

УДК 532.529, 004.942

## **ОБЗОР PVT-СИМУЛЯТОРОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ**

**Качалов Владимир Викторович<sup>1</sup>, Сокотушенко Вадим Николаевич<sup>2,3</sup>,  
Нечаевский Андрей Васильевич<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, старший научный сотрудник;  
Объединенный институт высоких температур РАН;  
г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2;  
e-mail: ongk@mail.ru.

<sup>2</sup>Ведущий инженер Лаборатории № 2.1.3.1. – распределенной генерации ОИВТ РАН;  
Объединенный институт высоких температур РАН;  
г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2;  
e-mail: sokotushenko@mail.ru.

<sup>3</sup>Кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой физико-технических систем;  
ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна»;  
г. Дубна, ул. Университетская д.19;  
e-mail: sokotushenko@mail.ru.

<sup>4</sup>Ведущий программист;  
Лаборатория информационных технологий ОИЯИ;  
Объединенный институт ядерных исследований;  
г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д.6;  
e-mail: nechav@jinr.ru.

*PVT-симулятор – программа, которая симулирует свойства жидкости по корреляциям, исходя из простейших начальных данных (плотность, состав, темп, давление). В статье представлен обзор наиболее распространенных PVT симуляторов и их возможностей. Освоение углеводородных месторождений предполагает их гидродинамическое моделирование на основе моделей пластовых флюидов. При этом численные модели пластовых флюидов создаются с использованием PVT – симуляторов. Решение поставленных в исследовании задач в первую очередь будет зависеть от того, какой PVT-симулятор выберет исследователь.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-01270 А.*

**Ключевые слова:** газоконденсат, PVT-симулятор, программа.

## **PVT-SIMULATORS REVIEW FOR NUMERICAL MODELING OF HYDROCARBONS STATES**

**Kachalov Vladimir<sup>1</sup>, Sokotushenko Vadim<sup>2,3</sup>, Nechaevskiy Andrey<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D., senior researcher;  
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;  
Moscow, st. Izhorskaya, 13, p.2;  
e-mail: ongk@mail.ru.

<sup>2</sup>Leading Engineer of Laboratory No. 2.1.3.1. - distributed generation of JIHT RAS;  
Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences;  
Moscow, st. Izhorskaya, 13, p.2;  
e-mail: sokotushenko@mail.ru.

<sup>3</sup>Candidate of Science in Engineering, associate professor, Deputy Head of the Department of Physico-Technical Systems;  
Dubna State University,  
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;

e-mail: sokotushenko@mail.ru.

<sup>4</sup>Leading programmer;

The Laboratory of Information Technologies;

Joint Institute for Nuclear Research;

Dubna, st. Joliot-Curie, 6;

e-mail: nechav@jinr.ru.

*PVT-simulator is a program that simulates the properties of a fluid by correlations, based on the simplest initial data (density, composition, rate, pressure). The paper provides an overview of the most common PVT simulators and their capabilities. The development of hydrocarbon fields involves their hydrodynamic modeling based on reservoir fluid models. In this case, numerical models of reservoir fluids are created using PVT simulators. The solution of the tasks posed in the study will primarily depend on PVT simulator the researcher chooses.*

*The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the research project No. 17-08-01270 A.*

Keywords: gas condensate, PVT-simulator, program.

## **Введение**

При разработке месторождений углеводородов необходимо обеспечить максимальный уровень добычи нефти и попутного газа с оптимальными технико-экономическими показателями. Одним из важнейших инструментов для достижения этой цели является компьютерное моделирование, служащее для имитации эксплуатации реального резервуара без затрат на дорогостоящие испытания и ошибки при работе с реальным объектом.

Для решения задач компьютерного моделирования углеводородных месторождений применяются различного рода симуляторы разработки нефтяных и газовых месторождений. Например, гидродинамическое моделирование применяется для контроля и управления процессом разработки месторождения, прогнозирования показателей разработки, решает задачи уточнения строения и свойств пласта, изучения процесса фильтрации в различных видах коллекторов, опробования механизмов воздействия на пласт и моделирования новых технологий. В результате с использованием полученной модели возможна наиболее оптимальная разработка нефтяных и газовых месторождений в сложно построенных коллекторах и межблоковых пространствах. При этом численные модели пластовых флюидов создаются с использованием *PVT*-симуляторов.

*PVT*-симулятор, такая программа, которая симулирует свойства жидкости по корреляциям исходя из простейших начальных данных (плотность, состав, темп, давление). Для решения поставленных перед исследователем задач необходимо понимать возможности различных *PVT*-симуляторов.

## ***Simulis Thermodynamics***

Специалисты *ProSim* имеют огромный опыт работы в широком круге областей, среди которых – термодинамика, моделирование физико-химических явлений и технологических процессов, энергетическая интеграция, методы оптимизации, численные методы, архитектура программного обеспечения и графический интерфейс пользователя. *ProSim* осуществляет свою деятельность в 63 странах по всему миру, сотрудничая с более чем 720 клиентами, в том числе с крупнейшими мировыми промышленными компаниями. Расчеты по *Simulis Thermodynamics* основываются на поставляемых вместе с программой базах данных, включающих в общей сложности более 2000 индивидуальных веществ. Для каждого из них в базе данных может храниться до 125 опорных констант и до 16 температурных зависимостей основных характеристик, таких как теплоемкость, давление насыщенных паров, теплота парообразования и др. Кроме числовых характеристик, для каждого конкретного вещества содержится его химическая формула, описание молекулярной структуры для различных групповых моделей и даже ее изображение. Базы данных индивидуальных веществ открыты для пользователя и снабжены удобным и наглядным пользовательским интерфейсом для просмотра и редактирования, а также для создания собственных пользовательских баз данных. *Simulis Thermodynamics* обеспечивает возможность рассчитать большой набор термодинамических и транспортных свойств продуктов по их мольному или массовому составу: плотность, коэффициент сжима-

емости, изобарную и изохорную теплоемкость, внутреннюю энергию, энтальпию, энтропию, скорость звука, коэффициент Джоуля-Томпсона, динамическую и кинематическую вязкость, теплопроводность, коэффициент поверхностного натяжения. При этом одновременно может быть определена и производная рассчитываемого свойства по давлению, температуре или содержанию одного из компонентов. В случае необходимости можно сразу выполнить расчет фазового равновесия, найти составы фаз и определить величину искомого свойства каждой из фаз. Богатство вычислительных возможностей и мощная методическая основа сочетаются в *Simulis Thermodynamics* с удивительной для подобного продукта простотой и гибкостью применения и интеграции. Система поставляется не в виде самостоятельного *EXE*-модуля, а как набор *COM*-компонент, легко встраиваемых в программы потенциального пользователя. В частности, конечные пользователи-технологи одним нажатием кнопки могут встроить вызов *Simulis Thermodynamics* в свои расчеты с использованием *MS Excel* или *MATLAB* [1, 2].

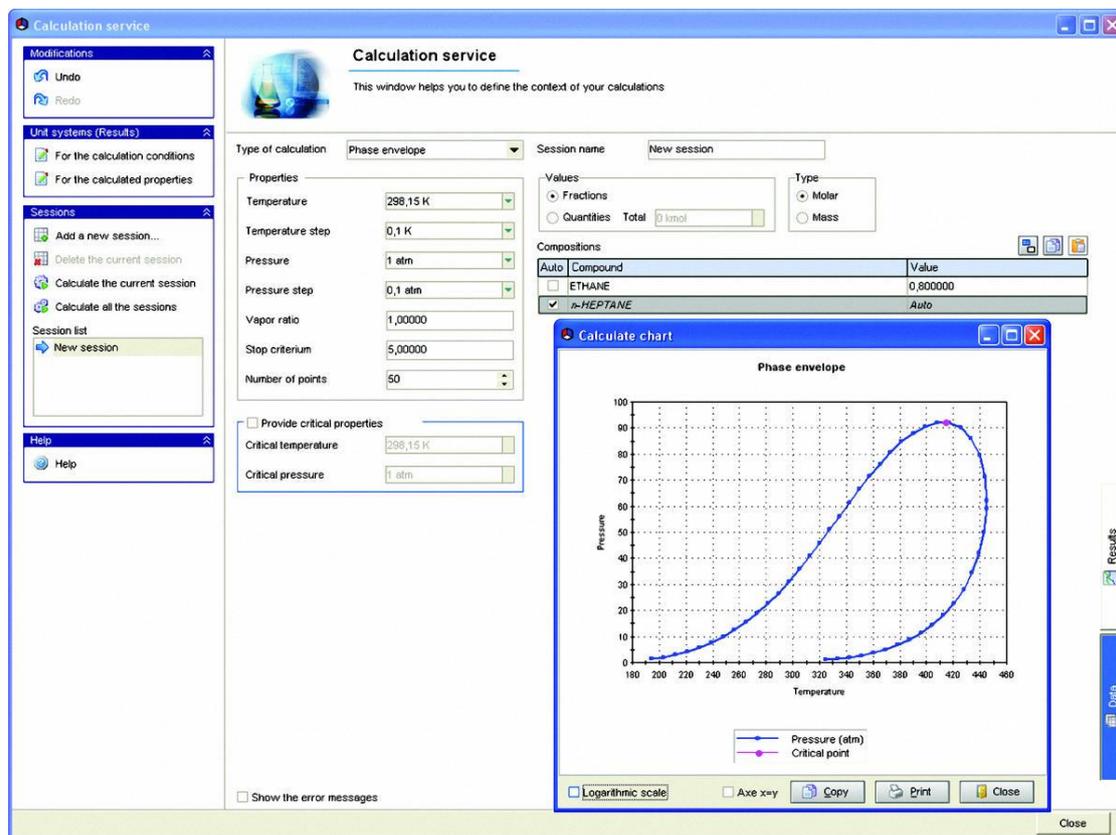


Рис. 1. Фазовая диаграмма "Envelope"

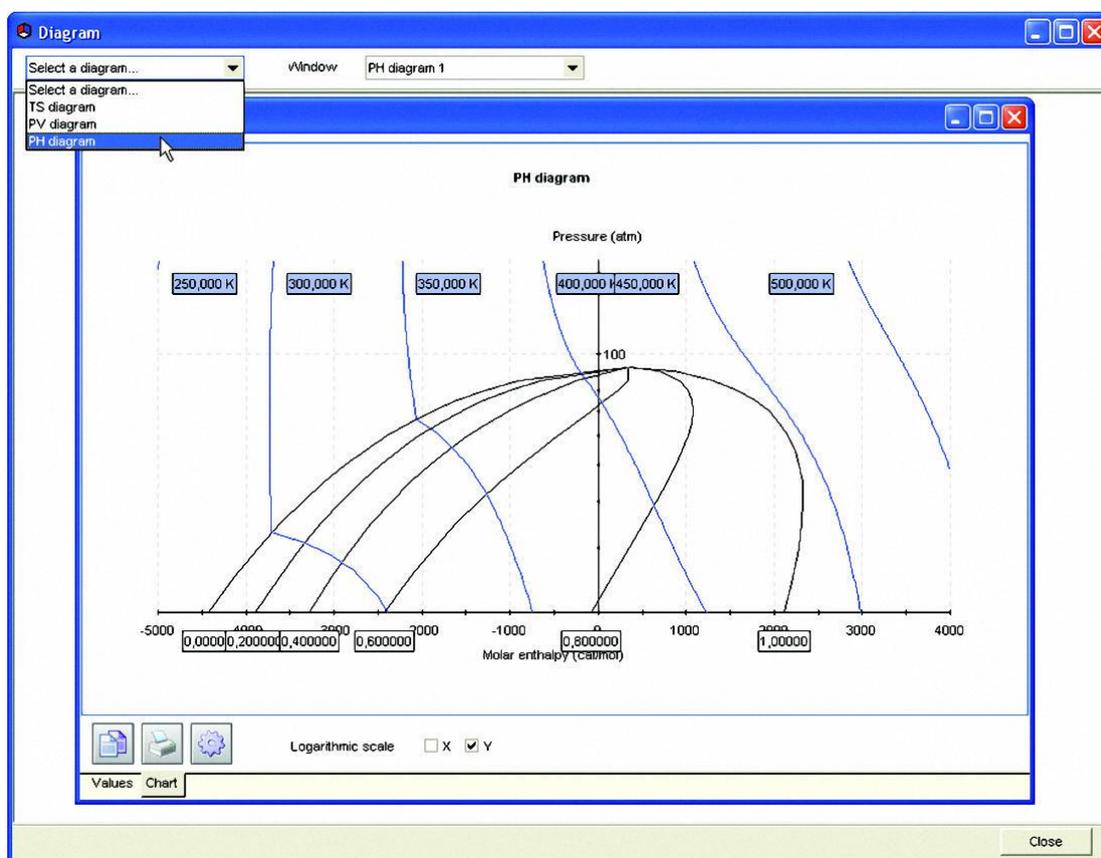


Рис. 2. Фазовая диаграмма PH

## VisualPVT

Программа *VisualPVT* [3] предназначена для расчета теплофизических свойств нефти, воды и газа по корреляционным зависимостям (корреляциям) при различных термобарических условиях. В состав *VisualPVT* входит около 150 корреляций для расчета таких свойств, как давление насыщения, газосодержание, объемный коэффициент, сжимаемость, плотность, вязкость, поверхностное натяжение, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и др. Необходимость использования корреляций возникает в задачах моделирования пластовых флюидов и технологических процессов в условиях недостатка информации о компонентном составе. Каждая корреляция, в зависимости от анализируемого ее автором географического региона или экспериментальной выборки, имеет пределы применимости, отображаемые при работе с программой.

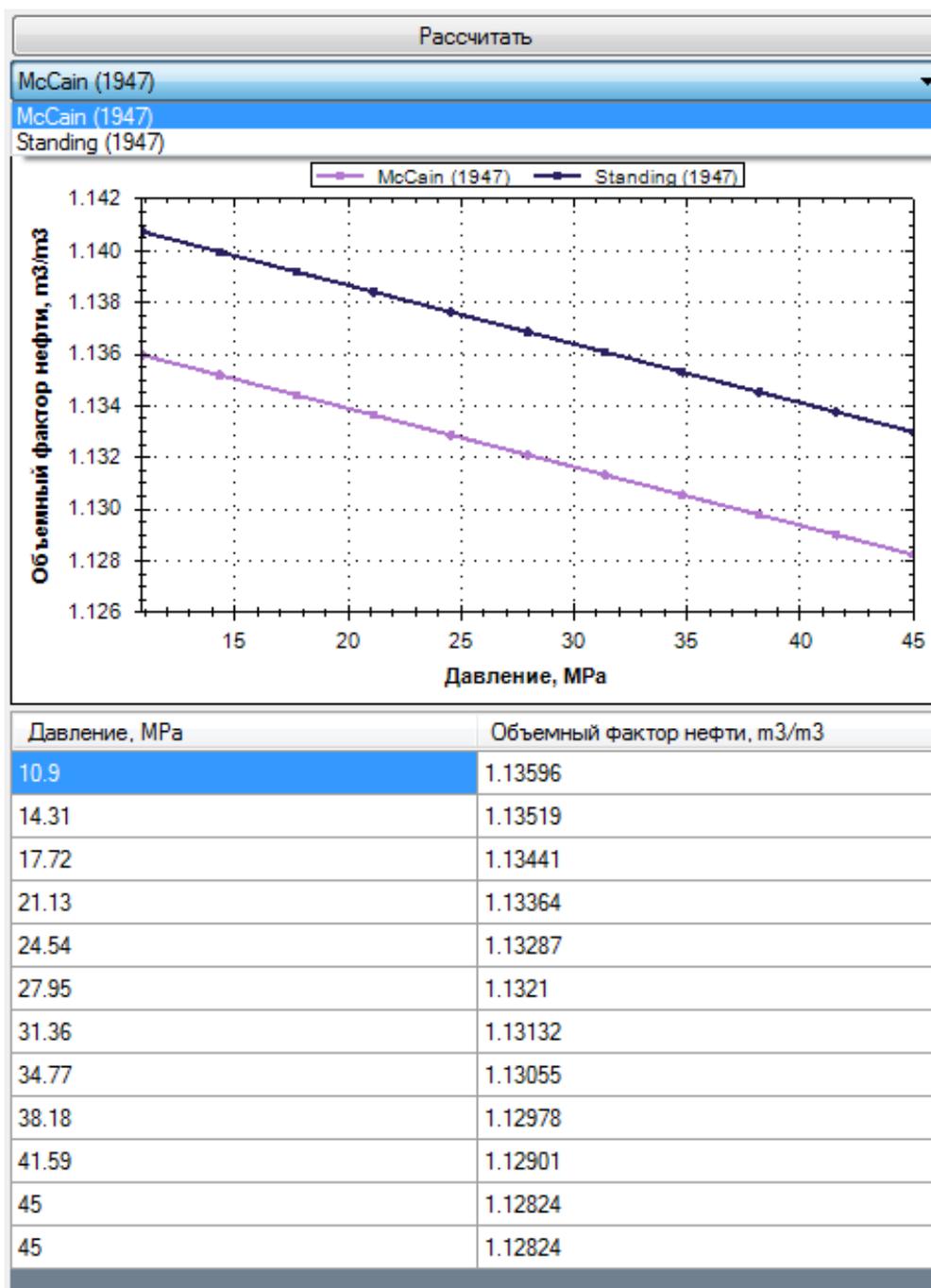


Рис. 3. Зависимость объемного коэффициента нефти от давления когда для газосодержания ( $R_s$ ) и сжимаемости ( $C_o$ ) были указаны фиксированные значения

В качестве входных данных для расчета по корреляциям выступают, как правило, давление, температура, относительная плотность нефти, относительная плотность газа, газосодержание при давлении насыщения. Уникальная особенность *VisualPVT* состоит в возможности пересчета входных свойств корреляций, по которым у пользователя нет экспериментальных данных, через другие корреляции, формируя тем самым составные корреляции, наиболее точно соответствующие зависимостям PVT свойств между собой.

Каждая из корреляций доступна для изменения налету благодаря встроенному редактору с VBA синтаксисом не требующего навыков программирования, за счет чего пользователи *VisualPVT* могут самостоятельно расширять набор зависимостей и обмениваться ими между собой.

Основные функциональные возможности *VisualPVT*: построение дерева корреляций с возможностью расчета при различных термобарических условиях, графическое представление нескольких

корреляций на одном графике, расширяемый конвертер единиц измерения, авто-сохранение проекта, русскоязычный интерфейс.

Проект *VisualPVT* активно развивается и открыт к предложениям по его улучшению и адаптации к другим областям применения (с другим набором рассчитываемых свойств и зависимостей).

Уникальность состоит в двух особенностях:

- 1) Возможность построения дерева корреляций;
- 2) Возможность редактирования корреляций.

## *PVTSim*

*PVTSim* – это универсальный программный продукт для моделирования свойств флюидов и *PVT* экспериментов, вобравший в себя все знания и опыт экспертов *Calsep* [4]. *PVTSim* является единственным продуктом, который разрабатывает компания, от его успеха зависит её успех и стабильность. Поэтому неудивительно, что на сегодняшний день он является самым продвинутым и функциональным продуктом данного класса на рынке и, кроме того, постоянно совершенствуется. Существует несколько вариантов комплектации *PVTSim* различными модулями для широкого спектра задач. В частности, в *PVTSim* имеются интерфейсы ко всем имеющимся на рынке гидродинамическим симуляторам: *CMG*, *Eclipse*, *MORE*, *VIP* и др., – что позволяет не только создавать и настраивать флюидные модели, но и передавать их в любой имеющийся у симулятор, что делает *PVTSim* универсальным инструментом.

Ключевыми преимуществами данного продукта являются:

- простой графический пользовательский интерфейс, предназначенный для быстрой и эффективной работы;
- продвинутые алгоритмы расчета фазового равновесия и регрессии;
- надежная и предиктивная характеристика пластового флюида;
- 9 разновидностей кубических уравнений состояния и собственное уравнение состояния *PC-SAFT*;
- самонастраиваемая регрессия для флюида с тяжёлым остатком, минимизирующая ручную настройку;
- автоматически регистрируемая история регрессии и журнал действий;
- продвинутое управление флюидами, включая гибкую группировку, смешивание и характеристику нескольких флюидов по единому уравнению состояния;
- возможность моделирования *PVT* экспериментов, не имея экспериментальных данных для настройки;
- экспорт в различные типы популярных гидродинамических симуляторов, симуляторов систем сбора и подготовки (абсолютно идентичная флюидная модель во всех симуляторах);
- полностью композиционное моделирование осаждения парафинов в трубопроводах;
- возможность простой интеграции со сторонними утилитами и программными комплексами.

## *Платформа Сфера. PVT-модуль*

*PVT*-симулятор, созданный специалистами НЦ РИТ «Дельта» [5], не имеющий российских аналогов, и удовлетворяющий требованиям ГОСТ Р «Освоение газовых, газоконденсатных, нефтегазовых и нефтегазоконденсатных месторождений», разрабатываемым в Газпроме. В мире существует несколько программ для *PVT* моделирования (реально используются 4-5), но все они являются зарубежными разработками. Российский симулятор «Сфера.*PVT*-модуль» предназначен для построения моделей пластовых смесей, а также для численного исследования свойств пластовых смесей.

Возможности блока «*PVT*-модуль»:

- Использование кубических уравнений состояния – двух и трехпараметрических, различных типов (Пенга-Робинсона, Редлиха-Квонга, Соаве-Редлиха-Квонга).
- Моделирование основных лабораторных экспериментов в нефтяных и газоконденсатных системах:
  - определение давления насыщения,  $P_{sat}$ , и его типа ( $P_{bub}$ ,  $P_{dew}$  ретроградное и  $P_{dew}$  нормальное);
  - расчет фазового равновесия (флэш расчет) углеводородной смеси;
  - дифференциальное разгазирование (синоним  $DLE$ );
  - контактная конденсация (синонимом  $CCE$ );
  - дифференциальная конденсация (синоним  $CVD$ );
  - построение  $PT$  диаграммы, определение криконденбары и криконденсермы;
  - расчет одно- или многоуровневого сепаратора, включая сложные сепараторы с произвольным направлением потоков с уровнями;
    - эксперимент на «разбухание», моделирующий закачку обедненного газа в пласт (*swelling test*).
- Расчет изменения компонентного состава и давления с глубиной в условиях термодинамического и гравитационного равновесия, определение при этом положения ГНК и создание таблиц  $ZMFVD$ ,  $COMPVD$ ,  $RSVD$ ,  $RVVD$ .
- Создание  $PVT$  таблиц жидкой и газовой фаз для гидродинамических моделей «Черной Нефти».
- Определение вязкости жидкой и газовой фаз углеводородов.
- Использование библиотеки свойств компонент – чистых веществ (включающей около 70 наименований) с возможностью для пользователя создавать свои собственные компоненты (фракции) и корректировать параметры существующих.
- Расчет параметров компонент-фракций на основе различных корреляций:
  - расчет плотности и температуры кипения фракций, критической температуры, критического давления, ацентрического фактора, критического объема, парахор, шифт-параметров;
  - расчет коэффициентов бинарного взаимодействия, используя корреляции.
- Создание  $PVT$ -блоков для гидродинамических композиционных изотермических моделей.
- Настройка параметров уравнения состояния по результатам лабораторных  $PVT$  экспериментов с использованием процедуры многомерной регрессии для создания модели пластового флюида.
- Экспорт результатов в формат Эклипс (сохранения результатов в форматах  $*.DATA$ ,  $*.PVO$ ), возможность загрузки ранее сохраненных смесей.
- Интерактивный режим работы с дружественный интерфейсом, наличие словаря терминов
- Визуализация результатов.
- Учет специфики российских условий, пожеланий пользователей.

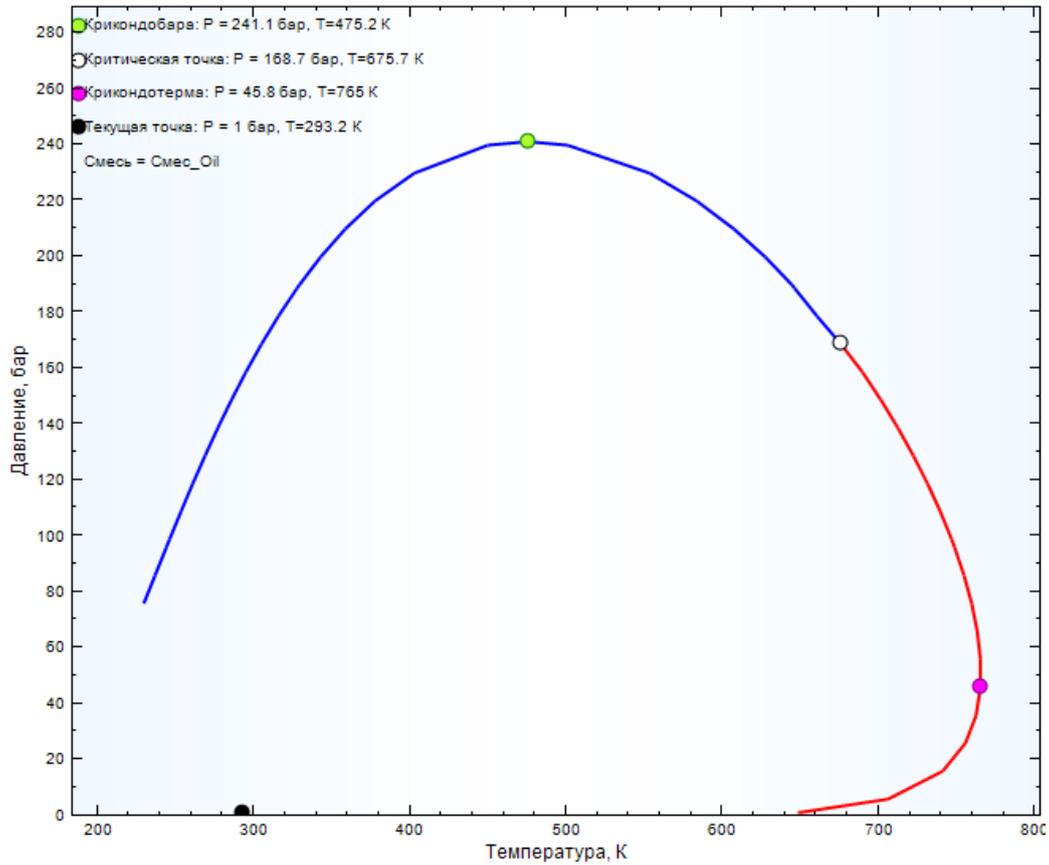


Рис. 4. Сфера.PVT-модуль. Построение PT диаграммы

### WinProp

WinPro представляет собой необходимый инструмент для инженера-разработчика как в лаборатории, так и в полевых условиях. Приложение позволяет точно идентифицировать и моделировать поведение фаз и свойства пластовых флюидов. Особенно ценным этот инструмент является для мультифазных и специализированных процессов и там, где имеют место изменения состава фаз. WinProp является неотделимой частью в процессе продвинутого моделирования [6].

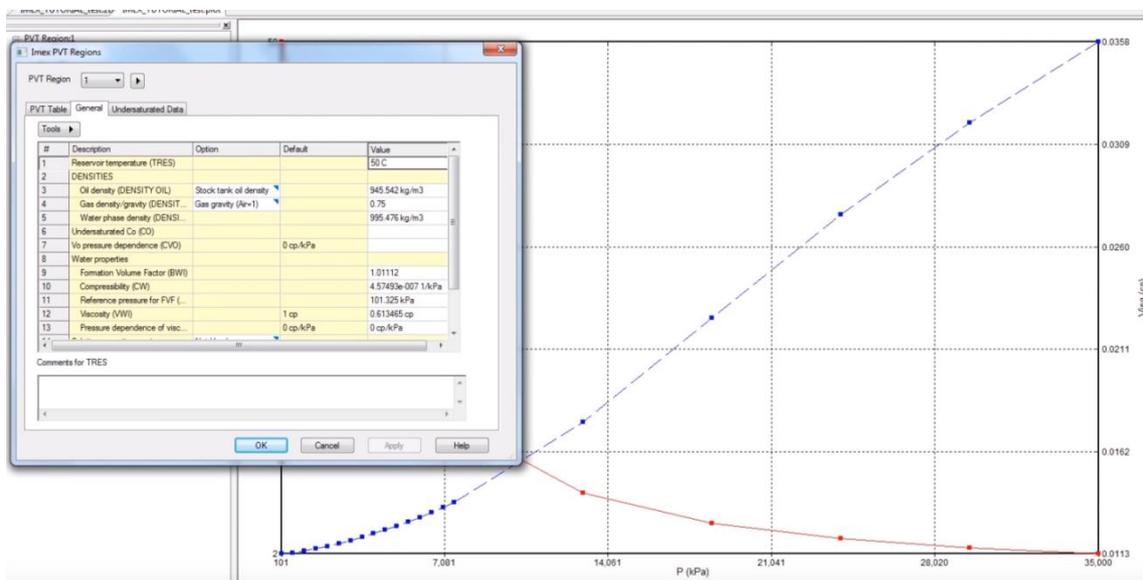


Рис. 5. Возможности WinProp [7]

## Saphir NL

Анализ давлений на неустановившихся режимах, или анализ ГДИС, в большинстве случаев – это анализ данных высокой частоты и разрешения, записанных во время остановки скважины. Запись осуществляется во время специальных исследований, таких как испытания на бурильных трубах, промышленное испытание или обычная техническая остановка, зарегистрированная стационарными глубинными манометрами (PDG). Кривые давления таких остановок используются для определения параметров пласта в радиусе исследования при радиальном течении или по площади исследования для более сложных геометрий. Диагностический график – билогарифмический, где кривая давлений и производная Бурде совмещаются с моделью, что позволяет определить свойства и геометрию пласта. Особой обработки требуют специальные исследования, такие как испытания газовых скважин на нескольких режимах, гидропрослушивание, многопластовые исследования и другие. Метод деконволюции позволяет сочетать данные нескольких остановок и получить больше информации о пласте, чем при стандартной интерпретации одиночной остановки [8].

*Saphir NL* является отраслевым стандартом в области программного обеспечения по интерпретации ГДИС, используется практически всеми крупными международными и национальными НК, а также независимыми и сервисными компаниями. Простой интерфейс и последовательность работы обеспечивают быстрое (и отчасти самостоятельное) обучение новых пользователей. Для продвинутых пользователей программа предлагает уникальную комбинацию инструментов анализа, аналитических и численных моделей, а также взаимодействие с другими программами по анализу динамических данных, таких как *Topaze NL* для анализа добычи или *Rubis* для адаптации модели всего месторождения.

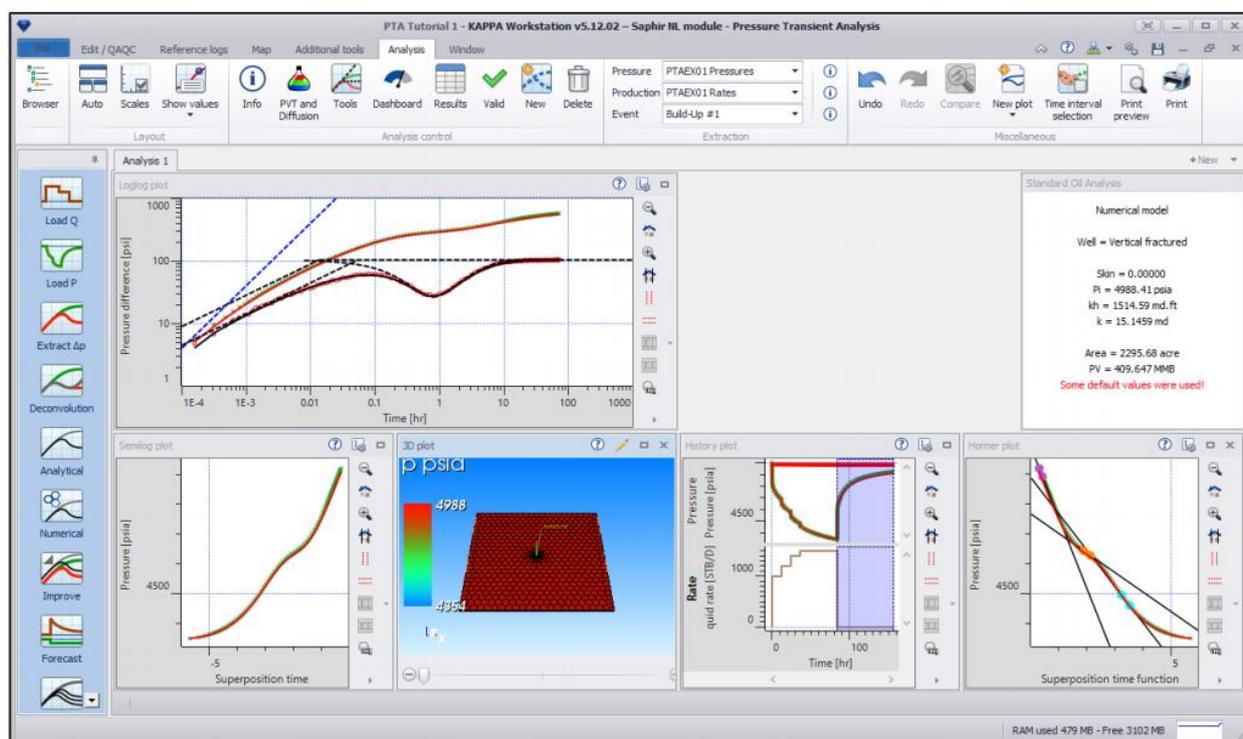


Рис. 6. Интерфейс *Saphir NL*

## Open Porous Media (OPM)

*OPM* – это бесплатный гидродинамический симулятор, обладающим всем необходимым инструментарием для создания модели течения флюидов в поровом пространстве. На сегодняшний день симулятор ориентирован, прежде всего, на разработку нефтегазовых месторождений, увеличение коэффициента извлечения нефти и секвестрацию  $CO_2$ . Разработка *OPM* началась в июне 2009 года в Исследовательском Центре компании *Statoil* в Норвегии [9].

На рис. 7 3D-график показывает распределение насыщенности, визуализированное в *ResInsight*. Графики линий показывают давление в скважине и скорости добычи нефти, рассчитанные потоком (синие линии) и *Eclipse 100* (красные линии). На рис. 8 резервуар изначально является ненасыщенным и заполнен однородной смесью воды и масла без исходного свободного газа и постоянным соотношением растворимости газойля по всей модели. Газ вводят в верхний слой. Рис. 9 показывает сравнение водного и полимерного затопления для синтетического мелководного резервуара из проекта *SAIGUP*. Решатель *OPM* предполагает несжимаемый поток и использует последовательную неявную процедуру решения с оптимальным упорядочением неизвестных в уравнении переноса, чтобы сократить время вычислений. В моделировании полимера (пунктирные линии) мы видим, что давление в нижней части скважины увеличивается и скорость впрыска уменьшается во время инъекции полимерного шлама. Это, в свою очередь, дает меньше добычи нефти во время инъекции слизи, но общий результат заключается в том, что меньше воды вводится и производится из резервуара в течение имитируемого 3000 дней, а общая добыча нефти несколько возрастает. (Визуализация с помощью *MRST*).

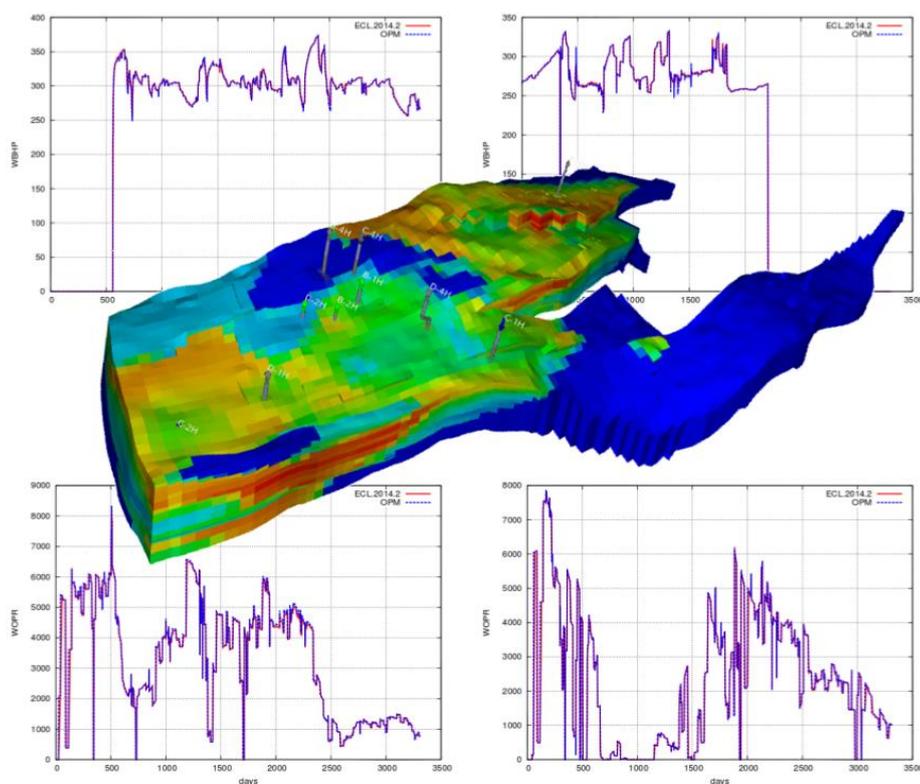


Рис. 7. Проверка потока для поля Норна

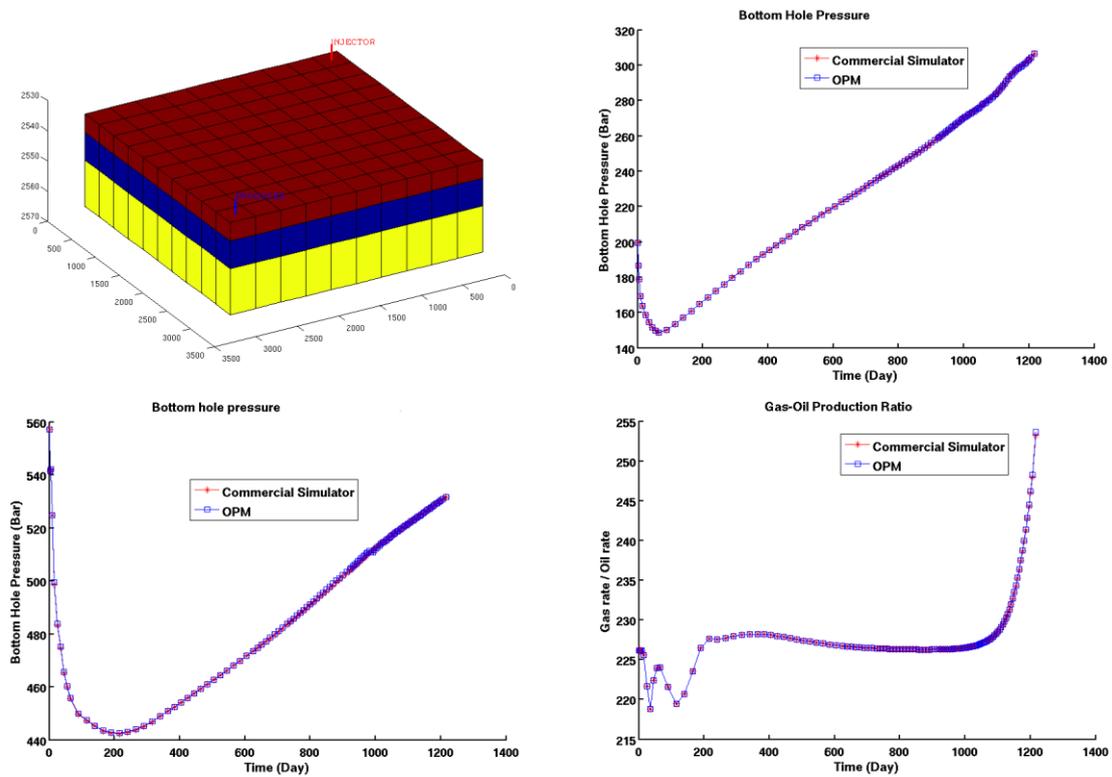


Рис. 8. Проверка потока в тестовом случае SPE1

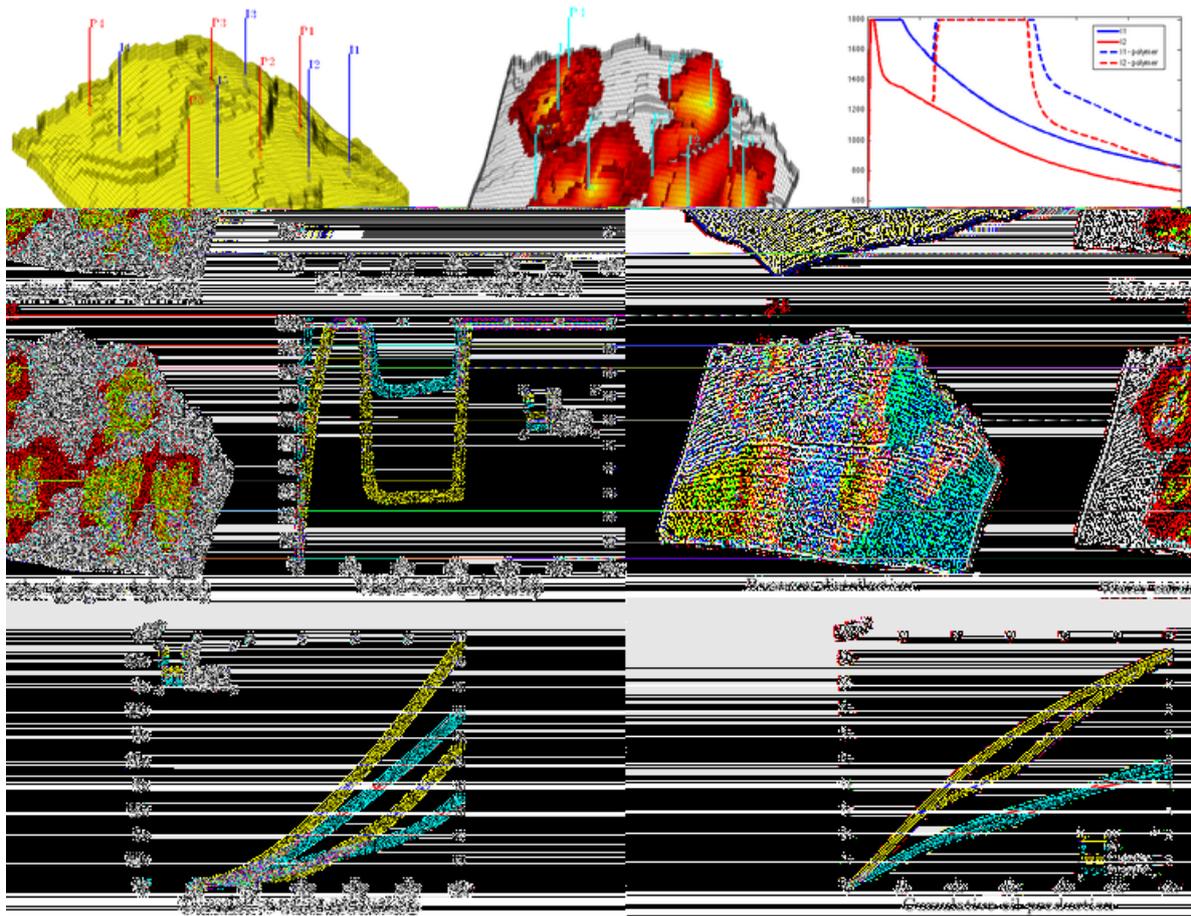


Рис. 9. Сравнение водного и полимерного затопления для синтетического мелководного резервуара

## ГДИ-эффект

Программно-методическая система ГДИ-эффект предназначена для обработки и анализа результатов гидродинамических и газодинамических испытаний и исследований скважин (ГДИС), наиболее массово выполняемых российскими геофизическими службами и предприятиями нефтегазодобывающей отрасли.

ГДИ-эффект обрабатывает совокупность ИПТ, ИД, КВД, КВУ, КПД, свабирование, интервальные замеры для разведочных и эксплуатационных скважин на нефть, газ и конденсат, вычисляет пластовое давление, коэффициенты проницаемости, гидропроводности, пьезопроводности.

Скин-фактор, дебит и продуктивность определяются с учётом влияния депрессии на пласт. ГДИ-эффект «С+К» выявляет оптимальный режим работы скважины, согласует противоречия результатов разных методов исследования, оставляет спокойный, исключает возбуждённые режимы эксплуатации.

При выполнении комплексной обработки в варианте «С+К» одновременно вовлекается разное количество исходных данных. Это количество может включать одно или несколько исследований, а также совокупности всех (за всю историю жизни скважины) исследований и данных эксплуатации. Если данных по объекту исследования (подсечение пласта скважиной) недостаточно, то для повышения достоверности результата могут быть вовлечены данные по соседним скважинам, вскрывающим тот же пласт.

Целью комплексной обработки является повышение достоверности определения фильтрационных характеристик пласта за счёт привлечения всех имеющихся данных и их совместного анализа, а также приведение полученных продуктивных характеристик скважины к условиям эксплуатации [10].

## GIBBS

*GIBBS* – это компьютерная программа комплексного моделирования технологических процессов промышленной подготовки, переработки и транспорта природного и попутного газа, газового конденсата и нефти. Программа официально зарегистрирована, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2003610500 от 25-02-2003.

Наиболее полный набор моделей позволяет описать свойства сырья и продуктов, определить затраты тепла, энергии, материально-тепловой баланс производства, массовые и объёмные выходы и состав продуктов, их соответствие действующим стандартам.

Используемые теоретические методы, в основе которых лежат принципы современной технической термодинамики и использование уравнения состояния для расчета фазовых превращений и теплофизических свойств углеводородных смесей, являются универсальными и позволяют моделировать в широком диапазоне условий следующие технологические процессы:

- процессы промышленной подготовки природного газа, включая установки низкотемпературной сепарации и конденсации;
- процессы обработки газа с вводом, сбором и регенерацией ингибиторов гидратообразования;
- процессы промышленной и заводской подготовки и переработки газоконденсата и нефти, включая деэтаннизацию, стабилизацию и фракционирование;
- процессы низкотемпературного выделения сжиженных углеводородных газов, этана, гелия и азота из природного газа, фракционирования смесей легких углеводородов, холодильные циклы, низкотемпературные детандерные заводы;
- процессы сжижения природного газа;
- процессы тепловых станций на водяном паре;
- процессы многофазного транспорта нефтегазоконденсатных смесей, включая транспорт не-ньютоновских жидкостей и водонефтяных эмульсий.

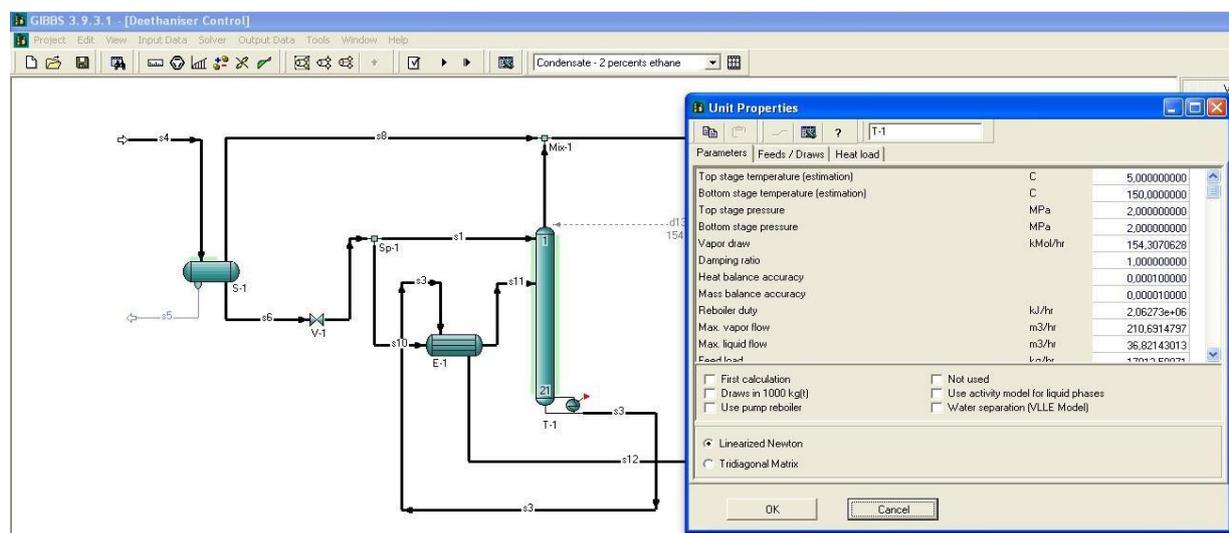


Рис. 10. Пример интерфейса программы GIBBS

## Заключение

В статье рассмотрены популярные *PVT*-симуляторы – программы, которые симулируют свойства жидкости, по корреляциям исходя из начальных данных (плотность, состав, темп, давление). Рассмотрены как платные, так и бесплатные варианты программ. При необходимости каждый может выбрать для себя необходимый инструментарий в зависимости от целей исследования.

## Список литературы

1. Simulis Thermodynamics. Расчет теплофизических свойств и фазовых равновесий. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.truboprovod.ru/cad/soft/simulis.shtml>.
2. Леонид Корельштейн, Сергей Лисин. Simulis Thermodynamics. Инструмент технолога, который всегда под рукой // CADmaster. Проектирование промышленных объектов. — 2011. — №3. — [Электронный ресурс]. URL: [http://thermophysics.ru/pdf\\_doc/Simulis.pdf](http://thermophysics.ru/pdf_doc/Simulis.pdf).
3. VisualPVT — программа расчета PVT свойств нефти, воды и газа со встроенным редактором корреляционных зависимостей. — [Электронный ресурс]. URL: <http://www.visual-pvt.com/>.
4. [Электронный ресурс]. <http://petec.ru/software/calsep>.
5. Национальный центр развития инновационных технологий «Дельта». Программный Комплекс Сфера.PVT-модуль. — [Электронный ресурс]. URL: <http://deltaru.ru/sfera.pvt-modul.html>.
6. Computer Modelling Group. WinProp Fluid Property Characterization Tool. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cmgl.ca/winprop>.
7. How to Create a Simple PVT for a Blackoil Model (CMG 2017). — [Электронный ресурс]. <https://www.youtube.com/watch?v=54sbIUvZVJI&feature=youtu.be>.
8. Saphir NL — анализ ГДИС. — [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kappaeng.com/software/saphir/overview>.
9. The Open Porous Media Initiative. — [Электронный ресурс]. URL: <https://opm-project.org/>.
10. Программно-методическая система «ГДИ-эффект» для стандартной и комплексной обработки. — [Электронный ресурс]. URL: <http://gisgdieffect.narod.ru/gdi/spcprog.html>.