

УДК 532.5
ББК В253.31

Владимир Александрович Толпаев

доктор физико-математических наук, профессор,
зав. лабораторией подземной гидродинамики,

Северо-Кавказский научно-исследовательский проектный институт природных газов
(Ставрополь, Россия), e-mail: v.a.tolpaev@mail.ru

Курбан Сапизжуллаевич Ахмедов

кандидат технических наук, директор научного центра информационных технологий,
Северо-Кавказский научно-исследовательский проектный институт природных газов

(Ставрополь, Россия), e-mail: svnipigz@gazprom.ru

Светлана Анатольевна Гоголева

научный сотрудник лаборатории подземной гидродинамики,

Северо-Кавказский научно-исследовательский проектный институт природных газов
(Ставрополь, Россия), e-mail: svnipigz@gazprom.ru

Исследование эксплуатационных режимов подземных хранилищ газа методом схемотехнического моделирования

В статье предлагается методика схемотехнического моделирования подземных хранилищ газа (ПХГ) как единого целого: взаимодействующих участков пласта, групп скважин и применяемой на ПХГ газосборной сети.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, дебит, скважина, фильтрация, электрическая цепь, сопротивление.

Vladimir Aleksandrovich Tolpaev

Doctor of Physics and Mathematics, Professor,

North-Caucasian Scientific Research Project Institute of Natural Gases
(Stavropol, Russia), e-mail: v.a.tolpaev@mail.ru

Kurban Sapizhullaevich Akhmedov

Candidate of Engineering Science, Director of Scientific Center of Information Technologies,
North-Caucasian Scientific Research Project Institute of Natural Gases

(Stavropol, Russia), e-mail: svnipigz@gazprom.ru

Svetlana Anatol'evna Gogoleva

Researcher, Laboratory of Subsurface Hydrodynamics,

North-Caucasian Scientific Research Project Institute of Natural Gases
(Stavropol, Russia), e-mail: svnipigz@gazprom.ru

Research of Operating Conditions of Underground Gas Storage by a Circuit Simulation Method

The paper provides a methodology of a circuit simulation of underground gas storages (UGS) as a whole: interacting parts of the gas bed, groups of wells and a gas-collecting network used in UGS.

Keywords: underground gas storage, rate of yield, well, filtration, electrical circuit, resistance.

1. Практическое значение схемотехнических моделей ПХГ

Методологической основой построения электрофизических моделей подземных хранилищ газа (ПХГ) служит аналогия дифференциальных уравнений, описывающих движение флюида в пласте-коллекторе при наличии перепада давления между контуром питания и контурами скважин, и распространение тока в электрической среде под действием разности потенциалов между моделями границ скважин, и контуром питания. Неослабевающий интерес к построению электрофизических моделей подчеркивает тот факт, что 13 декабря 2010 г. в АО «Интергаз Центральная Азия» г. Астана состоялось специальное научно-техническое совещание по созданию электрофизических и гидродинамических моделей подземных хранилищ газа.

Преимуществом электрофизических и, в частности, схемотехнических моделей по сравнению с цифровыми является то, что на них можно наглядно и быстро моделировать влияние отдельных участков ПХГ на работу всего объекта в целом. В частности, можно моделировать различные схемы газосборных сетей на ПХГ, по результатам моделирования выбрать оптимальную локальную газосборную сеть, оптимизировать процессы закачки и отбора газа, определить величины перетоков газа между отдельными зонами пласта, установить величины безвозвратных технологических потерь газа. Именно поэтому электрофизические, конкретнее схемотехнические, модели ПХГ, в силу их способности наглядно представлять весь сложный механизм ПХГ как единое целое взаимодействующих отдельных участков, следует рекомендовать, на взгляд авторов, как один из обязательных разделов в отчетах авторского надзора за эксплуатацией ПХГ.

2. Необходимые исходные данные для построения схемотехнической модели ПХГ

Для построения электрофизической модели ПХГ потребуются следующие документы.

1. Структурная карта размещения скважин по площади ПХГ.
2. Действующая зональная геолого-технологическая модель ПХГ, характеризующая геологическое строение и свойства рабочего пласта-коллектора.
3. Данные по внутрипластовым перетокам газа между зонами геолого-технологической модели ПХГ.
4. Схема соединений газораспределительных пунктов (ГРП) и дожимно-компрессорных станций (ДКС) в применяемой локальной газосборной сети.

Конкретные примеры перечисленных документов представлены на рис. 1, 2, 3 и в табл. 1.

На рис. 1 представлен пример структурной карты размещения скважин с выделением на ней зон геолого-технологической модели некоторого конкретного ПХГ. Номера эксплуатационных и наблюдательных скважин в зонах представленной геолого-технологической модели ПХГ перечислены в табл. 1. Данные по перетокам газа между зонами геолого-технологической модели приведены на рис. 2.

На рис. 3 представлена конструктивная схема рабочей локальной газосборной сети ПХГ.

Таблица

Номера скважин в зонах геолого-технологической модели ПХГ

№ зоны	№ РГП	Номера эксплуатационных скважин	Кол-во скважин
1	1	77, 78, 111, 79, 4, 112, 113, 158	8
2	2	2, 37, 108, 2, 48, 56, 76, 73, 32	9
3	3	107, 5, 47, 46, 38, 31, 109, 20, 110	9
4	4	43, 102, 104, 45, 105, 103, 32, 160, 106	9
5	5	7, 123, 139, 138, 141, 121, 140, 122, 150, 119, 142	11
6	6	135, 136, 44, 137, 151	5
7	7	187, 118, 14, 42, 50, 58, 15	7
8	8	74, 3	2
9	9	23, 60, 85, 53, 59, 54, 55, 115	8
10	10	69, 94, 68, 93, 67, 84, 98	7
11	11	41, 99, 60, 100, 65, 91, 101, 64	8
12	12	127, 117, 131, 92, 132, 90, 89, 63, 88, 154, 62, 87, 155, 61, 86, 145	16
13	13	97, 96, 95, 133	4
14	14	1, 71, 80, 81, 72, 49, 30, 70, 82	9
15		143, 17, 6, 157, 149	5
16		114, 124, 8, 125, 126, 153, 147, 12	8
17		19, 35, 24, 16, 128, 159, 116, 130, 13	9
18		85, 146, 156, 144, 18, 10	6
19		29, 30, 5, 20, 31, 15, 21, 32, 7, 22, 33, 23, 34, 17, 24, 35, 28, 25, 36, 26, 37, 19, 27, 42, 3, 11, 9, 2, 41, 8, 39, 40, 38, 10	34
ИТОГО		Эксплуатационных скважин:	112
		Наблюдательных скважин:	62

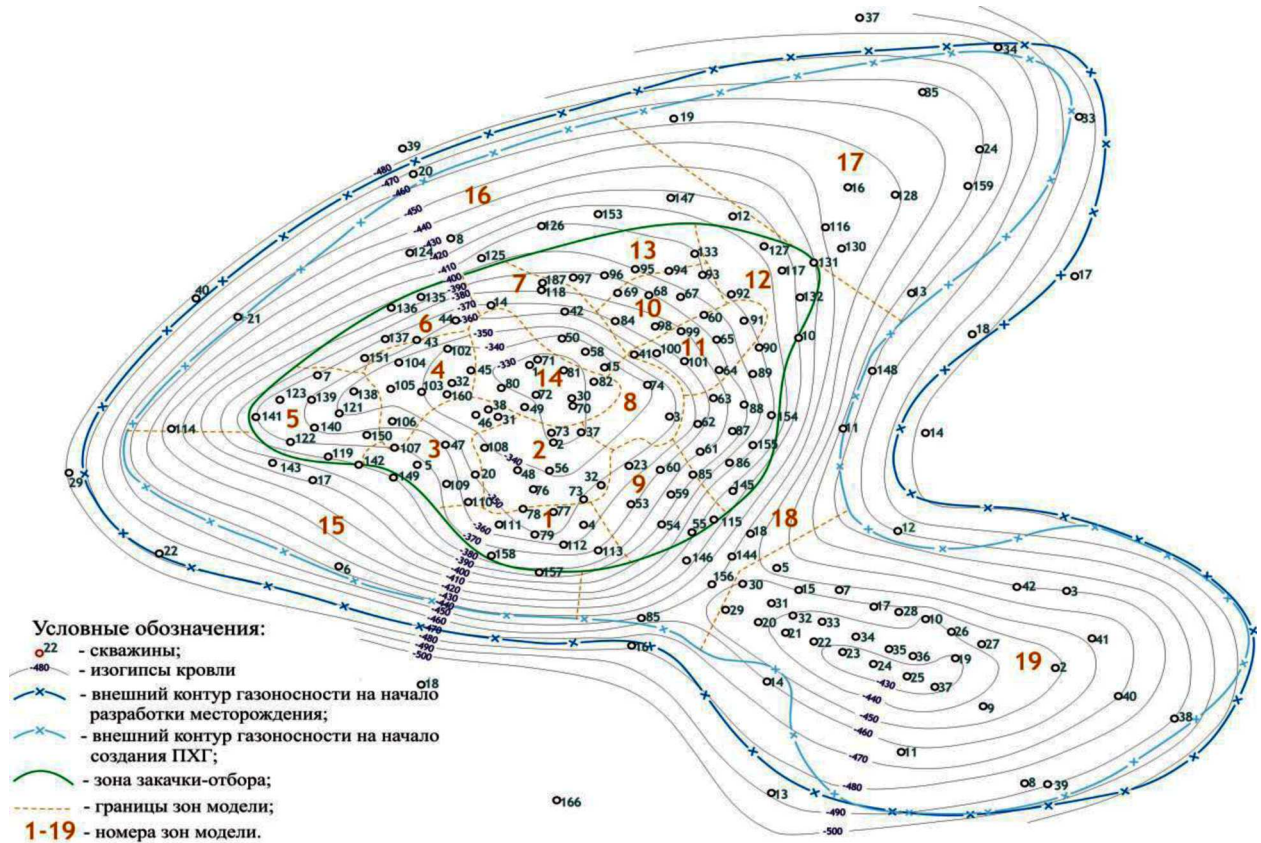


Рис. 1. Структурная карта размещения скважин по площади ПХГ с выделенными зонами действующей геолого-технологической модели

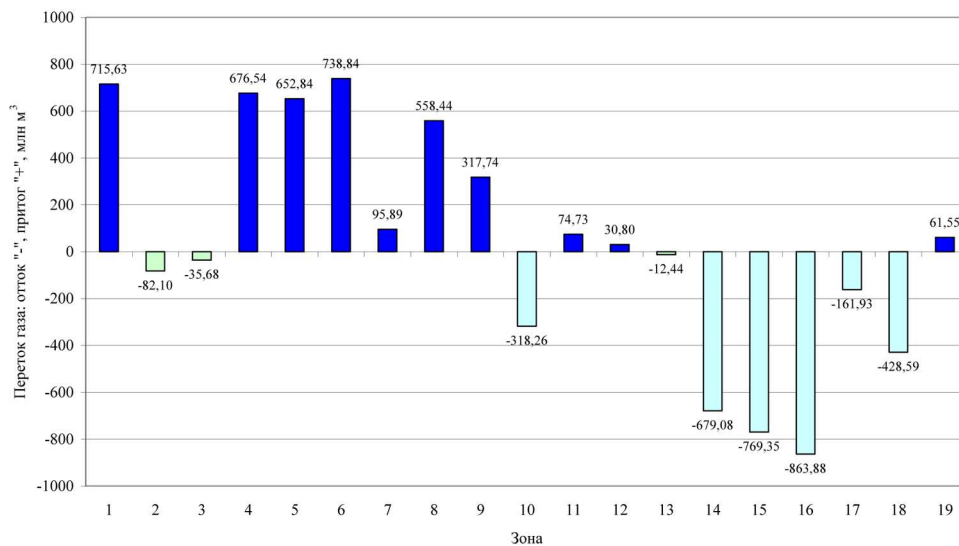


Рис. 2. Гистограммы внутрипластовых перетоков газа между зонами ПХГ в периодах отбора

3. Схемотехническая модель ПХГ

Схемотехническая модель любого подземного хранилища газа, созданного на основе выработанного газового месторождения, представляет собой сложную разветвленную электрическую цепь, состоящую из резисторных сопротивлений, конденсаторов электрической ёмкости, переключателей (ключей), источников постоянного тока. Схемотехническая модель для рассматриваемого приме-

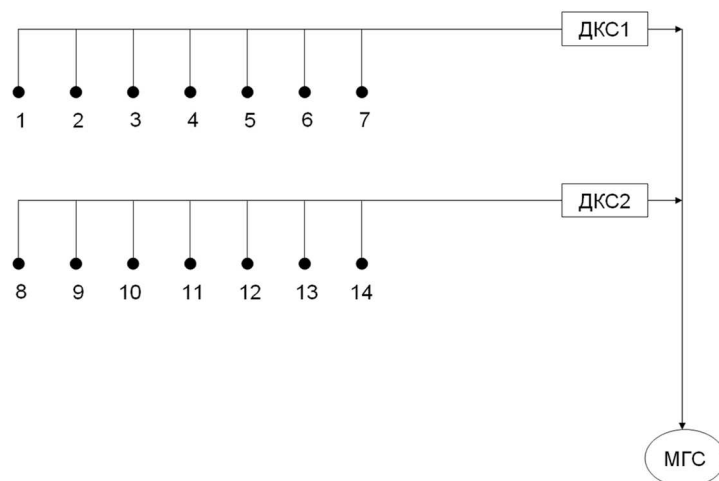


Рис. 3. Пример схемы локальной газосборной сети по скважинам ПХГ ● – газораспределительные пункты (ГРП); ДКС1 и ДКС2 – дожимные компрессорные станции №1 и №2; МГС – магистральная газораспределительная сеть

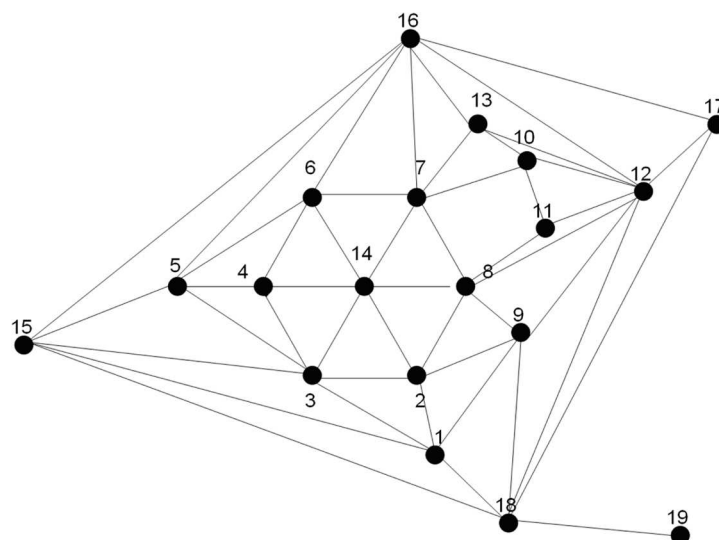


Рис. 4. Схематическая модель рабочего пласта-коллектора ПХГ. Представляет электрическую цепь, моделирующую зоны в принятой геолого-технологической модели ПХГ. Сопротивления между контактными точками 1, 2, ..., 19 подбираются пропорционально перетокам газа по гистограмме на рис. 2. Каждая контактная точка рассматривается как укрупненная скважина, заменяющая собой группу реальных скважин (перечисленных в табл. 1) в зоне с соответствующим номером

ра ПХГ представлена на трёх рисунках. Рис. 4 (зональная геолого-технологическая модель пласта ПХГ); рис. 5 (схематическая модель локальной газосборной сети с подключенными геолого-технологическими зонами) и рис. 6 (схематическая модель, имитирующая работу комплекса всех геолого-технологических зон).

Окончательная итоговая схематическая модель всего комплекса ПХГ из представленных составных частей получается объединением схем на рис. 4, 5 и 6. Для этого, во-первых, контактные точки с номерами 1, 2, ..., 14 на рис. 5 соединяем (для образования электрического контакта) с одноименными по номеру контактными точками на рис. 4. Во-вторых, контактные точки с номерами 1, 2, ..., 19 на рис. 6 соединяем (снова для создания электрического контакта) с одноименными по номеру контактными точками на рис. 4. В результате такого соединения получим схематическую модель всего ПХГ. Активные сопротивления на указанной цепи моделируют падение давления вдоль насосно-компрессорных труб скважин, по длине участков газосборной сети, давления в точках

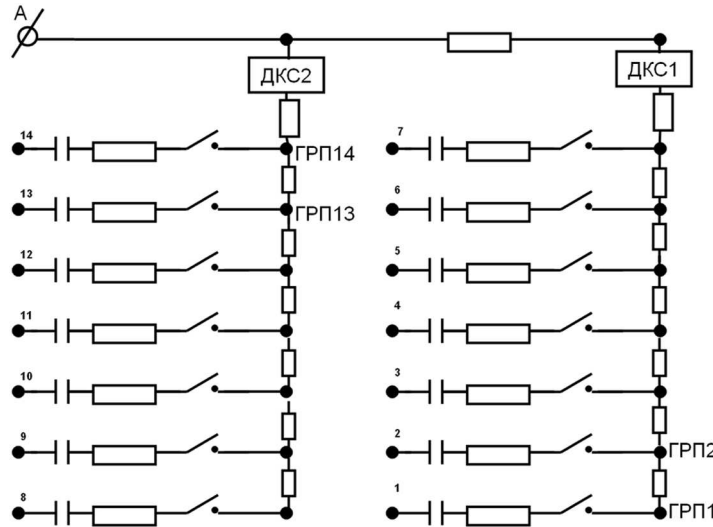


Рис. 5. Блок цепи схмотехнической модели, моделирующий работу комплекса локальной газосборной сети и геолого-технологических зон пласта

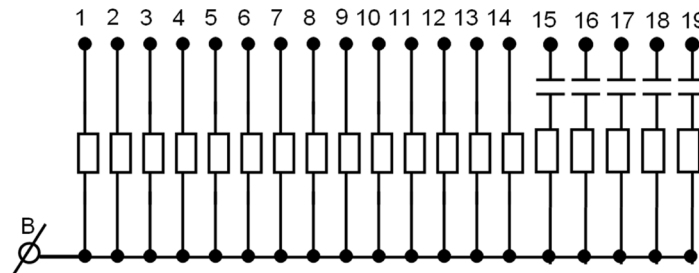


Рис. 6. Блок цепи схмотехнической модели, моделирующий работу комплекса геолого-технологических зон

входа в ДКС, а также (на рис. 4) перегородки газа между отдельными геолого-техническими зонами ПХГ. Конденсаторы электрической ёмкости (разной для разных геолого-технических зон) моделируют локальные ёмкостные свойства геолого-технических зон. Переключатели (ключи) позволяют моделировать различные способы закачки (отбора) газа в ПХГ.

Для моделирования различных режимов закачки на предложенной схмотехнической модели к клеммам нужно подключить источник постоянного тока с заданным напряжением (пропорциональным задаваемой репрессии). Снимая показатели напряжений и токов в характеристических узлах цепи, будем знать, как и насколько быстро заполняются закачиваемым газом отдельные геолого-технические зоны ПХГ. Например, если будут включены только ключи 10 и 4, то это значит, что моделируется режим закачки газа в ПХГ через две зоны 10 и 4.

Для моделирования процесса отбора на предложенной схмотехнической модели клеммы нужно соединить друг с другом активным сопротивлением и включить (замкнуть) ключи тех геолого-технических зон, из которых планируется делать отбор газа. В результате будет происходить процесс разрядки конденсаторов соответствующих зон, который физически и будет моделировать отбор газа. Снимая показатели напряжений и токов, будем знать, как и насколько быстро будут истощаться отдельные геолого-технологические зоны ПХГ. Например, при всех включенных ключах будет моделироваться одновременный отбор газа из всех скважин ПХГ.

Наличие множества ключей на схмотехнической модели позволяет исследовать всё многообразие режимов закачки и отбора газа на ПХГ и подобрать оптимальный режим для заданного объёма отбора (или закачки) газа.

4. Программное обеспечение, поддерживающее схмотехническое моделирование

После того как схмотехническая модель создана, для разработанной электрической цепи на

основе законов Ома и Кирхгофа необходимо составить систему алгебраических (при моделировании стационарных процессов) или дифференциальных (при моделировании нестационарных динамических процессов) уравнений и произвести их математический расчёт. Разумеется, это весьма сложный и ответственный этап разработки любых математических моделей.

Однако на сегодняшний день для разработки современного радиоэлектронного оборудования существуют специализированные пакеты программ САПР, в которых автоматически составляются уравнения (алгебраические и дифференциальные) для данной электронной цепи и производится их математический расчёт.

Примерами таких САПР являются профессиональные пакеты разработчиков электронной аппаратуры типа ACCEL, EDA и ORCAD. Более простыми пакетами САПР являются пакеты Electronics Workbench и Micro-Cap, основанные на моделях, создаваемых на языке SPice.

Программа Micro-Cap 8 подробно с соответствующими примерами описана в [1]. Эта программа позволяет анализировать сложные замкнутые электронные цепи с переменной конфигурацией. Несмотря на достаточно скромные требования к программно-аппаратным средствам ПК (процессор не ниже Pentium II, ОС Windows 95/98/ME или Windows NT 4/2000/XP, память не менее 64 Мб, монитор не хуже SVGA), возможности данного пакета достаточно велики. Интерфейс программы является стандартным для программ ОС Windows. Как обычно, все команды можно вызвать через меню. Часть наиболее употребляемых команд выведена на инструментальные панели в виде ярлычков (пиктограмм). Пользователь составляет электрическую цепь непосредственно в удобном графическом редакторе (Circuit editor), затем задаёт параметры анализа цепи (Analysis) и изучает графики с данными. Программа, как уже сказано, автоматически составляет уравнения для данной цепи и производит их математический расчёт.

При загрузке программы появляется главное окно MAIN, готовое для рисования электрической схемы в новом файле, получающем название по умолчанию circuit1.cir. В разделе FAIL приведены обычные для ОС Windows команды для работы с файлами. Созданные файлы электрических цепей сохраняются в типе Schematic (*.cir).

В окне EDIT наиболее важной является команда Copy to Clipboard с её четырьмя возможностями сохранения видимого окна или его части. Наиболее востребовано окно Component. По сути, это большая библиотека элементов электрической цепи. В разделе Analog primitives/Passive Components находятся три главных аналоговых линейных элемента: резистор R, конденсатор C, индуктивность L.

По клику левой кнопкой мышки команды Analysis/DC вызывается очень мощное и нужное диалоговое окно DC Analysis Limits. В этом окне можно установить пределы изменения переменных, вид выводимых графиков и собственно команду Run, которая позволяет машине начать анализ электронной цепи. Всё окно разделено на пять областей: кнопки управления, числовые значения, представление графиков, выражения и дополнительные функции (опции).

Важной особенностью пакета Micro-Cap 8 является его способность к математическому моделированию электрических цепей с нелинейными элементами (например, с сопротивлениями, зависящими от температуры и силы тока). Важным из самых простых нелинейных элементов является диод – по сути дела, резистор, сопротивление которого зависит от полярности приложенного напряжения. Именно этот элемент позволит при схемотехническом моделировании ПХГ учесть какие-то гистерезисные явления, в частности, те необратимые процессы, которые приводят к невозполнимым технологическим потерям буферного газа. Поэтому эта способность Micro-Cap 8 заслуживает специального внимания.

5. Заключение

Учитывая наличие на сегодняшний день мощных и с удобным интерфейсом специализированных пакетов САПР для анализа сложных электронных схем, разработку схемотехнических моделей ПХГ следует считать, на взгляд авторов, как один из обязательных разделов в отчетах авторского надзора за эксплуатацией ПХГ. Схемотехнические модели ПХГ помогут с наименьшими затратами оптимизировать процессы закачки-отбора газа на ПХГ и выбирать оптимальные режимы эксплуатации скважинного фонда ПХГ.

Список литературы

- Амелина М. А., Амелин С. А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 464 с.

References

Amelina M. A., Amelin S. A. Programma skhemotekhnicheskogo modelirovaniya Micro-Cap 8. M.: Goryachaya liniya–Telekom, 2007. 464 s.

Статья поступила в редакцию 29.01.2013