ. split-range control) в рамках динамической модели. Произведен анализ разработанной модели с историческими данными, где проверена достоверность модели. Разработана стратегия управления для промышленного контроллера С300 и HMI-интерфейс для операторов с целью интеграции цифрового двойника с распределенной системой управления Experion PKS. Цифровой двойник открывает новые возможности для создания и проверки новых схем управления, оптимизации параметров и настройки системы безопасности. По результатам опросов клиентов компании Honeywell внедрение цифровых двойников позволяет сократить капитальные затраты на проектирование более чем на 10%, сократить время разработки на 10% и увеличить производительность завода на 3–8 %.

Ключевые слова: цифровой двойник, нефтяная промышленность, управление с разделением диапазона, сложный объект, моделирование, Unisim Design, распределенная система управления, Experion PKS.

Введение

На сегодняшний день нефтегазовая отрасль является одной из самых сложных и опасных сфер, связанных с высоким риском для жизни сотрудников [1]. Дистилляция является одним из основных технологических процессов в нефтегазовой промышленности [2] и используется для разделения природного или попутного газа на его основные компоненты [3]. Процесс перегонки газа основан на разделении углеводородов на фракции при нагреве, так как каждые компоненты имеют свою температуру кипения [3]. Он широко используется в нефтегазовой промышленности для очистки газа от таких примесей, как сероводород (H_2S) и углекислый газ (CO_2) [4], которые токсичны для живых организмов и вызывают коррозию трубопроводов, оборудования и технологических установок [5]. Под кислой водой понимают поток жидкости, который содержит кислые газы H_2S и CO_2 , полученный на разных этапах, начиная от добычи и заканчивая очисткой сырой нефти [6]. Для контроля за процессом по сбору и очистке кислой воды требуется высокая точность и оперативное реагирование на любые изменения параметров, чтобы предотвратить и избежать аварийных ситуаций, обеспечив безопасность. В статье рассматривается проектирование цифрового двойника технологического процесса сбора и очистки кислой воды с использованием программного обеспечения компании Honeywell Unisim® Design (Honeywell, США) и внедрением системы раздельного управления и подклю-

чения модели к распределенной системе управления Honeywell Experion Process Knowledge System® (PKS).

Под фразой «цифровой двойник» подразумевается виртуальная копия или модель любого реального физического объекта или процесса, который получает данные в реальном времени с промышленного оборудования [7].

Цифровое проектирование используется для оптимизации предприятий, получения данных с технологического процесса и предсказания поведения объектов. Статьи [8, 9] посвящены моделированию и симуляции химических процессов с применением программного продукта «Honeywell Unisim Design R451». В первой работе рассматривается производство серной кислоты с использованием технологии двойной абсорбции. Авторы создали двойник технологического процесса получения серной кислоты с учетом термодинамических свойств и тепловых потерь. Результаты моделирования цифровой модели были проверены на основе реальных данных завода, а точность вычисления составила 97%, что делает эти данные пригодными для использования в других работах. Как итог данная модель показала высокую эффективность, где выбросы SO_2 составили 140 частей на миллион (англ. ppm), а большая часть энергии от реакций была восстановлена с помощью теплообменников и использована для повышения энергоэффективности.

В работе [9] было проведено моделирование процесса газификации древесной биомассы для получения синтезированного газа. Целью исследования было разработать такую модель газификации, которая снизит содержание тяжелых соединений, таких как смолы, и оптимизировать энергетические затраты. В качестве объекта исследования авторы выбрали древесную биомассу трех видов (Cooktown Ironwood, Melville Island Bloodwood, Darwin Stringybark) из региона Западной Австралии. В результате была разработана новая конфигурация процесса газификации, в которой тепло от высокотемпературной стадии используется для поддержания низкотемпературной стадии, минимизируя внешние энергетические затраты. Отдельным вкладом считается использование возобновляемых источников энергии, таких как древесная биомасса, для регионов с высокой стоимостью электроэнергии. Результатом исследования было получено, что максимальная молярная доля CO достигала 13,2% при 1200 °C, а H_2 – 35,2% при 600 °C, что является хорошим результатом.

Помимо программного продукта «Unisim Design», существуют и другие решения для цифрового моделирования сложных объектов. Так, в работах [10–14] в качестве программного продукта для симуляции химических процессов был использован «Aspen HYSYS». В научной статье [10] рассматривается разработка модели отрицательных выбросов CO_2 на электростанции, которая использует газифицированный осадок сточных вод в качестве основного топлива. Программные продукты «Aspen Plus», «Aspen HYSYS» и «Ebsilon» были применены для моделирования и сравнения термодинамических характеристик системы. Общий КПД системы составил от 43% до 55% в зависимости от используемого топлива и программного обеспечения. Работа демонстрирует интеграцию биотоплива и CCS для достижения отрицательных выбросов CO_2 , что является относительно новой концепцией в сфере энергетики. Недостатком звеном данной работы является отсутствие экспериментальных данных для валидации моделей.

В научной работе [11] смоделирован и оптимизирован процесс аминного улавливания CO_2 на основе данных из мусоросжигательной установки «Fortum» в Норвегии, изучены такие параметры, как эффективность абсорбции, минимальная разница температур в теплообменнике и высота упаковки в абсорбере. Методы «Enhanced Detailed Factor» (EDF) и «Power Law» были использованы для оценки затрат на оборудование и эксплуатацию, основанные на зависимостях между стоимостью и производительностью оборудования. Авторами была выявлена оптимальная минимальная температура в 15 °C при которой минимальная стоимость улавливания CO_2 составила около 36.7 евро, оптимальная высота упаковки рассчитана в 19 метров, а эффективность улавливания – 87%. Из ключевых объектов были смоделированы: абсорбер, десорбер, теплообменники, насосы и вентиляторы.

В отличие от улавливания углекислого газа, в статье [12] исследуется процесс производства метилхлорида, его безопасность, энергетическая и экологическая эффективность на базе модели «Aspen HYSYS». Была разработана симуляционная модель производства метилхлорида посредством хлорирования метанола, проведен анализ энергопотребления с добавлением в проект двух теплообменников, которые позволили снизить потребление энергии на 36%. Была сокращена стоимость продукции на \$2.78 за тонну с периодом окупаемости 0.63 года. С экологической точки зрения было выделено уменьшение выбросов парниковых газов на 26% и соответствующего углеродного налога на него. Новизной данной работы является интеграция «Aspen HYSYS» и «ALOHA» в одну платформу для создания безопасных, энергоэффективных и экономичных химических процессов.

В исследовательской работе [13] программное обеспечение «Aspen Hysys» использовалось для поиска оптимального отношения пара к биомассе и рабочей температуры газификатора с кипящим слоем для получения синтезированного газа высшего качества. Были получены приемлемые настройки температуры (700–800 °C и соотношение пара/биомассы (0,2–0,3)). Данное исследование впервые выполнено для исследования переработки сельскохозяйственных отходов.

Статья [14] посвящена исследованию трехфазного горизонтального сепаратора в программном обеспечении «Aspen Hysys» с целью поиска взаимосвязей основных параметров объекта управления. Во время исследования авторы смоделировали процесс разделения углеводородной смеси на примере резервуарных жидкостей, характерных для нигерийских месторождений. Для расчетов было использовано уравнение состояния Пенга-Робинсона, а результаты были сравнены с такими продуктами, как «CHEMCAD» и «Unisim». В итоге были выявлены следующие взаимосвязи: с увеличением давления снижается молярный поток газа и увеличивается молярный поток нефти, а повышение температуры приводит к росту молярного потока газа, однако снижается молярный поток нефти. Найдены оптимальное рабочее давление 8000 кПа и температура 43 °C, обеспечивающие максимальную эффективность сепарации.

Авторы статьи [15] занимались разработкой и улучшением процесса дегидрирования изопропилового спирта в ацетон с использованием программы для симуляции химических процессов «CHEMCAD». Были смоделированы реакторы, теплообменники, компрессоры, внесены изменения в условия работы танка, что снизило потери ацетона и позволило дополнительно использовать полученный водород. Преимуществом данного процесса является его экологичность. Производство ацетона получается без выбросов химических отходов, путем снижения потери продуктов и повышения КПД посредством оптимизации основных технологических параметров.

Цифровой двойник также может быть использован для тестирования. Так, в работе [16] была проведена разработка и проектирование оборудования с использованием цифрового двойника и виртуального пуска для тестирования оборудования перед его физической реализацией. Работы были проведены в сотрудничестве с Siemens PLM/Factory Automation и производителем машиностроительного оборудования на реальном бизнес-кейсе. Согласно результатам исследования, предложенный метод проектирования способен сократить время разработки на 75% и улучшить общее качество продукта до 47%, хотя эти показатели могут варьироваться в зависимости от сложности машины. Использование виртуального пуска позволило значительно сократить время на тестирование и настройку машины, а внедрение цифрового двойника повысило качество и точность проектирования, позволив избежать ряда ошибок до физического производства.

Материалы и методы

Процесс сбора и очистки кислой воды является промежуточным этапом в дистилляции сырого газа на нефтеперерабатывающих заводах. Он состоит из трех основных технологических установок: трехфазного горизонтального сепаратора, абсорбера и резервуара. Зна-

чально поток топливного газа высокого давления, поток кислой воды с жидкими углеводородными примесями поступает в трехфазный сепаратор. Из-за разности плотностей разделенная нефть поднимается на поверхность воды, затем переливается через перегородку и выходит из сепаратора по трубопроводу. Разделенная от углеводородов кислая вода направляется на следующую установку абсорбера. Давление внутри сепаратора поддерживается с помощью двух клапанов PV-001 и PV-002, которые регулируют расход газа на входе и выходе с установки. Первый клапан отвечает за регулирование потока топливного газа высокого давления в сепаратор, увеличивая давление в установке. Второй клапан устанавливается на выходной трубопровод и уменьшает давление в установке. Уровень воды в сепараторе контролируется с помощью уровнемера и клапана LV-001.

Изолированная кислая вода со дна главного отсека через клапан LV-001 поступает в верхнюю секцию отдувочной колонны, содержащей 25 ситчатых тарелок. Кислая вода подвергается отдувке, подавая топливный газ низкого давления в нижнюю часть колонны, поглощая кислые компоненты. Процент содержания воды в колонне растет по мере прохождения жидкости по каждой тарелке. На данном этапе вода разделяется на два компонента: очищенная вода и отдувочный газ. Первый компонент направляется в танкер, а второй направляется в другую отдувочную колонну. Так как работа связана с очисткой воды, описание и реализация обработки отдувочного газа отсутствуют.

Очищенная вода поступает в горизонтальный резервуар для скапливания и удаления остаточных газов. Уровень воды в танкере измеряется уровнемером и поддерживается благодаря управляющему клапану LV-003 на выходе. Давление в сепараторе контролируется индикатором давления. Газ выводится с помощью эжектора. Процент содержания воды в итоге должен составлять более 98%. Рисунок 1 демонстрирует блок-диаграмму технологического процесса.

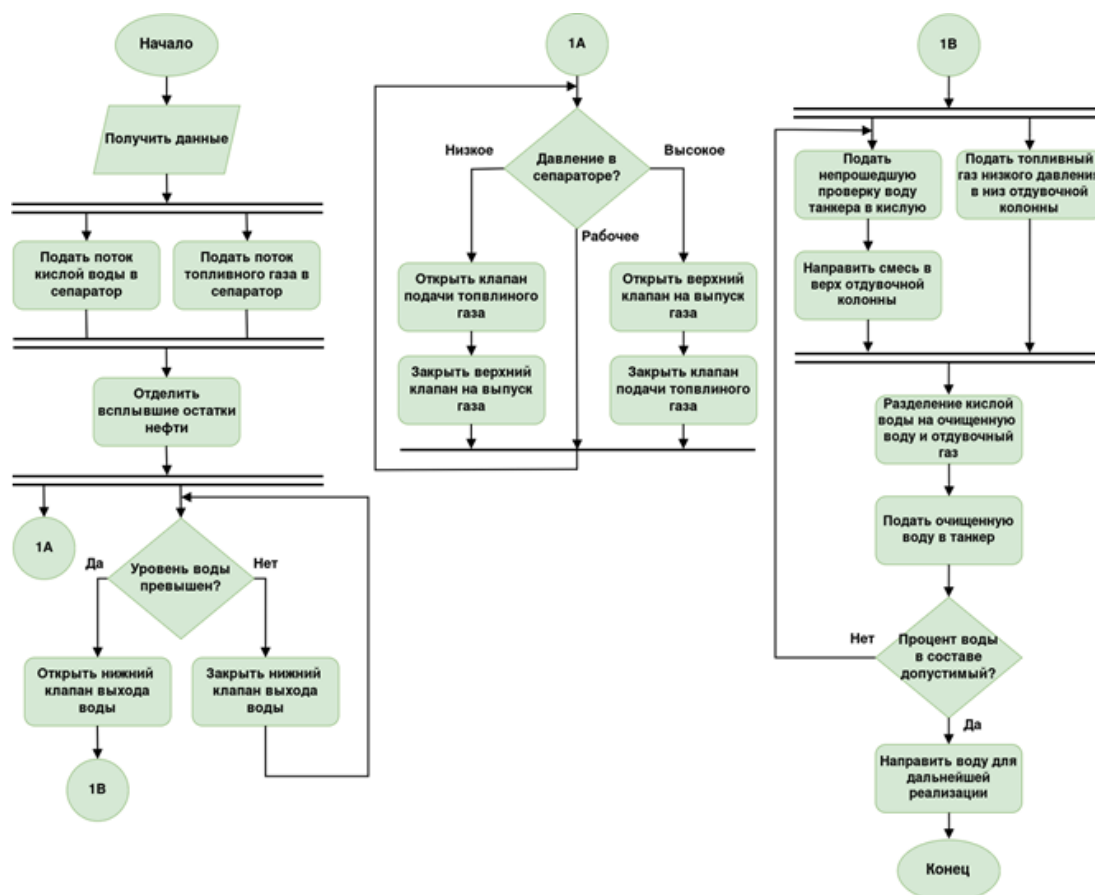


Рисунок 1 – Блок-диаграмма сбора и очистки кислой воды

Реализация раздельного управления

Управление с разделением диапазона (с англ. Split-range control) – это метод управления, согласно которому один регулятор управляет несколькими исполнительными механизмами [17, 18], например, несколькими клапанами, заслонками, двигателями и т.д. Как правило, на вход регулятора в качестве желаемого значения (с англ. SP, Setpoint) и текущего значения (с англ. PV, Process Value) подается одна переменная, а выходное значение (с англ. OP, Output) регулятора разделено на диапазоны по установленному правилу, где каждый диапазон используется для управления конкретным исполнительным механизмом. Рисунок 2 демонстрирует применение раздельного управления для контроля давления в сепараторе.

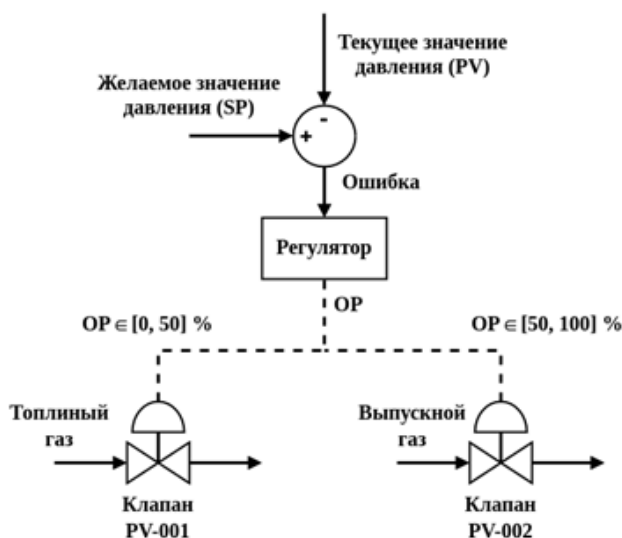


Рисунок 2 – Раздельное управление для поддержания давления в сепараторе

Разница между текущим значением (PV) и желаемым значением (SP) давления в сепараторе направляется в регулятор в виде ошибки рассогласования. На основе ошибки высчитывается выходное значение регулятора (OP). Далее, на основе выходного значения регулятора происходит управление двух клапанов (PV-001 и PV-002). Значение регулятора в интервале от 0 до 50% управляет положением клапана на подачу топливного газа высокого давления (PV-001) в сепаратор, в то время как значение от 50 до 100% задает поведение клапана на выпуск газа с сепаратора (PV-002). Рисунок 3 детально описывает поведение каждого из клапанов.

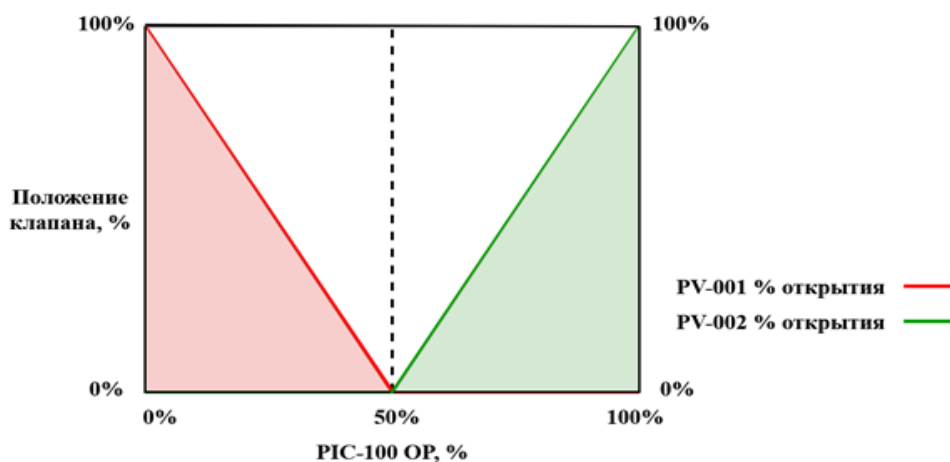


Рисунок 3 – Положение клапанов на основе значения регулятора PIC-100

Выходное значение регулятора PIC-100 влияет на положение клапанов PV-001 и PV-002. Если значение регулятора на выходе составляет 0%, то клапан на подачу топливного газа должен быть полностью открыт, в то время как 50% ОР приводит клапан к полному закрытию. Клапан на выпуск газов из сепаратора PV-002 работает по следующему правилу: 50% значения регулятора соответствует полному закрытию, а 100% означает, что клапан должен быть полностью открыт. Режим работы регулятора «прямой», потому что текущее значение давления PV должно напрямую менять значение ОР регулятора. Низкое значение ОР говорит о том, что давление в сепараторе низкое и нужно его увеличить, открыв клапан на подачу топлива высокого давления, а если давление высокое, т. е. значение ОР больше 50%, то нужно закрыть клапан на подачу топлива и открыть клапан на выпуск газов из системы. Математически поведение двух клапанов от параметра регулятора ОР можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} PV-001_{OP \in [0, 50]} &= -2 \cdot OP + 100 \\ PV-002_{OP \in [50, 100]} &= 2 \cdot OP - 100, \end{aligned}$$

где ОР – выходное значение регулятора, %,

PV-001 – положение клапана подачи топлива высокого давления, %,

PV-002 – положение клапана выпуска газа, %.

Стандартное управление регулятором и управление с разделением диапазона для регулирования параметров сложных объектов реализовано в двух разных ситуациях: напрямую в «Honeywell Unisim Design» и в распределенной системе управления «Honeywell Experion PKS». Experion Process Knowledge System (PKS) – это интеллектуальная платформа управления производственными процессами, разработанная компанией «Honeywell», объединяющая распределенную систему управления и систему диспетчерского контроля [19].

Моделирование цифрового двойника процесса очистки кислой воды

В «Unisim Design» для расчета термодинамических и транспортных свойств веществ используются два понятия: пакет свойств (от англ. Property package) и пакет жидкости (от англ. Fluid package). Пакет свойств – это модель, которая описывает, как будут вычисляться свойства веществ [20]. Пакет жидкости, или жидкостный пакет – это пакет, который хранит информацию о компонентах, которые будут использоваться в проекте, их свойства и методы для расчета фазового равновесия [21]. При моделировании цифрового двойника использованы следующие компоненты входного потока сырого газа: метан (CH_4), этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), диоксид углерода (CO_2), вода (H_2O), изобутан (C_4H_{10}), изопентан (C_5H_{12}), сероводород (H_2S), азот (N). Спроектирован технологический процесс, включающий в себя следующие объекты: трехфазный горизонтальный сепаратор, абсорбер, танкер и клапаны. Трехфазный горизонтальный сепаратор – это горизонтальная установка, используемая для сбора кислой воды и разделения на газовую, жидкую фазы [22]. Абсорбер – это объект, который используется для поглощения и разделения компонентов газовой смеси жидким абсорбентом [23]. Физико-геометрические параметры установок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические спецификации оборудования

Физический параметр оборудования	Значение
Абсорбер	
Высота	17.9 м
Диаметр	150 см
Объем	31.7 м ³
Количество тарелок	25
Тип тарелок	Ситчатые

Продолжение таблицы 1

Рабочее давление	4–6 бар
Температура	25–30 °C
Резервуар	
Диаметр	3 м
Длина	15 м
Объем	106 м ³
Давление	0.01 бар
Температура	20–25 °C
Трехфазный горизонтальный сепаратор	
Длина	15 м
Диаметр	360 см
Объем	152 м ³
Давление	4–6 бар
Температура	25–30 °C

При моделировании цифрового двойника необходимо настроить параметры пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора для достижения заданного желаемого значения давления в сепараторе. Формула закона управления давления трехфазного сепаратора ПИД-регулятора с заданными коэффициентами представлена в следующем виде:

$$U(t) = 2.18 \cdot E(t) + 681.25 \int_0^t E(\tau) d\tau,$$

где $E(t)$ – разница между желаемым значением и текущим в момент времени t , кПа,

$U(t)$ – выходное значение регулятора в момент времени t , %.

На вход трехфазного сепаратора поступает два потока: поток кислой воды и топливный газ высокого давления. В сепараторе из-за разности плотностей смесь разделяется на извлеченный газ и кислую воду, отделенную от углеводородов. Данные потоков исходного сырья представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристика потоков исходного сырья

Материальный поток	Параметр	Ед. измерения	Значение
Кислая вода	Диоксид углерода	мольный %	0.25
	Вода	мольный %	0.5
	Сероводород	мольный %	0.25
	Температура	°C	30
	Давление	кПа	600
	Расход	м ³ /ч	23
Топливный газ	Метан	мольный %	0.798
	Этан	мольный %	0.135
	Пропан	мольный %	0.041
	Изобутан	мольный %	0.007
	Изопентан	мольный %	0.001
	Азот	мольный %	0.018
	Расход	м ³ /ч	16

Все основные объекты управления, а именно трехфазный сепаратор, абсорбер и резервуар, смоделированы согласно регламенту технологического процесса на существующем предприятии. Смоделированный технологический процесс в динамическом режиме изображен на рисунке 4.

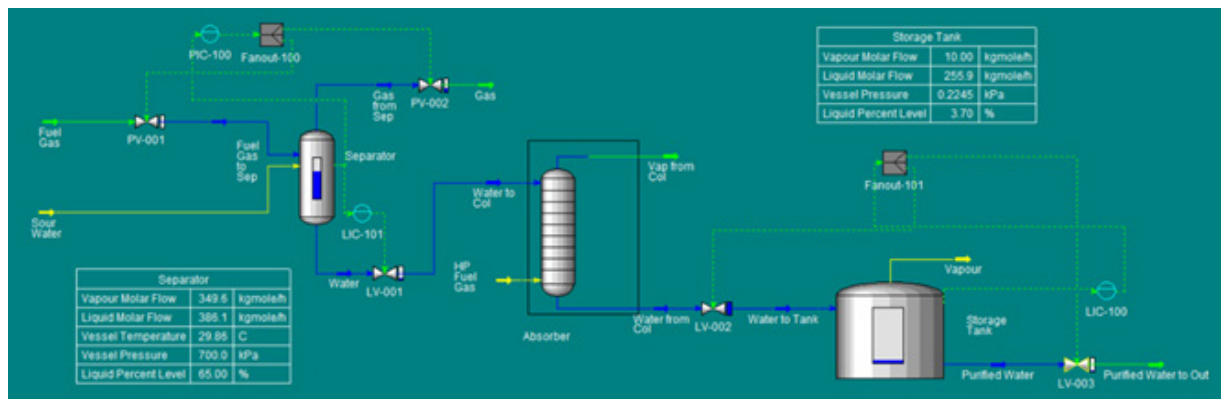


Рисунок 4 – Технологический процесс в динамическом режиме в Unisim Design

Модель представлена в двух вариантах – как в статическом (от англ. Steady-State), так и в динамическом (от англ. Dynamic) режимах. Это позволяет учитывать поведение системы при переходных процессах, аварийных ситуациях, а также изменение и контроль параметров (температура, давление, уровень жидкости и т. д.) в настоящем времени.

Реализация управления с помощью Honeywell Experion PKS

Для управления объектами в Unisim Design с помощью Experion PKS выбраны следующие параметры, влияющие на поведение системы:

Таблица 3 – Информация о параметрах, передаваемых с PCY в цифровой двойник

Имя параметра	Ед. измерения	Объект управления	Исполнительный механизм для управления
Давление	кПа	Трехфазный сепаратор	Положение клапана подачи топливного газа высокого давления в сепаратор (PV-001)
			Положение клапана выпуска извлеченного газа с сепаратора (PV-002)
Уровень жидкости	%	Трехфазный сепаратор	Положение клапана выпуска кислой воды с сепаратора (LV-001)
Уровень жидкости	%	Резервуар	Положение клапана подачи очищенной воды в резервуар (LV-002)
			Положение клапана выпуска очищенной воды из резервуара (LV-003)

На стороне Experion PKS разработан модуль управления на языке СМ, что является аналогом языка FBD по стандарту МЭК 61131-3 [24]. Рисунок 5 демонстрирует управление клапанами PV-001 и PV-002 с разделением диапазонов для поддержания давления в трехфазном сепараторе с Experion PKS.

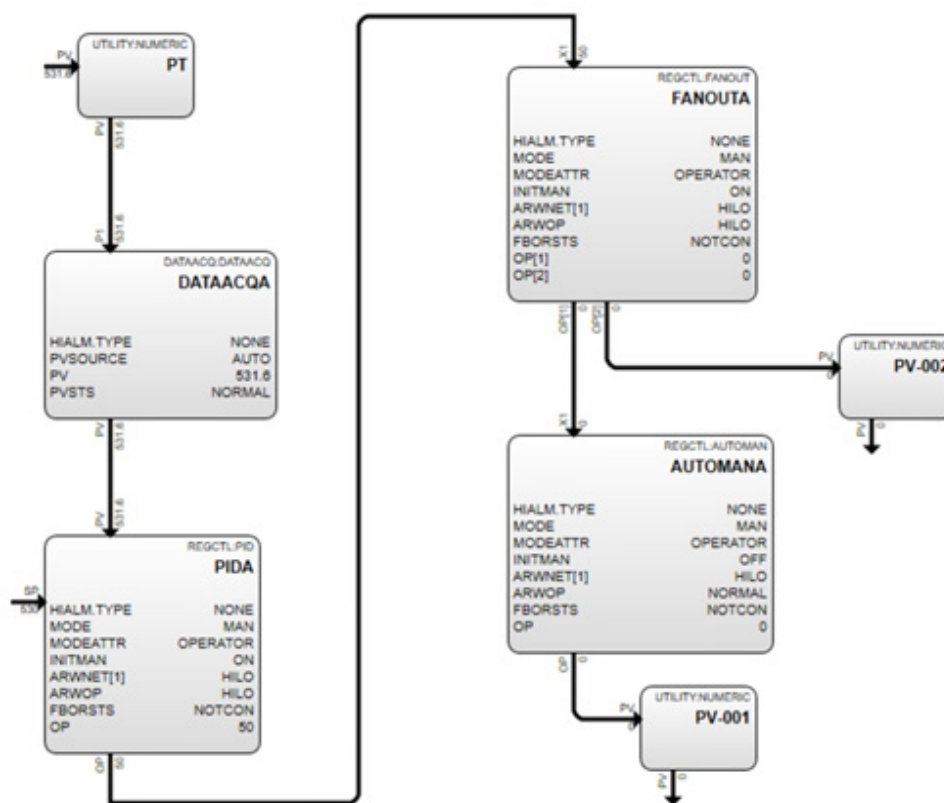


Рисунок 5 – Управление клапанами PV-001 и PV-002 с разделением диапазонов для поддержания давления в Experion PKS

Информация о текущем давлении приходит на блок «PT», который переадресовывает свое значение на «DATAACQ» для дополнительной обработки. Далее значение сигнала идет на блок ПИД-регулятора. В Experion PKS ПИД-регулятор может быть настроен под другие типы регуляторов. В данном случае нужен ПИ-регулятор, поэтому дифференцируемый коэффициент был равен нулю. Пропорциональный коэффициент и время интегрирования были получены с помощью «Autotune» в Unisim Design, сняв показания с объектов. «OP» регулятора затем разбивается на два значения в блоке «FANOUTA» по правилу, описанному в формулах 1 и 2. Результат параметра «OP1» – положение клапана для подачи топливного газа для увеличения давления, а параметра «OP2» – клапана для выпуска избыточного газа из трехфазного сепаратора. Эти значения затем отправляются назад в Unisim Design по OPC.

Результаты и обсуждение

В данной секции представлены результаты выполненного моделирования, а также проблемы и дальнейшая модернизация цифрового двойника в рамках данного технологического процесса. Согласно результатам моделирования, на выходе очищенная вода состоит на 99.9998 % из воды и на 0.002 % из азота, что говорит об успешной очистке от кислых компонентов. Таблица 4 содержит данные о потоках отдувочного газа и очищенной воды с абсорбера.

Управление как в самом Unisim Design, так и в Experion PKS успешно поддерживает давление и уровень жидкости в трехфазном сепараторе, а также уровень жидкости в резервуаре в желаемых значениях, согласно данным с таблиц, описанных выше. Рисунок 6 изображает человеко-машинный интерфейс (HMI) процесса сбора и очистки кислой воды на станции Experion.

Таблица 4 – Характеристика потоков на выходе абсорбера

Поток	Параметр	Ед. Измерения	Значение
Очищенная вода	Вода	мольный %	0.999998
	Азот	мольный %	0.000002
Отдувочный газ	Метан	мольный %	0.786329
	Этан	мольный %	0.133026
	Пропан	мольный %	0.040400
	Диоксид углерода	мольный %	0.002370
	Вода	мольный %	0.005925
	Изобутан	мольный %	0.006898
	Изопентан	мольный %	0.000985
	Сероводород	мольный %	0.006331
	Азот	мольный %	0.017735

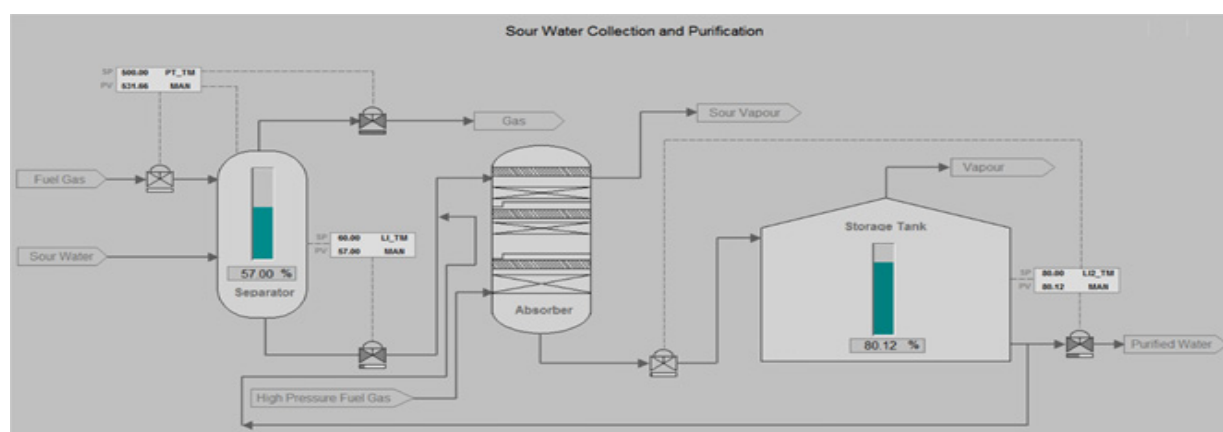


Рисунок 6 – Операторский интерфейс процесса сбора и очистки кислой воды

В оригинальном технологическом процессе присутствует еще одна колонна, в которую направляется поток кислого газа после абсорбера, чтобы выделить дополнительно остатки чистой воды, однако в целом на очистку кислой воды это не оказывает никакого влияния, поэтому эта установка была пропущена. Однако для дальнейшего расширения цифрового двойника предлагается промоделировать весь процесс.

Из дальнейших улучшений, вместо стандартного регулирования с помощью ПИД-регулятора предполагается использовать контроллеры с нечеткой логикой, чье поведение будет разработано на основе экспертных знаний инженеров, тем самым обеспечивая более гибкую адаптацию системы к изменениям технологических параметров, повышая точность управления и снижая влияние внешних возмущений на процесс.

Заключение

Эффективное управление процессом сбора и очистки кислой воды способствует повышению эффективности, а также сокращению выбросов кислот и углекислого газа в окружающую среду. В данной статье рассматривается разработка цифрового двойника этого процесса в статическом и динамическом режимах, что позволяет провести его детальный анализ и автоматизировать управление, снижая необходимость прямого вмешательства оператора. Весь

технологический процесс детально был описан согласно документам на существующем предприятии Казахстана. Было уделено большое внимание управлению с разделением диапазона, рассмотрено управление как внутри самого Unisim Design, так и с помощью распределенной системы управления Experion PKS. По результатам моделирования процент содержания компонента воды составил 99.9998%, а автоматическое управление успешно поддерживает заданные параметры установок в рабочих диапазонах, гарантируя высокую точность.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Benson, C., Dimopoulos, C., Argyropoulos, C.D., Varianou Mikellidou, C., and G. Boustras. Assessing the common occupational health hazards and their health risks among oil and gas workers, *Safety Science*, 140, 105284 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105284>.
- 2 Nalinakshan, S., Sivasubramanian, V., Ravi, V., Vasudevan, A., Sankar, M.R., and K. Arunachalam. Progressive crude oil distillation: An energy-efficient alternative to conventional distillation process, *Fuel*, 239, 1331–1337 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.033>.
- 3 Kinsara, R.A. and A. Demirbas. Upgrading of crude oil via distillation processes, *Petroleum Science and Technology*, 34 (14), 1300–1306 (2016). <https://doi.org/10.1080/10916466.2016.1200080>.
- 4 Tengku Hassan, T.N.A., Shariff, A.M., Mohd Pauzi, M.M., Khidzir, M.S., and A. Surmi. Insights on Cryogenic Distillation Technology for Simultaneous CO₂ and H₂S Removal for Sour Gas Fields, *Molecules*, 27(4) (2022). <https://doi.org/10.3390/molecules27041424>.
- 5 Farhadian, A., Go, W., Yun, S., Rahimi, A., Reza Nabid, M., Iravani, D., and Y. Seo. Efficient dual-function inhibitors for prevention of gas hydrate formation and CO₂/H₂S corrosion inside oil and gas pipelines, *Chemical Engineering Journal*, 431, 134098 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134098>.
- 6 De Farias Soares, A., Delloso Penteado, E., Ramalho Diniz, A.A., and A. Komesu. Influence of operational parameters in sour water stripping process in effluents treatment, *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102012 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102012>.
- 7 Daniel, A., Sriramulu, S., Partheeban, N., and S. Jayagopalan, *Digital Twin Technology and Applications*, (New York, 2024), 400 p. <https://doi.org/10.1201/9781003469612>.
- 8 Mounaam, A., Harmen, Y., Chhiti, Y., Souissi, A., Salouhi, M. and M. El Khouakhi, Unisim-Design Simulation and Analysis of a Sulphuric Acid Manufacturing Plant with Double Absorption Process, in *Proceedings of the 10th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications – SIMULTECH, IN-STICC*. SciTePress, 2020, pp. 91–100. <https://doi.org/10.5220/0009832300910100>.
- 9 Usmani, S., Gonzalez Quiroga, A., Vasquez Padilla, R., Palmer, G., and M. Lake, Simulation model of the characteristics of syngas from hardwood biomass for thermally integrated gasification using unisim design tool, *Energy*, 211, 118658 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118658>.
- 10 Zi'olkowski, P., Madejski, P., Amiri, M., Ku's, T., Stasiak, K., Subramanian, N., Pawlak-Kruczek, H., Badur, J., Nied'zwiecki, and D. Mikieliewicz. Thermodynamic Analysis of Negative CO₂ Emission Power Plant Using Aspen Plus, Aspen Hysys, and Ebsilon Software, *Energies*, 14(19) (2021). <https://doi.org/10.3390/en14196304>.
- 11 Shirdel, S., Valand, S., Fazli, F., Winther-Sørensen, B., Aromada, S.A., Karunarathne, S., and L. E. Øi. Sensitivity Analysis and Cost Estimation of a CO₂ Capture Plant in Aspen HYSYS, *ChemEngineering*, 6(2) (2022). <https://doi.org/10.3390/chemengineering6020028>.
- 12 Yandrapu, V.P., and N.R. Kanidarapu. Energy, economic, environment assessment and process safety of methylchloride plant using Aspen HYSYS simulation model, *Digital Chemical Engineering*, 3, 100019 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.dche.2022.100019>.
- 13 Kartal, F. and U. Özveren. A comparative study for biomass gasification in bubbling bed gasifier using Aspen HYSYS, *Bioresource Technology Reports*, 13, 100615 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100615>.
- 14 Olugbenga, A.G., Al-Mhanna, N.M., Yahya, M.D., Afolabi, E.A., and M.K. Ola. Validation of the Molar Flow Rates of Oil and Gas in Three-Phase Separators Using Aspen Hysys, *Processes*, 9 (2) (2021). <https://doi.org/10.3390/pr9020327>.
- 15 K'okdemir, B., and N. Acarali. A novel study on CHEMCAD simulation of isopropyl alcohol dehydrogenation process development, *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(3), 100035 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jics.2021.100035>.

16 De Oliveira Hansen, J.P., da Silva, E.R., Bilberg, A., and C. Bro. Design and development of Automation Equipment based on Digital Twins and Virtual Commissioning, *Procedia CIRP*, 104, 1167–1172 (2021) 54th CIRP CMS 2021 - Towards Digitalized Manufacturing 4.0. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.196>.

17 Reyes-L'ua, A., Zotic'a, C., Forsman, K., and S. Skogestad. Systematic Design of Split Range Controllers, *IFAC-PapersOnLine*, 52(1), 898–903 (2019) 12th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems DYCOPS 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.06.176>.

18 Machado, D.O., S'anchez, A.J. , Gallego, A.J., de Andrade, G.A., Normey-Rico, J.E., Bordons, C., and E.F. Camacho. Split-range control for improved operation of solar absorption cooling plants, *Renewable Energy*, 192, 361–372 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.064>.

19 Samigulina, G.A., Samigulina, Z.I., and Zh.S. Lukmanova. Cognitive smart-technology of distance learning of Experion PKS distributed control system for oil and gas industry using ontological approach, *News of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 1, 23–30 (2020). <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.3>.

20 Haydary, J. *Chemical Process Design and Simulation: Aspen Plus and Aspen Hysys Applications*, (John Wiley & Sons, Incorporated, 2019).

21 Liu, Z. and I. Karimi. Simulation of a combined cycle gas turbine power plant in Aspen HYSYS, *Energy Procedia*, 158, 3620–3625 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.901>.

22 Basyouny, A. Experimental validation of numerical two-phase flow in a horizontal separator, *Results in Engineering*, 15, 100476 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100476>.

23 Otitoju, O., Oko, E., and M. Wang. Modelling, scale-up and techno-economic assessment of rotating packed bed absorber for CO₂ capture from a 250 MWe combined cycle gas turbine power plant, *Applied Energy*, 335, 120747 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120747>.

24 Commission, I.E. et al. *Programmable controllers-part 3: Programming languages*, IEC 61131-3 (Ed. 2.0), 2002.

¹Самигулин Т.И.,

PhD, қауымдастырылған профессор, ORCID: 0000-0001-9963-6719,

e-mail: t.samigulin@kbtu.kz

^{1*}Маратұлы Т.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0001-3850-6221,

*e-mail: t.maratuly@kbtu.kz

¹Қазақстан-Британ техникалық университеті, Алматы қ., Қазақстан

ҚЫШҚЫЛ СУДЫ ЖИНАУ ЖӘНЕ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСІНІҢ ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІН ӘЗІРЛЕУ

Аңдатпа

Мұнай-газ саласында шикі газды айдау барысында қышқыл суды жинау және тазарту – маңызды технологиялық үдеріс. Аталған үдерісті оңтайлы басқару өндірістің тиімділігін арттыруға, қоршаған ортаға қышқыл қосындылар мен көмірқышқыл газының шығарылуын азайтуға, сондай-ақ мұнай-газ индустриясының өсіп келе жатқан қажеттіліктері аясында табиғи ресурстарды ұтымды пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу Honeywell Unisim Design бағдарламалық жасақтамасын пайдалана отырып, цифрлық егізді жобалауға арналған. Негізгі назар динамикалық модель аясында диапазонды бөлу (ағылш. split-range control) басқару жүйесін әзірлеу мен енгізуге бағытталады. Жасалған модель тарихи деректер негізінде талданып, оның дәлдігі тексерілді. Цифрлық егізді Experion PKS таратылған басқару жүйесіне біріктіру мақсатында C300 өнеркәсіптік контроллер үшін басқару стратегиясы мен операторларға арналған HMI-интерфейс әзірленді. Ұсынылған цифрлық егіз жаңа басқару схемаларын құру және сынақтан өткізу, параметрлерді оңтайландыру, сондай-ақ қауіпсіздік жүйесін баптау үшін жаңа мүмкіндіктер ұсынады. Honeywell компаниясы жүргізген тұтынушылық сауалнамаға сәйкес, цифрлық егіздерді енгізу жобалауға жұмсалатын күрделі шығындарды 10%-дан астам қысқартуға, әзірлеу уақытының 10%-ға азаюына және зауыт өнімділігінің 3–8%-ға артуына мүмкіндік береді.

Тірек сөздер: цифрлық егіз, мұнай-газ өнеркәсібі, диапазонды бөлуді басқару, күрделі нысан, модельдеу, Unisim Design, таратылған басқару жүйесі, Experion PKS.

¹Samigulin T.I.,

PhD, Associate Professor, ORCID ID: 0000-0001-9963-6719,

e-mail: t.samigulin@kbtu.kz

^{1*}Maratuly T.,

Master's student, ORCID ID: 0009-0001-3850-6221,

*e-mail: t.maratuly@kbtu.kz

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN FOR THE SOUR WATER COLLECTION AND PURIFICATION PROCESS

Abstract

In the oil and gas industry, the collection and purification of sour water during crude gas distillation is a crucial technological process. Optimal control of this process can increase production efficiency, reduce environmental emissions of acids and carbon dioxide, and enable more rational use of natural resources amid the growing demands of the oil and gas industry. This study focuses on the design of a digital twin using Honeywell Unisim Design software. Special attention is given to the development and implementation of a split-range control system within a dynamic model. The developed model has been analyzed using historical data to verify its accuracy. A control strategy has been designed for the C300 industrial controller, along with an HMI interface for operators to integrate the digital twin with the Experion PKS distributed control system. The digital twin unlocks new opportunities for developing and testing control schemes, optimizing parameters, and fine-tuning safety systems. According to customer surveys conducted by Honeywell, the implementation of digital twins can reduce significant expenses for design by more than 10%, shorten development time by 10%, and increase plant productivity by 3–8%.

Keywords: digital twin, oil and gas industry, split-range control, complex object, simulation, Unisim Design, distributed control system, Experion PKS.

Дата поступления статьи в редакцию: 28.02.2025