

УДК 519.876.5

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Н.А. Кисленко, Ю.В. Литвин, О.Е. Обухов, В.С. Кулик, И.А. Боронин (Москва),
С.П. Карпенко (Санкт-Петербург)

Введение

Перерабатывающие предприятия нефтегазовой отрасли (ПП) являются сложными многоуровневыми иерархическими системами, принимающими углеводородное сырьё (УВ) и осуществляющими многоступенчатое разделение поступающих потоков, а также выпуск товарной продукции. ПП состоят из множества объектов (узлов), включающих технологические установки (ТУ), резервуарные парки (РП), наливные эстакады и др., а также связывающую их систему трубопроводов. ПП характеризуются высокой нелинейностью протекающих процессов и циркулирующих между узлами потоками УВ. Многие ПП включены в производственные циклы глобальных распределённых макроструктур, состоящих из большого числа относительно самостоятельных предприятий, занимающихся добычей, транспортом и подземным хранением газа.

В настоящей работе изложение будет вестись на примере Уренгойского завода по подготовке газового конденсата к транспорту (ЗПКТ) и Сургутского завода по стабилизации конденсата (СЗК), образующих единый перерабатывающий комплекс ПАО «Газпром» в Западной Сибири [1, 2]. ЗПКТ обеспечивает первичную подготовку нестабильного газового конденсата (НГК), поступающего с крупнейших нефтегазоконденсатных месторождений Надым-Пур-Тазовского региона: Ямбургского, Уренгойского, Заполярного, Ен-Яхинского и др., а также выпускает товарную продукцию. Часть ЗПКТ (так называемая альтернативная схема) используется для приема и последующей перекачки нефти и стабильного конденсата (СК), полученного с НГК ачимовских залежей Уренгойского месторождения. Подготовленный на ЗПКТ деэтанализованный конденсат (ДК) направляется через связывающий магистральный конденсатопровод на Сургутский ЗСК, где проводится многоступенчатая переработка поступающего потока и выпуск товарной продукции (рис 1).

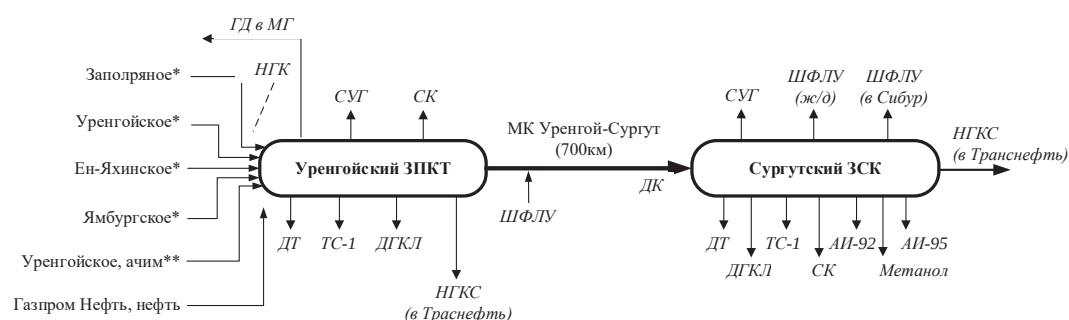


Рис. 1. Укрупненная схема перерабатывающего комплекса Западной Сибири:

НГК – нестабильный газовый конденсат; *НГКС* – нефтегазоконденсатная смесь; *ГД* – газ деэтанализации; *ДК* – деэтанализованный конденсат; *ШФЛУ* – широкая фракция легких углеводородов; *ДТ* – дизельное топливо; *ТС-1* – авиационный керосин; *ДГКЛ* – дистилят газового конденсата, легкий; *СУГ* – сжиженный углеводородный газ;

СК – стабильный конденсат; *МГ* – магистральный газопровод; *МК* – магистральный конденсатопровод; * (одна звезда) – «легкий» НГК; ** (две звезды) – «тяжелый» НГК

Оперативное управление этим комплексом, направленное на достижение поставленных бизнес-целей, осуществляется в соответствии с текущими (годовыми) и оперативными (месячными) планами по переработке НГК и выпуску товарной продукции. Как правило, указанные планы разрабатываются исходя из среднесрочных и долгосрочных целей по обеспечению максимальной маржинальной эффективности с учетом потребностей рынка.

Процессы планирования и управления ПП связаны со значительной спецификой производства, учет которой оказывается затруднен или даже невозможен без соответствующей информационной и модельной поддержки [3]–[6]. Использование аналитических моделей, базирующихся на физико-химических свойствах (ФХС) потоков [7, 8], часто вызывает затруднения в практической реализации и заменяется более упрощенными схемами, не всегда адекватно отражающими реальные процессы. Проводимая в настоящее время повсеместная цифровизация процессов производства и управления в нефтегазовой отрасли, а также создание цифровых двойников во многом способствуют разрешению этих проблем [9]–[11]. В частности, комбинирование имитационных и аналитических методов позволяет существенно уточнить и повысить адекватность моделирования. Отметим, что в последние годы значительно возросло применение методов детерминированного анализа сетей массового обслуживания сложных систем [12, 13]. В данной работе использована именно эта идея для моделирования процессов ПП. Однако ряд решаемых на ПП задач все же имеют случайный характер, что также находит отражение в предложенном подходе.

Начиная с 2022 года в ООО «НИИГазэкономика» проводятся работы по созданию и развитию универсального средства поддержки принятия решений и оптимизации работы ПП, входящих в территориально распределенные структуры имитационно-аналитического комплекса (ИАК). Развиваемые в рамках ИАК методы комбинированного моделирования ПП, учитывающие как типовые, так и специфические технологические особенности переработки УВ, обеспечивают новые возможности в решении актуальных для отрасли задач, в частности:

- анализ реализуемости подготовленных на приближенных моделях оптимизационного планирования планов производства и отгрузки продукции;
- оценка технологической эффективности вариантов изменения действующей на ПП схемы переработки УВ;
- разработка рекомендаций по изменению (переориентации) существующих технологических схем и потоков производства из-за возможного достижения отдельными узлами ПП предельных значений по загрузке или их возможному превышению;
- анализ сбалансированности процессов ПП с детальным учетом ограничивающих факторов;
- формирование графиков работы ПП в периоды остановок отдельных объектов для проведения ремонтных работ;
- интеграция нескольких ПП, объединенных транспортной сетью, в общую структуру;
- мониторинг и прогнозирование отгрузки товарной продукции, а также оценка факторов, оказывающих наибольшее воздействие на возможные отклонения от намеченных планов;

- оценка технологических эффектов реализации проектов нового строительства, реконструкции, технического перевооружения и модернизации объектов переработки и др.

Суть научной новизны представленного доклада заключается в следующем:

- разработке новых подходов к моделированию объектов переработки, позволяющих решать специфические для отрасли задачи эффективного управления ПП;
- постановке и решении задач математического (преимущественно линейного) программирования с учетом специфики функционирования конкретных объектов переработки;
- отработке способов объединения результатов моделирования, полученных на имитационной и аналитической моделях в едином расчетном контуре;
- разработке и внедрению новых алгоритмов моделирования стационарных и переходных режимов работы ТУ и РП;
- разработке новых алгоритмов формирования и обслуживания (обработки) заявок между объектами переработки;
- создании нормативной базы по внедрению результатов моделирования в процессы оперативного принятия решений.

Практическая значимость заключается в использовании ИАК в качестве универсального средства поддержки принятия решений, позволяющего оперативно оценивать результаты функционирования ПП в различных вариантах, планировать и проверять реализуемость намеченных планов производства, повышать эффективность реконструкции и технического перевооружения, а также отвечать на большое число (по сути несчетное множество) других управленческих вопросов.

Структура имитационно-аналитического комплекса перерабатывающих производств нефтегазовой отрасли

Имитационно-аналитический комплекс представляет собой цифровой двойник, способный детально отражать динамику потоков ПП и обеспечивать широкие возможности управления. ИАК разработан на принципах системной инженерии, имитационного моделирования, математического программирования и других научных дисциплин. Проведенные эксперименты продемонстрировали высокую эффективность ИАК в части повышения точности планирования и эффективности управления процессами переработки УВ, а также использования ИАК в качестве универсального средства поддержки принятия решений при ответах на разнообразные вопросы типа «что, если?», возникающие в процессах оперативного и стратегического управления ПП.

ИАК включает следующие элементы (рис. 2):

- имитационные потоковые модели (ИПМ) Уренгойского ЗПКТ и Сургутского ЗСК, с высокой степенью детальности на уровне материальных потоков отражающие процессы переработки УВ;
- аналитические оптимизационные модели распределения входящих потоков сырья между ТУ;
- разностную динамическую и нейросетевую модели оценки переходных процессов, протекающих в РП;
- гидродинамическую модель конденсатопровода для расчета движения потоков между ПП.

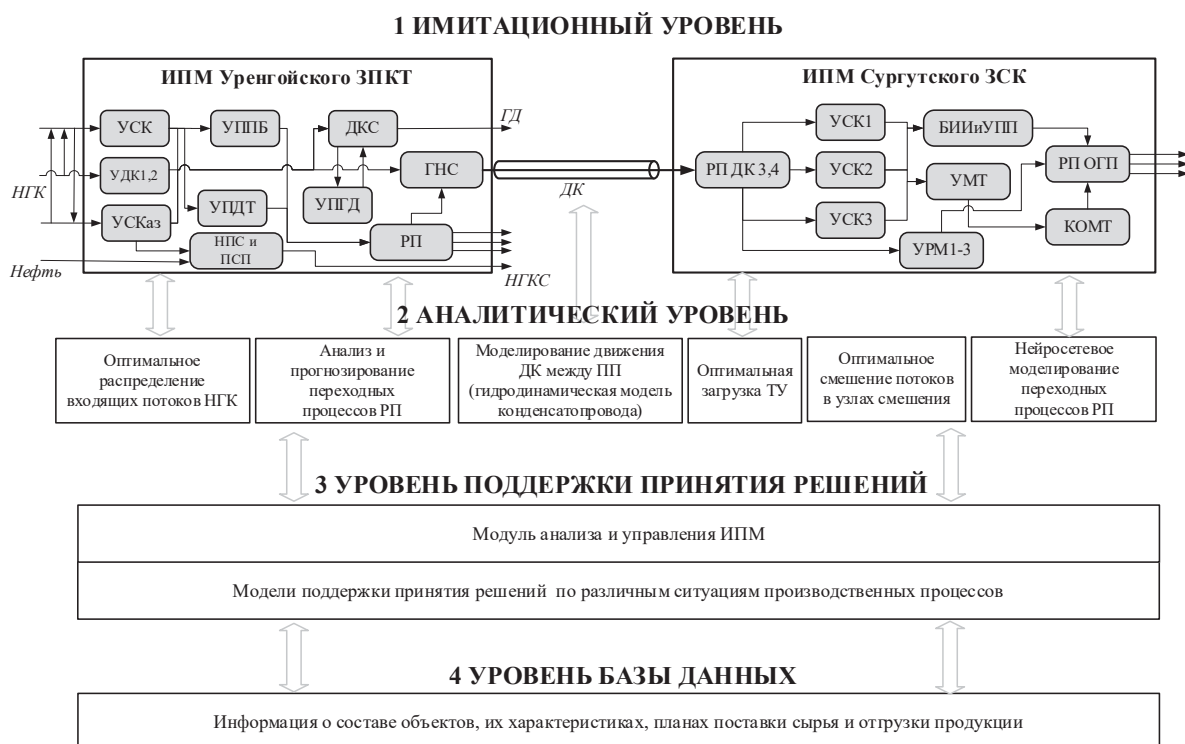


Рис.2. Структура ИАК Западной Сибири:

БИИиУПП – блок извлечения изопектака и установка получения пропана;
 ГНС – газонасосная станция; ДКС – дорожная компрессорная станция;
 КОМ – установка комплексного облагораживания моторных топлив;
 НПС – нефтеперекачивающая стнция; ПСП – приемо-сдаточный пункт;
 РП ДК – резервуарный парк деэтаномизированного конденсата;
 РП ОГП – резервуарный парк отгрузки готовой продукции;
 УДК – установка деэтанизации конденсата; УМТ – установка моторных топлив;
 УПГД – установка подготовки газо деэтанизации; УПДТ – установка производства
 дизельного топлива; УППБ – установка производства пропан-бутана;
 УРМ – установка регенерации метанола; УСК – установка стабилизации конденсата;
 УСКаЗ – установка стабилизации конденсата ачимовских залежей.

Отметим, что кроме вышеперечисленных элементов ИАК включает большое число других модулей и алгоритмов (например, алгоритмы сглаживания потоков, учета взаимозависимых ТУ, отслеживания «блуждающих» (перемещающихся между продуктами) резервуаров и др.), позволяющих детально отражать протекающие процессы переработки ПП, поверхностно представленных или полностью отсутствующих в других программных системах подобного типа [14]–[16].

Одним из ключевых преимуществ ИАК является возможность визуализации процесса динамического составления материального баланса по всем узлам ПП, позволяющая еще на этапе моделирования обнаружить возможные отклонения от заданных величин, определить их причины и провести коррекцию принятых планов производства (от промысла до отгрузки товарной продукции), а также детально оценить последствия принятия тех или иных решений. Основные характеристики ИАК приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики ИАК

Наименование	Значение	Примечание
Тип моделируемых процессов	Непрерывные	–
Характер процессов	Динамический	–
Подход к описанию процессов. Учет случайных факторов	Детерминированные и случайные процессы в переработке нефти и конденсата	Расчеты по составлению материальных балансов выполняются в детерм. постановке. При решении задач в условиях неопределённости (например, будущих поставок НГК, начала проведения ремонтных работ) учитываются случайные факторы
Число моделируемых объектов	ЗПКТ > 120; Конденсатопровод > 100; СЗСК > 600	-
Уровень детализации	ТУ - до линий; РП - до резервуаров; МК - до перемычек	-
Скорость моделирования	От 1 месяц до 7 мин	Указано время моделирования одного ПП для посуточных планов поставки НГК. В случае задания месячных планов поставки НГК время моделирования ПП сокращается до 3-4 мин
Длительность моделирования	Не ограничена	-
Шаг моделирования	Часы	Эмпирически установленный максимально-приемлемый шаг для учета переходных процессов ТУ и РП
Точность моделирования	> 97%	Определяется по уровню сходимости расчётных и фактических значений показателей по приему сырья, выходу товарной продукции, а также входящим и выходящим потокам каждой ТУ (в расчет не принимаются техногенные отклонения от стационарного режима)

В ИАК приняты следующие допущения:

- все потоки проходят через узлы ИПМ мгновенно и не задерживаются в них (за исключением РП и ж/д цистерн, находящихся на наливных эстакадах);
- переходные режимы с длительностью менее шага моделирования в расчетах не учитываются;
- ряд факторов, учитываемых в аналитических моделях расчета оптимального разделения потоков между установками (например, максимальная загрузка ТУ в зависимости от результатов смещения потоков), линеаризованы;
- между ИПМ отсутствуют «обратные» связи;
- при задании месячных планов поставки НГК мгновенные значения потоков определяются исходя из расчета их средних значений с учетом возможного сглаживания и др.

Рассмотрим каждую из составляющих ИАК более подробно.

Имитационная потоковая модель перерабатывающего производства нефтегазовой отрасли

Имитационная потоковая модель - ключевой элемент ИАК, который является виртуальным двойником реального ПП и позволяет в процессе моделирования управлять материальными потоками в каждом узле ПП, а также оценивать разнообразные статические и динамические показатели работы объектов. Для ускорения построения, адаптации, а также возможностей применения на других ПП нефтегазовой отрасли на языке *Java* с использованием идей библиотеки моделирования потоков (*FluidLibrary*) системы имитационного моделирования Anylogic [17] была построена библиотека типовых объектов (узлов), составляющих основу имитационной части ИАК:

- источник - контейнер, определяющий одно или несколько месторождений, позволяющий задавать различные типы входных потоков (нефть, НГК и т.д.). Источники устанавливают динамику входящих потоков на основе информации о планируемых поставках из подключенной базы данных; при необходимости проводят «сглаживание» значений потоков и др.;

- технологическая установка - основной объект имитационной модели, позволяющий воспроизводить результаты различных процессов разделения потоков УВ (сепарация, ректификация, каталитические процессы и т.д.) с учетом доступных мощностей (мин/макс) и их привязкой к конкретным режимам. Для этого используются статистические и ретроспективные данные, результаты опытных пробегов или химико-технологических расчетов, например, рассчитанных в Aspen Hysis [18]. Для каждой ТУ задаются наборы рецептур, которые формализуют процентные соотношения, связывающие тонну входящего смесового потока с выходящими потоками продукции в каждом режиме;

- проточный резервуарный парк характеризуется непрерывными притоками и оттоками продукта, которые одновременно заполняют и разгружают несколько параллельно связанных в группу резервуаров. Используются для «сглаживания» исходящих потоковых импульсов;

- накопительный резервуарный парк реализует процедуры накопления, компаундирования, отстоя, паспортизации и отгрузки продукции на наливные эстакады либо ее перекачки в последующие парки;

- узел откачки позволяет устанавливать планы по откачке продукции, задавать различную длительность (ежедневно, ежемесячно) и динамику отгрузки (как можно быстрее, равномерно в течение месяца), а также отслеживать степень выполнения планов в процессе моделирования;

- делитель разделяет входящий поток на любое количество исходящих потоков на основе установленных коэффициентов разделения;

- смеситель смешивает любое количество входящих потоков в один исходящий поток на основе установленных коэффициентов смешения;

- узел смешения (производства продукции) смешивает входящие потоки и присадки в заданной пропорции на основе различных алгоритмов (например, на основе ФХС потоков или математических алгоритмов оптимизации) для получения желаемых продуктов (например, бензинов), удовлетворяющих требованиям нормативных документов;

- узел квотирования ограничивает перекачку продукции между объектами ПП с учетом максимальной производительности насосного и др. оборудования;

- наливная эстакада моделирует погрузку продукции в железнодорожные или автомобильные цистерны на погрузочной платформе, управляет расписанием составов с различным типом вагонов, количеством отгружаемой продукции, сроками поставки/вывоза и другими факторами.

ИПМ представляется в виде перечисленных объектов, соединенных между собой потоками сырья и готовой продукции. Каждый узел ИПМ позволяет задать множество специфических параметров и ограничений, приближающих результаты моделирования к результатам работы реального объекта ПП. Например, производительность любой линии ТУ ограничивается нижней и верхней границами допустимой загрузки, зависящей от множества факторов (время года, компонентно-фракционный состав (КФС) смеси, технологический режим и проч.). Режим является одной из важнейших динамических характеристик ТУ. На практике под понятием режима скрывается совокупность физико-технологических параметров линий ТУ (прежде всего давления и температуры), определяющих результаты разделения поступающего потока сырья с ориентацией на целевой продукт. В процессе моделирования учет влияния этих параметров проводится путем расширения количества доступных в БД рецептов. Каждая из линий в момент моделирования может находиться в каком-либо одном режиме и изменять его с течением времени. Множество возможных режимов, а также взаимосвязи между ними задаются диаграммой состояний (рис.3). Отметим наличие «переходных» процессов, связанных с невозможностью линий ТУ мгновенно изменять режим своей работы. Например, при моделировании установки производства дизельного топлива (УПДТ), находящейся в режиме производства ДТ, при переходе на режим производства авиационного керосина (ТС-1) необходимо учитывать наличие суточного переходного режима, связанного с выпуском некондиционного продукта. Данное действие соответствует регламенту на производство продукции, а также реальным условиям эксплуатации УПДТ.

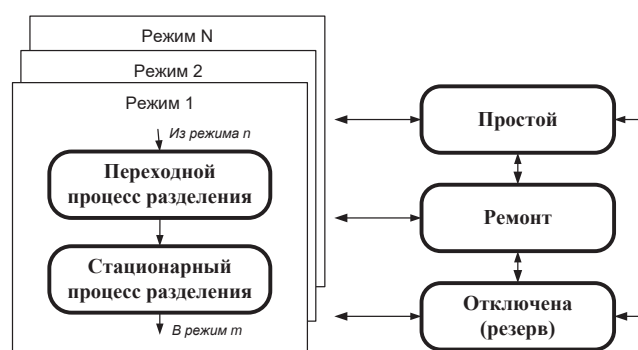


Рис. 3. Типовая диаграмма состояний линии ТУ

Между режимами линий ТУ могут быть установлены дополнительные ограничения, например, обязывающие (или исключающие) появление какого-либо режима на линии ТУ в зависимости от другой линии или режимов других ТУ (учет взаимозависимых ТУ).

Основным правилом, выполняемым ИПМ в процессе моделирования, является закон сохранения массы между поступающим сырьем, изменением находящегося в узле остатка (для РП), выходящими потоками, а также условными нормативными потерями продукта. Потери могут возникать на всех стадиях технологической цепочки и, как правило, не превышают 1-2% масс в узле. Помимо баланса по массе в ходе моделирования и проведения расчетов используются также объемные характеристики потоков (например, при разделении потока НГК между линиями¹ головных ТУ и определении их максимальной загрузки, которая указывается в м³), для корректного расчета которых в ИПМ реализованы специализированные алгоритмы, учитывающие

¹ Технологическая линия – это обособленная технологическая единица, обладающая набором аппаратов, оборудования и технических средств, связанных одной системой трубопроводов, для выполнения комплекса процессов при переработки сырья.

физико-химические свойства (ФХС) сырья, прежде всего плотность как функцию давления и температуры [7].

Помимо связей, заданных расходами потоков, узлы ИПМ связаны между собой информационно-управленческими потоками заявок. Заявки позволяют управлять функционированием одних узлов ИПМ в зависимости от потребностей других. На рис. 4 представлен фрагмент ИПМ, содержащий связанные между собой ТУ, РП, наливную эстакаду и узел откачки. В начале моделирования узел откачки загружает из БД информацию о запланированном на ближайший месяц объеме откачки ДТ. Наливная получает сведения о графике и составе вагоно-цистерн под АИ-92 и ДТ, прибывающих на ПП. Исходя из количества и вместимости вагоно-цистерн, поступивших для налива, формируется заявка на продукцию из РП. В свою очередь узел откачки независимо формирует заявку на ожидаемую откачку продукции из РП в течение месяца. Поступившая от узла откачки заявка позволяет РП сформировать собственную заявку к ТУ на производство ДТ. В ней учитываются остатки готовой к отгрузке партии ДТ, ожидаемые потери при перекачке, а также использование присадок. В процессе моделирования РП могут также формировать заявки к ТУ более низких приоритетов на дополнительное производство продукции в связи с ожидаемыми значительными планами на отгрузку в следующем месяце, наличия резервуара с остатками ниже минимума для начала паспортизации или другими причинами.

Управление заявками, поступившими с различных узлов, осуществляется в едином модуле управления ИПМ. Используя лексикографическое упорядочивание заявок, проводится их сравнение и последующая приоритизация, на основании чего принимается решение об изменении режима работы ТУ.

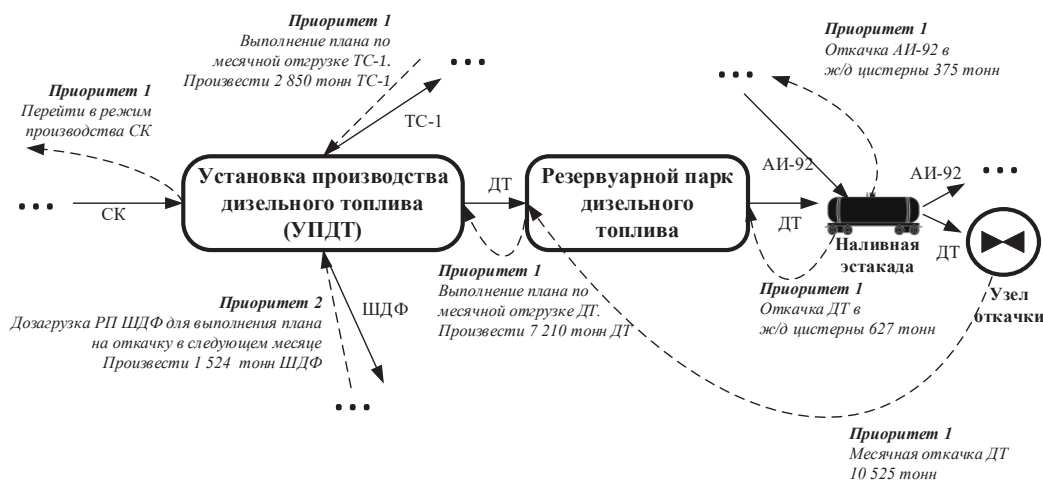


Рис. 4. Фрагмент информационно-управляющих связей между узлами ИПМ, реализованных в форме заявок: ШДФ – широкая дистиллятная фракция (аналог – бензиновая фракция)

Основными причинами, вызывающими потребность в столь детальном моделировании динамики процессов, происходящих на ПП, с одной стороны являются периодические изменения условий его работы (вызванные, например, изменениями планов поставки НГК и отгрузкой продукции), а с другой – работа многих узлов на «пределе возможностей», что требует достаточно точных расчетов для выработки приемлемых решений по управлению.

ИПМ демонстрируют высокую точность сходимости с фактическими результатами работы ПП. Таким образом, ИПМ является адекватным имитационным прототипом функционирования ПП и может использоваться как «цифровой двойник» не

только в составе ИАК, но и автономно. Кроме этого, ИПМ содержит отработанные интерфейсы с блоками аналитической оптимизации и схемы управления РП, построенной на конечно-разностной аппроксимации.

Краткость описания ИПМ на примере сложного производственного комплекса по переработки НГК в Западной Сибири не позволила остановиться на большом числе особенностей имитационного моделирования, учет которых требует использования различных методов и подходов. Некоторые примеры, вызвавшие необходимость в использовании комбинаторного моделирования, приведены ниже.

Аналитические модели оптимального распределения входящих потоков сырья

При построении ИПМ перерабатывающих производств неизбежно возникают задачи, которые достаточно сложно решить путем имитации или решение которых на имитационных моделях заняло бы неприемлемо продолжительное время ввиду их значительной комбинаторной сложности. Для решения подобных задач в состав ИАК включен модуль математической оптимизации. Приведем описание трех типов аналитических моделей, включенных в данный модуль:

- уникальные оптимизационные модели распределения входящих потоков сырья между головными ТУ;
- типовые оптимизационные модели распределения входящих потоков сырья между линиями ТУ;
- модели оптимального смешения сырьевых потоков, реализованные в узлах смешения ИПМ, для получения готовой продукции, соответствующей требованиям нормативной документации.

Известно, что многие ПП спроектированы таким образом, что на их входе отсутствуют РП, а поступающие потоки сырья сразу же направляются на головные ТУ. При изменении скоростей входящих потоков, их КФС, режимов работы ТУ, а также по другим причинам возникает задача недопущения превышения загрузки головных ТУ. В то же время приостанавливать или сокращать входящие на ПП потоки крайне нежелательно (или даже невозможно), так как НГК является попутной продукцией при добыче газа. Именно это условие (принять все сырье) и предопределяет цель в данной задаче. Следует также отметить существование «возвратных» потоков с ПП, которые подмешиваются к входящим потокам, что дополнительно усложняет получение решения.

Описанная задача решается в ИАК следующим образом: после изменения скорости любого из входящих потоков ИПМ приостанавливает процесс имитации и передает обновленные массовые расходы в оптимизационный модуль¹, который заносит полученные значения в подготовленный шаблон оптимизационной системы уравнений. Отметим, что при решении данной задачи необходимо также учитывать большое количество других факторов: время года, КФС и типы потоков (ряд ТУ может работать только на более «легком» валанжинском НГК, в то время как другие ТУ допускают смешение с более «тяжелыми» ачимовскими потоками), текущие (для минимизации числа переключений) и желаемые (для максимальной выработки товарной продукции) режимы линий ТУ и другие. Результаты разделения потоков на линиях ТУ, а также непринятые остатки НГК возвращаются в ИПМ, после чего процесс моделирования продолжается.

Отметим, что задача создания уникальной оптимизационной модели распределения входящих потоков возникает также в случае, когда ПП имеет на входе РП. Например, на Сургутском заводе стабилизации конденсата (ЗСК) распределение потоков

¹ Оптимизационный модуль реализован в среде *LpSolve*.

ДК, поступивших от ЗПКТ, осуществляется из принимающих проточных РП ДКЗ и РП ДК4 на девять технологических линий УСК. Состав учитываемых в этом случае ограничений, естественно, по-своему уникален.

Другим классом процессов переработки УВ, для описания которых также используются алгоритмы оптимизации, является компаундирование потоков, происходящее в узлах смешения (УС). Каждый УС представляет собой объект ПП, на вход которого поступает один или несколько потоков, а на выходе получается готовый продукт, а также непринятые для смешения остатки. В ходе смешения к получившейся продукции обычно добавляются присадки.

Классическим примером узла смешения ИПМ является узел смешения потоков для получения автомобильного бензина АИ-95. На вход данного узла в ИПМ поступают сырьевые потоки фракций, выкипающих при температурах НК-85 °С, 50-100 °С, различные катализаторы и изопентан. Для обеспечения соответствия получаемого АИ-95 требованиям ГОСТ по октановому числу, содержанию бензола, ароматики и проч. [19], которые могут оцениваться как по массовому, так и объёмному расходам, используется метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ). В ИПМ добавление МТБЭ реализовано путем включения в узел смешения дополнительного узла источника. Наиболее интересным и сложным в расчетах является использование «балансирующей» МТБЭ, которая позволяет обеспечить требуемые в ГОСТ характеристики выпускаемого продукта, но при этом является достаточно дорогостоящей.

При изменении скорости любого из входящих на узел смешения потоков ИПМ приостанавливает моделирование и вызывает модуль оптимального смешения. По аналогии с предыдущим примером, ИПМ передает в модуль мгновенные расходы входящих потоков, требования к качеству выпускаемой продукции, а также текущие значения параметров имитационной модели (например, время года для учета требований ГОСТ к летнему или зимнему сортам). Результатами расчета являются коэффициенты разделения сырьевых потоков на принятую для смешения и остаточные (непринятые) части. Формально указанные условия в предположении аддитивности требуемых ГОСТ характеристик могут быть записаны:

$$Q_{prod,95} \rightarrow \max,^1 \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^N Q_{in,i} + \sum_{j=1}^M Add_j = Q_{prod,95} + \sum_{i=1}^N Q_{res,i}, \quad (2)$$

$$Q_{prod,95} = \sum_{i=1}^N Q_{prod,i} + \sum_{j=1}^M Add_j, \quad (3)$$

$$Q_{in,i} = Q_{prod,i} + Q_{res,i}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N W_{i,j} \cdot \frac{1}{\rho_i} \cdot Q_{prod,i} > V_j, \quad (5)$$

где $Q_{prod,95}$ – мгновенный расход АИ-95 на выходе из узла смешения;

$Q_{in,i}$ – мгновенный расход сырьевого потока i на входе в узел смешения;

Add_j – мгновенный расход присадки j в узле смешения;

¹ В некоторых случаях используется другой вариант целевой функции, связанной с минимальным вовлечением МТБЭ.

$Q_{res,i}$ – мгновенный расход непринятой части сырьевого потока i на выходе из узла смешения;

N – количество смешиваемых потоков;

M – количество используемых присадок;

$W_{i,j}$ – j -я характеристика i -го потока (например, содержание бензола в катализате);

ρ_i – плотность i -го потока;

$W_{i,j}$ – предельное требование ГОСТ по j -й характеристике в итоговом продукте (например, октановое число по инструментальному методу, не менее чем).

При решении (1)-(5) следует также учитывать возможное влияние балансирующей присадки. Так как предельный расход таких присадок обычно строго нормирован ($Add_j \leq Add_{limit,j}, \forall j \in [1, M]$), на первом этапе решение оптимизационной задачи производится в предположениях максимального вовлечения присадки ($Add_{limit,j}$) в конечный продукт, что позволяет снизить предельные значения требуемых ГОСТ характеристик ($W_{i,j}$). После получения решения следует добавить присадку к результирующему продукту в необходимом количестве.

Таким образом, эффективное функционирование ИАК невозможно без использования аналитических расчетных моделей, ключевое место среди которых занимают модели оптимального распределения входящих потоков сырья и смешения потоков-компаундов для получения товарной продукции.

Имитационные модели управления процессами функционирования резервуарных парков с использованием конечно-разностной аппроксимации

Резервуарные парки ПП можно разделить на проточные и накопительные. Проточные РП обеспечивают сглаживание выходящих потоков. Основными задачами накопительных РП являются накапливание, компаундирование (перемешивание), паспортизация и отгрузка продукции. В ИПМ отгрузка, осуществляемая железнодорожным или автомобильным транспортом, проводится через специализированные, тесно связанные с РП узлы – наливные эстакады, которые оказывают существенное влияние на процессы отгрузки продукции. В отличие от проточного парка, накопительный РП не может проводить одновременно наполнение и откачку в одном и том же резервуаре.

Моделирование РП по способу реализации в ИАК также можно разделить на имитационное и аналитическое. Имитационная часть имитирует все процессы функционирования РП и содержит набор базовых функций управления: только прием / отгрузка, режим «прямоток» и др. Аналитическая модель обеспечивает оценку и прогноз динамики изменения наполнения и откачки продукции из РП.

ИАК использует два типа аналитических разностных моделей для оценки переходных процессов, возникающих в проточных РП, отличающихся составом ограничений, налагаемых на минимальные и максимальные значения допустимых скоростей откачки, и возможностями по их оперативному изменению. Первая модель применяется в случае управления проточными РП, находящимися между ТУ. Здесь необходимо соблюдать требования по соответствию объемов загрузки РП установленным техническими регламентами пределам, а также обеспечивать производительность всей схемы. Вторая модель применяется в случае, когда необходимо регулировать процессы откачки продукции из РП в связанный с ПП конденсатопровод, что ограничивает резкие изменения скоростей выходящих из РП потоков (для предотвращения гидравлического удара в конденсатопроводе).

Ввиду большого числа контролируемых состояний и режимов РП приведем для иллюстрации простейший случай проточного РП, работающего в режиме «прямотока»,

когда поступающий поток не простаивает в парке, а сразу же направляется в конденсатопровод. Уровень заполнения РП в разностной модели, согласно условиям баланса, определяться уравнением:

$$S(t) = S(t - 1) + (V_{in} - V_{out})dt, \quad (6)$$

где $S(t)$ – уровень заполнения РП в момент времени t ;

dt – принятый интервал дискретизации времени, ч;

V_{in} и V_{out} – скорости входного и выходного потоков.

Задача заключается в выборе такой скорости откачки (V_{out}), чтобы в любой момент моделирования одновременно выполнялись следующие условия:

- не нарушались предельно возможные скорости минимальной ($V_{out,min}$) и максимальной ($V_{out,max}$) производительности установленного в РП насосного оборудования;

- обеспечивалось плавное изменение V_{out} не более чем на dV (обычно 50-100 т/ч) для соблюдения «дыхания» резервуаров и предотвращения избыточного гидродинамического воздействия на конденсатопровод, задействованный в перекачке;

- не допускалось переполнение РП ($S(t) \leq S_{max}$).

Для иллюстрации приведем результаты расчета V_{out} (рис. 5), более подробно рассмотренные в работе [20]. Вычисленные значения скоростей V_{out} передаются в ИПМ для учета в дальнейших расчетах.

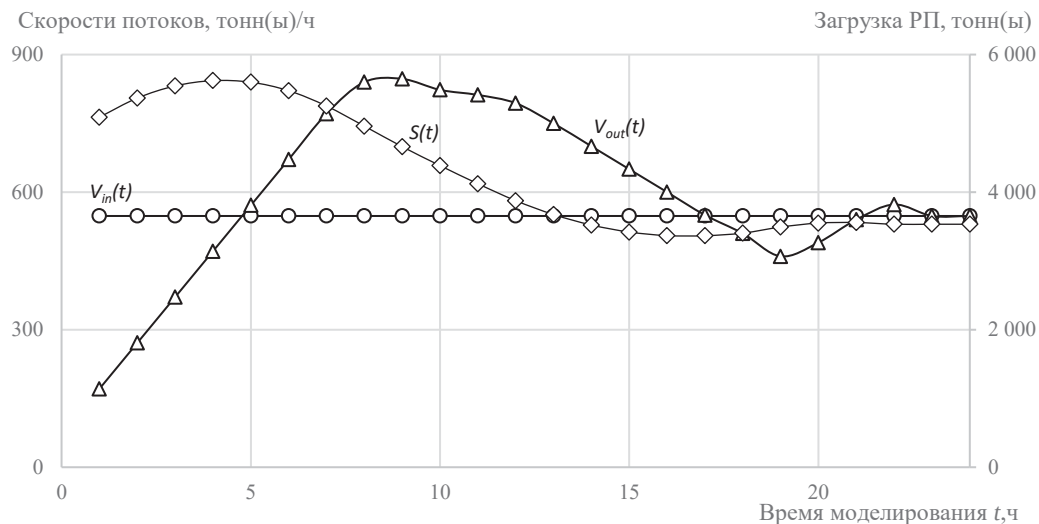


Рис. 5. Пример расчета $V_{out}(t)$ в зависимости от $V_{in}(t)$ и $S(t)$

Подобные перерасчеты $V_{out}(t)$ хотя и позволяют достаточно точно прогнозировать процесс изменения скоростей откачки на реальном объекте ПП, расходуют значительное время и вычислительные ресурсы, что требует создания более эффективных алгоритмов. Один из подобных алгоритмов, базирующийся на моделях нейронных сетей, предложен в работе [21].

Полученные на ИПМ Уренгойского ЗПКТ скорости и КФС потоков ДК через встроенную БД передаются в гидродинамическую модель, обеспечивающую связь между ИПМ Уренгойского ЗПКТ и Сургутского ЗСК. Данная модель учитывает топологию и геометрию связывающего ПП конденсатопровода, возможные отключения участков и вывод их в ремонт, а также изменения гидравлического сопротивления за счет использования противотурбулентных присадок [22]. Проводится нестационарный гидродинамический расчет процесса транспортировки ДК, результатом которого является динамично меняющийся входящий поток для ИПМ Сургутского ЗСК.

Транспортировка ДК от Уренгойского ЗПКТ до Сургутского ЗСК занимает существенное время (от 10 дней до трех недель), что оказывает значительное влияние на планирование режимов работы ПП с учетом неоднородности состава суточных сырьевых партий. Отметим, что задача нестационарного моделирования конденсатопровода является достаточно сложной и играет ключевую роль в процессах ИАК, поскольку величины потоков, а также их КФС и ФХС подвержены существенным изменениям в процессе моделирования.

Результаты использования имитационно-аналитического комплекса в практике работы перерабатывающих производств нефтегазовой отрасли

Реализованный в ИАК подход комбинированного моделирования для Уренгойского ЗПКТ и Сургутского ЗСК, охватывающий большое число специфических для ПП особенностей, позволил существенно улучшить результаты планирования и обоснования принимаемых решений при условии сохранения приемлемой сложности. Следует отметить, что в области управления ПП уже долгое время существуют готовые программные средства, также направленные на улучшение и оптимизацию процессов переработки УВ, которые могут быть разделены на группы оптимизационного планирования и химико-технологического моделирования. Сравнительный анализ возможностей ИАК и современных программных комплексов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ возможностей программных комплексов управления перерабатывающими производствами

Направление сравнения	Имитационно-аналитический комплекс (ИАК)	Системы оптимизационного планирования	Системы химико-технологического моделирования
Решаемые задачи	Планирование и управление. Поиск оптимальных вариантов управления	Планирование и управление. Поиск оптимальных вариантов управления	Проектирование. Поиск оптимальных технологических режимов
Результат	Реализуемый производственный план	Оптимальный производственный план	Расчетные параметры химико-технологических процессов
Учет специфики (резервуарные парки, ДКС, наливные)	Максимальный учет особенностей объектов переработки	Укрупненные модели некоторых объектов	Глубокий учет химико-технологических особенностей объектов переработки УВ
Состав управляемых переменных	Режимы с технологическими рецептурами, доступность и производительность установок, скорости откачки, взаимосвязь с другими объектами ПП, интенсивности потоков, их КФС и ФХС	Производительность установки, технологические рецептуры, цены, затраты, условия смешивания и др.	Параметры колонн, теплообменников, печей, число тарелок, места подачи сырья, (физико-технические переменные)
Подход к моделированию	Комбинированный (имитационно-аналитический)	Аналитический (линейное программирование)	Аналитический (решение уравнений состояния термодинамических систем)

Направление сравнения	Имитационно-аналитический комплекс (ИАК)	Системы оптимизационного планирования	Системы химико-технологического моделирования
Источники исходных данных (на примере ТУ)	Статистика, регламентные данные	Статистика, регламентные данные	Справочные, экспериментальные и проектные данные
Учет случайности	Возможно	Ограничено (решение «двойственных» задач)	Ограничено

Тестирование ИАК проводилось в период 2023-2025 годов. В ходе тестирования от реальных ПП была получена информация о плановых поставках НГК (ДК), а также укрупненных планах выработки товарной продукции по месяцам и графиках проведения ремонтных работ.

Указанные сведения использовались в ИАК и на их основе проводился расчет материального баланса каждого из узлов и ПП в целом. По окончании месяца анализировались результаты работы ПП, для чего данные из фактического материального баланса (вход сырья по суткам и результаты производства продукции) также принимались в качестве исходных данных для ИАК. Результаты ИАК по всем узлам и потокам ПП сравнивались с показателями фактического материального баланса.

Следует сразу же обратить внимание на ряд практических сложностей, связанных с попыткой сравнения расчетных и фактических значений работы ПП, вызывающих отбраковку некоторых фактических величин:

- различные события техногенного характера (природные аномалии, повлиявшие на энергоснабжение объекта ПП и проч.) или внутренней среды (нештатные действия внутри ПП и проч.) с отражением на результативность объекта;

- возможное несовпадение моментов времени работы ТУ в одинаковых режимах. Например, УПДТ в ИАК первые 15 дней работает в режиме производства ТС-1, а оставшиеся (с 16 по 30 день) – в режиме производства ДТ. Фактическая же динамика изменения режимов УПДТ в силу каких-то причин оказалась обратной (сначала производство ДТ, а потом ТС-1);

- отсутствие в некоторых узлах ПП расходомеров, когда соответствующие значения в фактической отчетности были занесены технологом ПП исходя из собственных представлений о величинах потоков в соседних узлах, и др.

Сравнение суточных материальных балансов реальной работы отдельных объектов ПП с косвенным влиянием вышеуказанных факторов не проводилось.

В табл. 3 приведены результаты сравнения расчетов ИАК с фактическими данными работы ПП. Указаны модули средних относительных отклонений между расчетными и фактическими величинами при месячном планировании.

Таблица 3. Сравнение расчетов ИАК с фактическими результатами ПП

Показатель	По рецептурам	По КФС
Прием НГК	1,22%	0,1%
Выполнение планов по отгрузке продукции	0,54%	0,36%
Расчет выходов ТУ	4,31% (макс: 6,70%)	2,30% (макс: 3.40%)
Остатки в РП на конец расчета	1,88%	1,88%

Из табл. 3 видно, что сравнение проводилось двумя методами: с использованием в качестве исходных данных готовых рецептур для каждой ТУ и развитием нового (перспективного) подхода, связанного с расчетом рецептур на основе КФС потоков и так называемых «функций отбора компонентов», которые позволяют динамично адаптировать рецептуры ТУ к изменяющимся углеводородным составам сырьевых потоков. Из таблицы следует, что подход к прогнозированию на основе КФС потоков обеспечивает высокую точность результатов по сравнению с фактическими данными ПП. Кроме этого, данный подход позволяет проанализировать КФС (а следовательно, и основные ФХС), что открывает для ИАК принципиально новое направление использования – управление ПП на основе анализа структуры и качества потоков.

Заключение

Практическое использование ИАК диктует потребность в постоянном развитии возможностей данного комплекса в части поддержки принимаемых решений типа «что, если?», а также придания отдельным компонентам более высокого универсализма в части охвата в моделях существующей в нефтегазовых процессах специфики, применения более точных методов и алгоритмов реализации отдельных функций, например, расчета КФС потоков технологической схемы ПП.

Последнее связано с созданием принципиально нового класса аналитических моделей, способных непосредственно в процессе моделирования на основе созданной в ИПМ топологии объектов представлять ее в виде графа и выполнять его обход с расчетом КФС потоков в каждой точке. Это направление является базовым в ИАК на 2025-2026гг. Создание таких моделей позволит взглянуть «вглубь» потоков ПП, планировать и анализировать результаты принимаемых решений не только в абсолютных величинах (тоннах), но и в разрезе их КФС, учитывая потенциал потоков в части компонентов и фракций, что откроет новый этап повышения возможностей в управлении ПП.

Значительное расширение ИАК планируется достигнуть путем включения в него новых моделей оценки затрат и расчета добавленной стоимости, вносимой каждым из этапов переработки. Планируется добавить новый модуль динамического расчета затрат, который позволит оценивать суммарные издержки на выполнение производственной программы ПП с учетом принятых управленческих решений, рассчитывать себестоимость каждого из потоков ПП в каждом из узлов ИПМ и. в конечном итоге, рассчитывать экономическую эффективность производства.

И, наконец, более полный учет и оценка влияния случайностей, связанных с нарушением предельных технологических требований эксплуатации ТУ и циркулирующих в ПП потоков, вызывает потребность в развитии ИАК в направлении прогнозирования и оценки рисков.

Литература

1. **Голубева И.А.** Новоуренгойский завод по подготовке конденсата к транспорту (ООО «Газпром переработка») / И.А. Голубева, Е.В. Родина // Нефтепереработка и нефтехимия. 2015. № 5. С. 19-25.
2. **Голубева И.А.** Сургутский завод стабилизации конденсата / И.А. Голубева, Е.В. Родина // Нефтепереработка и нефтехимия. 2015. № 4. С. 37-42.
3. **Линник Ю.Н., Кирюхин М.А.** Цифровые технологии в нефтегазовом комплексе // Вестник университета. 2019. № 7. С. 37-40.
4. **Солиев Н.Н.** Единый программный комплекс для моделирования в нефтегазовой промышленности // Академический журнал Западной Сибири. 2015. Т. 11. № 2 (57). С. 52–53
5. **Дмитриевский А.Н., Ерумин Н.А., Черников А.Д.** Цифровая модернизация нефтегазодобычи: инструменты и индикаторы развития // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 1. С. 44–47. DOI: 10.24412/2076-6785-2024-1-44-47.
6. **Кисленко Н.А., Литвин Ю.В., Обухов О.Е.** Цифровая трансформация процессов управления перерабатывающими производствами нефтегазовой отрасли на базе комбинированного моделирования // Газовая промышленность. 2023. № 9 (854). С. 32-41.
7. **Капустин В. М.** Технология переработки нефти : учебное пособие для вузов / В. М. Капустин, А. А. Гуреев. М.: Химия, КолосС, 2007. 400 с.
8. **Технология переработки природного газа и конденсата.** Справочник, М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 517 с.
9. **Якимов А.И., Якимов Е.А., Борчик Е.М.** Имитационное моделирование производственных систем. Могилев: 2021. 196 с.
10. **Шпак П.С., Сычева Е.Г., Меринская Е.Е.** Концепция цифровых двойников как современная тенденция цифровой экономики // Вестник Омского университета. Сер. Экономика. 2020. № 1. С. 57-68. doi: 10.24147/1812–3988.2020.18(1).57-68.
11. **Еремин Н.А., Еремин Ал.Н.** Цифровой двойник в нефтегазовом производстве // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 12. С. 14-17.
12. **Le Boudec J.-Y.** Network Calculus: A Theory of Deterministic Queuing Systems for the Internet. Berlin: Springer, 2022. 265 p.
13. **Helal, A.** A hybrid system dynamics-discrete event simulation approach to simulating the manufacturing enterprise : Dissertation, Orlando, Florida, 1999. – 390 p.
14. **Фомина В.В.** Анализ программных систем в переработке нефти и газа / В.В. Фомина // Нефтегазовое дело. 2017. № 4. С. 194-214. – URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/issues/4_2017/ogbus_4_2017_p194-214_FominaVV_ru.pdf (дата обращения: 06.09.2025).
15. Роль цифровизации в улучшении эффективности добычи и переработки нефти и газа [Электронный ресурс] // КиберЛенинка. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-tsifrovizatsii-v-uluchshenii-effektivnosti-dobychi-i-pererabotki-nefti-i-gaza/viewer> (дата обращения: 06.09.2025).
16. **Khasanov I.** From digital to high-digital oil and gas production [Electronic resource] / I. Khasanov, A. Gazizov, M. Frolov // ResearchGate. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/373112562_From_digital_to_high-digital_oil_and_gas_production (дата обращения: 06.09.2025).
17. Обзор AnyLogic [Электронный ресурс] // Lokad: официальный сайт. – URL: <https://www.lokad.com/ru/review-of-anylogic-ком/> (дата обращения: 09.09.2024).
18. **Al-Harbi A., Al-Mutairi E. M., Al-Ajmi A.** A Case Study on the Application of Aspen HYSYS to Optimise the Performance of an Existing Gas Sweetening Process Plant // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2015. – Vol. 4, № 4. – P. 1–7. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/278329853>

- A Case Study on the Application of Aspen HYSYS to Optimise the Performance of an Existing Gas Sweetening Process Plant (дата обращения: 09.09.2024).
19. ГОСТ 32513-2013. Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартиформ, 2014. IV, 21 с.
20. **Кисленко Н.А., Литвин Ю.В., Обухов О.Е.** Математическое моделирование процессов перекачки продукции через резервуарные парки перерабатывающих заводов [Электронный ресурс] // Нефтегаз.ру. 2024. URL:<https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/801715-matematicheskoe-modelirovanie-protssesov-perekachki-produktsii-cherez-rezervuarnye-parki-pererabatyv/> (дата обращения: 06.09.2025).
21. **Кисленко Н.А., Литвин Ю.В., Обухов О.Е.** Математическое моделирование процессов перекачки продукции через резервуарные парки перерабатывающих заводов [Электронный ресурс] // Нефтегаз.ру. 2024. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/tsifrovizatsiya/805875-matematicheskoe-modelirovanie-protssesov-perekachki-produktsii-cherez-rezervuarnye-parki-pererabatyv/> (дата обращения: 06.09.2025).
22. **Сухарев М.Г.** Анализ и управление стационарными и нестационарными режимами транспорта газа / М.Г. Сухарев, Р.В. Самойлов. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2017. 399 с.