

622.279.26/.4+665.63+66.011

А.Г. Касперович, М.В. Овсянкин, Д.А. Рычков, О.А. Омельченко

Комплексное моделирование добычи и переработки жидких углеводородов северных месторождений ОАО «Газпром» в Западной Сибири

Действующий с 1985 г. крупнейший в России комплекс ОАО «Газпром» по добыче, транспорту и переработке жидкого углеводородного сырья в настоящее время вступает в период интенсивного развития, связанного с вводом в эксплуатацию ряда новых газоконденсатных (ГКМ) и нефтегазоконденсатных (НГКМ) месторождений, сопровождающимся значительным приростом объемов добычи. Для подготовки, транспорта и переработки возрастающих объемов жидких углеводородов необходимо строительство новых и реконструкция действующих мощностей, развитие новых направлений переработки, транспорта и реализации продукции.

Разработка решений по реконструкции и развитию комплекса осложняется значительными изменениями структуры сырьевой базы и, соответственно, составов и физико-химических свойств поступающего на переработку сырья. Это связано со значительным ростом добычи нефти нефтяных оторочек и газового конденсата ачимовских отложений при одновременном устойчивом падении добычи валанжинского конденсата – более легкого проектного сырья действующих мощностей по транспорту и переработке (рис. 1).

В результате этого возникают проблемы с эксплуатацией установленного оборудования, происходят значительные сдвиги балансов и качества производимой продукции.

Действующие на Уренгойском заводе по подготовке конденсата к транспорту (ЗПКТ) и Сургутском заводе по стабилизации конденсата (ЗСК) мощности не рассчитаны на прием значительно утяжеленного сырья, соответствующего прогнозной структуре добычи. При его транспорте и переработке возникнут технологические (выпадение и отложение парафинов) и балансовые (сокращение производства светлых нефтепродуктов и рост выработки тяжелого остатка) проблемы. Уже в настоящее время при весьма незначительном (относительно прогнозируемого уровня)

Ключевые слова:

материально-компонентный баланс, функции отбора компонентов, компонентно-фракционные составы, спецификации продуктов, комплексные расчеты.

Keywords:

material-component balance, component recovery functions, component-fraction composition, product properties, complex calculations.

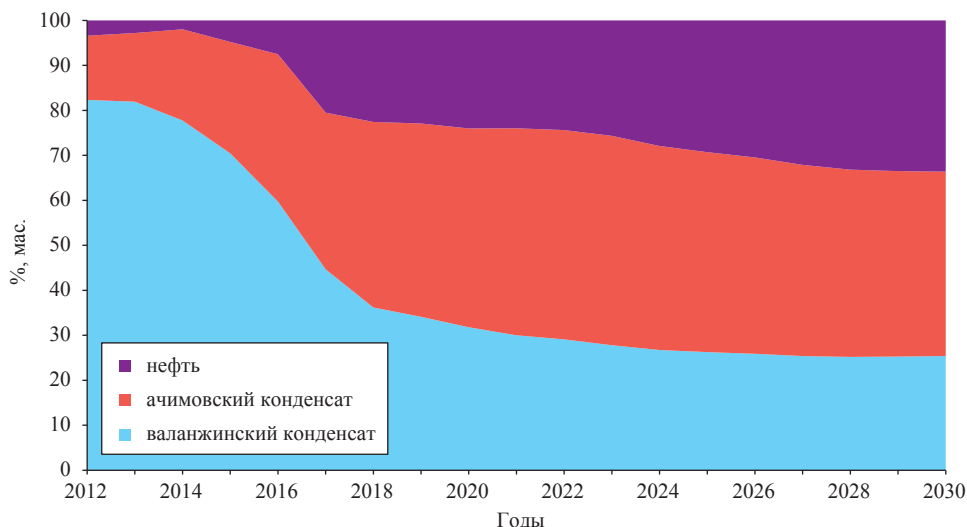


Рис. 1. Прогнозные доли объемов добычи жидких углеводородов

утяжелении состава сырья на Сургутском ЗСК возникла необходимость увеличить объем бензиновых фракций, подаваемых на разбавление остатка переработки для предотвращения потери его текучести и выполнения экспортных требований ГОСТ Р 51858-2002 по максимальному содержанию парафинов (не более 6 % мас.) в стабильном конденсате (СК) товарном, отгружаемом в систему магистральных нефтепроводов ОАО АК «ТрансНефть». Кроме того, возникла потребность в применении депрессорных и диспергирующих присадок во избежание оседания твердых парафинов при хранении и транспорте в железнодорожных цистернах, причем требуемый объем этих присадок растет по мере увеличения доли поставляемого ачимовского конденсата.

Кроме проблем с изменением составов перерабатываемого сырья, прием добываемых жидких углеводородов ограничивается мощностями ряда действующих объектов транспорта и переработки. С учетом этого необходимы как реконструкция и развитие действующих мощностей, так и создание новых альтернативных направлений переработки и транспорта жидкого углеводородного сырья.

В сложившейся ситуации очевидно, что для разработки эффективных решений по реконструкции и развитию добычи и переработки жидких углеводородов в Западной Сибири необходима их комплексная вариантная проработка. При этом одним из основных этапов такой проработки является расчет комплексного баланса добычи и переработки сырья с определением выходов продукции на всех технологических переделах и проверкой соответствия ее состава, физико-химических свойств и показателей качества установленным нормативным требованиям. Приемлемым инструментом для выполнения таких расчетов является созданная авторами в среде электронных таблиц Microsoft Excel и реализованная при решении ряда практических задач комплексная модель добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья ОАО «Газпром» в Западной Сибири.

Основу данной модели составляет специально разработанная методология и прикладное программное обеспечение в виде пакета пользовательских функций, функционалов и макропроцедур для автоматизации итерационных вычислительных процессов. Реализованные в модели принципы ее формирования и выполнения балансовых расчетов с опреде-

лением компонентно-фракционных составов, физико-химических свойств и показателей качества сырьевых, промежуточных и продуктовых потоков изложены в ряде работ с участием авторов, наиболее подробно они представлены в работе [1].

Необходимо отметить, что для моделирования схем добычи и переработки углеводородного сырья и выполнения расчетов балансов и физико-химических свойств потоков существуют специализированные программные продукты – системы технологического моделирования, наиболее популярными из которых в России являются зарубежные HYSYS и PetroSIM, отечественные Gibbs и «ГазКондНефть». Однако создание в среде этих систем моделей сложных объемных комплексов, подобных Западно-Сибирскому, достаточно проблематично по следующим причинам.

Вследствие заложенных в системах достаточно сложных алгоритмов расчетов технологического оборудования (в частности, ректификационных колонн) настройка и выполнение вычислений является весьма непростой задачей. При этом в случае существенных изменений входных характеристик сырья нередко происходят сбои в выполнении расчетов. Это осложняет выполнение расчетов относительно как простых схем, так и сложных взаимосвязанных систем с большим количеством технологических переделов.

Системы технологического моделирования ориентированы на выполнение одновариантных (или однопериодных) расчетов, в то время как для проработки вариантов перспективного развития (а также планирования) необходимы многопериодные (на ряд лет) расчеты, определяющие динамику показателей. Организация многопериодных вычислений на базе систем технологического моделирования возможна (и реализована авторами), однако это требует создания дополнительных весьма объемных шаблонов в среде электронных таблиц.

В системах технологического моделирования не предусмотрены прямые механизмы отключения и переключения потоков для их гибкого перераспределения по объектам переработки и транспорта в соответствии с различного рода ограничениями и критериями, что необходимо при расчетах комплексных схем.

Формирование отчетных материалов (таблиц, графиков) по результатам выполненных в системах технологического моделирова-

ния расчетов осуществляется в среде электронных таблиц. При этом время, требуемое на создание этих таблиц, нередко существенно превосходит время на выполнение самих расчетов. Непосредственное выполнение расчетов в уже сформированных таблицах резко упрощает данную задачу и значительно экономит время выдачи и анализа результатов.

Все вышеизложенное ни в коей мере не является утверждением того, что в системах технологического моделирования нет необходимости, и они полностью могут быть заменены балансовыми моделями в среде электронных таблиц на базе созданной авторами методологии и прикладного программного обеспечения. Для выполнения проектных и аналитических расчетов, в которых необходим детальный анализ работы технологического оборудования, построение профилей термодинамических параметров и т.п. использованию систем технологического моделирования практически нет альтернативы. Более того, системы технологического моделирования необходимы (и фактически используются) и для настройки созданной авторами комплексной модели. Однако для непосредственного выполнения укрупненных балансовых расчетов с целью проработки вариантов реконструкции и перспективного развития комплексных схем добычи и переработки углеводородного сырья, а также производственного планирования более эффективно применение специальных моделей, в частности представляемой в данной статье.

Комплексная модель добычи и переработки углеводородного сырья ОАО «Газпром» в Западной Сибири создана на базе специально разработанной методологии балансового моделирования. Ее отличие от традиционной, используемой в системах технологического моделирования, заключается в построении поточной схемы с помощью условных технологических элементов (бинарных узлов разделения), в которых происходит разделение входящего потока на легкий (парообразный, газовый) и тяжелый (жидкий) потоки. Такие условные элементы можно выделить в ректификационных колоннах и сепараторах, т.е. в технологическом оборудовании, где происходят процессы переработки сырья на основе фазовых переходов «жидкость – пар». Материально-компонентные балансы таких узлов («приходно-расходные» ведомости по сырью – продуктам в целом и по каждому компоненту сырья – продуктов) опи-

сываются обобщенными функциями отбора компонентов. Детальное описание принципов такого балансового моделирования, как уже было отмечено, изложено в работе [1], поэтому ограничимся изложением усовершенствований, разработанных после публикации [1] и успешно реализованных на практике.

Как подробно показано и обосновано в вышеупомянутой работе, функция отбора компонентов (ФОК) представляет зависимость коэффициентов отбора (доли компонента, перешедшего при разделении в один из продуктов) от температуры кипения и на графике имеет форму сигма-функции. Наиболее простым и удобным аналитическим описанием ФОК является впервые предложенное бельгийским математиком П.Ф. Ферхюльстом логистическое уравнение сигмоиды [2], широко применяемое в настоящее время при статистическом моделировании. Для аппроксимации ФОК это уравнение используется в следующей интерпретации:

$$KO_{i,жс} = 100 - 100 / \{1 + \exp[S(Tk_i - Tk_{50})]\}, \quad (1)$$

где $KO_{i,жс}$ – коэффициент отбора i -го компонента разделяемого потока в жидкий (тяжелый) продукт узла разделения, % мас.; S – фактор наклона ФОК; Tk_i – температура кипения i -го компонента, °С; Tk_{50} – температура кипения ключевого компонента, °С – условного (гипотетического) компонента, равномерно распределяемого (по 50 %) между продуктами узла разделения.

В этом уравнении – два регулирующих параметра: величина S определяет наклон ФОК, а величина Tk_{50} – ее местоположение относительно оси температур кипения, характеризующее номинальную температурную границу распределения компонентов входящего потока между тяжелым и легким продуктами.

Недостатком аппроксимации ФОК с помощью «классического» уравнения сигмоиды (1) является невозможность достижения приемлемой точности расчетов коэффициентов отбора компонентов во всем диапазоне от 0 до 100 %. Наиболее высокие относительные отклонения рассчитанных по (1) и полученных экспериментально (или по системам технологического моделирования) коэффициентов отбора компонентов в тяжелый и легкий продукты отмечаются на «хвостах» ФОК – при значениях коэффициентов отбора ниже 10 % (особенно ниже 1 %). Причем относительные отклонения коэффициентов отбора значительно

возрастают по мере их приближения к нулю. Поэтому в первой версии балансового моделирования для математического описания ФОК и манипуляций с их перемещением авторами использовался предложенный в работе [3] модифицированный кубический сплайн.

Однако практика показала, что при перемещениях ФОК с помощью даже улучшенных ограничивающих сплайнов [3] в некоторых случаях возникают непредсказуемые местные искривления ФОК, «сбросы» коэффициентов отбора в 0 и 100 %, нарушения принципа «эквидистантности». Анализ способов обеспечения более высокой точности и надежности расчетов привел к разработке комбинированного таблично-аналитического варианта описания ФОК – ее аппроксимации с помощью модифицированного уравнения сигмоиды, в котором фактор наклона определяется не в целом для функции, а индивидуально для каждого компонента:

$$S_i = \ln[1/(1 - KO_{i,жк}/100) - 1]/(T_{K_i} - T_{K_{50}}), \quad (2)$$

где S_i – фактор наклона ФОК для i -го компонента.

При использовании такого описания для каждого выделенного в схеме узла разделения создается «паспортный» массив ФОК, в который включаются значения факторов наклона, вычисленные для каждого компонента при установленных характеристиках и типовых режимах работы оборудования. В частности, для узлов разделения в процессах ректификации, наиболее информативными ключевыми параметрами являются число теоретических тарелок и кратность орошения (флегмовое число). Для создания качественных «паспортных» массивов (обеспечивающих достаточно высокую точность вычислений) расчеты факторов наклона ФОК необходимо проводить с применением систем технологического моделирования по результатам обследований действующих технологических процессов.

Переход от использования модифицированных кубических сплайнов к применению модифицированного уравнения сигмоиды позволил значительно повысить точность и надежность вычислений, а также достоверность описания ФОК, идентифицируемых факторами наклона, полученными для конкретных компонентов с учетом их свойств, вместо обезличенных коэффициентов отбора, произвольно пере-

мещаемых по температурам кипения при использовании сплайнов. Еще одним преимуществом модифицированного уравнения сигмоиды является возможность вовлечения в расчетные процессы неуглеводородных компонентов с «выпадающими» из сигма-функции коэффициентами отбора – если при аппроксимации ФОК сплайнами необходима строгая монотонность зависимости коэффициентов отбора от температуры кипения компонентов, то для модифицированного уравнения сигмоиды это условие необязательно.

Задача расчетов материально-компонентных балансов для каждого входящего в комплексную модель узла разделения заключается в достижении условия выработки продукта, соответствующего заданной спецификации. В качестве спецификаций могут использоваться выходы продуктов, их физико-химические свойства и показатели качества. Суть расчета заключается в итерационном вычислении ФОК, при которой расчетный показатель продукта соответствует заданной спецификации с требуемой точностью.

Например: для стабилизации конденсата в ректификационной колонне с заданным числом теоретических тарелок и флегмовым числом необходимо рассчитать материально-компонентный баланс, при котором вырабатываемый стабильный конденсат будет иметь требуемое давление насыщенных паров (ДНП) по Рейду.

Расчет осуществляется в два этапа.

На первом этапе проводится интерполяция табличных значений «паспортного» массива факторов наклона ФОК стабилизации деэтанализованного конденсата. Данные массивы факторов наклона для компонентов относительно их температур кипения частично представлены на рис. 2 и 3.

Интерполяция проводится по заданным ключам – в данном случае это число теоретических тарелок ректификационной колонны и флегмовое число. В результате интерполяции определяются факторы наклона для индивидуальных компонентов S_p , соответствующие заданным величинам числа теоретических тарелок и флегмового числа. Рассчитанная по этим коэффициентам ФОК соответствует эффективности массообмена в колонне с заданным числом теоретических тарелок и флегмовым числом.

На втором этапе производится определение ФОК, соответствующей технологическому режиму, при котором обеспечивается выработка

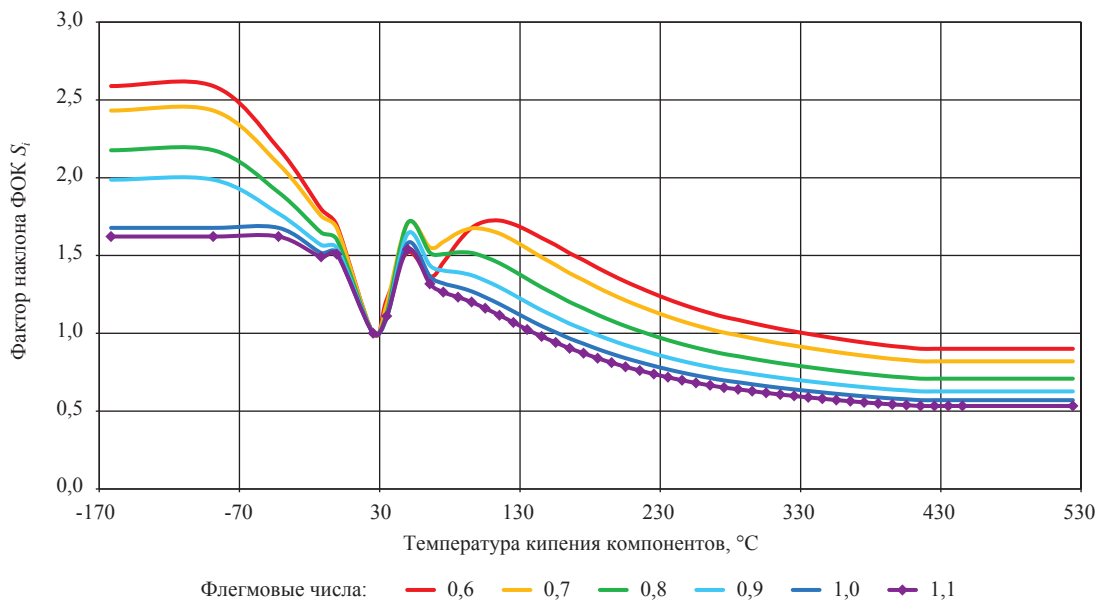


Рис. 2. Факторы наклона ФОК стабилизации конденсата для компонентов в зависимости от флегмового числа при постоянном числе теоретических тарелок – 12

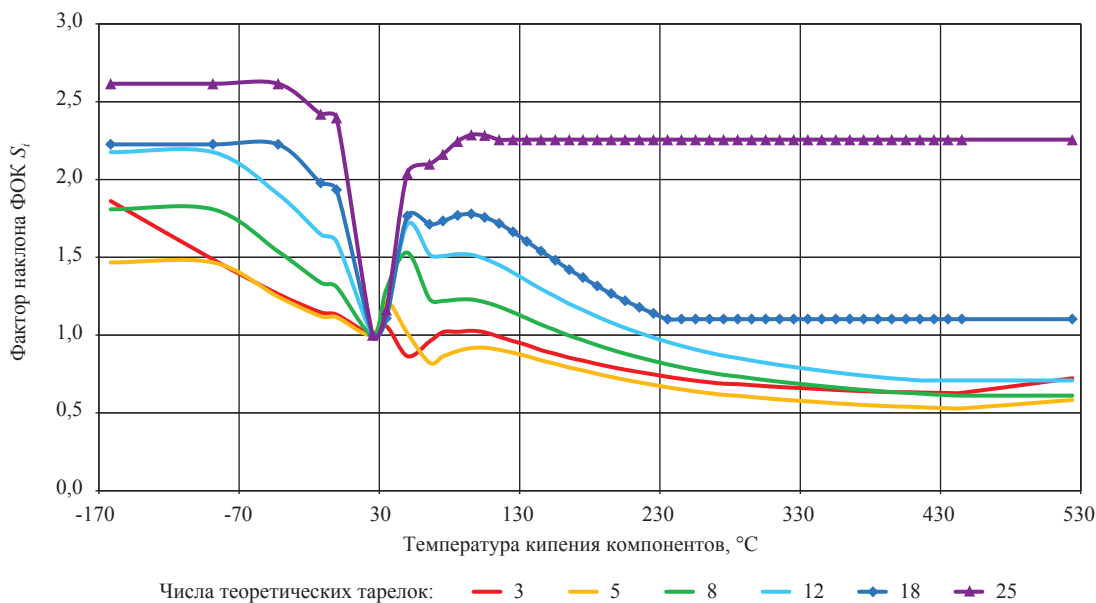


Рис. 3. Факторы наклона ФОК стабилизации конденсата для компонентов в зависимости от числа теоретических тарелок при постоянном флегмовом числе – 0,8

стабильного конденсата с требуемым ДНП по Рейду. Задается начальное значение подбираемой температуры кипения ключевого компонента T_{k50} . По ней и полученным на первом этапе расчета (в результате проведенной интерполяции) значениям S_i с помощью модифицированного уравнения сигмоиды непосредственно вычисляются коэффициенты отбора компонентов. После этого исходя из масс компонентов во входящем потоке сырья и получен-

ных значениях $KO_{i,ис}$ рассчитываются массы компонентов и общие массы продуктов ректификации (в частности, стабильного конденсата), по которым вычисляются их компонентно-фракционные составы. Далее по вычисленному составу вычисляется заданный в спецификации показатель (в рассматриваемом примере – ДНП по Рейду для стабильного конденсата). Если рассчитанное значение совпадает с заданной спецификацией с требуемой

точностью, расчет завершается. В противном случае принимается новое значение T_{k50} , и все вышеописанные расчеты повторяются.

Для узлов разделения, соответствующих сепараторам «газ – жидкость», в которых процесс разделения может быть описан с помощью фазового равновесия (при необходимости – с элементами уноса фаз) «паспортные» массивы ФОК не создаются. Для таких элементов коэффициенты отбора компонентов рассчитываются непосредственно по результатам расчетов фазовых равновесий «жидкость – пар», которые реализованы в комплексной модели на базе положений и математических выкладок, подробно изложенных в работе [4].

Процедура подбора режима выработки продукта, соответствующего заданной спецификации, заключается в итерационном подборе температуры сепарации при заданном давлении. В некоторых, достаточно редких случаях может потребоваться выполнение обратной задачи – подбора давления сепарации при заданной температуре. Тогда для выполнения расчета в обязательном порядке задается давление сепарации. Далее в процессе итерационного расчета принимается начальное значение температуры сепарации, после чего рассчитывается фазовое равновесие входящего в узел разделения потока, на основе полученных результатов вычисляются массы и компонентно-фракционный состав газовой и жидкой фаз (легкого и тяжелого продуктов узла разделения), и по ним определяется значение заданного в спецификации свойства. При совпадении рассчитанного и заданного значений с требуемой точностью расчет завершается. В противном случае меняется значение температуры сепарации, и расчетная процедура повторяется.

Выполнение расчетов по комплексной балансовой модели заключается в последовательном проведении изложенных выше итерационных расчетов каждого узла разделения, представленного в поточной схеме. Расчеты ведутся, начиная с узлов, для которых известны массовый расход и состав поступающего сырья. По результатам расчетов материально-компонентных балансов этих технологических элементов и прописанных в балансовой модели межэлементных связей рассчитываются массы компонентов и составы входящего сырья следующих узлов поточной схемы, и для них проводятся аналогичные рас-

четы. После завершения расчета всех узлов поточной схемы формируется ее сводный материально-компонентный баланс, определяются составы всех потоков балансовой модели, и по ним рассчитываются их физико-химические свойства и показатели качества по методикам, преимущественно изложенным в работе [1] с небольшими изменениями и дополнениями для некоторых свойств. Наиболее значительным относительно публикации [1] изменением является реализация в комплексной модели представленной в работе [5] методики расчета плотности жидких углеводородов, которая значительно уточняет расчет плотности для газонасыщенных потоков.

Кроме определения материально-компонентных балансов перерабатывающих процессов и характеристик (компонентно-фракционных составов, физико-химических свойств и показателей качества) всех потоков балансовая модель позволяет также оценить температурные режимы ректификационных колонн и сепараторов, необходимые для выработки продуктов с вычисленными (требуемыми) характеристиками. С этой целью для каждого технологического элемента задается рабочее давление, и по найденным составам продуктов при заданных давлениях рассчитываются температура начала кипения тяжелого продукта и температура начала конденсации легкого продукта. Эти температуры с вполне приемлемой точностью соответствуют температурам куба и верха простой ректификационной колонны или температурам боковых отборов и (или) куба стриппингов сложной колонны, в зависимости от конкретной технологической схемы и преобразования ее в поточную схему балансовой модели.

Вышеизложенная балансовая модель достаточно широко используется в проектной и производственной практике. По ней регулярно выполняются комплексные балансовые расчеты для следующих целей.

1. Формирование комплексных балансов для проработки вариантов реконструкции и перспективного развития Западно-Сибирского комплекса ОАО «Газпром» по добыче и переработке жидкого углеводородного сырья. В частности, в настоящее время проводятся варианты балансовых расчетов для разработки Инвестиционного замысла по развитию транспорта и переработки жидких углеводородов ОАО «Газпром» в Западной Сибири.

2. Подготовка исходных данных для проектирования разработки месторождений, реконструкции действующих и создания новых мощностей по переработке и транспорту жидкого углеводородного сырья. В частности, расчеты по модели выполнялись при проектировании разработки лицензионных участков 4 и 5 ачимовских отложений Уренгойского месторождения, подготовки исходных данных для проектирования технологических линий № 8 и 9 установки стабилизации конденсата Сургутского ЗСК, установки подготовки газа деэтанзации Уренгойского ЗПКТ, установки стабилизации конденсата ачимовских отложений в составе альтернативной схемы подготовки и транспорта тяжелого сырья.

3. Обоснование изменений выходов продукции технологических установок переработки жидких углеводородов в связи с изменением составов поступающего сырья при производственном планировании. Расчеты по модели с этой целью выполняются ежеквартально с конца 2011 г.

Проводимые расчеты позволяют получать необходимую и достаточно полную информацию для комплексного анализа состояния, проблем и перспектив развития всех взаимосвязанных технологических объектов системы добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья, разработки решений с учетом синхронизации развития и ввода мощностей по добыче, транспорту и переработке. В конечном счете все это способствует повышению эффективности функционирования и развития Западно-Сибирского комплекса ОАО «Газпром».

Список литературы

1. Касперович А.Г. Балансовые расчеты при проектировании и планировании переработки углеводородного сырья газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений: учеб. пособие / А.Г. Касперович, Р.З. Магарил. – М.: КДУ, 2008. – 412 с.
2. Verhulst P.F. Notice sur la loi que la population poursuit dans son accroissement / P.F. Verhulst // Correspondance mathématique et physique. – 1838. – 10:113–121.
3. Kruger C.J.C. Constrained Cubic Spline Interpolation for Chemical Engineering Application / C.J.C. Kruger. – 2005. – http://www.korf.co.uk/util_2.html
4. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа / А.И. Брусиловский. – М.: Грааль, 2002. – 575 с.
5. Hankinson R.W. Get accurate LNG densities with COSTALD / R.W. Hankinson, T.A. Coker, G.H. Thomson // Hydrocarbon Process. – United States, 1982. – Vol. 62. – P. 207–208.