



Н.С. Бахтий¹
канд. техн. наук, доцент
начальник отдела математического
моделирования нефтегазовых
месторождений
bahtiy_ns@surgutneftegas.ru



М.В. Абдулина¹
канд. физ.-мат. наук
заведующий лабораторией
вычислительной гидродинамики
abdulina_mv@surgutneftegas.ru



А.А. Аристов¹
заведующий лабораторией
программного обеспечения
aristov_aa@surgutneftegas.ru



М.В. Мишарин¹
старший научный сотрудник
misharin_mv@surgutneftegas.ru



М.С. Тупицин¹
ведущий инженер
tupicin_ms@surgutneftegas.ru

Гидродинамический симулятор «Техсхема»: моделирование месторождений нефти и газа с использованием суперкомпьютерных технологий²

1. Тюменское отделение «СургутНИПИнефть» ОАО «Сургутнефтегаз». Россия, 625003, Тюмень, ул. Розы Люксембург, 12, корп. 7.
2. В работе над статьей принимали участие сотрудники Тюменского отделения «СургутНИПИнефть» Д.Н. Иванюта, С.В. Майер, Н.И. Малышева.

Более 20 лет в ОАО «Сургутнефтегаз» развивается гидродинамический симулятор «Техсхема», который используется для моделирования всех месторождений компании. «Техсхема» позволяет моделировать добычу как традиционных, так и трудноизвлекаемых запасов с применением гидроразрыва пласта и других методов увеличения нефтеотдачи. Симулятор является отечественным программным обеспечением и работает на различных операционных системах, что сокращает зависимость от импортных аналогов и затраты на них. Для повышения квалификации специалистов разработан учебный курс моделирования в ПО «Техсхема», преподаваемый в Тюменском государственном университете

Ключевые слова: гидродинамическое моделирование; параллельные вычисления; начальные условия; модель нелетучей нефти; гидроразрыв пласта; экономическая оценка

Для гидродинамического моделирования (ГДМ) используется программное обеспечение (ПО), которое содержит гидродинамический симулятор (расчетное ядро, численно решающее фильтрационные уравнения) и программы обработки исходных данных и результатов расчета.

ГД-симулятор «Техсхема» создан и в течение почти 30 лет совершенствовал специалист высокого класса в области вычислительной гидродинамики, канд. техн. наук В.П. Майер. За это время с использованием ПО «Техсхема» успешно проектировалась разработка большинства месторождений За-

падной Сибири (и многих месторождений других регионов). По данным ЦКР Роснедра «Техсхема» является третьим программным продуктом по частоте использования при со-

здании проектной документации на разработку месторождений [1]. Ввиду возросших требований к ГДМ, а также для эффективного применения современных суперкомпьютерных систем, коллективом Тюменского отделения «СургутНИПИнефть» была создана новая версия «Техсхемы» – ПО «Техсхема 15». Этот симулятор имеет высокую производительность и выполняется на различных операционных системах (*Windows, Linux, Unix*); работает с большими массивами данных на компьютерах с общей и распределенной памятью; использует только свободно распространяемые библиотеки, чтобы исключить влияния ограничительных санкций; имеет удобную модульную архитектуру для совместного процесса разработки и отладки, простые системы расширения функциональных возможностей и управления расчетом, а также простой и интуитивно понятный пользовательский интерфейс.

Новая версия «Техсхемы» позволяет моделировать добычу как традиционных, так и трудноизвлекаемых запасов с применением гидроразрыва пласта и других методов увеличения нефтеотдачи. Симулятор «Техсхема» является отечественным программным обеспечением, уменьшающим зависимость от импортных аналогов и затраты на них.

Параллельные вычисления

В настоящее время стандартом для повышения производительности вычислений в ГД-симуляторах стало использование гибридного распараллеливания [2]. Симулятор «Техсхема» реализует именно такой подход: взаимодействие между узлами кластера осуществляется с помощью технологии *MPI*, а внутри узла используется технология *OpenMP*.

Для распараллеливания расчетов используется метод доменной декомпозиции [3]. Декомпозиция расчетной сетки (ее разделение на отдельные области – домены) выполняется алгоритмом, основанным на минимальной связности доменов и реализованным в библиотеке *METIS* [4]. Процесс декомпозиции в ПО «Техсхема» реализован в виде отдельного приложения, которое позволяет пользователям применять не только встроенные, но и свои собственные алгоритмы.

На *рис. 1* продемонстрирована зависимость эффективности распараллеливания от количества процессоров и способа декомпозиции исходной сетки на домены. Видно, что декомпозиция *METIS* может дать значительное дополнительное ускорение по сравнению

Новая версия «Техсхемы» позволяет моделировать добычу как традиционных, так и трудноизвлекаемых запасов с применением гидроразрыва пласта и других методов увеличения нефтеотдачи

падной Сибири (и многих месторождений других регионов). По данным ЦКР Роснедра «Техсхема» является третьим программным продуктом по частоте использования при со-

Рис. 1.

Ускорение расчета в зависимости от количества процессоров и способа декомпозиции

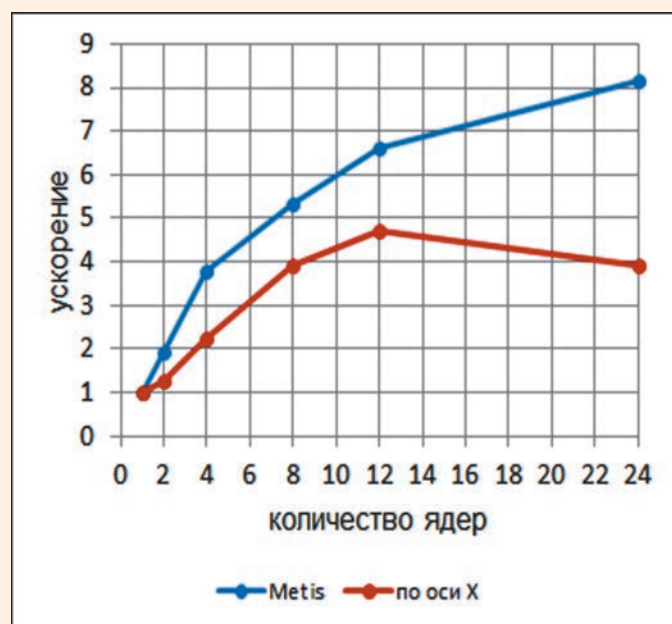




Рис. 2. Сравнение численного и аналитического решений для начальной нефтенасыщенности

со стандартной декомпозицией сетки вдоль оси X.

Начальное состояние

Для расчета начального состояния модели реализован отдельный гидростатический симулятор.

Этот симулятор, рассчитывающий начальное давление и насыщенность, был протестирован на модели неоднородного коллектора с ухудшающимися фильтрационно-емкостными свойствами от подошвы к кровле

пласта. В этом случае возможно немонотонное распределение насыщенности.

Для аналитического решения зависимость капиллярного давления от насыщенности и глубины задавалась как

$$P_{cow}(S_w(z)) = \varphi(z)J(S_w),$$

где функция Леверетта имеет вид

$$J(S_w) = (1 - S_w)^2,$$

множитель капиллярного давления (в МПа) –

$$\varphi(z) = 0,0001z^2 - 0,404z + 408,05.$$

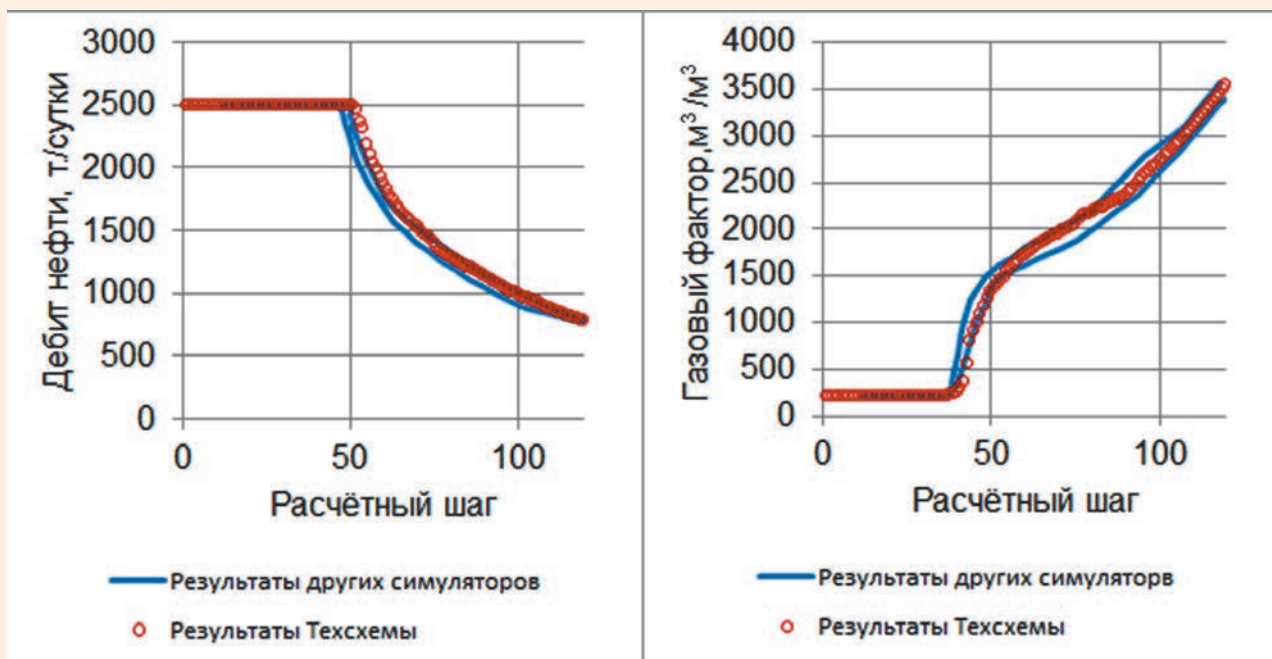
Сравнительные результаты расчета, представленные на рис. 2, показывают отличное совпадение численного и аналитического решений.

Гидродинамическое моделирование

В основе ГД-симулятора «Техсхема» – классическая модель нелетучей нефти (*black oil*). Вычислительные алгоритмы протестированы сравнением результатов расчета с известными аналитическими решениями [5], а также с результатами других симуляторов. На рис. 3 представлено сравнение дебита нефти и газового фактора добывающей скважины с результатами 1-го теста SPE, опубликованными в [6]. На рис. 4 проведено сравнение суммарного дебита нефти и среднего давления с результатами 10-го теста SPE [7]. Результаты всех симуляторов отлично согласуются.

Рис. 3.

Сравнение результатов Техсхемы и других симуляторов. Тест SPE 1



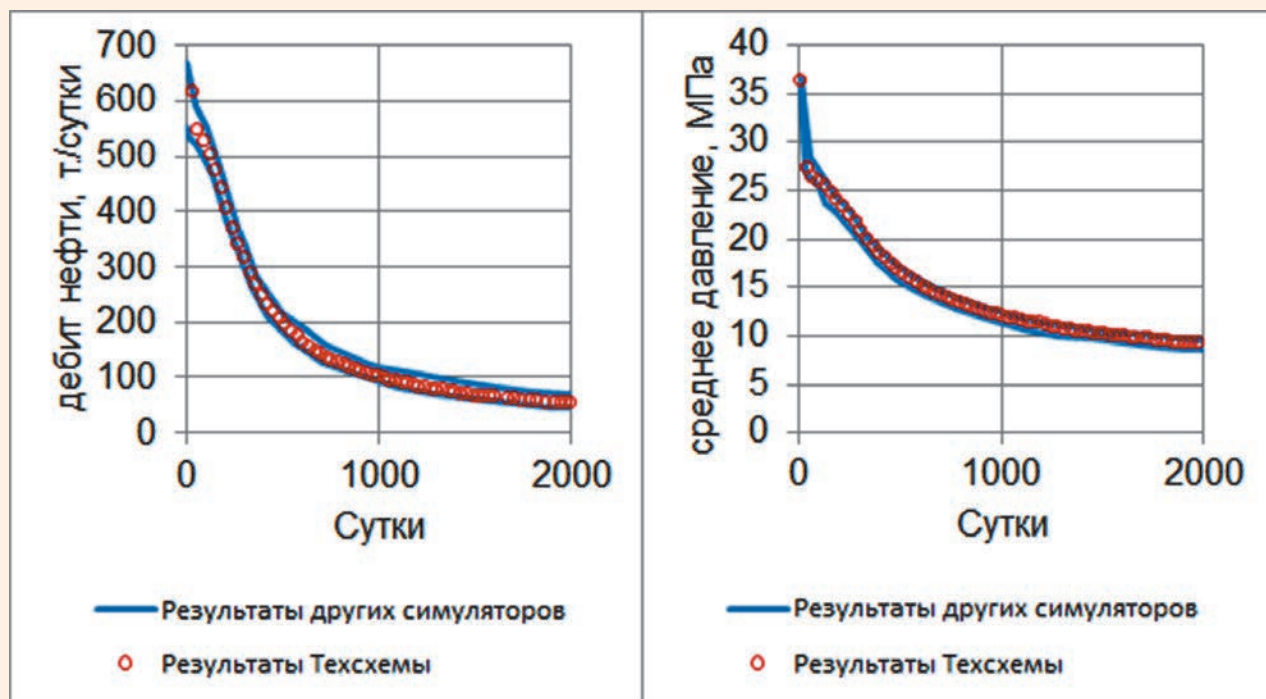


Рис. 4.
Сравнение результатов Техсхемы и других симуляторов. Тест SPE 10

Моделирование гидроразрыва пласта (ГРП)

Зачастую моделирование ГРП осуществляется заданием отрицательного значения скин-фактора. Однако при увеличении детализации модели «все чаще возникает ситуация, когда размеры трещин начинают превышать

размеры ячеек сетки, и применение этого подхода приводит к значительному искажению свойств математической модели и фактически разрушает ее прогнозную силу» [2].

В этом случае в «Техсхеме» реализована возможность моделирования ГРП посредством дополнительных «виртуальных» перфораций, которые создаются автоматически на основе геометрии трещин. Модель позволяет учесть эффект «затухания» эффекта от

Рис. 5.
Трещины ГРП на 3D-карте в ПО «Техсхема»

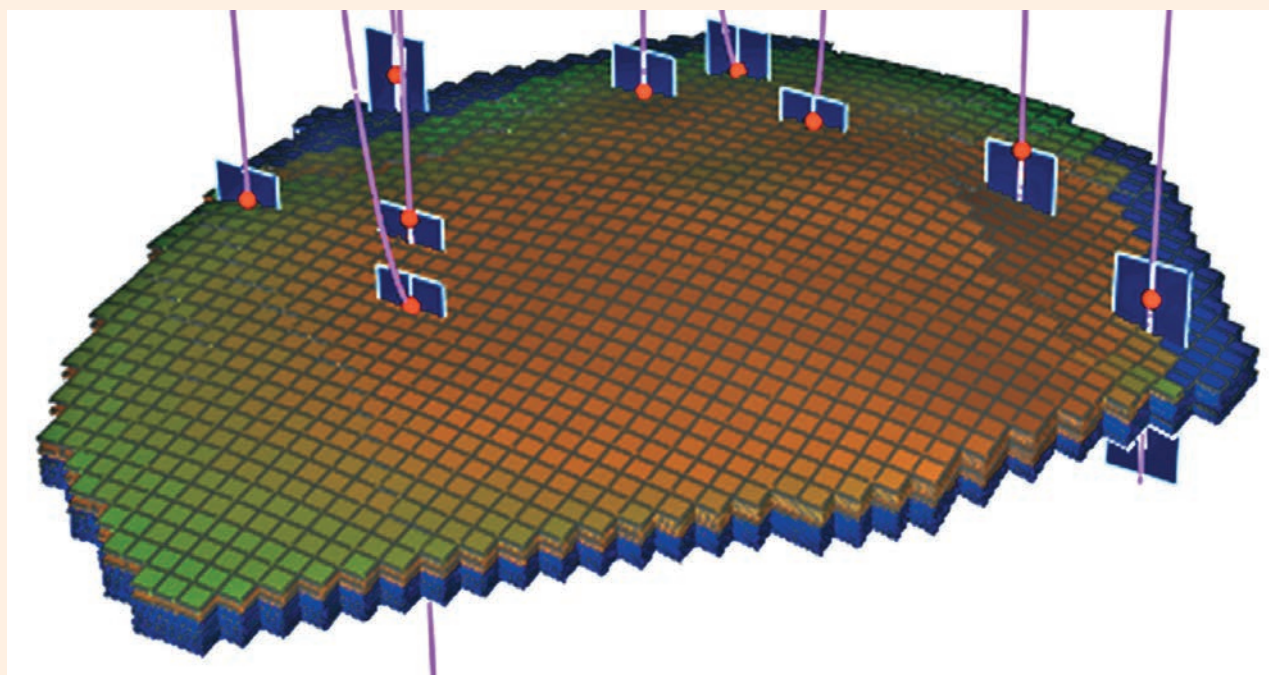


Таблица результатов расчёта экономических показателей

Статические показатели Динамические показатели Анализ чувствительности

Навигатор формул **(TE344)119.040 + (TE348)44.600 + (TE352)120.610 + (TE353)2.277 + (TE354)2.214 + (TE355)232.950 +**

Группа	Экономические показатели	2014	2015	2016	...
343	ОНСС для газодобывающих, всего	0.000	0.000	0.000	
335	в том числе скважин действующего фонда	0.000	0.000	0.000	
358	Внутрипромысловое строительство, всего	631.246	400.312	465.936	
344	в том числе: сбор, транспорт и подготовка нефти и газа	119.040	83.250	89.150	
332	сбор нефти и газа для скважин, находящихся ...	0.000	0.000	0.000	
348	закачка воды	44.600	84.090	38.890	
349	закачка газа	0.000	0.000	0.000	
352	электроснабжение	120.610	51.690	86.150	
353	автоматика и теленеханика	2.277	6.072	2.277	

Рис. 6. Результаты расчета экономических показателей

ГРП. На рис. 5 показаны сеточная модель, скважины и трещины ГРП, созданные по единому шаблону.

Модуль экономической оценки

Для оценки экономической эффективности проектов разработки месторождений был создан модуль «Экономика» (рис. 6). Этот модуль используется при принятии решений об инвестициях в разработку месторождений и позволяет значительно ускорить работу по подготовке проектной документации.

Вся расчетная часть проводится на основе регламентов по проектированию и разработ-

месторождению на основе моделей отдельных залежей).

Кроме того, разработан гибкий механизм создания шаблонов для табличных Excel-отчетов на основе списка тегов, которые автоматически распознаются в программе. Такая методика дает пользователю большие возможности для создания отчетов.

В связи с тем, что в регламентирующие документы и налоговое законодательство регулярно вносятся поправки, необходимо постоянно вносить изменения в расчетные алгоритмы. Эта проблема будет решена посредством перевода расчетной части на скрипты на языке Python с возможностью редактирования, а также написания собственных скриптов для большей гибкости модуля.

Симулятор «Техсхема» является отечественным программным обеспечением, уменьшающим зависимость от импортных аналогов и затраты на них

ке нефтяных и газовых месторождений [8, 9], налогового законодательства, и постоянно поддерживается в актуальном состоянии в соответствии с новыми нормативными документами.

Программный модуль «Экономика» включает в себя блоки: экономические нормативы, технологические показатели, экономические показатели, анализ чувствительности, а также встроенный модуль для суммирования технико-экономических показателей (например, для получения данных в целом по

Управление скважинами

Механизм управления прогнозными режимами скважин реализован при помощи скриптов на языке JavaScript. Классы, отвечающие за работу скважин, предоставляют возможность вызова своих методов из скриптов при помощи мета-объектной системы Qt [10].

Для автоматического создания скриптов разработан их генератор. Пользователь имеет возможность назначить прогнозные режимы работы скважин, используя специальный модуль с удобным графическим интерфейсом. Затем при помощи генератора создается текстовый файл скрипта. Этот файл считывается симулятором и используется для управления режимами работы скважин. Файл скрипта является текстовым, поэтому пользователь может просматривать и редактировать его вручную. Таким образом, возможности по управлению прогнозными режимами работы скважин значительно расширяются.

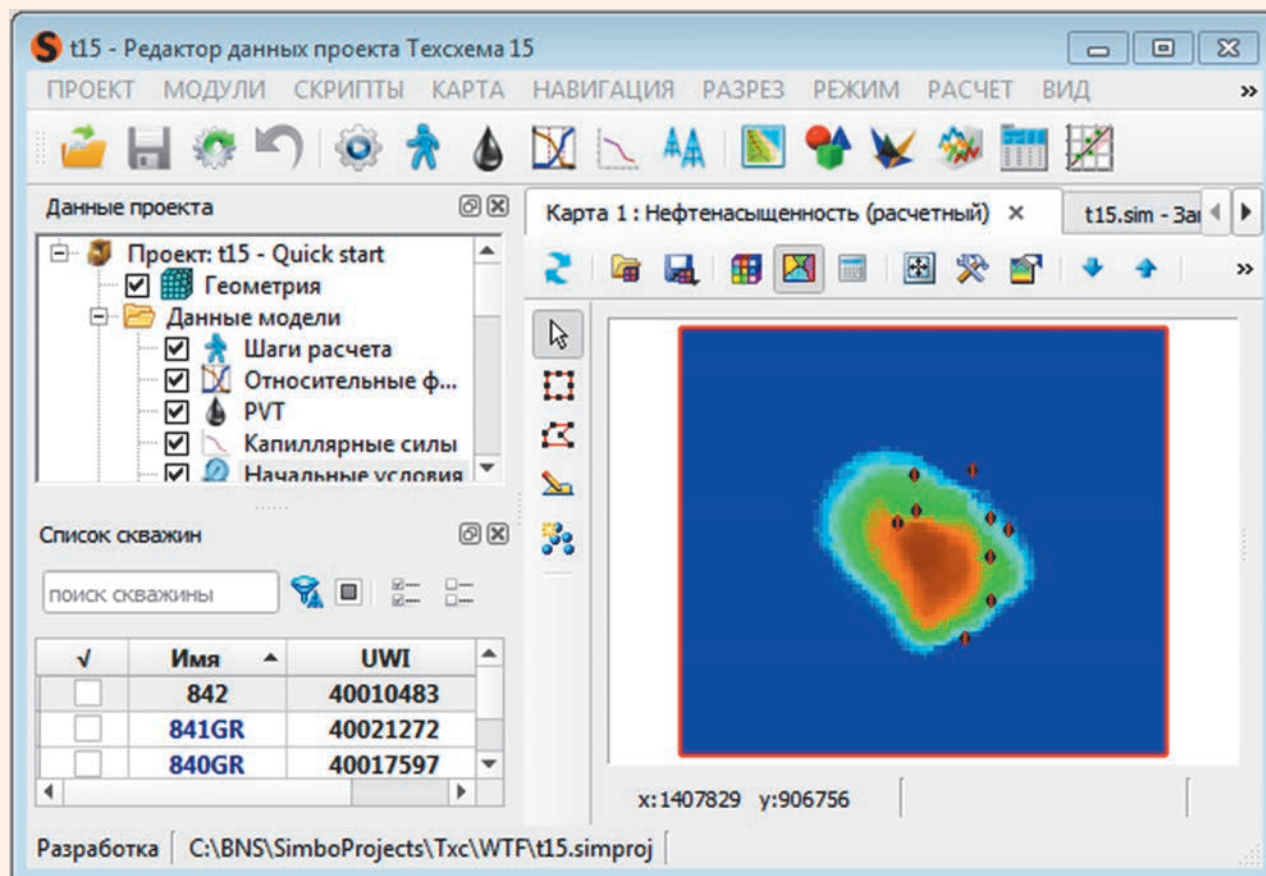


Рис. 7.
Программа подготовки данных в ПО «Техсхема 15»

На данный момент при помощи скриптов настраиваются следующие параметры прогнозного режима скважины: вид работы, коэффициент использования, дебит нефти, воды, газа, забойное давление, граничное условие, условия выхода из прогнозного режима. В ближайших планах – реализация индивидуальных и групповых ограничений по скважинам.

Управление расчетом

В симуляторе ПО «Техсхема 15» реализован механизм удаленного контроля и управления расчетом на кластере. Суть его заключается в том, что при запуске нулевого MPI-процесса симулятора на узле кластера в отдельном потоке запускается специальный сервер управления. К этому серверу есть возможность удаленно подключаться клиентской программе и запрашивать информацию о расчете или посылать управляющие команды. Например, можно получить информацию о текущем шаге расчета, завершить расчет или поставить его на паузу. Данная возможность доступна и при выполнении расчета на рабочей станции.

Большие модели

Все структуры данных, библиотека их обработки и визуализации ориентированы на большие ГДМ, содержащие до 2 млрд расчетных ячеек. В ПО «Техсхема15» геометрические характеристики ячеек модели и соединения между ячейками не хранятся в классах или массивах, а рассчитываются «на лету». Кроме того, для быстрого динамического отображения больших карт стандартный графический конвейер *OpenGL* был заменен на *VBO (Vertex Buffer Objects)*. При данной технологии массивы координат и цветов углов сетки находятся в памяти видеоустройства, а не в оперативной памяти, поэтому сцена может быть отрисована непосредственно видеоустройством. Эти меры дали значительный прирост скорости отображения моделей и сократили требования по оперативной памяти.

Пре- и постпроцессинг

Важной особенностью ПО «Техсхема 15» является то, что все необходимые данные для расчета готовятся с помощью программ с графическим интерфейсом пользователя (рис. 7). В импортных симуляторах для управления моделированием используются

ключевые слова, количество которых может достигать до тысяч, а также специально разработанные языки программирования. И хотя эти пакеты имеют развитые надстройки с графическим пользовательским интерфейсом, преобразующие данные в нужный формат, инженеру-разработчику для начала моделирования необходимо дополнительно изучать большое количество ключевых слов и специфический синтаксис языка управления данными.

Программа подготовки данных для ГДМ включает в себя следующие модули: PVT-свойства флюидов, относительные фазовые проницаемости, капиллярные силы, начальное состояние пласта, модель водоносного пласта Фетковича, скважины. Для просмотра исходных данных и результатов расчета ГД-

симулятора используются модули: карты 2D и 3D, динамические результаты расчета, отчеты. Ведется активное развитие существующих и создание новых модулей.

Учебный курс

Был разработан учебный курс ГДМ с применением ПО «Техсхема», состоящий из теоретической и практической частей, он преподается в Тюменском государственном университете. Учебные материалы курса, дистрибутивы ПО «Техсхема» и все сопутствующие материалы в свободном доступе выложены на сайте <http://tecscheme.org/>.

Специалисты ОАО «Сургутнефтегаз» продолжают активное развитие гидродинамического симулятора «Техсхема» и учебного курса. ☺

Литература

1. Судо Р.М. Требования ЦКР Роснедр к качеству трехмерных цифровых геолого-гидродинамических моделей при согласовании проектной документации на разработку месторождений УВС. Москва, 29 октября 2014 года. Научно-практический семинар «Современные требования к качеству трехмерных цифровых геолого-гидродинамических моделей при согласовании проектной документации на разработку месторождений УВС». Доступно на: http://www.naen.ru/nr_naen/seminars_conferences/29_okt_seminar_yvs/ (обращение 12.06.2015).
2. Богачев К.Ю. Эффективное решение задачи фильтрации вязкой сжимаемой многофазной многокомпонентной смеси на параллельных ЭВМ: дисс. д-ра. физ.-мат. наук. М. 2012. 201 с.
3. Saad Y. Iterative methods for sparse linear systems. Second edition. Philadelphia, PA, USA: SIAM Press, 2003. Pp. xviii + 528.
4. George Karypis, Vipin Kumar. A Fast and Highly Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs. SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 20, No. 1, pp. 359–392, 1999.
5. Бахтий Н.С. Некоторые аспекты моделирования многофазной многокомпонентной фильтрации и тестирования вычислительных алгоритмов, индуцированные программным комплексом «Техсхема»: дисс. канд. техн. наук. Тюмень. 2012. 136 с.
6. Aziz S. Odeh. Comparison of Solutions to a Three-Dimensional Black-Oil Reservoir Simulation Problem //JPT, Volume 33, Issue 01, Paper SPE 9723-PA, 1981.
7. M.A. Christie, M.J. Blunt. Tenth SPE Comparative Solution Project: A Comparison of Upscaling Techniques //SPE Reservoir Simulation Symposium, Conference Paper SPE 66599, 2001.
8. Методические рекомендации по проектированию разработки нефтяных и газонефтяных месторождений. Приказ МПР РФ от 21.03.2007 № 61. Доступно на: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2062384/> (обращение 12.06.2015).
9. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утверждены Минэкономки РФ, Минфин РФ, Госстроем РФ 21.06.1999 № ВК 477). Доступно на: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=LAW&n=28224&req=doc> (обращение 12.06.2015).
10. Бланшет Ж., Саммерфилд М. Qt4: программирование GUI на C++. М.: КУДИЦ-ПРЕСС, 2008. 736 с.

UDC 532.546, 532.68, 004.415.53

Reservoir Simulator «TecScheme»: Using of High Performance Computing for Reservoir Simulation²

Nikolai Bakhtii¹, Ph.D, assistant professor, head of department of mathematical modeling of oil and gas fields, bahtiy_ns@surgutneftgas.ru
Marina Abdulina¹, Ph.D, head of laboratory of computational fluid dynamics, abdulina_mv@surgutneftgas.ru

Andrei Aristov¹, head of laboratory of software, aristov_aa@surgutneftegas.ru
Maksim Misharin¹, senior researcher, misharin_mv@surgutneftegas.ru
Maksim Tupitsyn¹, lead engineer, tupicin_ms@surgutneftegas.ru

1. Tyumen Branch of «SurgutNIPneft» OJSC «Surgutneftegas». 12, Rozy Liuksemburg street, building 7, Tyumen, 625003, Russia.
2. The above article involved employees of the Tyumen Branch of "SurgutNIPneft" D.N. Ivaniuta, S.V. Maier, N.I. Malysheva.

Abstract: «TecScheme» is special software for reservoir simulation, which consists of both computational kernel for hydrodynamics equations numerical solving and pre- and postprocessor. OJSC «Surgutneftegas» has been developing this reservoir simulator for more than 20 years. During this period most Western Siberian oilfields and many oilfields from other regions were simulated by «TecScheme». This software is used for modelling of all oil fields of the company. «TecScheme» is applicable for both conventional and unconventional reservoirs. It allows to model fracturing and other enhanced oil recovery methods. «TecScheme» is a domestic cross-platform project, which reduces dependence of the company on expensive import software. In accordance with the report of Federal Agency of Natural Resources «TecScheme» holds third place among most frequently used simulators in Russian Federation [1]. Considering increasing requirements for reservoir simulation, as well as for efficient use of modern High Performance Computing systems, Tyumen Branch «SurgutNIPneft» has developed a new version of «TecScheme» – «TecScheme 15». This simulator has high performance, works with big data volume and runs on various operating (Windows, Linux, Unix) and hardware (shared and distributed memory) systems. It uses only open source libraries to prevent the impact of restrictive sanctions. «TecScheme 15» has intuitive user interface and modular architecture convenient for team work (sharing development and debugging). It is also easy to add new functionality and to control simulation process. A training course of petroleum reservoir simulation in «TecScheme» is taught at Tyumen State University. The course provides attendees with both fundamentals and practical skills of simulation. Simulator «TecScheme» and tutorials of the course are available online and free of charge on the site <http://tecscheme.org/>. Researchers of OJSC «Surgutneftegas» continue active development of the reservoir simulator «TecScheme» and the training course.

Keywords: reservoir simulation; high performance computing; initial conditions; black oil model; hydraulic fracturing; economic evaluation

References

1. Sudo R.M. *Trebvaniia TsKR Rosnedr k kachestvu trekhmerykh tsifrovyykh geologo-gidrodinamicheskikh modelei pri soglasovanii proektnoi dokumentatsii na razrabotku mestorozhdenii UVS. Moskva, 29 oktiabria 2014 goda. Nauchno-prakticheskii seminar «Sovremennyye trebvaniia k kachestvu trekhmerykh tsifrovyykh geologo-gidrodinamicheskikh modelei pri soglasovanii proektnoi dokumentatsii na razrabotku mestorozhdenii UVS»*. Available at: http://www.naen.ru/np_naen/seminars_conferences/29_okt_seminar_vvs/ (accessed 12.06.2015).
2. Bogachev K.Iu. *Effektivnoe reshenie zadachi fil'tratsii viazkoi szhimaemoi mnogofaznoi mnogokomponentnoi smesi na parallelnykh EVM*. Diss. doct. fiz.-mat. nauk [Effective solution of the viscous compressible multiphase multicomponent flow problem parallel computers. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2012, 201 p.
3. Saad Y. *Iterative methods for sparse linear systems*. Second edition. Philadelphia, PA, USA: SIAM Press, 2003. Pp. xviii + 528.
4. George Karypis, Vipin Kumar. A Fast and Highly Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs. *SIAM Journal on Scientific Computing*, Vol. 20, No. 1, pp. 359–392, 1999.
5. Bakhtii N.S. *Nekotorye aspekty modelirovaniia mnogofaznoi mnogokomponentnoi fil'tratsii i testirovaniia vychislitel'nykh algoritmov, indutsirovannyye programmnykh kompleksom «Tehskhema»*. Diss. kand. tekhn. nauk [Some aspects of multiphase multicomponent flow simulation and computational algorithms' testing by software «Tehskhema»]. Ph.D tech. sci. diss.]. Tyumen, 2012, 136 p.
6. Aziz S. Odeh. Comparison of Solutions to a Three-Dimensional Black-Oil Reservoir Simulation Problem //JPT, Volume 33, Issue 01, Paper SPE 9723-PA, 1981.
7. M.A. Christie, M.J. Blunt. Tenth SPE Comparative Solution Project: A Comparison of Upscaling Techniques //SPE Reservoir Simulation Symposium, Conference Paper SPE 66599, 2001.
8. *Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniu razrabotki neftiannykh i gazoneftiannykh mestorozhdenii. Prikaz MPR RF ot 21.03.2007 № 61*. Available at: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2062384/> (accessed 12.06.2015).
9. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov (utverzhdeny Minekonomiki RF, Minfinom RF, Gosstroem RF 21.06.1999 № VK 477)*. Available at: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?base=LAW&n=28224&req=doc> (accessed 12.06.2015).
10. *Blanshet Zh., Sammerfild M. Qt4: programmirovaniie GUI na C++* [Qt4: GUI programming in C ++]. Moscow, KUDITs-PRESS Publ., 2008. 736 p.