

УДК 622.276.03:532

**В. Н. Сокотущенко****Математическое и экспериментальное моделирование процессов фильтрации углеводородов в газоконденсатном пласте**

*Рассматривается математическая модель, позволяющая адекватно рассчитать количественные параметры процесса течения газоконденсатной смеси в пласте с учетом фазового перехода в системе газ–конденсат, которая может служить основой для решения актуальных прикладных задач. Проведенная серия экспериментов (экспериментальные данные предоставлены ОИВТ РАН) и разработанная математическая модель позволяют рассчитать гидродинамические характеристики процесса фильтрации газоконденсатной залежи как колебательной системы и получить их качественное и количественное соответствие.*

*Ключевые слова: многофазная фильтрация, фазовые переходы, математическое моделирование, газоконденсат, колебательная система.*

**Об авторе**

**Сокотущенко Вадим Николаевич** – кандидат технических наук, доцент Государственного университета «Дубна», заместитель заведующего кафедрой физико-технических систем Государственного университета «Дубна».

Газоконденсатные месторождения различаются между собой как условиями залегания углеводородов (внутрипластовой температурой и давлением, пористостью коллектора, свойствами и составом пластовой системы, наличием или отсутствием нефтяной и водной оторочки), так и составом пластовой смеси. Учет влияния всех факторов, определяющих поведение газоконденсатной системы, в условиях натурального эксперимента представляет практически неразрешимую задачу. Для прогнозирования разработки реальных месторождений и исследования закономерностей внутрипластовой фильтрации требуется создание моделей, основанных на теории многокомпонентной фильтрации с учетом теплофизических свойств углеводородных смесей, а также термодинамических и гидродинамических условий, при которых происходит процесс фильтрации. К основной задаче моделирования относится качественная и, при возможности, количественная оценка зависимости динамики конденсатоотдачи от методов воздействия на продуктивный пласт. При этом моделирование усложняется вследствие необходимости учета гидродинамических, тепловых и физико-химических процессов. Нестационарные процессы, происходящие при фильтрации углеводородной смеси в пористом коллекторе, моделиро-

вались в одномерном приближении в изотермических условиях. Газовый конденсат представляет собой сложную смесь метана и высших производных метанового ряда. Фазовая диаграмма такой смеси содержит в себе область, в которой при понижении давления возможно образование ретроградной жидкости, испаряющейся с дальнейшим уменьшением давления, так называемую «ретроградную область».

Одна из проблем разработки газоконденсатных месторождений состоит в выпадении в пласте газового конденсата [1–5]. Газовый конденсат может образовываться в пласте при постоянной температуре в процессе снижения пластового давления. Началу образования газового конденсата соответствует некоторое пороговое давление  $P_m$  в пласте. Затем при снижении давления объем жидкой фазы в пласте растет. При снижении давления в пласте от  $P_m$  до давления  $P'_m$  (давление максимальной конденсации), насыщенность конденсатом возрастает до максимальных значений, возникает явление – ретроградная конденсация. При дальнейшем снижении давления насыщенность породы конденсатом падает. Фильтрация многокомпонентной двухфазной смеси к забою скважины вызывает увеличение насыщенности конденсатом порового пространства по сравнению с процессом дифференциальной статической конденсации вплоть до образования «конденсатной пробки». При этом ухуд-



переходящего в жидкую фазу в единице объема пористой среды за единицу времени в процессе ретроградной конденсации. Рассчитан суммарный массовый дебит  $Q = Q(t)$  при двухфазном течении газа и конденсата в произвольный момент времени  $t$ , что позволяет проанализировать влияние структуры порового

пространства на поведение объёма продукции, добываемой из скважины за единицу времени (рис. 2, 3). Система уравнений фильтрации решается численно, методом конечных элементов в пакете FlexPDE [7] с разбиением области заданного объёма коллектора на элементы.

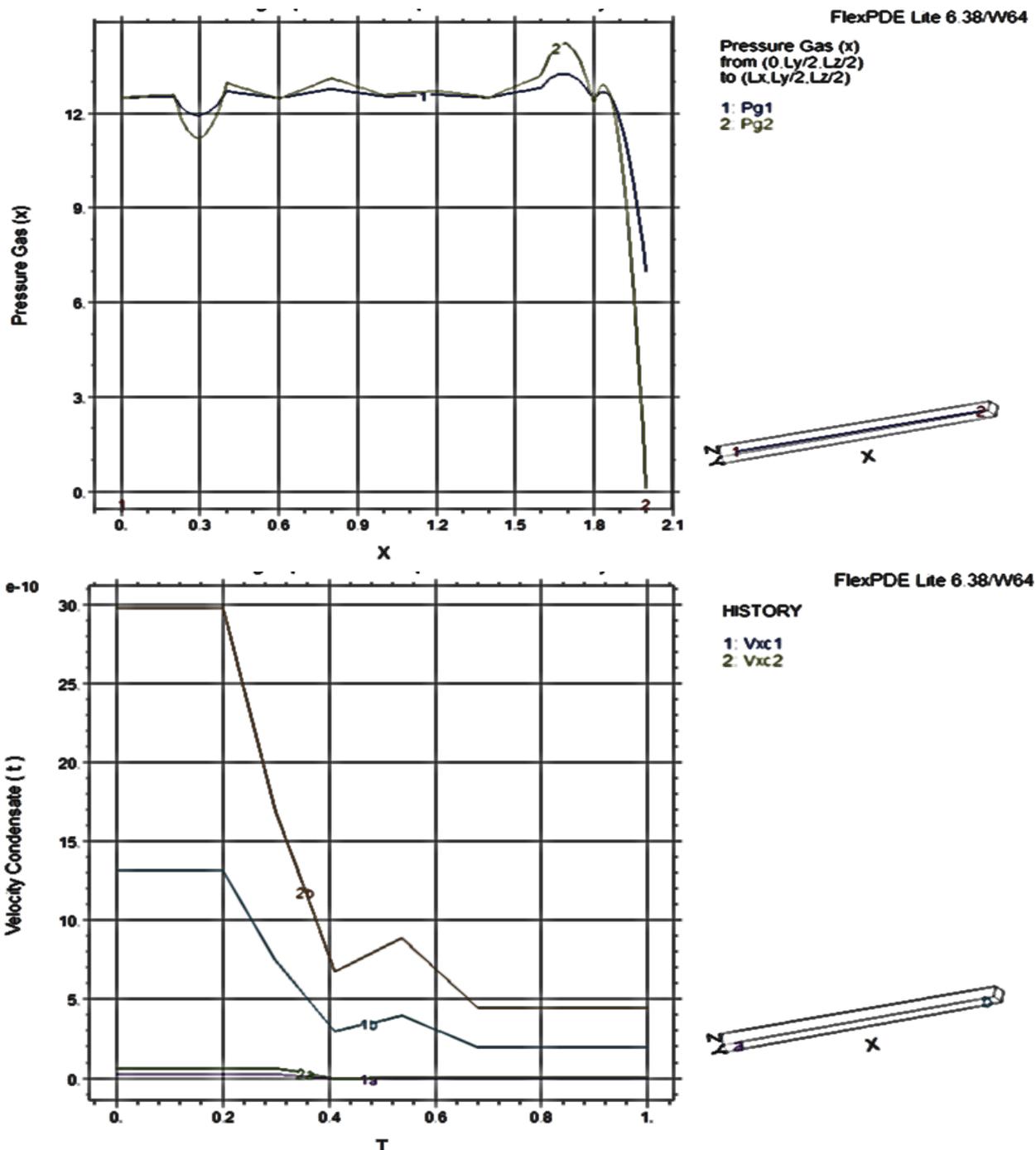


Рис. 2. Зависимость давления по длине и скорости от времени при различных давлениях на выходе P2

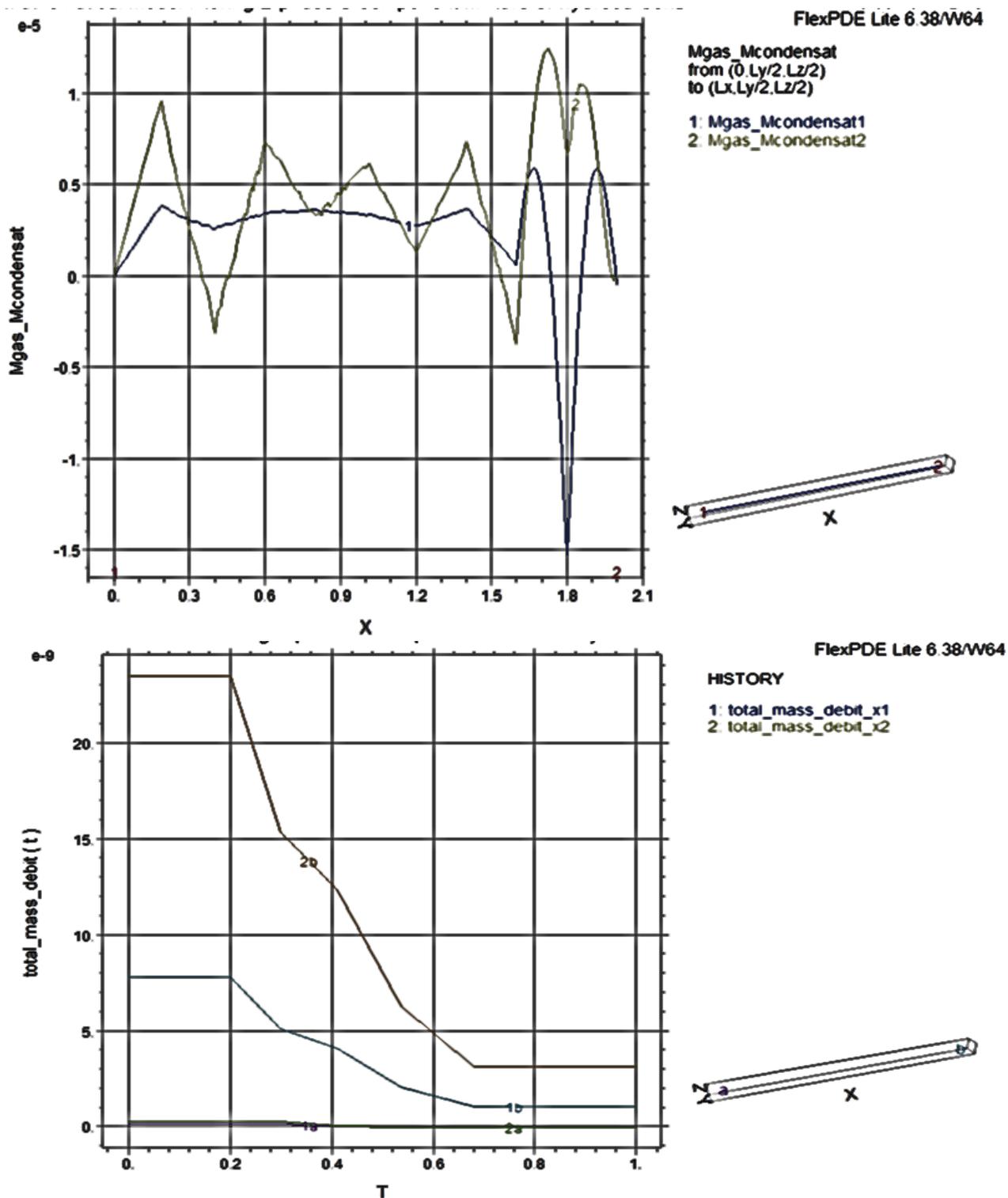


Рис. 3. Зависимость массового расхода смеси по длине установки и во времени

### Физическое моделирование

Физическое моделирование методов воздействия на газоконденсатную пробку проводилось на экспериментальном стенде, созданном в ОИВТ РАН. Стенд предназначен для исследования процессов фильтрации пластовых флюидов

при термобарических условиях реальных пластов. Параметры, которые может обеспечить установка – давление до 40 МПа и температура до 400 °С, – позволяют в широких пределах мо-

делировать пластовые условия и проводить эксперименты с жидкостями и газами различного фракционного состава.

Для моделирования процессов воздействия использовалась экспериментальная установка, входящая в состав экспериментального стенда и предназначенная для исследования процессов фильтрации нефтяных и газоконденсатных смесей, которая была модернизирована с целью обеспечения необходимых параметров эксперимента. Измерялись давления на входе и выходе экспериментального участка, температура термостата, расход смеси на входе и расходы жидкой и газовой фаз на выходе экспериментального участка. Также проводились измерения составов смеси на входе и газовой и жидкой фаз на выходе из экспериментального участка. Для

автоматизации измерений и регулирования параметров эксперимента данные выводились на контроллер.

Для проверки адекватности физической и математической модели явления условиям реальных пластов была проведена серия предварительных экспериментов по получению газоконденсатной пробки в процессе фильтрации модельной смеси при заданных термобарических условиях.

На рис. 4 представлены результаты одного из экспериментов этой серии – зависимость расхода газовой фазы на выходе из ЭУ от времени и данные по составу исходной и выходящей смеси, которые после сравнения с результатами расчета по математической (1)–(4) показывают качественное их совпадение.

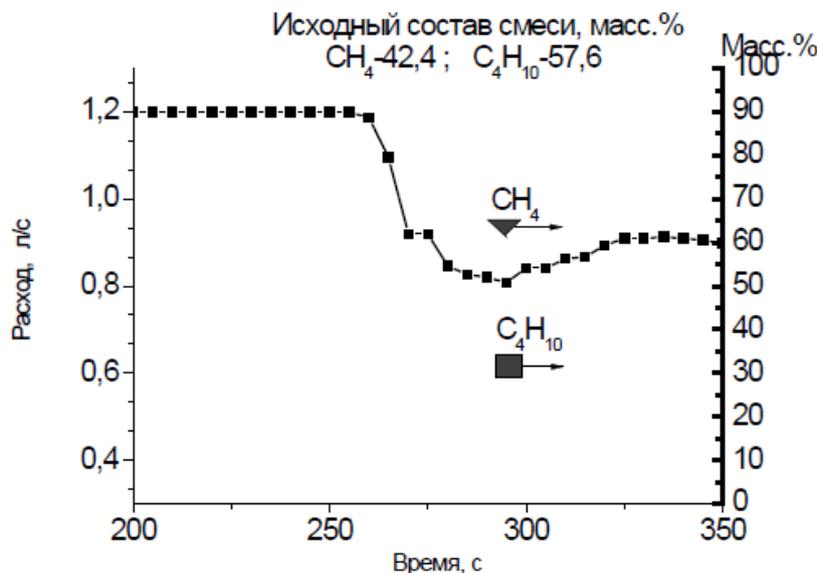


Рис. 4. Расход газовой фазы на выходе из ЭУ: давление на входе в ЭУ – 12,5 МПа, на выходе – 9 МПа

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что после 250 секунды с начала эксперимента расход смеси резко падает и ее состав изменяется в сторону уменьшения содержания н-бутана. Это свидетельствует об образовании в поровом пространстве газоконденсатной «пробки» и перераспределении содержания компонентов в жидкой и паровой фазах – массовая концентрация метана от исходной 42,4% увеличивается до 66,4%. То же самое имеем на соответствующем графике теоретического расчета. При повышении температуры термостата до 330 К образования «пробки» не наблюдается и состав

выходящей газовой фазы соответствует исходному. Это объясняется сдвигом ретроградной области при увеличении температуры в сторону меньших концентраций метана. Следует отметить, что, согласно расчетам по разработанной в математической модели, образование газоконденсатной «пробки» в смеси с концентрацией метана 42% масс. при температурах выше 330 К в условиях эксперимента не происходит. Образование конденсатной пробки не происходит также при составе смеси 70% масс. метана и 30% масс. бутана и температуре термостата 293 К.

При такой концентрации метана смесь при понижении давления не проходит через ретроградную область фазовой диаграммы и выпадения конденсированной фазы не происходит. Во всей серии экспериментов, проведенных со смесью, находящейся в термодинамических условиях, которые соответствуют ретроградной области, при постоянном перепаде давления на экспериментальном участке получено уменьшение расхода конденсата в результате образования конденсатной пробки.

### **Заключение**

Таким образом, показана возможность физического моделирования образования газоконденсатной «пробки» и адекватность математической модели, описывающей это явление.

Такие колебания характеристик потока (см. рис. 2, 3) могут быть результатом:

1) значительного изменения проницаемости в горизонтальном направлении (и в меньшей степени изменения пористости и содержания связанной воды) при неизменной проницаемости пласта по вертикали;

2) значительной слоистости пласта; пласт может быть представлен несколькими пропластками, свойства каждого однородны, но отличаются от пропластка к пропластку;

3) комбинации двух приведенных крайних случаев. Поэтому в данном реальном пласте характер процесса закачки газа может быть заметно различным.

### **Библиографический список**

1. Брусиловский А.И. Многокомпонентная фильтрация газоконденсатных систем в глубокопогруженных залежах // OIL AND GAS GEOLOGY. 1997. № 7. С. 31–38.
2. Изюмченко Д.В., Лапшин В.И., Николаев В.А., Троицкий В.М., Гатин Р.И. Конденсатоотдача при разработке нефтегазоконденсатных залежей на истощение // Газовая промышленность. 2010. № 1. С. 24–27.
3. Кадет В.В. Перколяционный анализ гидродинамических и электрокинетических процессов в пористых средах. М.: ИНФА-М, 2014. 256 с.
4. Розенберг М.Д., Кундин С.А. Многофазная многокомпонентная фильтрация при добыче нефти и газа. М.: Недра, 1976. 335 с.
5. Тер-Саркисов Р.М. Повышение углеводородоотдачи пласта нефтегазоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1995. 167 с.
6. Kachalov V.V., Molchanov D.A., Zaichenko V.M., Sokotushchenko V.N. Mathematical modeling of gas-condensate mixture filtration in porous media, taking into account nonequilibrium phase transitions// XXXI International Conference on Equations of State for Matter March 1–6, 2016, Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia // Journal of Physics: Conference Series 774 (2016) 012043. P. 1–6.
7. <http://www.pdesolutions.com/sdmenu6.html> – сайт программного продукта “FlexPDE” (режим доступа: свободный. Дата обращения: 21.12.2017).

*Поступила в редакцию  
15.01.2018*