

РУБРИКА: АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЦИФРОВИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ  
НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ

### **Разработка и применение цифрового двойника для моделирования термодинамических процессов и оптимизации работы газоперерабатывающего оборудования**

Е. В. Войтенков (ООО «Аэрогаз»)

В статье рассматривается процесс создания и функциональные возможности цифрового двойника, предназначенного для моделирования термодинамических процессов в установке фракционирования конденсата. Дано авторское определение термина «цифровой двойник» применительно к задачам газопереработки. Система базируется на модифицированном уравнении состояния Пенга — Робинсона и позволяет выполнять поверочные расчеты, ретроспективный анализ и многовариантные сценарии «что, если». Описаны численные алгоритмы решения задач тепломассопереноса. Особое внимание уделено задаче обеспечения сходимости расчетных и фактических показателей, а также методике подбора оптимального технологического режима на примере увеличения выхода целевой фракции. Представленный в работе подход демонстрирует эффективность применения цифровых моделей для повышения эффективности переработки углеводородов.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, термодинамическое моделирование, уравнение Пенга — Робинсона, оптимизация технологических режимов, установка фракционирования конденсата, сходимость модели, ретроспективный анализ.

### **Development and Application of a Digital Twin for Thermodynamic Process Modeling and Operational Optimization of Gas Processing Equipment**

E. V. Voytenkov (ООО “Aerogas”)

This article discusses the development and functionality of a digital twin designed for modeling thermodynamic processes in gas processing equipment. The authors provide their own definition of the term “digital twin” in the context of gas processing. The system is based on a modified Peng — Robinson equation of state and enables verification calculations, retrospective analysis, and multivariate “what-if” scenarios. Numerical algorithms for solving heat and mass transfer problems are described. Special attention is given to ensuring the convergence of calculated and actual performance indicators, as well as a methodology for selecting optimal process conditions, exemplified by increasing the yield of a target fraction. The approach presented in this work demonstrates the effectiveness of using digital models to improve the energy efficiency of hydrocarbon processing.

**Keywords:** digital twin, thermodynamic modeling, Peng — Robinson equation of state, process optimization, gas processing unit, model convergence, retrospective analysis, what-if analysis, hydrocarbon processing.

## **Введение**

Современные запросы газодобывающей отрасли, связанные с переходом на эксплуатацию низконапорных скважин и необходимостью повышения энергоэффективности, требуют внедрения интеллектуальных систем управления технологическими процессами [1]. Анализ литературных источников показывает, что в последние годы активно ведутся работы по созданию цифровых двойников для нефтегазового сектора. Так, в работах [2, 3] рассматриваются подходы к моделированию отдельных элементов газоперерабатывающих установок, однако целостные решения, охватывающие всю технологическую цепочку фракционирования конденсата с возможностью многовариантной оптимизации, представлены недостаточно широко. Большинство существующих моделей ориентированы либо на стационарные режимы, либо требуют значительной доработки для учета изменяющегося состава сырья.

Одним из наиболее перспективных инструментов является создание цифровых двойников. При этом в научно-технической литературе отсутствует единое определение данного термина. Например, в [4] под цифровым двойником понимают виртуальную копию физического объекта, обновляемую в реальном времени за счет данных с датчиков. В работе [5] акцент делается на двустороннюю связь между физическим и виртуальным объектами. Для целей настоящего исследования мы будем придерживаться следующего определения: цифровой двойник — это программный комплекс, который на основе стационарной термодинамической модели и архивных данных позволяет выполнять поверочные расчеты, ретроспективный анализ и оптимизацию технологических режимов без обязательного наличия онлайн-связи в реальном времени. Цель данной научно-исследовательской работы (НИР) заключается в разработке программного комплекса для моделирования термодинамических процессов в газодифракционирующем оборудовании и создания инструментария для поиска оптимальных режимов работы колонны фракционирования газового конденсата.

## **Назначение и решаемые задачи**

Разработанная система представляет собой специализированное программное обеспечение для электронно-вычислительных машин (ЭВМ), ориентированное на моделирование работы оборудования, входящего в состав установок комплексной подготовки газа (УКПГ) и газоперерабатывающих заводов (ГПЗ). Основное назначение системы — расчет термодинамических характеристик многокомпонентных потоков с высокой точностью прогнозирования фазового поведения углеводородных систем, включая водную фазу [6, 7, 8].

Ключевыми решаемыми задачами являются:

- расчет тепловых и материальных балансов технологических линий [9, 10];
- моделирование работы широкого спектра оборудования: сепараторов, теплообменников [11, 12], ректификационных колонн [13], насосов, компрессоров, детандеров и эжекторов [14];
- проведение вычислительных экспериментов для НИР, направленных на определение оптимальных точек варьирования для увеличения выхода самой маржинальной фракции, с учетом ограничений по качеству всех остальных товарных продуктов [15, 1].

## Математическая основа модели

**Общий подход к моделированию.** В основе разработанного цифрового двойника лежит численное решение системы уравнений сохранения массы, энергии и количества движения для многокомпонентных потоков. Моделирование оборудования (ректификационных колонн, теплообменников, сепараторов) выполняется с использованием аналитических зависимостей для расчета коэффициентов теплопередачи и гидравлического сопротивления, которые дискретизируются по высоте аппарата методом конечных разностей.

**Термодинамическая часть.** Для расчета фазового равновесия используется модифицированное уравнение состояния Пенга — Робинсона. Выбор данного уравнения обусловлен его высокой предсказательной способностью при расчете равновесия пар — жидкость в системах, характерных для природного газа и газоконденсата. Для определения критических свойств и молекулярных масс углеводородных фракций используются корреляции, подобные предложенным Тву [16]. Модификации, внесенные в классическое уравнение, позволили повысить точность расчета энтальпийных характеристик потоков и корректно описывать поведение смесей в широком диапазоне давлений и температур, что критически важно для моделирования процессов дросселирования и сепарации. Верификация термодинамических свойств выполняется с использованием авторитетных баз данных, таких как NIST Chemistry WebBook [6] и стандарты IAPWS для водной фазы [7], а также открытой библиотеки CoolProp [8].

**Численные алгоритмы.** Решение системы нелинейных уравнений выполняется итерационным методом Ньютона — Рафсона с контролем шага по критерию Липшица. Для расчета профиля температур и составов по высоте ректификационной колонны используется алгоритм Томаса (процедура прогонки) для трехдиагональных матриц при решении системы линейных уравнений, возникающей на каждой глобальной

итерации. Шаг по времени при ретроспективных расчетах выбирается автоматически в зависимости от скорости изменения входных параметров (в среднем от 5 до 30 минут).

## **Функциональные возможности системы**

Программный комплекс АЭРОСИМ/ФЛОУСИМ и модуль «Интеллектуальный технолог» (разработчик «Аэрогаз») обеспечивает сквозное проектирование и анализ технологических схем. Автоматизация охватывает все ключевые аспекты — от ввода граничных условий до оптимизации режимов.

## **Обеспечение сходимости цифрового двойника с фактическими показателями**

Критически важным этапом верификации цифрового двойника является обеспечение его соответствия реальному объекту. Для этого в системе реализован следующий алгоритм:

- Импорт архивных данных: система подгружает базу данных реального времени (БДРВ), содержащую структурированные показания датчиков (идентификатор, дата, значение).
- Прямой расчет: по заданной календарной дате и времени выполняется расчет технологической модели с фиксацией граничных условий по фактическим показаниям датчиков и составов сырья на установку. Гидравлические расчеты трубопроводов и оборудования выполняются с учетом потерь давления, определяемых по справочным данным [17].
- Анализ отклонений: программное ядро вычисляет абсолютные и относительные отклонения расчетных параметров от фактических.
- Формирование отчетности: на выходе генерируется сводная таблица (в том числе в формате XLSX), содержащая сравнение ключевых метрик: данные разгонки по методу ASTM D86, плотность, температуры замерзания/помутнения/вспышки продуктов, материальный баланс и показания контрольных датчиков.

## **Инструменты сценарного анализа и проверки гипотез**

Для перехода от статичной модели к инструменту прогнозирования система поддерживает два ключевых режима:

- Ретроспективный расчет: позволяет провести серию расчетов за выбранный диапазон дат. Результатом является массив данных, отражающий динамику отклонений модели от реальных показателей во времени. Данные сохраняются в формате CSV.

- Режим «Что, если» (What-If): пользователь может создавать сценарии варьирования параметров (например, изменение давления, температуры, состава сырья) и наблюдать за изменением целевых метрик. Результаты расчетов сохраняются в структурированном виде для оценки релевантности исследуемой гипотезы.

## Практическая реализация оптимизационной задачи

В качестве демонстрации эффективности разработанного инструментария была решена задача повышения выхода легких фракций (целевого продукта) за счет перераспределения материальных потоков и углубления разделения.

Постановка задачи: обеспечить перераспределение фракционного состава между продуктами установки с приоритетом увеличения выработки целевого компонента (керосина) при сохранении требований к качеству и технологическим ограничениям.

### Оптимизируемые параметры объекта

- **По колонне К-1:** температура сырья на входе, расход и температура орошения, температура куба (регулируется испарителем).
- **По колонне К-2:** температура верхнего орошения, температура нижнего орошения, температура куба.
- **По колонне-стрипперу К-3:** температура куба (регулируется испарителем).

### Граничные условия (ограничения по качеству)

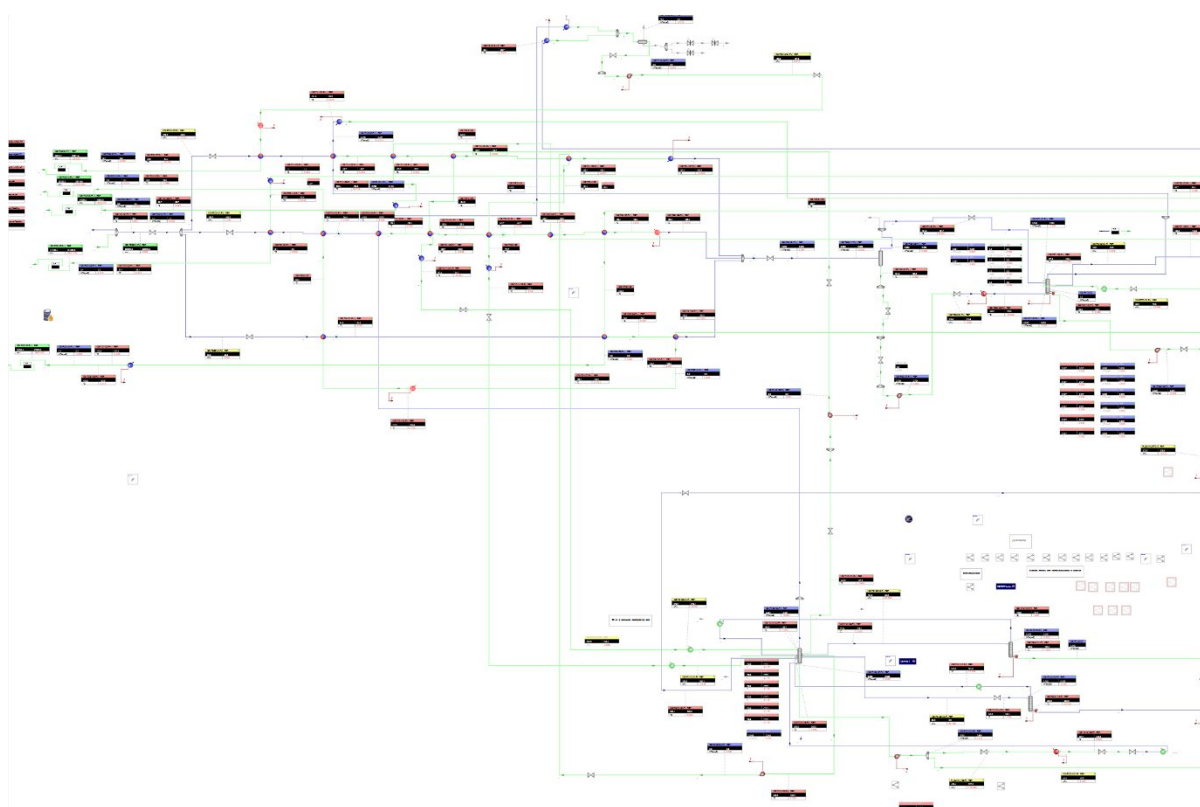
- Качество целевого продукта (керосин): температура вспышки в закрытом тигле не ниже 40°C, температура замерзания не выше минус 49°C.
- Качество товарной нефти тяжелой (НТ): разница температур, при которых перегоняется 5 об. % и 90 об. % (ASTM D86) не менее 60°C.
- Качество товарной нефти легкой (НЛ): давление насыщенных паров не более 13,5 psi, разница температур (5–90 об. %) не менее 60°C.
- Качество товарной дизельной фракции: температура вспышки не менее 60°C, температура помутнения не более 0°C.

### Этапы оптимизации

Шаг 1. Перераспределение потоков на первой колонне (К-1).

Цель: увеличить долю тяжелого сырья, подаваемого на следующую ступень разделения, за счет изменения режима первой колонны. Задача решается в рамках подхода к моделированию многоступенчатого равновесного разделения, описанного в работе Jelinek [13].

Варьируемые переменные: снижение температуры входа сырья в колонну, корректировка температуры верха и низа колонны.



**Рисунок 1.** Общий вид цифрового двойника

Результат шага 1. Расход кубового продукта колонны К-1 увеличился на 3 % при следующих изменениях:

- температура сырья на входе в К-1 — понижена на 5 %;
- расход орошения К-1 — понижен на 30 %;
- температура орошения К-1 — без изменений.

Шаг 2. Увеличение выхода целевого продукта (керосина) на второй колонне (К-2) и стриппинге (К-3).

Результат шага 2 (базовый режим). Расход керосина увеличен на 5 % при изменениях:

- температура верхнего орошения К-2 — понижена на 10 %;

- температура куба К-3 — понижена на 1 %;
- температура нижнего орошения К-2 — без изменений;
- температура куба К-2 — без изменений.

Результат при снятии части ограничений. Расход керосина увеличен на 10 % при изменениях:

- температура верхнего орошения К-2 — понижена на 27 %;
- температура куба К-3 — понижена на 3 %;
- температура нижнего орошения К-2 — понижена на 4 %;
- температура куба К-2 — без изменений.

### **Результаты оптимизации (промышленная реализация)**

В результате последовательной двухэтапной оптимизации системой были выданы рекомендуемые значения режимных параметров (температурные уставки), которые позволили:

- увеличить отбор целевой фракции (керосин) на 5 % (базовый вариант) или до 10 % (форсированный вариант) без ухудшения качественных характеристик товарных продуктов;
- сохранить выход смежных фракций (дизельная фракция) на прежнем уровне;
- обеспечить технологическую реализуемость режима, подтвержденную сходимостью материальных и тепловых балансов в модели.

**Найденный технологический режим успешно внедрен на действующей установке фракционирования газового конденсата, что подтверждает практическую ценность разработанного подхода.**

### **Заключение**

Разработанный цифровой двойник установки фракционирования газового конденсата представляет собой эффективный инструмент для глубокого анализа и оптимизации технологических процессов. Использование модифицированного уравнения Пенга — Робинсона с корректировкой свойств по методам Тву [16] и верификацией по базам данных [6, 7, 8] в сочетании с численными алгоритмами решения задач тепломассопереноса (метод Ньютона — Рафсона, алгоритм Томаса) обеспечивает высокую точность термодинамических прогнозов, а

встроенные инструменты ретроспективного анализа позволяют верифицировать модель по актуальным промышленным данным.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Предложено авторское определение цифрового двойника для газоперерабатывающего оборудования, учитывающее как стационарные, так и ретроспективные режимы без требования обязательной онлайн-связи.
2. Впервые применена комбинация модифицированного уравнения Пенга — Робинсона с алгоритмом автоматической корректировки коэффициентов теплопередачи на основе архивных данных БДРВ.
3. Разработан двухэтапный метод последовательной оптимизации режимов работы колонн фракционирования, позволяющий увеличить выход целевого продукта на 5–10 % при жестких ограничениях по качеству.

Практическая значимость работы подтверждена успешным решением оптимизационной задачи по перераспределению фракций [13]. Найденный технологический режим реализован на работающей установке фракционирования, что доказывает возможность применения системы для повышения эффективности переработки конденсата [1], в том числе в условиях изменяющегося компонентного состава сырья на входе в установку. Дальнейшее развитие системы предполагает интеграцию алгоритмов машинного обучения для предиктивной аналитики входного сырья.

## Список литературы

1. Безносиков А. Ф. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: уч. пос. / Безносиков А. Ф., Забоева М. И., Синцов И. А., Остапчук Д. А. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016.
2. Ковалев А. А. Цифровые двойники в нефтегазовой отрасли: обзор подходов / Ковалев А. А., Петров С. В. // Автоматизация и ИТ в энергетике. — 2021. — № 4. — С. 12–19.
3. Henderson D. A review of digital twin applications in oil and gas processing / Henderson D. & Chen Y. // Journal of Process Control. — 2020. — No. 95. — P. 103–115.
4. Glaessgen E. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles / Glaessgen E. & Stargel D. // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. — 2012.
5. Negri E. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems / Negri E., Fumagalli L., Macchi M. // Procedia Manufacturing. — 2017. — No. 11. — P. 939–948.
6. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. Thermophysical Properties of Fluid Systems [Электронный ресурс]. URL: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
7. IAPWS. International Association for Properties of Water and Steam [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iapws.org/>.
8. CoolProp: An open-source thermophysical property library [Электронный ресурс]. URL: <http://www.coolprop.org/>.
9. Моисеев Б. В. Методы теплового расчета трубопроводов различного назначения: уч. пос. / Моисеев Б. В., Земенков Ю. Д., Налобин Н. В., Земенкова М. Ю., Дудин С. М. — Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2016.
10. Holman J. P. Heat Transfer (10th ed.) / Holman J. P. — McGraw-Hill, 2010.
11. Леонтьев А. П. Расчет аппаратов воздушного охлаждения: уч. пос. / Леонтьев А. П., Беев Э. А. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2000.
12. Виноградов С. Н. Выбор и расчет теплообменников / Виноградов С. Н., Таранцев К. В., Виноградов О. С. — Пенза: ПГУ, 2001.

13. Jelinek J. The calculation of multistage equilibrium separation problems with various specifications / Jelinek J. // Computers & Chemical Engineering. — 1987. — Vol. 11. — No. 2. — P. 169–175.
14. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика / Абрамович Г. Н. — Москва: Наука, 1991.
15. Гужов А. И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа / Гужов А. И. — М.: Недра, 1973.
16. Twu C. H. An internally consistent correlation for predicting the critical properties and molecular weights of petroleum and coal-tar liquids / Twu C. H. // Fluid Phase Equilibria. — 1984. — Vol. 16. — No. 2. — P. 137–150.
17. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям (3-е изд.) / Идельчик И. Е. — Москва: Машиностроение, 1992.

## References

1. Beznosikov A. F. Razrabotka i ekspluatatsiya gazovyh i gazokondensatnyh mestorozhdeniy [Development and Operation of Gas and Gas-Condensate Fields.] / Beznosikov A. F., Zaboieva M. I., Sincov I. A., Ostapchuk D. A. — Tyumen': Tyumenskiy industrial'nyy universitet, 2016.
2. Kovalev A. A. Cifrovye dvoyniki v neftegazovoy otrasli: obzor podhodov [Digital twins in the oil and gas industry: a review of approaches] / Kovalev A. A., Petrov S. V. // Automation and IT in Energy. — 2021. — № 4. — Pp. 12–19 (in Russ.).
3. Henderson D. A review of digital twin applications in oil and gas processing / Henderson D. & Chen Y. // Journal of Process Control. — 2020. — No. 95. — P. 103–115.
4. Glaessgen E. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles / Glaessgen E. & Stargel D. // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. — 2012.
5. Negri E. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems / Negri E., Fumagalli L., Macchi M. // Procedia Manufacturing. — 2017. — No. 11. — P. 939–948. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. Thermophysical Properties of Fluid Systems. Available at: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
6. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. Thermophysical Properties of Fluid Systems. Available at: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>.
7. IAPWS. International Association for Properties of Water and Steam. Available at: <http://www.iapws.org/>.

8. CoolProp: An open-source thermophysical property library. Available at: <http://www.coolprop.org/>.
9. Moiseev B. V. Metody teplovogo rascheta truboprovodov razlichnogo naznacheniya [Methods for Thermal Calculation of Pipelines for Various Purposes] / Moiseev B. V., Zemenkov Yu. D., Nalobin N. V., Zemenkova M. Yu., Dudin S. M. — Tyumen': Tyumenskiy industrial'nyy universitet, 2016.
10. Holman J. P. Heat Transfer (10th ed.) / Holman J. P. — McGraw-Hill, 2010.
11. Leont'ev A. P. Raschet apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya [Calculation of Air-Cooled Heat Exchangers] / Leont'ev A. P., Beev E. A. — Tyumen': TyumGNGU, 2000 (in Russ.).
12. Vinogradov S. N. Vybór i raschet teploobmennikov [Selection and Calculation of Heat Exchangers] / Vinogradov S. N., Tarancev K. V., Vinogradov O. S. — Penza: PGU, 2001(in Russ.).
13. Jelinek J. The calculation of multistage equilibrium separation problems with various specifications / Jelinek J. // Computers & Chemical Engineering. — 1987. — Vol. 11. — No. 2. — P. 169–175.
14. Abramovich G. N. Prikladnaya gazovaya dinamika [Applied Gas Dynamics] / Abramovich G. N. — Moscow: Nauka, 1991 (in Russ.).
15. Guzhov A. I. Sovmestnyy sbór i transport nefti i gaza [Combined Collection and Transport of Oil and Gas] / Guzhov A. I. — Moscow: Nedra, 1973 (in Russ.).
16. Twu C. H. An internally consistent correlation for predicting the critical properties and molecular weights of petroleum and coal-tar liquids / Twu C. H. // Fluid Phase Equilibria. — 1984. — Vol. 16. — No. 2. — P. 137–150.
17. Idel'chik I. E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam (3rd ed.) [Handbook of Hydraulic Resistances] / Idel'chik I. E. — Moscow: Mashinostroenie, 1992 (in Russ.).