

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2024.4.233-252>

EDN GIPUBQ

УДК 681.518:622.279.012

**Применение многомерных табулированных моделей
при оптимизации работы газовых промыслов
в режиме реального времени**

Харитонов А.Н., Стрекалов А.В., Дунаев А.В., Козлов В.В., Зеленин Д.В.

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

**The use of multidimensional tabulated models in optimizing
the operation of gas fields in real time**

A.N. Kharitonov, A.V. Strekalov, A.V. Dunaev, V.V. Kozlov, D.V. Zelenin

Tyumen Petroleum Research Center LLC, Tyumen, Russia

E-mail: ankharitonov@tnnc.rosneft.ru

Аннотация. Современные информационные системы управления работой газовых промыслов, разрабатываемые в рамках цифровой трансформации нефтегазодобывающих предприятий, должны обладать высоким быстродействием для решения задач оптимизации в режиме реального времени. Поэтому использование в цифровом двойнике промысла (ЦДП) достаточно сложных моделей, построенных в коммерческих симуляторах технологических процессов добычи газа, далеко не всегда способно обеспечить требуемую скорость расчета. Авторами предложен новый подход, базирующийся на применении в ЦДП упрощенных табулированных моделей установок подготовки газа, который реализуется путем первоначального построения исходных моделей в технологическом симуляторе и выполнении многосценарных расчетов в заданных диапазонах изменения параметров. Результаты расчетов сводятся в n-мерные электронные таблицы – табулированные модели, которые подключаются к ЦДП. В работе приведен алгоритм построения и актуализации табулированных моделей в процессе эксплуатации промысла, а также описаны процедуры прямого и обратного поиска выходных и входных параметров. Тестирование табулированных моделей для реального газоконденсатного промысла компании ПАО «НК «Роснефть» и сравнение с расчетами на исходной модели подтвердило работоспособность предложенного подхода.

Ключевые слова: *газовый промысел, установка комплексной подготовки газа, дожимная компрессорная станция, цифровая трансформация, цифровой двойник промысла, моделирование установок подготовки газа, интегрированная модель, табулированная модель, система автоматического управления промыслом, информационная система*

Для цитирования: Харитонов А.Н., Стрекалов А.В., Дунаев А.В., Козлов В.В., Зеленин Д.В. Применение многомерных табулированных моделей при оптимизации работы газовых промыслов в режиме реального времени // Нефтяная провинция. -2024.-№4(40).-С. 233-252. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.4.233-252>. - EDN GIPUBQ

Abstract. Modern information systems for managing the operation of gas fields, developed as part of the digital transformation of oil and gas producing enterprises, must have high performance to solve optimization problems in real time. Therefore, the use of sufficiently complex models in the digital twin of the field (DTF), built in commercial simulators of technological processes of gas production, is not always able to provide the required calculation speed. The authors propose a new approach based on the use of simplified tabulated models of gas treatment plants in the DTF, which is implemented by initially constructing initial models in a technological simulator and performing multi-scenario calculations in specified ranges of parameter changes. The calculation results are summarized in n-dimensional spreadsheets – tabulated models that are connected to the DTF. The paper presents an algorithm for constructing and updating tabulated models during the operation of a field, as well as describes the procedures for direct and reverse search of output and input parameters. Testing of tabulated models for the real gas condensate field of PJSC NK Rosneft and comparison with calculations based on the initial model confirmed the efficiency of the proposed approach.

Key words: *gas field, integrated gas treatment plant, booster compressor station, digital transformation, digital twin of field, modeling of gas treatment plants, integrated model, tabulated model, automatic field control system, information system*

For citation: A.N. Kharitonov, A.V. Strekalov, A.V. Dunaev, V.V. Kozlov, D.V. Zelenin *Применение многомерных табулированных моделей при оптимизации работы газовых промыслов в режиме реального времени* [The use of multidimensional tabulated models in optimizing the operation of gas fields in real time]. *Neftyanaya Provintsiya*, No. 4(40), 2024. pp. 233-252. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2024.4.233-252>. EDN GIPUBQ (in Russian)

Неравномерность спроса на газ, обусловленная сезонным изменением погоды или внешнеэкономическими рыночными факторами, часто требует оперативных корректировок технологических режимов работы газопромыслового оборудования. Кроме того, потребность в такого рода корректиров-

ках, зачастую, вызывается рядом «внутренних» факторов, к которым относятся различные геолого-технологические ограничения, обусловленные ухудшением эксплуатационных характеристик залежей и технического состояния оборудования. Поскольку на этапе проектирования газовых промыслов данные факторы обычно сложно прогнозировать с достаточно высокой точностью, то на этапе эксплуатации возникает необходимость в оперативной расчетной оптимизации технологических параметров работы газопромыслового оборудования для обеспечения высокой экономической эффективности технологических процессов.

Функционирование газовых промыслов характеризуется существенным взаимным влиянием звеньев неразрывной производственной цепочки от разрабатываемой залежи до магистрального газопровода. Тем не менее, в существующей практике эксплуатации газовых промыслов оперативная расчетная оптимизация в значительной степени используется локально – обычно для отдельных единиц или групп технологического оборудования.

В качестве примера можно привести успешный опыт внедрения в производственную практику так называемых «виртуальных датчиков». С помощью данного подхода могут решаться отдельные практические задачи, такие как оптимизация расхода химических реагентов, оптимизация химико-аналитического контроля, оптимизация потребления топливного газа и ряд других.

Обычно, при локальной оптимизации требуются относительно простые расчетные алгоритмы, которые могут быть реализованы в автоматизированных системах оперативно-диспетчерского управления (далее – АСОДУ). Для оптимизации работы всей системы добычи и подготовки газа на промыслах уже требуются более сложные интегрированные модели, для реализации которых обычно требуются группы специалистов, оснащенные вычислительными мощностями с современными коммерческими программными продуктами [1]. При таком подходе оптимизационные расчеты будут

слишком продолжительные, что не позволит оперативно решать целый ряд задач. Это следует учитывать в процессе цифровой трансформации нефтегазодобывающих компаний, в том числе и при внедрении технологий интеллектуализации промыслов, которые предусматривают автоматическое управление и оптимизацию работы промыслов в режиме реального времени с целью повышения их эффективности [2].

Несмотря на то, что техническая возможность автоматизации передачи данных из современных АСОДУ и баз данных технологической информации в коммерческие симуляторы, а также выгрузки из них является технически осуществимой задачей, тем не менее такой подход характеризуется рядом существенных недостатков:

- значительные затраты вычислительных ресурсов на выполнение расчетов с высокой частотой выполнения, что также может вызывать задержки в получении результатов из-за ограничений вычислительных мощностей;

- необходимость одновременного поддержания в актуальном состоянии как всей интегрированной модели промысла, так и отдельных моделей каждого объекта, что требует постоянного задействования в работе соответствующего объема вычислительных мощностей и лицензий на программное обеспечение;

- необходимость обеспечения постоянного контроля моделей со стороны специалистов соответствующей квалификации, так как построенные с помощью коммерческих симуляторов модели характеризуются периодическим возникновением сбоев (например, при итерационных процедурах) и необходимостью оперативной корректировки настроек.

Частичное решение представленных выше проблем можно осуществить путем некоторого упрощения расчетных моделей и алгоритмов, что часто отрицательным образом сказывается на качестве результатов. Другим путем является разработка собственного специализированного программ-

ного обеспечения. Несмотря на то, что при собственной разработке возможно создавать индивидуальные модели объектов, в большей степени учитывающие их специфику и обеспечить высокий уровень отказоустойчивости, тем не менее, данный подход обычно является более дорогим и редко используется на практике.

Результаты анализа публикаций о проектах по оптимизации систем добычи и обработки газа в режиме реального времени [3] свидетельствуют об отказе от использования относительно точных коммерческих симуляторов в пользу более упрощенных моделей собственной разработки. Данный подход может обеспечить частичное решение представленных выше проблем, если достигаемой при этом точности достаточно для решения поставленных задач. Тем не менее, также существуют упоминания об использовании коммерческих инструментов моделирования, специализированных для оптимизации технологических процессов в реальном времени, но при этом не приводятся подробности о степени упрощения данных моделей в сравнении с широко распространенными коммерческими симуляторами [4].

В связи с необходимостью использования отказоустойчивых моделей без существенного упрощения расчетных алгоритмов при выполнении множества оптимизационных расчетов в короткие периоды, сопоставимые со скоростью протекания технологического процесса, то есть в режиме реального времени, авторами предложен новый подход к моделированию сложных технологических объектов на газовых и газоконденсатных промыслах. Он основан на применении в быстродействующем динамическом цифровом двойнике промысла (ЦДП) многомерных табулированных моделей для расчета параметров технологических процессов на дожимной компрессорной станции (ДКС) и установке комплексной подготовки газа (УКПГ).

Под ЦДП в данной работе подразумевается цифровая версия промысла, включающая всю систему «пласт-скважины-коллекторы-УКПГ-ДКС» и представляющая собой динамическую интегрированную модель

этого объекта, отображающую реальное состояние и рабочие характеристики своего физического прообраза [5].

Известно, что в информатике достаточно широко и успешно применяются различные табличные модели, представляющие свойства объектов и процессов в виде таблиц. Предложенная табулированная модель (ТМ) – это вариант табличной модели, в которой информация о моделируемом объекте структурирована в виде n -мерных таблиц в формате Multi Function Table (MFT).

Особенностью реализации предложенного подхода является первоначальное построение полноценных исходных моделей УКПГ и ДКС с использованием коммерческих симуляторов. В дальнейшем с помощью данных моделей и подключаемого к ним специально разработанного программного модуля осуществляются многосценарные расчеты в симуляторе технологических процессов подготовки газа на заданные диапазоны изменения параметров. Данные диапазоны выбираются так, чтобы максимально покрыть все возможные изменения выбранных технологических параметров работы газопромыслового оборудования в течение рассматриваемого периода времени, например, месяца или квартала. Результаты расчетов сводятся в n -мерные электронные таблицы – табулированные модели УКПГ и ДКС, которые подключаются к ЦДП. При выполнении прогнозных или оптимизационных расчетов на вход ТМ поступают данные о параметрах газового потока на входе объекта (входные данные) и по известному алгоритму осуществляется поиск и многомерная интерполяция соответствующих им значений в n -мерных таблицах для определения параметров работы технологического оборудования (выходных данных).

Для оценки адекватности полученных моделей могут быть построены зависимости выбранного выходного параметра объекта от двух входных при фиксации остальных параметров на входе. Данные зависимости описы-

ваются поверхностью, пример которой представлен на рисунке 1, где представлено изменение перепада давления на УКПГ от давления и расхода газа на входе в установку. Визуально можно оценить насколько полученная поверхность соответствует принципу «физичности».

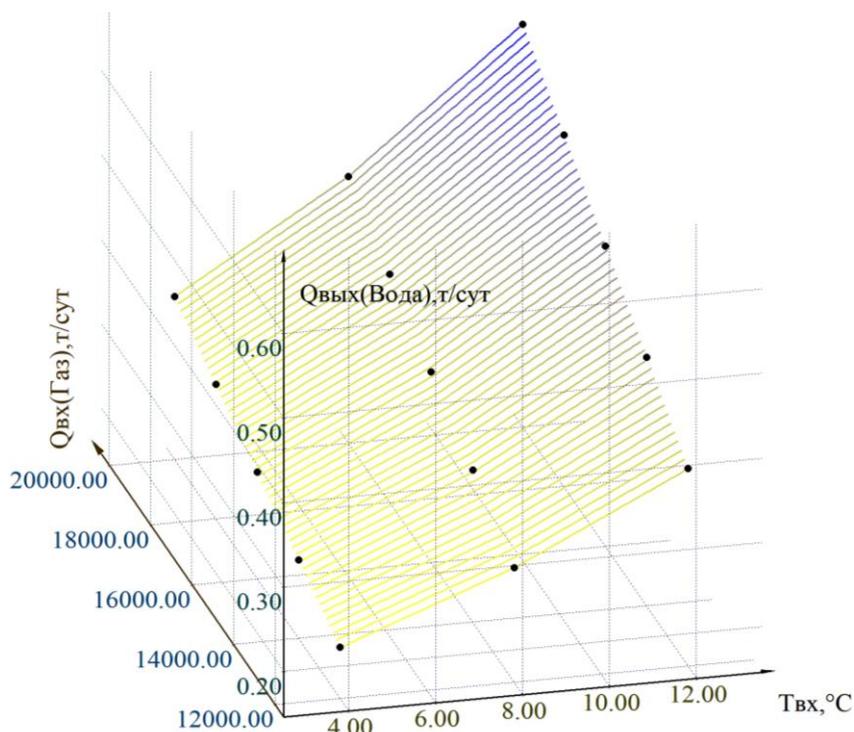


Рис. 1. Пример n -мерной поверхности, отображающей зависимость расхода воды на выходе УКПГ в зависимости от расхода газа на входе в установку и от входной температуры

Процедуры прямого поиска необходимых значений функции между заданными точками в ТМ реализованы на основе билинейной интерполяции. Обобщенная на n -аргументов формула билинейной интерполяции выглядит следующим образом:

$$F(u_1, u_2, \dots, u_n) = \sum_{i_1=0}^1 \sum_{i_2=0}^1 \dots \sum_{i_n=0}^1 a_{i_1 i_2 \dots i_n} u_1^{i_1} u_2^{i_2} \dots u_n^{i_n}$$

где u_i – i -й аргумент, $a_{i_1 i_2 \dots i_n}$ – коэффициенты.

Прямой поиск значений функции подразумевает определение значения функции при заданных значениях аргументов. Алгоритм заключается в

выделении n -мерного гиперкуба таким образом, чтобы искомая точка находилась внутри. Далее значение функции в заданной точке вычисляется последовательно согласно градиентам функции по каждому аргументу.

Для нахождения значений какого-либо аргумента при известных значениях функции и остальных аргументов («обратный поиск») можно использовать известные численные методы решения нелинейных уравнений, однако, с позиции скорости вычислений это будет малоэффективно. В данной работе предлагается иной подход. Первый шаг алгоритма аналогичен первому шагу в случае прямого поиска – необходимо определить n -мерный гиперкуб. Предположим, задача заключается в поиске значения аргумента u_1 , при заданных аргументах $\tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_n$ и заданном значении функции $\tilde{f} = F(u_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_n)$, тогда гиперкуб будет выделен таким образом, чтобы его точки удовлетворяли условиям:

$$\begin{cases} u_{j_2} < \tilde{u}_2 < u_{j_2+1} \\ u_{j_3} < \tilde{u}_3 < u_{j_3+1} \\ \dots \\ u_{j_n} < \tilde{u}_n < u_{j_n+1} \\ f_j < \tilde{f} < f_{j+1} \end{cases}$$

где j_n и j индексы аргумента и функции соответственно в MFT таблице.

На основе полученного гиперкуба строится система линейных уравнений для определения коэффициентов $a_{i_1 i_2 \dots i_n}$. В результате неизвестный аргумент, например, с индексом «1», рассчитывается по формуле:

$$u_1 = \frac{(F - \sum_{i_2=0}^1 \dots \sum_{i_n=0}^1 a_{0i_2 \dots i_n} u_2^{i_2} \dots u_n^{i_n})}{\sum_{i_2=0}^1 \dots \sum_{i_n=0}^1 a_{1i_2 \dots i_n} u_2^{i_2} \dots u_n^{i_n}}$$

Важно отметить, что в зависимости от конкретной решаемой задачи могут быть заданы различные наборы входных и выходных данных для ТМ. Таким образом, суть предлагаемой методики состоит в создании исчерпывающих в контексте решаемой задачи таблиц технологических параметров объекта на основании расчетов его "медленной" детерминированной модели

в заданном диапазоне входных параметров с целью дальнейшего их использования в быстродействующих цифровых двойниках промыслов.

В рамках данного подхода расчеты могут осуществляться с высокой частотой (например, ежечасно или ежеминутно). При этом адаптацию исходной «медленной» модели требуется проводить гораздо реже, главным образом после внесения изменений в технологическую схему промысла.

Реализация описанного выше подхода была опробована в рамках пилотного проекта системы автоматического управления промыслом (САУП) для оптимизации работы одного из действующих в настоящее время газовых месторождений компании ПАО «НК «Роснефть» [6]. В рамках данного проекта разрабатывается система автоматического управления промыслом с помощью его цифрового двойника.

Разрабатываемый ЦДП, наряду с детерминированными физико-математическими моделями пласта, скважин и газосборной сети, включает в себя табулированные модели УКПГ и ДКС. При этом была выполнена достаточно детальная проработка в коммерческом симуляторе исходных моделей отдельных видов технологического оборудования систем абсорбционной осушки газа, регенерации гликоля, узлов ингибирования гидратообразования, ДКС и некоторых других систем. Так, например, для абсорберов заданы индивидуальные характеристики внутренних контактных устройств (структурированная насадка), благодаря чему имеется возможность рассчитывать пропускную способность данных аппаратов по обрабатываемому сырью, а также достаточно точно определять гидравлические потери давления осушаемого в них газа (Рис. 2). При разработке моделей газоперекачивающих агрегатов (ГПА) были также заданы индивидуальные характеристики центробежных компрессоров (ЦБК) (Рис. 3) и газотурбинных установок, что позволяет рассчитывать широкий спектр параметров процесса компримирования газа в зависимости от режимов работы ГПА, в том числе и потребление топливного газа.

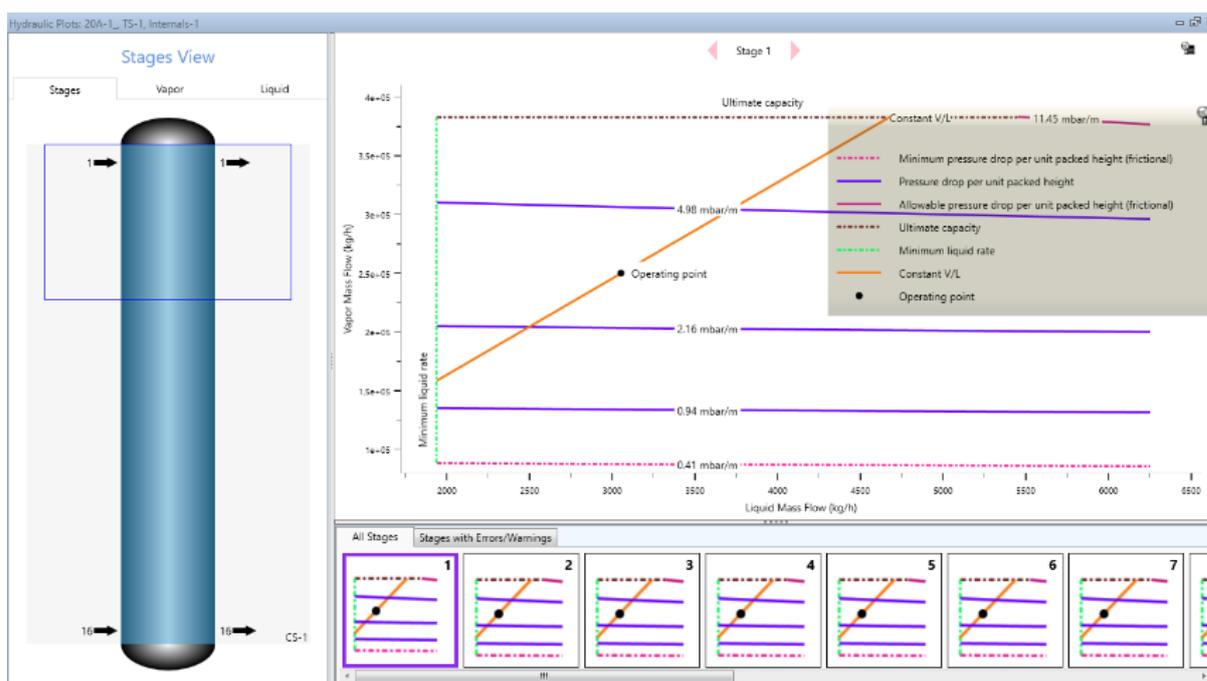


Рис. 2. Гидродинамическая характеристика структурированной насадки абсорбера

Пример создания быстродействующей математической модели ДКС на базе многомерной таблицы в формате текстового файла представлен в работе [7]. Показано, что ТМ независимо от сложности гидромеханической схемы объекта позволяет осуществлять вычисление ее технологического режима за время менее 1 мс и гарантирует высокую точность расчета параметров фактического режима работы ДКС. Также отмечено, что одним из основных достоинств применения ТМ в формате текстовых файлов является независимость от конкретного программного обеспечения и его производителя. Модель может быть построена на основе любых инструментов, позволяющих получить детерминированную модель объекта с достаточной точностью, включая собственные разработки компаний, и представляет собой отдельный продукт, готовый к использованию в составе цифровых двойников более сложных технологических объектов.

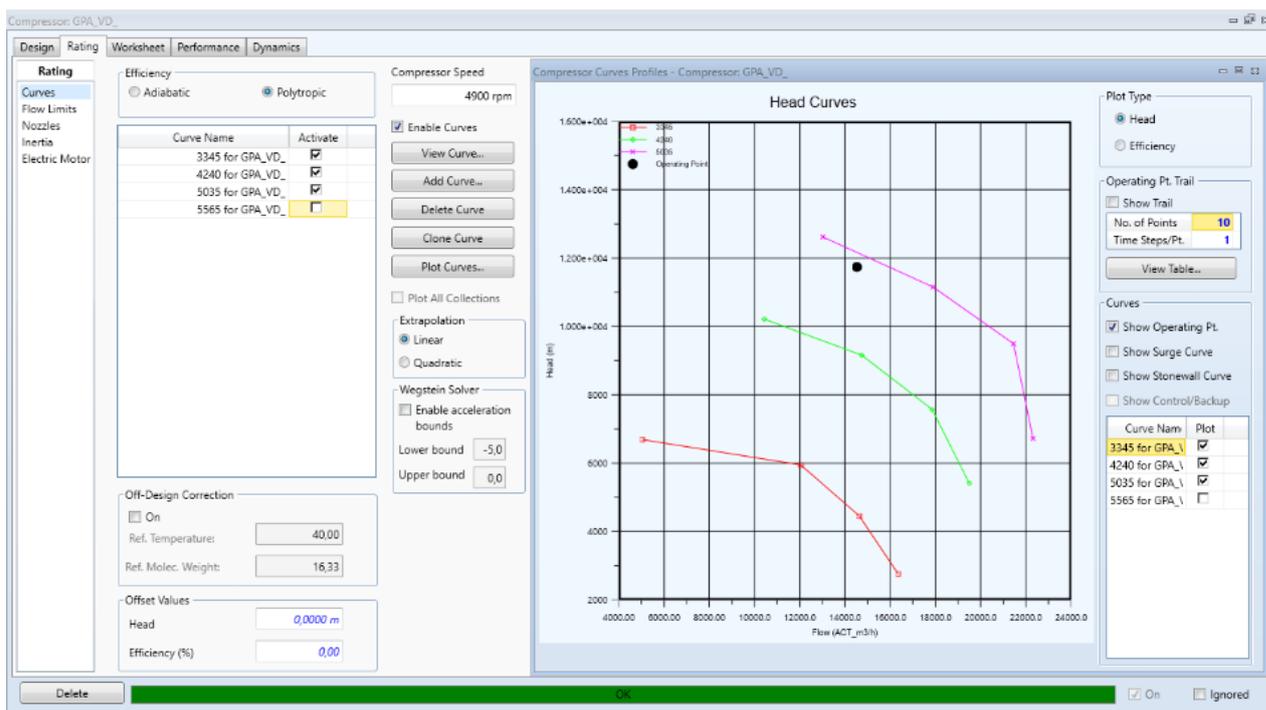


Рис. 3. Газодинамические характеристики центробежного нагнетателя

Формирование ТМ и поддержание их в актуальном состоянии может быть практически полностью реализовано в автоматическом режиме, кроме процессов создания и адаптации исходных моделей в технологическом симуляторе. Алгоритм создания и адаптации быстродействующих табулированных моделей ДКС и УКПГ, реализованный в САУП, представлен на рис. 4 и включает следующие этапы:

1. Создание специалистом-технологом исходной «медленной» модели УКПГ (ДКС) в симуляторе технологических процессов с использованием средств автоматизации, доступных в данном симуляторе.
2. Адаптация специалистом-технологом исходной модели на фактические данные с использованием средств автоматизации, доступных в технологическом симуляторе. Повторная адаптация исходной модели проводится с учетом изменения коэффициентов адаптации табулированной модели в процессе эксплуатации, которые контролируются САУП на промысле и периодически направляются специалистам-технологам в офис ОГ.

3. Подбор перечня необходимых входных и выходных параметров для контроля и управления процессом подготовки с указанием диапазонов изменения входных параметров модели (с учетом ожидаемого диапазона работы УКПГ или ДКС и пропускных возможностей применяемого оборудования).

4. Вычисление и выгрузка из симулятора n -мерой таблицы, связывающей выходные параметры УКПГ (ДКС) с входными при их изменении в заданных диапазонах.

5. Создание на основе n -мерой таблицы быстродействующей табулированной модели УКПГ (ДКС), которая структурирована в формате Multi Function Table (MFT), и передача ее на промысел в САУП.

6. Подключение табулированной модели УКПГ (ДКС), которая включает информацию о моделируемом объекте, к цифровому двойнику промысла.

7. Периодическая автоматическая адаптация табулированных моделей УКПГ и ДКС на данные телеметрии раз в сутки или при отклонениях расчетных значений выходных параметров от факта выше заданной допустимой величины.

8. Контроль коэффициентов адаптации табулированных моделей УКПГ и ДКС для своевременной адаптации исходных моделей с переходом к п.3.

9. Автоматическая инициация повторного пересчета табулированных моделей с использованием актуальных исходных моделей при превышении пороговых значений коэффициентов адаптации, например, по причине технологического износа оборудования и/или внесения изменений в технологическую схему объектов и т.д.

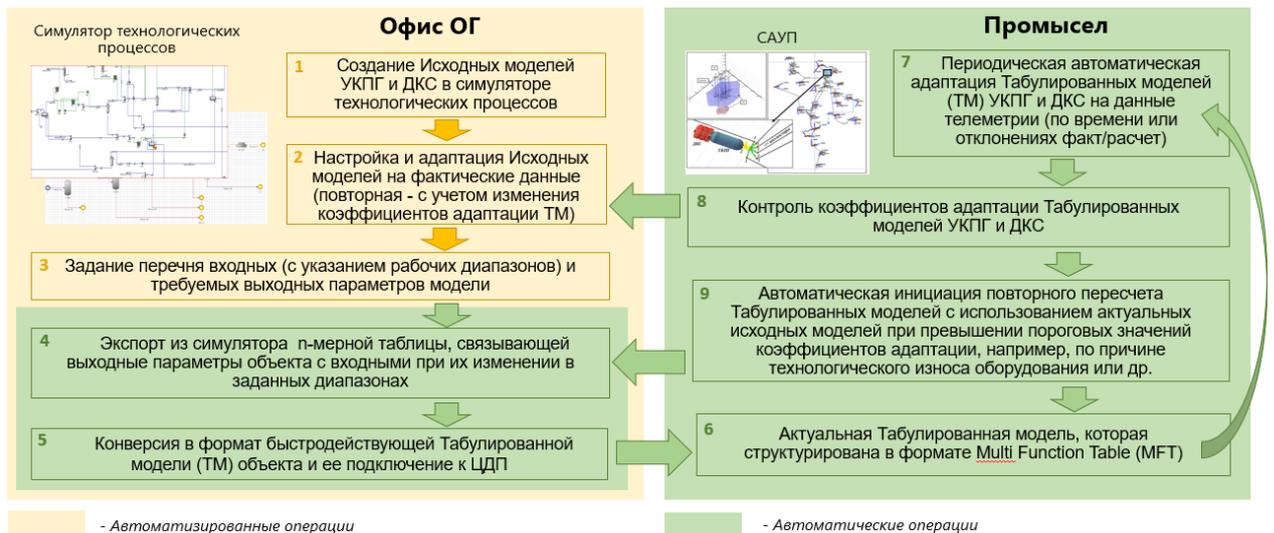


Рис. 4. Алгоритм создания и адаптации быстродействующих табулированных моделей ДКС и УКПГ

Следует отметить, что создание табулированной модели путем преобразования *n*-мерной таблицы, выгружаемой из технологического симулятора в формат MFT было связано, главным образом, с более ранним использованием в проекте таблиц данного формата. Иными словами, в общем случае такое преобразование не является обязательным.

Пример перечня входных и выходных параметров для установки абсорбционной осушки газа, сформированного с учетом задач САУП, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень входных и выходных параметров для установки абсорбционной осушки газа

Входные параметры:	Выходные параметры:
– расход газа;	– расход осушенного газа;
– давление газа на входе;	– давление осушенного газа;
– расход воды в составе газа;	– температура осушенного газа;
– температура газа на входе;	– общий перепад давления газа по УКПГ;
– содержание метанола;	– общий перепад температуры газа по УКПГ;
– компонентный состав газа;	– расход воды в осушенном газе;
– количество технологических линий осушки газа.	– расход углеводородов C ₅₊ в осушенном газе;
	– расход метанола в осушенном газе;
	– степень захлебывания насадки в системе осушки газа;
	– температура точки росы по воде и углеводородам;
	– расход отсепарированного водного раствора.

Процедура периодической адаптации исходных и табулированных моделей, в ходе которой подлежат уточнению ряд характеристик технологического оборудования и ограничений, осуществляется следующим образом:

- с помощью специального программного модуля осуществляется загрузка в исходную модель актуализированных диапазонов входных параметров, сформированных исходя из максимального покрытия всех возможных их изменений в течение следующего месяца;
- выполняются модельные расчеты, в ходе которых специалист-технолог производит сопоставление результатов с фактическими данными и, при необходимости, адаптацию исходной модели;
- для каждого сочетания входных параметров рассчитывается соответствующий набор выходных параметров (результатирующих функций);
- после завершения расчетов, все полученные результаты сводятся в общую n -мерную таблицу.

Поскольку n -мерные таблицы обычно являются весьма громоздкими и содержат огромное количество полей, с целью удобства представления ниже рассмотрен упрощенный пример n -мерной таблицы результатов модельных расчетов ДКС (Табл. 2).

Заданы следующие диапазоны параметров:

- расход перекачиваемого газа: от 300 000 до 350 000 ст.м³/ч, приращение – 12500 ст.м³/ч (всего 5 значений);
- частота вращения ротора ЦБК: от 4520 до 5200 об/мин, приращение – 170 об/мин (всего 5 значений);
- давление газа на входе ЦБК: от 1,8 до 2,8 МПа (изб.), приращение – 0,25 МПа (всего 5 значений);
- температура газа на входе ЦБК: от 0 до 10 °С, приращение – 2,5°С (всего 5 значений).

Общее количество сочетаний значений параметров: $5^4 = 625$. При этом в реальных n -мерных таблицах количество сочетаний значений параметров обычно может достигать нескольких десятков тысяч или даже сотен тысяч.

В качестве выходной переменной (результатирующей функции) задан только расход топливного газа. При этом в реальных n -мерных таблицах результирующих функций обычно намного больше – до нескольких десятков.

Таблица 2

Упрощенный пример n -мерной таблицы результатов модельных расчетов ДКС

Номер режима	Расход перекачиваемого газа, ст.м ³ /ч	Частота вращения ротора ЦБК, об/мин	Давление газа на входе в ЦБК, МПа (изб.)	Температура газа на входе в ЦБК, °С	Расход топливного газа, ст. м ³ /ч
1	300 000	4520	1,80	0,0	4480
2	300 000	4520	1,80	2,5	4472
3	300 000	4520	1,80	5,0	4464
4	300 000	4520	1,80	7,5	4457
5	300 000	4520	1,80	10,0	4449
...
156	312 500	4690	2,05	0,0	4801
157	312 500	4690	2,05	2,5	4790
158	312 500	4690	2,05	5,0	4779
159	312 500	4690	2,05	7,5	4770
160	312 500	4690	2,05	10,0	4761
...
311	325 000	4860	2,30	0,0	5151
312	325 000	4860	2,30	2,5	5143
313	325 000	4860	2,30	5,0	5130
314	325 000	4860	2,30	7,5	5119
315	325 000	4860	2,30	10,0	5108
...
466	337 500	5030	2,55	0,0	5525
467	337 500	5030	2,55	2,5	5514
468	337 500	5030	2,55	5,0	5503
469	337 500	5030	2,55	7,5	5492
470	337 500	5030	2,55	10,0	5481
...
621	350 000	5200	2,80	0,0	5917
622	350 000	5200	2,80	2,5	5908
623	350 000	5200	2,80	5,0	5899
624	350 000	5200	2,80	7,5	5890
625	350 000	5200	2,80	10,0	5881

На основе n -мерной таблицы специальный программный модуль формирует табулированную модель в формате MFT и передает ее в промышленную САУП для подключения к ЦДП. Детали реализации формата MFT определяются целевой системой.

Дальнейшие оптимизационные расчеты САУП выполняет с уже новым ЦДП, исходя из заданной целевой функции (максимизация добычи газа, минимизация потребления топливного газа и т.п.) и учетом всех технологических ограничений. В том числе может быть найдено оптимальное количество ГПА в работе и соответствующие параметры их работы.

Было проведено тестирование табулированных моделей УКПГ и ДКС для газоконденсатного промысла компании ПАО «НК «Роснефть» путем сравнения с расчетами на исходной модели в Aspen HYSYS, которое показало хорошую сходимость результатов. Расчет динамических параметров системы «пласт-скважины-ГСС-УКПГ-ДКС» был выполнен на 12 режимах работы газоконденсатного промысла. При заданной добыче газа стандартное отклонение результатов расчета по добыче газового конденсата на УКПГ – 1,1 %, по температуре – 1,3 %, по объему отсепарированной воды – 2,2 %. Расхождение по требуемой частоте вращения ротора ДКС – 0,7 %, по мощности – 3,5 %.

Таким образом, процесс получения оптимального решения основывается на относительно простом алгоритме табличного поиска и вывода результатов. При реализации данного подхода, оптимизация газового промысла требует относительно небольшой объем вычислительных ресурсов, поскольку все основные сложные модельные расчеты на коммерческих симуляторах выполняются с относительно большим периодом (обычно, ежемесячно или ежеквартально). Необходимо также отметить, что создание табулированных моделей ДКС и УКПГ может быть выполнено при помощи отечественного технологического симулятора «РН-СИМТЕП», в котором реализована функция многовариантных расчетов с выгрузкой результатов в

табличной форме. При этом модельные расчеты для нескольких газовых промыслов могут выполняться на одной вычислительной машине. В результате достигается снижение потребности в объеме вычислительных мощностей, лицензий на программное обеспечение, а также снижение трудовых затрат квалифицированных специалистов.

Подводя итоги выполненной работы, можно отметить, что предлагаемый авторами подход к оптимизации режимов работы газовых промыслов в режиме реального времени с применением многомерных табулированных моделей является вполне перспективным и имеет значительный потенциал внедрения в производственную практику. Апробация данного подхода уже на газовых промыслах компании ПАО «НК «Роснефть» показала основные достоинства данного подхода:

- процесс получения параметров работы УКПГ и ДКС основывается на относительно простом алгоритме табличного поиска с n-мерной интерполяцией последующих результатов;
- относительно небольшой необходимый объем вычислительных мощностей и низкая трудоемкость;
- высокая скорость расчета и отказоустойчивость табулированных моделей;
- возможность использования как коммерческого программного обеспечения в качестве симуляторов технологических процессов, так и ПО собственной разработки.

Список литературы

1. Харитонов А.Н., Архипов Ю.А., Давлетов К.М., Скоробогач М.А., Юмшанов В.Н., Дунаев А.В., Глазунов В.Ю. Результаты внедрения интегрированной модели Ямсовейского нефтегазоконденсатного месторождения (сеноман) // Геология, бурение, разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: Науч.-техн. сб. - М.: ООО «Газпром экспо», 2010. – №1.
2. Поспелова Т.А., Аржиловский А.В., Харитонов А.Н., Юшков А.Ю., Стрекалов А.В., Лопатин Р.Р., Лознюк О.А., Архипов Ю.А. Концепция интеллектуализации газовых и газоконденсатных промыслов. - Нефтяное хозяйство, №11, 2019, с. 58-63.

3. Derek Göbel, Jan Briers, Frank De Boer, Ron Cramer, Kok-Lam Lai, Martijn Hooimeijer (2012) "Successful Real-Time Optimization of a Highly Complex, Integrated Gas System: Intelligent Energy in the Real World," paper SPE 150109, Intelligent Energy International Conference, Utrecht, The Netherlands, 27–29 March 2012.
4. Mokhatab S. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices / Saeid Mokhatab, William A. Poe, John Y. Mak – Fourth edition. – Gulf Professional Publishing, 2019.
5. Пospelova Т.А., Стрекалов А.В., Князев С.М., Харитонов А.Н. Реализация цифровых двойников для управления газовым промыслом//Нефтяная провинция. - 2020.- №1(21).-С.230-242. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2020.1.230-242>.
6. Аржиловский А.В., Пospelova Т.А., Харитонов А.Н., Стрекалов А.В., Лознюк О.А., Архипов Ю.А, Дерюшев Д.Е., Лопатин Р.Р., Трушников Д.Н. Технология регулирования и оптимизации нефтегазодобычи в режиме реального времени Нефтяная провинция. 2021. № 4(28). Часть 1. Спецвыпуск. с. 70-93.
7. Козлов В.В., Стрекалов А.В., Харитонов А.Н., Лопатин Р.Р., Эльберт И.П. «Быстродействующая табулированная модель дожимной компрессорной станции в составе цифрового двойника газового промысла». - Автоматизация и информатизация ТЭК, 2022, № 9(590), с. 45–55.

References

1. Kharitonov A.N., Arkhipov Yu.A., Davletov K.M., Skorobogach M.A., Yumshanov V.N., Dunaev A.V., Glazunov V.Yu. The results of the implementation of the integrated model of the Yamsoveisky oil and gas condensate field (Cenoman) // Geology, drilling, development and operation of gas and gas condensate fields: Scientific and Technical. Sat. - M.: Gazprom Expo LLC, 2010. – No. 1. (in Russian)
2. Pospelova T.A., Arzhilovsky A.V., Kharitonov A.N., Yushkov A.Yu., Strekalov A.V., Lopatin R.R., Loznyuk O.A., Arkhipov Yu.A. The concept of intellectualization of gas and gas condensate fields. - Oil Industry, No.11, 2019, pp. 58-63. (in Russian)
3. Derek Göbel, Jan Briers, Frank De Boer, Ron Cramer, Kok-Lam Lai, Martijn Hooimeijer (2012) "Successful Real-Time Optimization of a Highly Complex, Integrated Gas System: Intelligent Energy in the Real World," paper SPE 150109, Intelligent Energy International Conference, Utrecht, The Netherlands, 27-29 March 2012.
4. Mokhatab S. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices / Saeid Mokhatab, William A. Poe, John Y. Mak – Fourth edition. – Gulf Professional Publishing, 2019.
5. Pospelova T.A., Strekalov A.V., Knyazev S.M., Kharitonov A.N. Implementation of digital twins for gas field management // The oil province. - 2020.-№1(21).- Pp. 230-242. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2020.1.230-242>. (in Russian)
6. Arzhilovsky A.V., Pospelova T.A., Kharitonov A.N., Strekalov A.V., Loznyuk O.A., Arkhipov Yu.A, Deryushev D.E., Lopatin R.R., Trushnikov D.N. Technology of regulation and optimization of oil and gas production in real time Oil province. 2021. No. 4(28). Part 1. Special issue. pp. 70-93. (in Russian)
7. Kozlov V.V., Strekalov A.V., Kharitonov A.N., Lopatin R.R., Elbert I.P. "A high-speed tabulated model of a booster compressor station as part of a digital twin of a gas field". - Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex, 2022, No. 9(590), pp. 45-55. (in Russian)

Сведения об авторах

Харитонов Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший эксперт отдела развития технологий нефтегазодобычи, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625002, Тюмень, Осипенко, 79/1

E-mail: ankharitonov@tnnc.rosneft.ru

Стрекалов Александр Владимирович, доктор технических наук, старший эксперт отдела развития технологий нефтегазодобычи, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625002, Тюмень, Осипенко, 79/1

E-mail: avstrekalov@rosneft.ru

Дунаев Александр Валентинович, кандидат технических наук, главный специалист отдела развития технологий нефтегазодобычи, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625002, Тюмень, Осипенко, 79/1

E-mail: av_dunaev@mail.ru

Козлов Василий Владимирович, кандидат технических наук, главный специалист отдела развития технологий нефтегазодобычи, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625002, Тюмень, Осипенко, 79/1

E-mail: vvkozlov6@tnnc.rosneft.ru

Зеленин Дмитрий Валерьевич, менеджер отдела разработки наукоемких систем, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»

Россия, 625002, Тюмень, Осипенко, 79/1

E-mail: dvzelenin@tnnc.rosneft.ru

Authors

A.N. Kharitonov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior expert of the Department of Development of Oil and Gas Production Technologies, Tyumen Petroleum Research Center LLC

79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625002, Russian Federation

E-mail: ankharitonov@tnnc.rosneft.ru

A.V. Strekalov, Doctor of Technical Sciences, Senior expert of the Department of Development of Oil and Gas Production Technologies, Tyumen Petroleum Research Center LLC

79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625002, Russian Federation

E-mail: avstrekalov@rosneft.ru

A.V. Dunaev, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of the Department of Development of Oil and Gas Production Technologies, Tyumen Petroleum Research Center LLC

79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625002, Russian Federation

E-mail: av_dunaev@mail.ru

V.V. Kozlov, Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist of the Department of Development of Oil and Gas Production Technologies, Tyumen Petroleum Research Center LLC

79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625002, Russian Federation

E-mail: vvkozlov6@tnnc.rosneft.ru

D.V. Zelenin, Manager of the Department of Development of Oil and Gas Production Technologies, Tyumen Petroleum Research Center LLC
79/1, Osipenko Str., Tyumen, 625002, Russian Federation
E-mail: dvzelenin@tnc.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 17.06.2024

Принята к публикации 17.12.2024

Опубликована 30.12.2024