

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр  
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской  
академии наук»  
(ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

## **ТРУДЫ НИИСИ РАН**

ТОМ 9 №4

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ:**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ**

МОСКВА  
2019

**Редакционный совет ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН:**

В.Б. Бетелин (председатель),  
Е.П. Велихов, В.А. Галатенко, В.Б. Демидович (отв. секретарь),  
Ю.В. Кузнецов (отв. секретарь), Б.В. Крыжановский, А.Г. Кушниренко,  
А.Г. Мадера, М.В. Михайлюк, В.Я. Панченко, В.П. Платонов, В.Н. Решетников

**Главный редактор журнала:**

В.Б. Бетелин

**Научный редактор номера:**

М.С. Горбунов

**Тематика номера:**

Исследование физических процессов и их моделирование, проектирование и моделирование СБИС, технологические проблемы плазмохимического травления микро- и наноструктур, математическое моделирование и визуализация, вопросы программирования

Журнал публикует оригинальные статьи по следующим областям исследований:

математическое и компьютерное моделирование, обработка изображений, визуализация, системный анализ, методы обработки сигналов, информационная безопасность, информационные технологии, высокопроизводительные вычисления, оптико-нейронные технологии, микро- и нанoeлектроника, математические исследования и вопросы численного анализа, история науки и техники.

**The topic of the issue:**

Research and modeling of physical processes, Design and modeling of VLSI, Technological problems of plasma-chemical etching processes for micro- and nano-structuring, Mathematical modeling and visualization, Problems in programming, Mathematical studies

The Journal publishes novel articles on the following research areas: mathematical and computer modeling, image processing, visualization, system analysis, signal processing, information security, information technologies, high-performance computing, optical-neural technologies, micro- and nanoelectronics, mathematical researches and problems of numerical analysis, history of science and of technique.

Заведующий редакцией: В.Е. Текунов

Издатель: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН,  
117218, Москва, Нахимовский проспект 36, к. 1

## СОДЕРЖАНИЕ

### I. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- В.А. Юдин, С.Г. Вольпин, И.В. Афанаскин, Н.П. Ефимова.* Анализ и обобщение литературных данных по моделям коллекторов баженовской свиты .....5
- В.А. Юдин, С.Г. Вольпин, И.В. Афанаскин, Н.П. Ефимова.* Возможность выявления дизъюнктивных нарушений на нефтяном месторождении по характеру обводнения скважин и данным трассерных исследований.....13
- А. А. Губайдуллин, В. П. Косяков.* Решение обратной задачи восстановления гидропроводности для нефтяного месторождения с учётом геолого-технических мероприятий на скважинах.....22
- И.В. Афанаскин, С.Г. Вольпин, А.А. Колеватов, П.В. Крыганов, Ю.М.Штейнберг.* Интерпретация гидродинамических исследований горизонтальных скважин при неустановившейся фильтрации.....28

### II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СБИС

- Б.Ю. Рогаткин, Ю.Б. Рогаткин.* Сложно-функциональный блок для измерения температуры кристалла СБИС .....40
- В.С. Першенков, А.И. Жуков, В.А. Фелицын, А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, В.А. Телец, А.С. Родин.* Обобщенная модель радиационно-индуцированного тока поверхностной рекомбинации в биполярных транзисторах.....45
- В.В.Мастеров.* Преобразователь «временной интервал - код» для ЦФАПЧ по технологии КМОП 65нм.....51
- Н. В. Масальский.* Моделирование характеристик инвертора на КНИ МОП нанотранзисторах с полностью охватывающим затвором.....56
- Ю. В. Катунин, В. Я. Стенин.* Моделирование импульсов помех в КМОП тройном мажоритарном элементе при воздействии одиночных ионизирующих частиц.....62
- В.Д. Калашиников, Д.О. Титовец, Д.С. Костюченко.* Методические особенности и основные результаты исследований КМОП СБИС микропроцессоров и микроконтроллеров на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения.....70
- О.Р. Загидуллина, А.С. Надин., И.Е. Трифанихина, Д.С. Шипицин.* Специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования и верификации PDK.....80
- А.А. Дубровин.* Метод повышения пропускной способности систем хранения данных — двухступенчатый контроллер твердотельного накопителя.....85

### III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

- А.М. Ефремов, Д.Б. Мурин, В.Б. Бетелин.* Кинетика и концентрации активных частиц в плазме галогенводородов.....92

#### **IV. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ**

*М.В. Михайлюк, П.Ю. Тимохин.* Визуализация скалярных полей цифровой модели керна .....100

#### **V. ВОПРОСЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

*Н.О.Бесшапошников, А.Г. Леонов, К.А. Мащенко, А.Е. Орловский.* Авто-тестирование системы ПиктоМир.....105

#### **VI. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*М. М Петрунин, Ю.Н. Штейников* О периодических элементах  $\sqrt{f}$  в эллиптических полях  $L = k(x)(\sqrt{f})$  специального вида.....111

# Анализ и обобщение литературных данных по моделям коллекторов баженовской свиты

В.А. Юдин<sup>1</sup>, С.Г. Вольпин<sup>2</sup>, И.В. Афанаскин<sup>3</sup>, Н.П. Ефимова<sup>4</sup>

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия

E-mail's: <sup>1</sup>yudinval@yandex.ru, <sup>2</sup>sergvolpin@gmail.com, <sup>3</sup>ivan@afanaskin.ru, <sup>4</sup>efinatka@gmail.com

**Аннотация.** Выявление зон повышенной продуктивности в отложениях баженовской свиты является одной из первоочередных задач по вовлечению в разработку значительных, но трудноизвлекаемых запасов, приуроченных к отложениям баженовской свиты. Чтобы выявить участки повышенной продуктивности необходимо понимать закономерности формирования залежей. За 50 лет исследований предложено более двух десятков различных моделей, описывающих механизмы образования коллекторов, закономерности их пространственного расположения, приуроченность к тем или иным литологическим разностям. В работе рассмотрены около 20 различных моделей коллекторов баженовской свиты, предложенных специалистами за время изучения баженовской свиты.

**Ключевые слова:** баженовская свита, модель залежи, керогеносодержащие породы, линзовидное строение, двойная проницаемость, зоны трещиноватости.

Значительным стратегическим резервом поддержания нефтедобычи в России являются нетрадиционные коллектора приуроченные к отложениям баженовской свиты Западной Сибири [1, 2]. Для оценки их промышленного потенциала и выбора оптимальной стратегии разработки необходимо сформулировать модели образования и строения коллекторов этого объекта.

Достаточно подробное изложение содержания из предложенных моделей содержится в работах [3, 4], а кратко — приведено в табл. 1 и 2, которые составлены на основе обзорных сведений, заимствованных из работ [3, 4] с некоторыми дополнениями из других источников.

В подавляющем большинстве случаев обязательной составляющей моделей коллекторов являются трещины разных порядков. Трещины отмечаются в моделях, сформулированных как в 70-80-х годах, так и в последние годы.

С самого начала изучения баженовской свиты [5] все исследователи рассматривали существование трещин, как необходимое свойство слагающих её пород. Одной из первых концепций явилась гипотеза И.И. Нестерова об образовании микро- и мезотрещин при преобразовании твёрдого ОВ (керогена) в жидкие и газообразные углеводороды [6, 7]. Этот процесс получил название «автофлюидоразрыва» и разрабатывался многими исследователями (О.Г. Зарипов, И.Н. Ушатинский, К.С. Юсупов, В.П. Сонич и многие другие). В результате в пласте

формируется, так называемый «листоватый» коллектор.

В работах ВНИГРИ [8] наряду с трещиной ёмкостью большое значение придавалось поровому пространству, формировавшемуся, в значительной мере, за счёт диа- и катагенетического преобразования минеральной части пород, а также термодеструкции органического вещества. В результате таких процессов происходит разблокирование закрытых пор, запечатанных смолистыми и асфальто-смолистыми компонентами. Этот процесс в последнее время наблюдался экспериментально [9] и должен сопровождаться не только увеличением суммарного объёма пор, но и обеспечивать их сообщаемость.

Параллельно рядом исследователей, в частности, В.С. Мелик-Пашаевым, Э.М. Халимовым, Ю.А. Терещенко, К.И. Микуленко, Т.В. Дорофеевой, Е.А. Гайдебуровой и другими, было выдвинуто (и развивается по сей день) положение о существенной роли тектонических процессов в формировании коллекторов баженовской свиты. Без привлечения этого фактора не удаётся объяснить все геолого-промысловые факты, касающиеся значений фильтрационно-ёмкостных и продуктивных параметров отложений баженовской свиты.

Сначала подчёркивалась роль любых тектонических дизъюнктивов, затем разрабатывалась концепция о преимущественном образовании и определяющей роли горизонтальных трещин,

порождённых тектоническими процессами [10, 11]. В последнее время всё более популярной становится идея о значимости вертикальной тектонической трещиноватости, которая порождает зону «оперения» в виде систем наклонных и горизонтальных трещин [12 - 15].

Образование коллекторов при наличии тектонической трещиноватости объясняется результатом процессов преобразования пород, в частности:

- проработкой гидротермальными водами, поднимающимися по этим разломам [15];

- активизацией процессов преобразования керогена за счёт потоков тепла по тектоническим вертикальным разломам, с последующими автофлюидоразрывами [16];

- активизацией процессов преобразования керогена за счёт механохимических эффектов, т.е. снижением энергии активации химических реакций в горных породах при наличии механических напряжений, с последующими автофлюидоразрывами [17].

Иными словами, две концепции – автофлюидоразрыва и влияния тектоники – в последние годы в некотором смысле объединяются.

Различны и типы коллектора в разных моделях. В одних описаны преимущественно глинистые коллекторы [18], в других — карбонатные.

В большинстве моделей предполагается линзовидное строение коллектора, причём в некоторых считается, что сообщаемость линз нефтенасыщенных коллекторов крайне изменчива: часть линз изолирована, а часть связана между собой системой мезотрещин различной проницаемости.

Следует выделить модель [19, 20], сформулированную на основании комплексных промысловых исследований пластов и скважин и анализа динамики энергетического состояния залежи на Салыском месторождении. Сопоставляя результаты исследований методом восстановления давления, промыслово-геофизических и геохимических исследований было установлено, что коллектор состоит из двух сред. Первая приурочена к пласту малой толщины в подошве баженовской свиты. Она имеет высокую проницаемость и низкое текущее пластовое давление. Эта среда является флюидоподводящей: она обеспечивает основные притоки нефти к скважинам.

Вторая среда охватывает всю залегающую выше толщу баженовских отложений. Она имеет низкую проницаемость и высокое текущее пластовое давление. Притоки из этой толщи к скважинам незначительные.

Начальное пластовое давление во всей

залежи по данным разведочных скважин было аномально высоким 45–46 МПа. За 10 лет разработки между двумя средами сформировался перепад давления в 10–15 МПа, за счёт которого происходит переток из слабопроницаемой среды с высоким давлением в высокопроницаемую среду с низким давлением.

Следует отметить, что высокопроницаемые обычно трещиноватые прослой малой толщины установлены во многих районах распространения баженовской свиты [1]. Этот высокопроводящий прослой может залегать в иных частях разреза, может существовать несколько таких пластов, либо разветвлённая система высокопроницаемых путей фильтрации. Суть подобной гидродинамической модели от этого не меняется.

В определённом смысле к этой модели близка модель В.П. Сонича с соавторами [22], в которой малопроницаемая поровая матрица вмещает более проницаемые кавернозно-трещинные разности.

Большая часть разработанных моделей, указанных в таблицах, носит теоретический или даже умозрительный характер [21] по объективным причинам, ввиду трудностей выделения и изучения коллекторов. Некоторым исключением является модель [19, 20], построенная на основании объективных данных промысловых исследований, но она является, как и многие гидродинамические модели, скорее аналоговой, позволяя прогнозировать динамику разработки, но не отражая адресно реальное строение объекта.

Ввиду многочисленности предложенных моделей, было предпринято несколько попыток разделить их условно на ряд групп.

В частности, в работах [21] они разделены на три группы.

В первой группе в качестве главного механизма формирования коллектора рассматривается преобразование органического вещества и нефтегенерация, то есть автофлюидоразрыв. Результатом преобразований являются листоватые трещиноватые коллекторы.

Модели второй группы основаны на том, что главными являются процессы преобразования минеральной части: неравномерное уплотнение осадка, чередование слоёв различного минерального состава и вторичное минералообразование. В результате формируются коллекторы трещинного, трещинно-кавернозного и трещинно-кавернозно-порового типов преимущественно в кремнистых и карбонатных

радиоляритах.

Третья группа — модели трещинно-каверновых коллекторов баженовской и абалакской свит, в формировании которых принимали участие средне- и высокотемпературные гидротермальные флюиды, проникавшие в породы баженовской свиты по тектоническим разломам, например, в работах [34, 35]. Обоснованию этой модели посвящена и подробная статья [36], в которой на основании значительного количества различных данных утверждается, что «вторичные коллекторы тектоно-гидротермального происхождения широко распространены в юрских отложениях Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна».

Несколько иная классификация моделей коллекторов свиты, с гидродинамических позиций, приведена в монографии [30], где все модели также разделены на три группы, но по иному признаку.

В первой группе залежь баженовской свиты является единым резервуаром, а коллектор представляет собой «среду с двойной пористостью» — низкопроницаемую матрицу и высокопроницаемые каналы, именуемые трещинами. К этому типу можно, видимо, отнести модель [19, 20], с некоторой модификацией.

Во второй группе моделей в баженовской свите предполагается наличие разностей коллектора с различной проницаемостью, но при широком спектре её значений; введение «двойной» среды не предполагается. Залежь рассматривается как совокупность линз, часть из которых сообщается, а часть изолирована.

В третьей группе (промежуточной между первой и второй) строение залежи также предполагается линзовидным (или блоковым), но в пределах каждой линзы коллектор представляет собой «среду с двойной пористостью».

В последние годы для месторождений Широкого Приобья развита несколько отличная от предыдущих модель коллекторов [3, 4, 12]. Коллекторами являются плотные (высокоскоростные по АК) трещинно-кавернозные прослои с малой толщиной коллектора 0,4–2 м (в основном, менее 1 м), представленные известняками, доломитами и опоками (последние сложены преимущественно аморфным кремнистым веществом). Низкопроницаемая матрица вмещающих слоёв коллектора нефтематеринских пород представлена гидрослюдисто-кремнистыми аргиллитами, кремнистыми аргиллитами [3].

По данным работы [4] «потенциальные

коллекторы в баженовском горизонте на западе Широкого Приобья формировались преимущественно по элювиальным горизонтам, сложенным известняками, доломитами, редко силицитами, развитыми по остаткам радиолярий, распространённых на четырёх стратиграфических уровнях разреза».

В шлифах пород коллекторов зафиксированы трещины, которые идентифицированы как трещины автофлюидоразрыва. Они обнаружены как внутри пород разных литотипов, так и на границе пород матрицы и коллекторов. Тип порового пространства по данным исследования ядра установлен как трещинно-поровый [4].

Наличие трещин в породах БС отмечено и в работе В.П. Сонича с соавторами [22]. Утверждается, что в породах с каверно-трещинной структурой порового пространства густота развития трещин, в зависимости от литологического состава пород, составляет от 10 до 500 на метр. В породах с поровым типом пустотного пространства (матрица, вмещающая каверно-трещинные разности) отмечается массовое развитие микротрещин протяжённостью от долей до первых миллиметров, в основном, не образующих связанной проницаемой системы.

В работе [21, стр. 164] на основании краткого обзора опубликованных работ утверждается, что нефтекерогеносодержащие породы БС представлены литотипами с микро- или макротрещиноватостью, причём доля первых значительно больше, чем вторых, и они практически непроницаемы при существующих пластовых условиях.

Таким образом, практически все указанные модели образования коллекторов и их распределения в теле свиты в качестве существенного элемента содержат те или иные виды трещин различного ранга и различной ориентации.

Это обстоятельство приводит к необходимости проведения специальных исследовательских работ по двум направлениям:

- создание такого вычислительного инструмента для моделирования разработки БС, в котором по желанию исследователя возможен учёт наличия трещин с варьированием их пространственной локализации, густоты, величин раскрытости и длины;

- разработка методов оценки фильтрационной значимости трещин, выделяемых по геофизическим данным, на основании комплексного анализа всей

гидродинамической информации, включая как данные традиционных промысловых измерений, так и специальных гидродинамических методов исследования скважин.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на 2019 год по программе Президиума РАН № 2 (I27), тема (проект) № 0065-2019-0110.

Таблица 1

Список некоторых моделей коллекторов БС, авторы и годы публикаций  
(по данным работ [87, 134] с дополнениями)

№ № модели п/п	Авторы	Годы публикаций	Ссылка
1	Нестеров И.И. и др.	1977-1985	6, 7
2	Федорцов В.К. и др.	1978	24
3	Сонич В.П. и др.	1978—1980	18
4	Добрынин В.М. и др.	1979—1982	25
5	Халимов Э.М. и др.	1980	26
6	Корж М.В. и др.	1980	27
7	Вольпин С.Г. и др.	1982—1988	19, 20
8	Сургучёв М.Л., Желтов Ю.В. и др.	1983—1988	28
9	Белкин В.И. и др.	1983—1985	29
10	Ермаков В.И. и др.	1995	30
11	Батурин Ю.Е., Сонич В.П., Ахапкин М.Ю. и др.	2002 – 2007	13
	Смолин А.С.		14
12	Зубков М.Ю. и др.	2004	31
13	Коровина Т.А.	2004	17
14	Мальчихина О.В.	2005	16
15	Усманов И.Ш. и др.	2006	32
16	Славкин В.С. и др.	2007	33
17	Алексеев А.Д.	2009	3
18	Сонич В.П. и др.	2010	22

Таблица 2

Основные особенности моделей коллекторов БС из табл. 1  
(по данным работ [3, 4], с дополнениями)

№№ мод. из табл. 1	Основные особенности моделей
1	Залежи нефти и газа представляют собой линзы, гидродинамически связанные между собой. Глинистые породы разбиты связной системой микротрещин, блоки размером 0,2×0,05 мм. Имеются рыхлые породы, фильтрация в которых – по закону Дарси, и плотные породы, которые связываются с рыхлыми при изменении пластового давления в результате разработки, фильтрация в них – не по закону Дарси.
2	Углеводороды аккумулируются в тонких порах и микротрещинах, фильтрация – по более крупным трещинам. Модель коллектора – трещинный и трещинно-поровый.
3	Коллектор – порово-трещинного типа. Ёмкости – поры между глинистыми частицами, фильтрация по трещинам и микротрещинам. Коллекторы – микрослоистые глины. Строение пласта – линзовидное: залежи нефти приурочены к линзам коллекторов, сложенных микрослоистыми трещиноватыми глинами, которые изолированы друг от друга массивными, слабо трещиноватыми глинами.
4	Нефтематеринская толща сложена массивными высокобитуминозными разностями глинистых пород с редкими вертикальными и наклонными трещинами. Нефтеотдающие интервалы – битуминозные листоватые глинистые породы, их число в разрезе невелико.
5	Коллектор – порового и трещинного типов, при разработке переходит в трещинно-поровый.

Продолжение Таблицы 2

№№ мод. из табл. 1	Основные особенности моделей
6	Развитие коллекторов в отложениях свиты не является повсеместным. Оно возможно лишь на территориях, где выполняется ряд условий: а – трещиноватые зоны, приуроченные к пограничным областям тектонических блоков с максимальными тектоническими напряжениями; б – содержание органического углерода не менее 7%; в – аномально высокие давления и температуры; г – наличие глинистых экранов.
7	Коллектор – «двойная среда», состоящая из флюидоподводящей и аккумулирующей сред. Первая, приуроченная к пласту малой толщины в подошве свиты, может быть либо трещинной, либо трещинно-поровой, либо поровой, но высокопроницаемой. Пластовая система гидродинамически едина, между высоко- и низкопроницающей средами существуют перетоки.
8	Пласт – чередующиеся по напластованию алевролитовые глины массивной текстуры и микрослоистые трещиноватые глины (10-17% толщины) более высокой проницаемости; породы в линзах являются трещинно-поровыми коллекторами с сетью микротрещин литологического генезиса; на эту сеть накладывается редкая сеть более крупных трещин (макротрещин); все трещины в линзе фильтрационно связаны; имеется не отдающая нефть часть пласта, состоящая из почти непроницаемой породы.
9	В низах баженовской свиты – кавернозный коллектор, в самой свите – линзовидные ловушки, сложенные линзовидными, часто чередующимися, проницаемыми ракушняками и раиоляритами с битуминозными аргиллитами или брекчией наиболее хрупких разностей битуминозно-кремнистых аргиллитов.
10	Нефтенасыщенные полости породы залегают участками, имеющими неправильную форму, и которые только приближённо могут быть представлены в виде линз. Нефтенасыщенные участки разуплотнены. Они располагаются несколькими этажами, в плане могут представляться как единое нефтеносное поле. Количество этажей по площади значительно варьирует. Гидродинамическая связь нефтенасыщенных участков крайне слабая. Связь нефтенасыщенных зон в пределах участков также крайне слаба; некоторые связаны высокопроницаемыми каналами, имеющими незначительный объём. Гидродинамическая связь между скважинами, если она наблюдается, осуществляется по отдельным высокопроницаемым каналам, имеющим малый объём. В процессе разработки происходит механическая деформация коллектора (по мере возрастания перепада давления: упругая деформация, пластическое сжатие, дилатантное разрушение, то есть трещинообразование) с постепенным вовлечением в разработку значительных объёмов первоначально не разрабатываемого коллектора.
11	Модель пласта ЮС <sub>0</sub> – блочная, расположение блоков обусловлено тектоническими разломами в подстилающих породах. Системы флексурно-разломных дислокаций различного ранга и амплитуды контролируют распространение трещинных и трещинно-кавернозных коллекторов в отложениях баженовской свиты. Пространственное распределение продуктивности и режим дренирования баженовской свиты определяются сочетанием литологического и тектонического факторов. Литологический фактор контролирует распространение пород, в различной степени способных аккумулировать и отдавать углеводороды, а тектонический фактор определяет формирование путей фильтрации. Примыкающие к зонам разломов части блоков – высокопродуктивны, центральные части блоков – низкопродуктивны. Различие в продуктивности скважин, расположенных в этих частях блоков, достигает десятков раз.
12	Определяющая роль тектонических напряжений и связанной с этим трещиноватости в формировании коллекторов и величине достигаемых дебитов скважин. Прогноз продуктивности по данным прогноза зон трещиноватости, обусловленной тектоническими напряжениями.
13	Значительная роль изменений протекания химических и иных процессов в породе в зонах повышенных тектонических напряжений и тектонозависимой трещиноватости (механохимические процессы) в образовании коллекторов и скоплений нефти и газа в

Продолжение Таблицы 2

№№ мод. из табл. 1	Основные особенности моделей
	<p>баженовской свите. Наиболее перспективны для нефтегенерации глинистые и кремнисто-глинистые литотипы с тонколистовой и микрочешуйчатой микротекстурами. Преимущественно в глинистых разностях, одновременно с образованием углеводородов, формируются ослабленные участки с матричной (псевдогранулярной) и микротрещинной пустотностью, в радиоляритах – дополнительно макротрещинная (в напряженных зонах при превышении предела прочности породы в результате тектонического воздействия). В зонах макротрещиноватости развиваются эндогенные процессы, среди которых наиболее значимыми являются карбонатизация и силицитизация.</p> <p>На втором этапе уже сформированная и заполненная консолидированной нефтью система первоначального коллектора, представленная в виде замкнутых до 2–3 мм зон автофлюидоразрывных микротрещин и пор, объединяется в промышленный коллектор возникающей системой субгоризонтальных и субвертикальных трещин. Толчком к этому является тектонический процесс, при котором порода претерпевает механические воздействия уже за пределами её прочности.</p> <p>Основные запасы нефти приурочены к каверно-трещинным и каверно-порово-трещинным коллекторам, приуроченным к кремнистым и карбонатным радиоляритам.</p>
14	<p>Дизъюнктивные нарушения достигают глинисто-кремнистых пород свиты. Кремнисто-глинисто-карбонатные и карбонатно-кремнистые слои жёстко воспринимают геодинамические подвижки вдоль панелей разломов и образуют зоны макротрещиноватости. Происходит воздействие на кероген пород; активный поток тепла повышает скорость генерации УВ из керогена. В результате автофлюидоразрыва образуются микротрещины, заполненные нефтью, которая заполняет зоны макротрещиноватости, образуя в этих зонах и в этих литологических слоях залежи нефти.</p>
15	<p>Залежи нефти в известняках пласта ЮС<sub>0</sub> линзовидны; линзы известняков иногда в средней части нефтенасыщены, на границах с аргиллитами – битуминозны; линзы известняков могут быть изолированы аргиллитами, могут быть связаны гидродинамически трещиноватыми кремнисто-известково-глинистыми породами.</p>
16	<p>Основными проводниками нефти в баженовской свите являются плотные карбонатизированные трещиноватые прослои (ПКТП). Промышленная нефтеносность баженовской свиты связана с наличием в разрезе маломощных плотных прослоев вторичных радиоляритов и подстилающего эти отложения карбонатного слоя КС1 (коррелируемый слой). Они легко распознаются по данным каротажа.</p>
17	<p>Модель Средне-Назымского и Гальяновского месторождений. Коллекторами являются плотные (высокоскоростные по АК) трещинно-кавернозные прослои с толщиной коллектора 0,4—2 м (в основном, менее 1 м), представленные известняками, доломитами и опоками (последние сложены преимущественно аморфным кремнистым веществом). Матрица нефтематеринских пород, вмещающих слои коллектора, представлена гидрослюдисто-кремнистыми аргиллитами, кремнистыми аргиллитами. Модальное значение пористости пород матрицы составляет 8—9%, проницаемости – 0,1 мД.</p>
18	<p>Коллекторы двух типов. Первый – каверно-трещинный, развит в теле свиты спорадически в виде линзообразных, слабо контактирующих друг с другом слоёв толщиной 0,2—4,0 м и протяжённости от первых до нескольких сотен метров. Слои содержат и способны отдавать нефть в скважины; густота развития трещин, в зависимости от литологического состава пород изменяется от 10 до 500 на метр.</p>

# Analysis and Generalization of Published Reservoir Models in Bazen Suite

V.A. Yudin, S.G. Volpin, I.V. Afanaskin, N.P. Efimova

**Abstract.** The detection of high productive zones in Bazen suite is one of the top-priority goals in development of sizable oil resources whose production is problematic. This can be done only if mechanism of reservoir formation is well understood. More than 20 different reservoir formation models had been proposed for Bazen suite during 50 years of its investigation which describes regularities of permeable zones spatial distribution and their association with different lithological varieties. Therefore in this article are briefly considered about 20 different reservoir models for Bazen suite which had been proposed by many geologists and geophysicists of former USSR and Russia.

**Key words.** Bazen suite, reservoir model, kerogen-bearing rocks, lenticular formation structure, double-permeability model, fractured zones.

## Литература

1. Баженовская свита – главный источник ресурсов нетрадиционной нефти в России А.Э. Конторович, Л.М. Бурштейн, В.А. Казаненков, В.А. Конторович, Е.А. Костырева, Е.В. Пономарева, С.В. Рыжкова, П.А. Ян Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН №2 2014 С. 2
2. Юдин В.А. Проблемы в обосновании численных моделей разработки баженовской свиты с закачкой в пласт воздуха. Т. I. – 432 С., Т. II. – 496 С. – М.: ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. – 2018. ISBN 978-5-93838-068-4
3. Алексеев А.Д. Природные резервуары нефти в отложениях баженовской свиты на западе Широкого Приобья // Дисс. на соиск. уч. степ. к. г.-м. н. М. 2009.
4. Немова В.Д. Литология и коллекторские свойства отложений баженовского горизонта на западе Широкого Приобья // Дисс. на соиск. уч. степ. к. г.-м. н. М. 2012.
5. Новиков Г.Р., Салманов Ф.К., Тянь А.В. Перспективы открытия крупных залежей нефти в трещиноватых аргиллитах баженовской свиты // Нефть и газ Тюмени. № 7. 1970.
6. Нестеров Н.И. Новый тип коллекторов нефти и газа // Геология нефти и газа. 1979, № 10. С. 26-29.
7. Строение и нефтеносность баженинов Западной Сибири // Сборник научных трудов под ред. И.И. Нестерова. Тюмень: ЗапСибНИГНИ. 1985.
8. Коллекторы нефти баженовской свиты Западной Сибири (Труды ВНИГРИ) / (под ред. Дорофеевой Т.В) Ленинград: «Недра». 131 С. 1983.
9. Костенко О.В. Блокирующий характер распределения высокомолекулярных соединений битумоида в поровой системе баженовской свиты (Западно-Сибирский бассейн) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. Т. 9. № 1. 2014.
10. Таруц Г.М., Гайдебурова Е.А. Строение нефтеносных отложений баженовской свиты Западно-Сибирской плиты в связи с особенностями тектоники верхнеюрского бассейна осадконакопления (на примере Салымского района) // В сб. «Цикличность осадконакопления нефтегазоносных бассейнов и закономерности размещения залежей». С. 80—98. Новосибирск: ИГ и Г СО АН СССР. 1970.
11. Трофимук А.А., Карогодин Ю.Н. Баженовская свита - уникальный природный резервуар нефти // Электронный журнал «Нефтегаз». 24. 10.2008.
12. Вертиевец Ю.А. Геологическое обоснование освоения трудноизвлекаемых запасов нефти кероген-глинисто-силицистых пород баженовской свиты района Красноречинского свода // Дисс. на соиск. уч. степ. к.г.-м. н. Москва. 2011.
13. Батулин Ю.Е., Сонич В.П., Ахапкин М.Ю. и др. Основные итоги и перспективы разработки баженовской свиты Салымского месторождения // Геофизика. №4. С. 211—218. 2007.
14. Смолин А.С. Литологические особенности и нефтегазоносность баженовской свиты на территории Среднего Приобья // Дисс. на соиск. уч. степ. к. г.-м. н. Москва. 2006.
15. Зубков М.Ю., Портмейстер Я.А., Бондаренко П.М. Прогноз трещинных коллекторов в отложениях баженовской и абалакской свит на основе результатов тектонофизического

- моделирования // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО (V научно-практическая конференция). Том 1. Ханты-Мансийск. 380 с. 2002.
16. Мальчихина О.В. Нефтегенерационные свойства керогена баженовской свиты на западной окраине Сургутского свода и формирование залежей нефти пласта ЮС<sub>0</sub> // Дисс. на соиск. уч. степ. к. г.-м. н. Москва. 2005.
  17. Коровина Т.А. Закономерности формирования и распространения коллекторов в битуминозных отложениях баженовской свиты для оценки перспектив нефтегазоносности западного склона Сургутского свода // Дисс. на соиск. уч. степ. к. г.-м. н. Санкт-Петербург. 2004.
  18. Сонич В.П. и др. Модель пласта Ю<sub>0</sub> баженовской свиты // Сб. «Нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири». М.: ИГиРГИ. С. 57—67. 1980.
  19. Умрихин И.Д., Вольпин С.Г., Ломакина О.В., Погонищев В.И., Самардаков В.В. Уточнение гидродинамической модели залежи и коллектора на Салымском месторождении // Геология нефти и газа. -№ 1. С. 52-57. 1988.
  20. Вольпин С.Г., Ломакина О.В., Афанаскин И.В., Штейнберг Ю.М. Комплексирование численного моделирования и различных видов исследований при изучении геологического строения месторождений с трудноизвлекаемыми запасами нефти на примере баженовской свиты // Нефтепромысловое дело, № 11, С. 5-13. 2018.
  21. Калмыков Г.А. Строение баженовского нефтегазоносного комплекса как основа прогноза дифференцированной нефтепродуктивности // дисс. на соиск. уч. степ. д. г.-м. н. М. 2016.
  22. Чирков В.Л., Сонич В.П. Степень геологической изученности баженовской свиты территории деятельности ОАО «Сургутнефтегаз» // Презентация. 2010
  23. Кокорев В.И. Техничко-технологические основы инновационных методов разработки месторождений с трудноизвлекаемыми и нетрадиционными запасами нефти // Дисс. на соиск. уч. степ. д. т. н. Москва. 2010.
  24. Федорцов В.К. и др. Обоснование модели пласта и режима залежи в отложениях баженовской свиты Салымского месторождения и пробной эксплуатации скважин. // Труды ЗапСибНИГНИ. Вып. 127. Тюмень. С. 17-33. 1978.
  25. Добрынин В.М. Проблемы коллектора нефти в битуминозных глинистых породах баженовской свиты // Известия АН СССР, Серия Геологическая. № 3. С. 120-127. 1982.
  26. Халимов Э.М., Мелик-Пашаев В.С. О поисках промышленных скоплений нефти в баженовской свите // Геология нефти и газа. № 6. С. 1-10. 1980.
  27. Корж М.В. и др. Нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири. М.: ИГиРГИ. 205 с. 1980.
  28. Желтов Ю.В., Хавкин А.Я. О системном подходе к геолого-промысловому изучению залежи нефти в баженовской свите Салымского месторождения // Труды ВНИИ. Вып. 102. С. 13-16. 1988.
  29. Белкин В.И. и др. Строение и нефтеносность баженовского резервуара // Литология и полезные ископаемые. № 2. С. 108-123. 1985.
  30. Ермаков В.И., Кирсанов А.Н., Кирсанов Н.Н. и др. Геологические модели нефтегазоконденсатных месторождений Тюменского Севера. М.: Недра. 464 с. 1995.
  31. Бондаренко П.М., Зубков М.Ю. и др. Прогноз зон природной трещиноватости в продуктивных отложениях Западно-Урьевской площади по данным сейсморазведки и тектонофизического моделирования // Вестник недропользователя Ханты-Мансийского автономного округа. № 14. 2004.
  32. Усманов И.Ш. и др. Нефтенасыщенные известняки баженовской свиты // Доклады IX Конференции «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО». Ханты-Мансийск: Издательский дом «Издатнаукасервис». 2006.
  33. Славкин В.С., Алексеев А.Д., Колосков В.Н. Некоторые аспекты геологического строения и перспектив нефтеносности баженовской свиты на западе Широкого Приобья. // Нефтяное хозяйство. № 8. С. 100-105. 2007.
  34. Ищенко А.Н. О перспективах развития ТЭК России // Недропользование – XXI век.
  35. № 1. С. 12—13. 2017.
  36. Киреева Т.А., Казак Е.С. Поровые растворы пород баженовской свиты Западной Сибири и их изменение в результате гидротермальной проработки // Геология нефти и газа. № 1. С. 83—91. 2017.
  37. Зубков М.Ю. Тектоногидротермальные процессы в юрских отложениях Западной Сибири // Геология нефти и газа. № 1. С. 64—80. 2017.

# Возможность выявления дизъюнктивных нарушений на нефтяном месторождении по характеру обводнения скважин и данным трассерных исследований

В.А. Юдин<sup>1</sup>, С.Г. Вольпин<sup>2</sup>, И.В. Афанаскин<sup>3</sup>, Н.П. Ефимова<sup>4</sup>

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия

E-mail's: <sup>1</sup>yudinval@yandex.ru, <sup>2</sup>sergvolpin@gmail.com, <sup>3</sup>ivan@afanaskin.ru <sup>4</sup>efinatka@gmail.com

**Аннотация.** Изучена возможность выявления высокопроницаемого нарушения по характеру обводнения скважин и данным трассерного метода. Исследование проведено методом численного моделирования для ячейки пятиточечной системы разработки, работающей в рамках опытно-промышленной эксплуатации в отсутствие окружения (остальные скважины пласта удалены на значительное расстояние и существенного влияния не оказывают). Показано, что: 1. наличие высокопроницаемого нарушения может приводить к оттоку нагнетаемой воды за пределы участка, что вызывает резкое замедление продвижения воды к скважинам, отделённым нарушением от нагнетательной скважины; 2. при некоторых параметрах нарушения по кривым обводнения скважин от времени наличие нарушения может быть выявлено; 3. трассерные исследования существенно дополняют данные по характеру обводнения, особенно, если проводятся неоднократно в процессе заводнения с разными типами трассеров.

**Ключевые слова:** дизъюнктивные нарушения, трассерные исследования, обводнение скважин.

## Введение

В настоящее время во многих публикациях сообщается о наличии на нефтяных месторождениях дизъюнктивных нарушений различного ранга. Причём, не только на сложенных карбонатными породами, для которых этот факт давно установлен, но и на терригенных залежах, в частности, на большинстве месторождений Западной Сибири, особенно в юрских отложениях [1, стр. 8–24].

Известно также, что зона локализации нарушений имеет достаточно сложную фильтрационную структуру [1, стр. 34–58]. Внутренняя зона нарушений содержит: различные виды глин; брекчию; катаклазиты, и т.п., формируется как за счёт механических процессов, так и при диагенетических преобразованиях пород. Она может иметь самую различную величину проницаемости – от нуля до нескольких Дарси. Во внешней же зоне нарушения, т.е. в зоне пласта, примыкающей к осевой зоне дизъюнктивного нарушения, формируется трещиноватость разной ориентации, с последовательно убывающей плотностью вторичных трещин в направлении, ортогональном плоскости сместителя. Таким образом, нарушение представляет собой своеобразную горную породу, имеющую полосообразный характер,

сложную фильтрационную структуру, и гидродинамически связанную с окружающим пластом.

Наличие нарушений заметно сказывается на эффективности разработки, в частности, на величине текущего и конечного коэффициентов нефтеотдачи [1], поэтому их обнаружение имеет большое значение для оптимизации разработки с целью повышения её эффективности и улучшения экономических показателей.

В настоящей работе изучена возможность выявления нарушения по данным анализа характера обводнения скважин и данным трассерного метода. При этом наибольший интерес представляет выявление высокопроницаемого нарушения, поскольку непроницаемые «стенки» достаточно хорошо выявляются по данным гидродинамических исследований скважин (ГДИ) [2].

## Численная модель

Исследование проведено методом численного моделирования. Для анализа выбрана ячейка пятиточечной площадной системы разработки, от которой все остальные скважины удалены на значительное расстояние. Также рассмотрена ситуация, когда имеются две добывающих скважины, между которыми

расположена одна нагнетательная. Участок пересекает высокопроводящее нарушение, отсекающее одну добывающую скважину от остальных и нагнетательной (обозначенной как I), рис 1. В случае двух добывающих скважин нарушение ориентировано перпендикулярно линии расположения скважин и локализовано между нагнетательной скважиной и одной из добывающих.

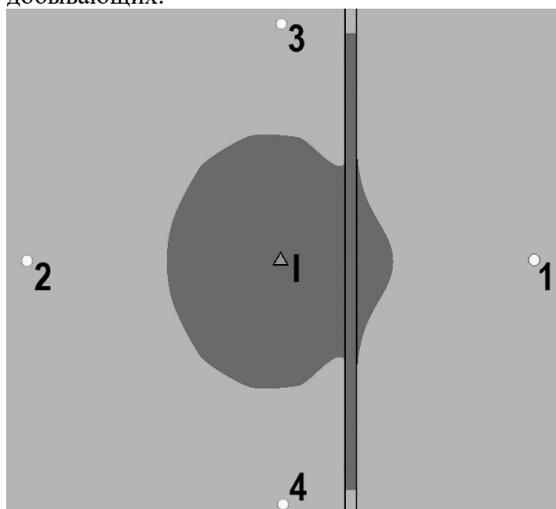


Рис. 1. Распространение воды (темная зона) по площади пласта через 10 месяцев после начала разработки в однородном пласте с проницаемостью 39 мД при наличии высокопроницаемого нарушения с проницаемостью 3900 мД и шириной 25 м, расположенного на расстоянии 125 м от нагнетательной скважины

Такая геометрия соответствует не этапу полного разбуривания месторождения, а этапу опытно-промышленной эксплуатации участка в начале освоения месторождения, что представляет несомненный интерес для возможно раннего обнаружения и определения параметров нарушений.

Для простоты нарушение моделируется одной узкой высокопроницаемой, пористой полосой, полностью гидродинамически связанной с остальной частью пласта.

Для расчёта использована математическая модель двухфазной фильтрации слабосжимаемых несмешивающихся жидкостей (нефти и воды) в упругом пласте в отсутствие гравитационных и капиллярных сил [3] с использованием представления соответствующей системы уравнений, предложенного в [4]. На удалённых внешних границах всего участка задаются условия непротекания.

Полученная система уравнений по времени аппроксимируется в явном виде по насыщенности  $S$  и схемой «классики» [5] по давлению  $P$ . Подробно вычислительная схема

описана в работе [6].

Количество ячеек по каждой из осей в горизонтальной плоскости – 22 шт. Вертикальный размер ячеек 1 м (что позволяет масштабировать задачу на любую толщину пласта), модель однослойная.

Добывающие скважины работают при заданном дебите 5,5 м<sup>3</sup>/сут (при эффективной толщине пласта 1 м). Нагнетательная скважина работает при постоянном расходе закачиваемой воды, рассчитанном исходя из компенсации отбора закачкой 100%. Скин-факторы скважин равны 0. Все скважины вводятся в эксплуатацию одновременно. Прочие параметры модели указаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметры расчётной модели пласта

Название параметра	Величина	Единицы измерения
Глубина кровли	2010	м
Проницаемость пласта	39	мД
Проницаемость нарушения	от 390 до 3900	мД
Пористость пласта	0,15	д.ед.
Пористость нарушения	0,15	д.ед.
Ширина нарушения	от 15 до 50	м
Объёмный коэффициент воды	1,01	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Сжимаемость воды	$4,7 \cdot 10^{-5}$	1/бар
Вязкость воды	0,4	мПа·с
Объёмный коэффициент нефти	1,15	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Сжимаемость нефти	$1,01 \cdot 10^{-4}$	1/бар
Вязкость нефти	1,3	мПа·с
Сжимаемость породы	$4,7 \cdot 10^{-5}$	1/бар
Растворимость газа в нефти	121	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>
Давление насыщения нефти газом	165	бар
Начальное пластовое давление	201	бар
Начальная водонасыщенность	0,27	д.ед.

Относительная фазовая проницаемость нефти при начальной водонасыщенности ( $S_{нач}=0,27$  д.ед.) равна 1 д.ед., и равна 0 д.ед. при максимальной водонасыщенности ( $S_{макс}=0,69$  д.ед.). Относительная фазовая проницаемость воды равна 0 д.ед. при  $S_{нач}$  и равна 0,24 д.ед. при  $S_{макс}$ .

В расчётах варьировались проницаемость и ширина нарушения, табл. 1, а также расстояние от нагнетательной скважины до нарушения – от 50 до 375 м.

## Результаты расчётов

Результаты расчётов показывают, что наличие высокопроницаемого, хотя и узкого, нарушения кардинально меняет характер обводнения скважин, прежде всего, за счёт распространения воды по нарушению к окружающим скважинам и за пределы рассматриваемой ячейки, рис. 1 и 2.

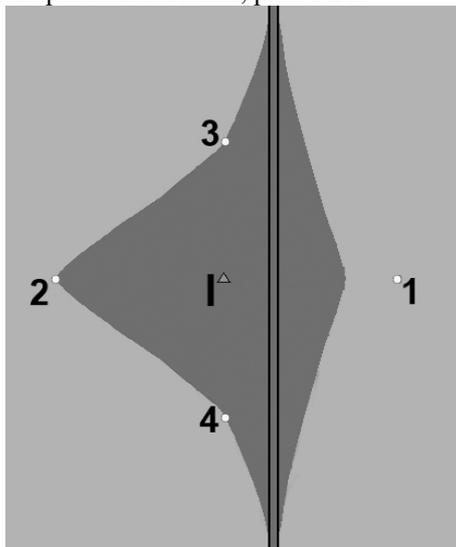


Рис. 2. Распространение воды (темная зона) по площади однородного пласта с проницаемостью 39 мД через 4 года после начала разработки при наличии высокопроницаемого нарушения при его проницаемости 3900 мД и ширине 25 м, расположенного на расстоянии 125 м от нагнетательной скважины

Видно, что за счёт ухода воды по нарушению происходит резкое замедление ее продвижения к добывающей скважине 1, и вода до неё доходит лишь спустя очень значительное время.

*Следует отметить, что в такой ситуации и по характеру обводнения скважины 1, и по результатам трассерных исследований, проведённых в этот момент времени, как правило, будет сделано заключение о наличии непроницаемого барьера между нагнетательной скважиной 1 и добывающей скважиной 1. Хотя в действительности нарушение есть, но оно не непроницаемое, а, наоборот, сверхпроницаемое.*

Если трассер не обнаружен в добывающей скважине в течение длительного времени, то это ещё не свидетельствует о наличии непроницаемого барьера между нагнетательной и добывающей скважинами; на практике же из этого факта часто делают именно такой вывод.

Полученный качественный расчётный

факт, по-видимому, подтверждается и на практике. Например, на рис. 3 из работы [7] приведён результат трассерного исследования, проведённого для обнаружения дизъюнктивных нарушений на Ватьёганском месторождении.

Видно, что при закачке трассера в скв. 9094 отмечено его быстрое распространение вдоль предполагавшегося разлома. При этом, несмотря на высокую проводимость разлома, в скважинах, расположенных по другую сторону от нагнетательной скв. 9094, поступление трассера отмечено не было. Возможно, это связано именно с влиянием высокопроницаемого разлома, как и в расчётном случае, показанном на рис. 1 и рис. 2.

Второй важный вывод из результатов расчёта – появление высокопроницаемого нарушения приводит к резкому различию кривых обводнения различных добывающих скважин от времени, рис. 4 и табл. 2, 3.

При этом характерно, что наличие нарушения приводит к замедлению обводнения не только в «отсечённой» скв. 1, но и в скв. 2, расположенной по ту же сторону от нарушения, что и нагнетательная. Это вполне понятно: вода уходит по нарушению за пределы ячейки разработки, эффективность заводнения снижается, большая часть воды расходуется непроизводительно, поэтому и обводнение скв. 2 наступает позже, чем в однородном пласте.

При этом кривые обводнённости не только различаются между собой, но значительно отличаются от аналогичной кривой для однородного пласта, соответствующей отсутствию нарушения, табл. 2, 3 и рис. 4.

Как различие времён достижения определённого уровня обводнённости в разных скважинах элемента, так и отличие этих времён от времени, характерного для однородной среды могут свидетельствовать о наличии некоторого резкого гидродинамического возмущения в пределах элемента, т.е. указывать на наличие нарушения.

Такие различия вполне заметны и для очень высокой проницаемости нарушения (3900 мД) и для меньшей – 390 мД, табл. 3. Однако, при снижении проницаемости разлома заметно уменьшается различие времён достижения определённого уровня обводнённости. Например, если для проницаемости разлома в 3900 мД и локализации разлома на 50 м от нагнетательной скважины, различие времён достижения уровня обводнения, равного 0,5 %, в скв. 2 и 3 составляет 8 раз, то при 390 мД оно равно всего 3,5 раза. Хотя и это – вполне заметное различие.

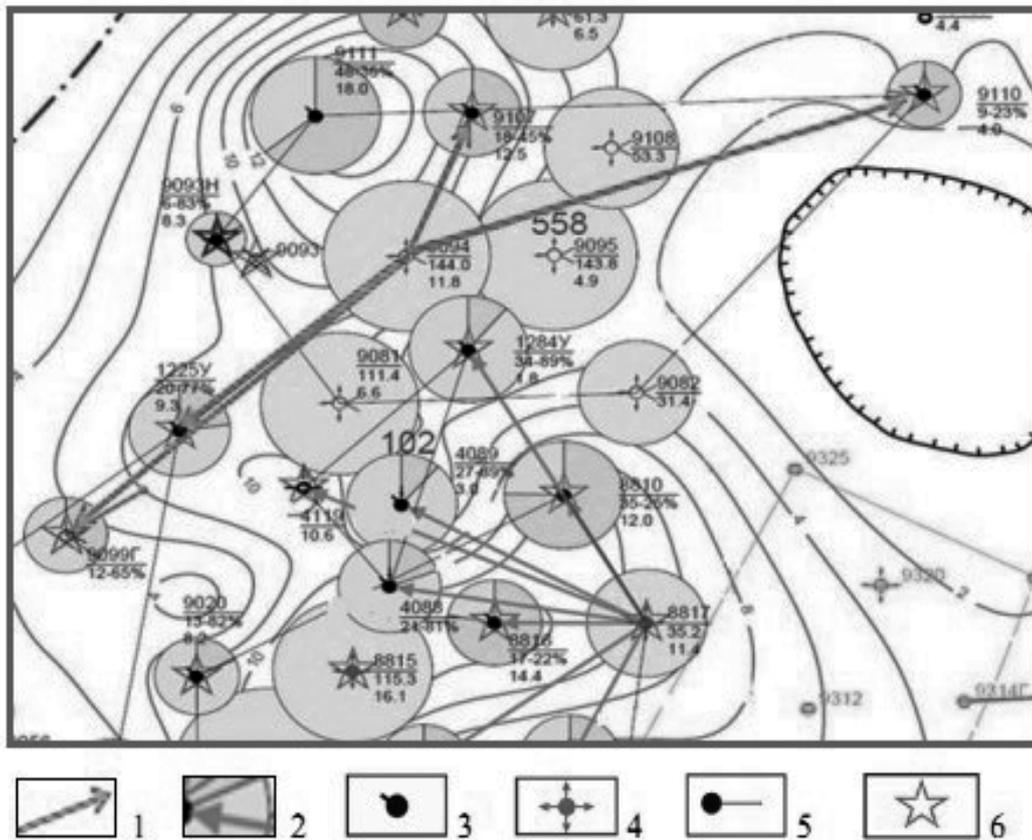


Рис. 3. Схема закачки раствора трассера в нагнетательные скв. 8817, 9094 на карте разработки (пласт ЮВ<sup>1</sup> Ватьеганского месторождения) [7]; 1 – движение жидкости с трассером по плоскости сместителя разрывного нарушения; 2 – движение трассера по пласту; 3 – нефтяные скважины; 4 – нагнетательные скважины; 5 – нефтяные горизонтальные скважины; 6 – скважины с ГРП

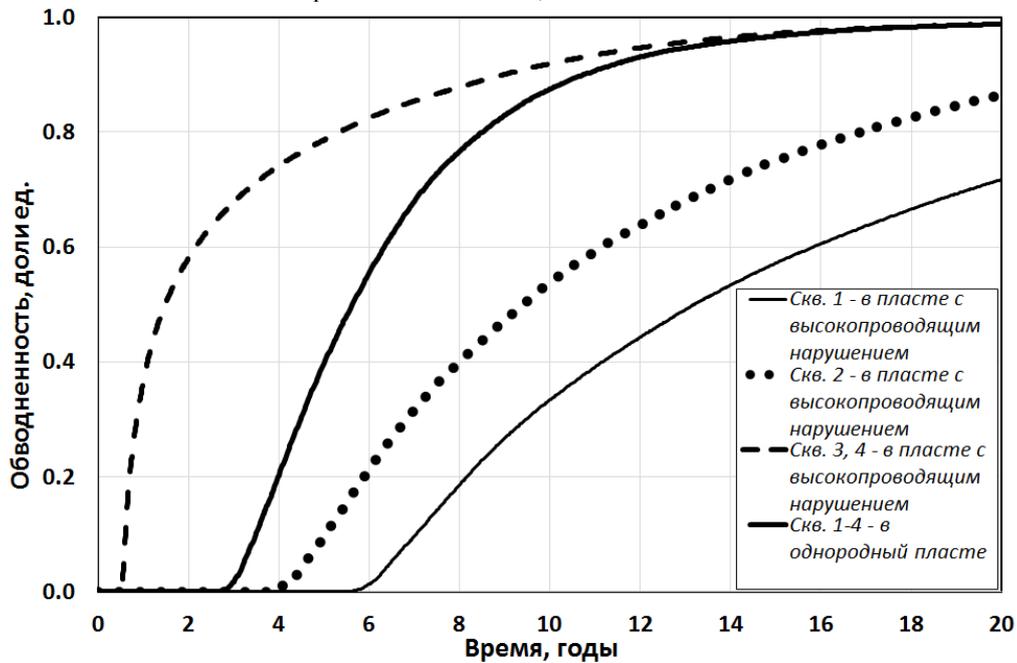


Рис. 4. Кривые изменения обводнённости продукции со временем в скважинах пятиточечного элемента площадной системы разработки в однородном пласте проницаемости 39 мД и при наличии высокопроницаемого нарушения, расположенного на расстоянии 50 м от нагнетательной скважины, при его проницаемости 3900 мД и ширине 25 м

Таблица 2

Времена достижения обводнённости продукции, равной 5 %, в скважинах пятиточечного элемента площадной системы разработки при проницаемости нарушения 3900 мД и его ширине 25 м

Проницаемость пласта, мД	39			
Проницаемость нарушения, мД	3900			
Расстояние до нарушения, м	50	125	250	375
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5 %, между скв. 2 и скв. 1 в пласте с высокопроницаемым нарушением, годы	1.9	1.6	0.5	0.0
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5 %, между скв. 2 и скв. 3 (скв.4) в пласте с высокопроницаемым нарушением, годы	4.0	1.7	0.2	0.0
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5 %, между скв. 1 и скв. 3 (скв. 4) в пласте с высокопроницаемым нарушением, годы	5.9	3.4	0.7	0.0
Время достижения обводнённости продукции, равной 5 %, в скв. 1-4 для однородного пласта, годы	3.1			
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5 %, между скв. 2 в случаях: пласта с высокопроницаемым нарушением и однородного пласта, годы	1.5	0.7	0.2	0.0
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5%, между скв.1 в случаях: пласта с высокопроницаемым нарушением и однородного пласта, годы	3.4	2.4	0.7	0.0
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5%, между скв.3 (скв.4) в случаях: пласта с высокопроницаемым нарушением и однородного пласта, годы	-2.5	-1.0	0.0	0.0

Таблица 3

Времена достижения обводнённости продукции, равной 5%, в скважинах пятиточечного элемента площадной системы разработки в однородном пласте и при наличии высокопроницаемого нарушения различной проницаемости и ширины, расположенного на расстоянии 50 м от нагнетательной скважины

Проницаемость пласта, мД	39					
Проницаемость нарушения, мД	3900			390		
Ширина нарушения, м	15	25	50	15	25	50
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5%, между скв.2 и скв.1 в пласте с высокопроницаемым нарушением, годы	1.5	1.9	2.0	0.1	0.2	0.2
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5%, между скв.2 и скв.3 (скв.4) в пласте с высокопроницаемым нарушением, годы	4.0	4.0	3.8	2.3	2.6	2.5
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5%, между скв.1 и скв.3 (скв.4) в пласте с высокопроницаемым нарушением, годы	5.5	5.9	5.8	2.5	2.8	2.7
Время достижения обводнённости продукции, равной 5%, в скв.1-4 для однородного пласта, годы	3.1					
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5%, между скв.2 в пласте с высокопроницаемым нарушением и в однородном пласте, годы	1.0	1.5	1.5	0.2	0.5	0.6
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5 %, между скв. 1 в пласте с высокопроницаемым нарушением и в однородном пласте, годы	2.6	3.4	3.5	0.4	0.7	0.7
Разница во времени достижения обводнённости продукции, равной 5 %, между скв. 3 (скв. 4) в пласте с высокопроницаемым нарушением и в однородном пласте, годы	-2.9	-2.5	-2.3	-2.1	-2.1	-2.0

При удалении же нарушения от нагнетательной скважины уменьшается различие во временах достижения определённого уровня обводнённости, характер обводнения приближается к однородной среде. Например, если проницаемость нарушения равна 3900 мД и нарушение локализовано на расстоянии 50 м от нагнетательной скважины, то отношение времён достижения 0,5 %-й обводнённости в скв. 2 и 3 составляет 8 раз, а при удалении на 125 м – всего 1,8 раз; при удалении же на 250 м – всего 1,1 раза, т.е. отличие от однородной среды практически несущественно и вряд ли будет возможно на практике.

Разумеется, такие же выводы следуют и из табл. 2 и 3, в которых жирным шрифтом помечены те параметры нарушения, при которых возможно его выявление по разнице времён достижения определённого уровня обводнённости.

Точно также вероятность выявления нарушения снижается, если уменьшается его ширина (сумма внутренней и внешней его частей). Однако если нарушение отстоит от нагнетательной скважины всего на 50–100 м, то его обнаружение возможно, даже при ширине 15 м и проницаемости всего 390 мД, табл. 3.

В целом, можно сказать, что *если: проницаемость нарушения более чем в 10 раз превосходит проницаемость пласта, оно удалено от нагнетательной скважины на расстояние не более 50–100 м, а его ширина более 15 м, то, при тщательном измерении кривой обводнения скважин от времени, наличие нарушения по этим данным может быть выявлено.*

Разумеется, эти данные могут дать информацию и об ориентировке нарушения. Например, если велико расхождение времён достижения, скажем, 5 %-го уровня обводнения по двум направлениям: по линии скв. 1–2 и по линии скв. 3–4, причём по сравнению с однородной средой по линии скв. 3–4 идёт опережение, а по линии скв. 1–2 происходит замедление времён обводнения – то нарушение ориентировано в направлении скв. 3–4.

Аналогичные результаты получены и для варианта двух добывающих скважин, между которыми расположена нагнетательная скважина, а на некотором удалении от неё, между нагнетательной и добывающей скважиной, располагается нарушение.

Результат замедления в обводнении по сравнению с однородным пластом будет контролироваться тремя безразмерными параметрами: отношением проницаемостей пласта и нарушения, отношением величин двух

расстояний – от нагнетательной скважины до нарушения и между скважинами, безразмерным временем, равным реальному времени, умноженному на темп закачки воды в нагнетательной скважине и делённому на поровый объём рассматриваемого участка. Этот объём, в свою очередь, равен произведению пористости на эффективную толщину пласта и на площадь расчётного участка.

*Как показали специальные контрольные расчёты, одинаковое изменение проницаемости пласта, проницаемости нарушения, продуктивности и приёмистости скважин, приводит к пропорциональному изменению масштаба времён достижения определённого уровня обводнённости. Поэтому полученные результаты имеют более общий характер, чем только для рассмотренных численных значений параметров.*

Важную дополнительную информацию может дать и применение трассерного метода исследований [8–10]. Одним из его показателей является время прорыва первой порции трассера к добывающей скважине. Рассмотрим, сугубо качественно, как сказывается наличие нарушения на величину времени прорыва трассера.

Применение трассерного метода считается практически реализуемым, если обводнение скважин превышает 5 % [10]. Рассмотрим ситуацию, когда обводнение скв. 3 и скв. 4 равно 5 %. До скв. 1 и 2 ни вода, ни трассер не дойдут. Распространение воды в этом случае показано на рис. 5.

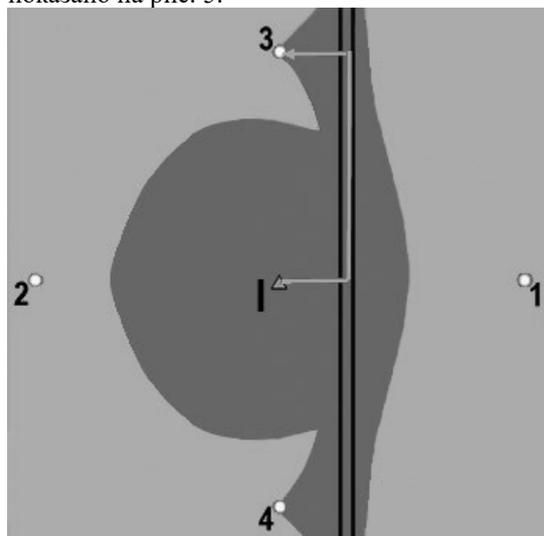
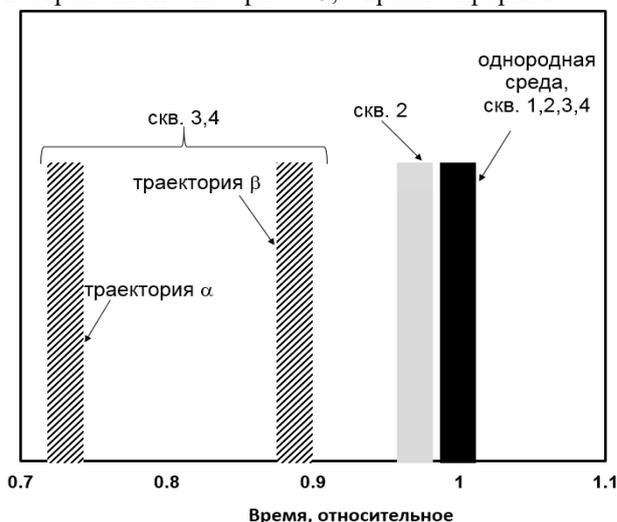


Рис. 5. Примерная линия тока трассера в случае нулевой обводнённости скв. 1 и 2, 5 %-й обводнённости скв. 3 и 4 при наличии высокопроницаемого нарушения проницаемости 3900 мД и ширины 25 м, расположенного на расстоянии 125 м от нагнетательной скважины

Ясно, что при закачке трассера единственным путём его прихода в скв. 3 и скв.4 является показанная на рисунке линия тока через нарушение. Если принять время прорыва первой порции трассера в добывающие скважины в однородном пласте, без нарушения, за 1, то в ситуации, изображённой на рис. 5, время прорыва



трассера к скв. 3 и скв. 4 составит 0,79.

В другом случае, когда обводнённость скв.2 будет равна 5 % (а обводнённость скв. 3 и скв.4 равна 34 %), появляется намного большее количество линий тока воды и трассера, например, как показано на рис. 6 – линия α и линия β.

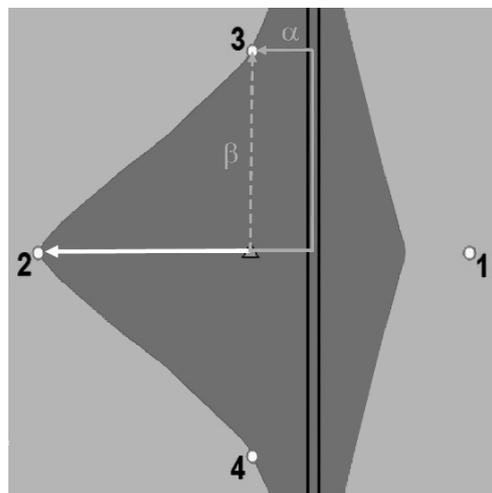


Рис. 6. Время прихода первой порции трассера (слева) в однородном пласте проницаемости 39 мД при наличии высокопроницаемого нарушения (проницаемости 3900 мД и ширины 25 м, расположенного на расстоянии 125 м от нагнетательной скважины) по двум возможным линиям тока, показанным справа; скв. 1 ещё не обводнилась, обводнённость продукции в скв. 2 равна 5 %, а скв. 3 (4) — 34 %

При этом время прихода трассера по линии тока β составит 0,89 относительных единиц, т.е. близко ко времени прорыва в однородной среде, в то время как по линии тока α оно равно 0,73. К скв. 2 в этом случае первая порция трассера подойдёт через относительное время 0,97, т.е. неотличимо от однородной среды.

Следовательно, данные трассерного метода дадут дополнительное подтверждение наличию сильного гидродинамического возмущения, т.е. нарушения.

Однако данные трассерных исследований дают и дополнительную информацию о наличии нарушения и его локализации. Дело в том, что даже в соответствии с полученными простейшими оценками, форма кривой «концентрация трассера – время» для двух рассмотренных моментов обводнения будет различна. Для первого варианта, когда обводняются только скважины 3 и 4, она будет иметь форму сравнительно узкого пика, тогда как во втором варианте эта кривая будет сильно размыта за счёт прихода трассера по более широкому набору линий тока. Это же следует и из теории трассерного метода для случая стационарного течения [11]. При этом набор линий тока будет разный в различные моменты

заводнения, за счёт различий в конфигурации линий тока.

Из этих, достаточно иллюстративных, результатов следует два вывода.

Во-первых, трассерный метод даёт информацию о распределении линий тока, которую данные об обводнённости не содержат. Иными словами, эти два метода обнаружения нарушения и изучения межскважинного расстояния существенно дополняют друг друга [11].

Во-вторых, для обнаружения нарушений на стадии опытно-промышленной эксплуатации, трассерные исследования целесообразно проводить несколько раз, в различные моменты процесса обводнения, используя различные типы трассеров. Тогда информация о степени неоднородности исследуемого участка будет существенно более полной. Определение наличия нарушения и его параметров тогда может быть сделано и количественно, стандартным приёмом нахождения оптимального набора параметров модели, обеспечивающего минимальную величину суммы квадратов отклонения экспериментальных и модельных кривых: обводнения скважин и «концентрация трассера

– время», полученных экспериментальным путём в процессе опытно-промышленной эксплуатации.

## Заключение

1. Наличие высокопроницаемого нарушения может приводить к оттоку нагнетаемой воды за пределы участка, что вызывает резкое замедление продвижения воды к скважинам скважин, отделённых нарушением от нагнетательной скважины. Отсутствие поступления воды (или трассера) в добывающую скважину в течение продолжительного времени не может однозначно интерпретироваться как наличие непроницаемого барьера между нагнетательной и добывающей скважинами.

2. Наличие нарушения вызывает заметное изменение характера обводнения скважин по сравнению с однородной средой. При этом времена достижения определённого уровня обводнения продукции в разных скважинах заметно различаются, как для разных скважин, так и по сравнению с однородной средой.

3. При благоприятном сочетании различных геометрических и фильтрационных параметров пласта и нарушения возможно выявление нарушения и его ориентировки по данным об обводнении скважин и трассерных исследований. Благоприятным является случай, когда проницаемость нарушения более чем в 10 раз превосходит проницаемость пласта, оно удалено от нагнетательной скважины на расстояние не более 50–100 м, а его ширина (включая внутреннюю и внешнюю зоны) более 15 м.

4. Трассерные исследования существенно дополняют данные по характеру обводнения, особенно, если проводятся неоднократно в процессе заводнения с разными типами трассеров.

5. Целесообразно проводить подобный анализ данных по обводнению и трассерных исследований на стадии опытно-промышленной эксплуатации для наиболее раннего обнаружения высокопроницаемых дизъюнктивных нарушений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-07-00676 А.

# Determination of Tectonic Fault in Oil Field Using Well's Flooding Characteristics and Tracer Data

V.A. Yudin, S.G. Volpin, I.V. Afanaskin, N.P. Efimova

**Abstract.** Possibility of detecting high permeable tectonic fault by using well's flooding characteristics and tracer data is investigated. The five-spot pattern was considered working during pilot production operation (all other wells are located far away from the pattern and don't interfere with pattern wells). Production of pattern wells was investigated by computer modelling. It was shown that: 1. If fault is located between injection and production well then water breakthrough to such well might take a lot of time due to the considerable water outflow along the fault; 2. Tectonic fault can be detected using flooding characteristics of pattern production wells in some favorable cases; 3. Tracer tests can provide meaningful additional information especially if are done several times during pilot operation by using different tracers.

**Keywords:** tectonic faults, tracer test, well flooding characteristic.

## Литература

1. Вольпин С.Г., Афанаскин И.В., Юдин В.А., Ефимова Н.П. Возможность определения фильтрационных параметров дизъюнктивных нарушений на нефтяных месторождениях по данным гидродинамических исследований пластов и скважин. – М.: Юдин В.А. – 2018. – 262 с. ISBN 978-5-600-02254-6.
2. Чодри А. /Вольпин С.Г. – ред./ Гидродинамические исследования нефтяных скважин. - М.: ООО Премиум Инжиниринг. – 2011. – 687 с.
3. Азиз Х., Сетгари Э. Математическое моделирование пластовых систем. - М.–Ижевск: ИКИ. - 2004. – 416 С.

4. Кац Р.М., Волгин Е.Р., Афанаскин И.В. Численное моделирование двухфазной фильтрации нефти и воды // Тр. НИИСИ РАН. – 2014. - Т. 4. - № 2. – С. 141-148.
5. Роуч П. Вычислительная гидромеханика. - М.: Мир. - 1980. – 618 с.
6. Афанаскин И.В., Королев А.В., Ялов П.В., Солопов Д.В., Сорокин Ф.Ю. Трёхмерное моделирование заводнения нефтяных пластов с применением разностной схемы «классики» // Нефтепромысловое дело. – 2017. - № 11. – С. 14–20.
7. Лесной А.Н. Исследование влияния дизъюнктивных нарушений в юрских отложениях на строение залежей нефтяных месторождений Когалымского нефтегазоносного района // Дис. на соиск. уч. степ. к.г.-м.н. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. - 2015. – 177 с.
8. Соколовский Э.В., Чижов С.Н., Тренчиков Ю.И. и др. Методическое руководство по технологии проведения трассерных исследований и интерпретации их результатов для регулирования и контроля процесса заводнения нефтяных залежей. - РД 39-014-7428-235-89. – Грозный: СевКавНИПИнефть. – 1989. – 79 с.
9. Хозяинов М.С., Веселов М.В., Иванов В.С., Кузьмина Г.С. и др. Методические рекомендации по количественной интерпретации данных индикаторных исследований межскважинного пространства нефтяных месторождений. – М.: ВНИИ Геоинформсистем. – 1988.
10. Чернокожев Д.А. Совершенствование технологии индикаторных исследований для оценки фильтрационной неоднородности межскважинного пространства нефтяных пластов // Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н. – Дубна: ГОУ ВПО МО «Международный университет природы, общества и человека «Дубна». - 2008. - 141 с.
11. Brigham W.E., Maghsood Abbaszadeh-Dehghani. Tracer Testing for Reservoir Description // Journal of Petroleum Technology. – 1987. – V. 39. – № 5. – P. 519–527.

# Решение обратной задачи восстановления гидропроводности для нефтяного месторождения с учётом геолого-технических мероприятий на скважинах

А. А. Губайдуллин<sup>1,3</sup>, В. П. Косяков<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Тюменский филиал института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, <sup>2</sup> ООО «Юни-КОНКОРД» <sup>3</sup> Тюменский государственный университет.  
[a.a.gubaidullin@yandex.ru](mailto:a.a.gubaidullin@yandex.ru), [hammer-rav@mail.ru](mailto:hammer-rav@mail.ru)

**Аннотация.** В работе предлагается подход, позволяющий при решении обратной задачи восстановления гидропроводности нефтяного пласта использовать формализованные экспертные знания. Проведено исследование возможности разделения эффекта геолого-технических мероприятий на изменение гидропроводности призабойной зоны и на изменение гидропроводности прискважинного пространства. Выполнено тестирование предложенного алгоритма на примере синтетического нефтяного месторождения.

**Ключевые слова:** пластовое давление, гидропроводность, геолого-техническое мероприятие, обратная задача, адаптация, разработка нефтяных месторождений.

## Введение

В настоящее время гидродинамическое моделирование является неотъемлемой частью процесса разработки нефтяных месторождений. Обязательным этапом при создании и поддержании гидродинамической модели в актуальном состоянии является процедура “адаптации”, позволяющая настроить необходимые параметры модели для согласования расчётных и фактических данных. Процедура адаптации гидродинамической модели представляет собой решение обратной задачи, которое в случае сложного многосвязного объекта, каким является нефтяной пласт, как правило, является трудоемким и не единственным в виду плохой обусловленности задачи. Применение упрощённых математических моделей и формализованных экспертных критериев позволяет снизить трудоёмкость задачи.

Одним из основных источников информации о состоянии объекта разработки являются скважины и режимы их работы. Полученные со скважин данные (дебиты, приёмистости, замеры давлений, уровней жидкости и т.д.) участвуют в процессе адаптации модели, интерпретируются алгоритмами и влияют на тот или иной параметр модели. Разработка нефтяного месторождения, как правило, сопровождается проведением технологических мероприятий

на скважинах, что приводит к изменению ряда технологических параметров (расхода жидкости, давления, обводненности продукции и т.д.). Однако однозначная с точки зрения модели интерпретация значения замеренного параметра или его изменения не всегда возможна. Подобная ситуация приводит к снижению обусловленности задачи. Для повышения обусловленности задачи является оправданным использование формализованных экспертных критериев. В качестве критериев могут выступать априорные знания об ожидаемом эффекте от проведённых мероприятий, которые могут заключаться как в ремонте или замене оборудования, так и в проведении действий, направленных на оптимизацию процесса разработки и увеличение количества добываемой нефти. Примером геолого-технического мероприятия (ГТМ) может служить гидроразрыв пласта (ГРП) или применение потокоотклоняющих технологий. Учёт проведённых мероприятий отражается на решении задачи адаптации. Для корректного решения важным является разделение эффекта от проведенного мероприятия - изменение гидропроводности призабойной зоны, прискважинного или межскважинного пространства. Также необходимо учитывать возможное проявление таких процессов, как интерференция соседних скважин, авто-ГРП. Таким образом, учёт техногенных или естественных процессов, происходящих на скважинах,

позволит повысить качество адаптации гидродинамической модели.

### Математическая модель

Для решения обратной задачи адаптации была выбрана двухмерная модель описывающая фильтрацию слабо сжимаемой жидкости. Выбранная модель обладает достаточной сложностью для решения задачи восстановления гидропроводности и позволяет учитывать работу скважин, их взаимовлияние, а также оценивать эффект от геолого-технических мероприятий, проводимых на скважинах. Решение задачи находится численно при помощи однофазного двухмерного гидродинамического симулятора на нерегулярной сетке. Решение для давления находится по неявной схеме, что позволяет использовать крупный шаг по времени. В качестве исходной информации для решения обратной задачи используются промысловые данные.

Алгоритм расчёта является итерационным. Каждая итерация включает в себя два шага. На первом шаге происходит интерполяция гидропроводности в расчетно области согласно уравнению:

$$\begin{aligned} \Delta \sqrt{\sigma} &= 0, \\ \sqrt{\sigma} \Big|_{\Gamma} &= \sqrt{\sigma_i} \Big|_{\Gamma}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\Delta$  - оператор Лапласа,  $\sigma$  - гидропроводность пласта,  $\sigma_i$  - гидропроводность вблизи  $i$ -той скважины,  $\Gamma$  - граница многосвязной расчётной области, которая состоит из внешней границы пласта и внутренних границ вокруг скважин. В отличие от [1, 2] гидропроводность вблизи скважин зависит от времени и может изменяться ступенчато только в указанные временные интервалы.

На втором шаге решается уравнение фильтрации для сжимаемой жидкости [3]:

$$\begin{aligned} \nabla \sigma \nabla P &= \beta^* \frac{dp}{dt} + \delta_q(x, y), \\ \delta_q(x, y) &= \begin{cases} 0, & \text{при } (x, y) \notin \Gamma, \\ q_{i, \Gamma} & \text{при } (x, y) \in \Gamma \end{cases}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $q_{i, \Gamma}$  - расход жидкости на  $i$ -той скважине или через границу  $\Gamma$ ,  $\beta^*$  - эффективная сжимаемость.

Для решения задачи адаптации необходимо определить гидропроводность вблизи скважин. В качестве управляющих параметров выступают забойные давления и дебиты на скважинах, которые могут изменяться в допустимых пределах. В общем

случае в процессе решения происходит минимизация целевой функции  $J$ , которую можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{n=1}^N \left[ a_1 \sum_{i=1}^m (\Delta q_i^n)^2 + a_2 \sum_{i=1}^m (\Delta p w_i^n)^2 + \right. \\ &+ a_3 \sum_{i=1}^k (\Delta p z_i^n)^2 + a_4 \sum_{i=1}^m (\Delta \sigma_i^n)^2 + \\ &\left. + a_5 \sum_{i=1}^m (\Delta w_i^n)^2 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\Delta q_i^n$  - разность фактического и расчётного дебита/приёмности,  $\Delta p w_i^n$  - разность фактического и расчётного забойного давления на  $i$ -той скважине в  $n$ -ый момент времени,  $\Delta p z_i^n$  - разность расчётного значения пластового давления и показания пьезометра,  $w_i^n$  - коэффициент связи с пластом (описывает продуктивность призабойной зоны пласта),  $m$  - количество работающих скважин,  $k$  - количество пьезометрических скважин,  $a_{1-5}$  - весовые коэффициенты. Отклонение значения гидропроводности от среднего значения  $\Delta \sigma_i^n$  и отклонение значения коэффициента связи с пластом от среднего значения  $\Delta w_i^n$  находятся следующим образом:

$$\Delta \sigma_i^n = \sigma_i^n - \bar{\sigma}_i^d, \quad (4)$$

$$\Delta w_i^n = w_i^n - \bar{w}_i^d, \quad (5)$$

где  $\bar{\sigma}_i^d$  и  $\bar{w}_i^d$  - средние значения гидропроводности и коэффициента связи с пластом для  $i$ -той скважины на временном интервале  $d$ . Решение находится с учётом экспертных и технических ограничений накладываемых на параметры:

$$\begin{cases} \sigma_{i, \min} \leq \sigma_i \leq \sigma_{i, \max} \\ w_{i, \min} \leq w_i \leq w_{i, \max} \\ p w_{i, \min} \leq p w_i \leq p w_{i, \max} \\ q_{i, \min} \leq q_i \leq q_{i, \max} \\ p z_{i, \min} \leq p z_i \leq p z_{i, \max} \end{cases}. \quad (6)$$

Решение задачи минимизации  $J$  находится с использованием метода ММА (Method of Moving Asymptotes) [4] и заключается в определении набора таких значений  $\sigma_i$  и  $w_i$ , которые соответствуют минимуму целевой функции  $J$ . При численном решении работа скважины описывается формулой Дюпюи, которую можно представить в виде:

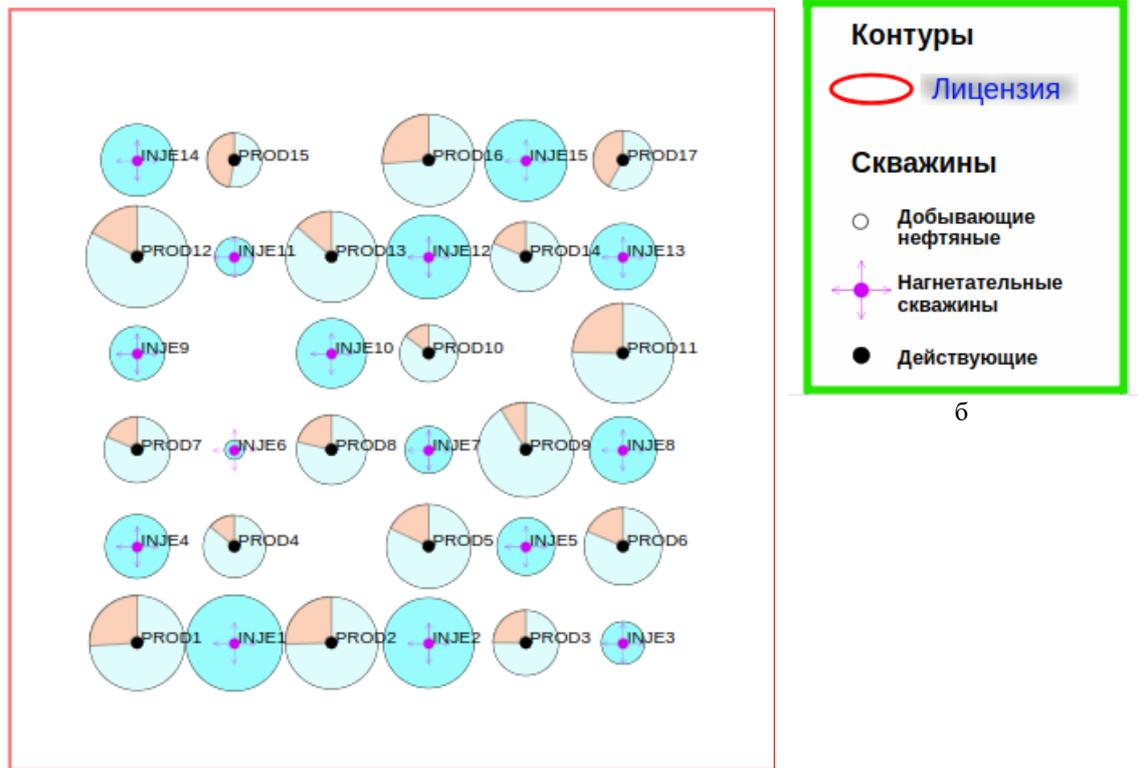
$$q_i = w_i \sigma_i (p_i - p w_i). \quad (7)$$

Введение коэффициента связи с пластом позволяет учитывать такие особенности, как несовершенство вскрытия скважины по

глубине и по разрезу, наличие разрушений породы вблизи призабойной зоны, загрязнение призабойной зоны скважины. В формулу входит произведение  $w_i\sigma_i$ , что приводит к неоднозначности при определении значений  $w_i$  и  $\sigma_i$ . Для однозначного определения необходимо отдельно учитывать изменения, происходящие в призабойной зоне пласта ( $w_i$ ), и изменения, происходящие в межскважинном пространстве ( $\sigma_i$ ). С учётом экспертных знаний о целевом объекте влияния геолого-технического мероприятия, алгоритм получает возможность изменять необходимый параметр в допустимом интервале.

## Тестовый пример решения задачи адаптации для нефтяного месторождения

Тестирование работы алгоритма проводилось на примере синтетического нефтяного месторождения с заданными (исходными) значениями гидропроводности и коэффициента связи с пластом. Схема расположения скважин и условные обозначения представлены на рисунке 1. Месторождение разрабатывается при помощи 17 добывающих и 15 нагнетательных скважин. Период разработки составляет 10 лет. Контур питания был “подключён” по периметру расчетной области.



а

Рисунок 1 - Карта расположения скважин тестового месторождения (а) и легенда (б), круговыми диаграммами отображены значения отборов и закачки на текущий момент времени.

Показатели разработки и режимы работы скважин рассчитывались на коммерческом гидродинамическом симуляторе. На рисунке 1а, круговыми диаграммами обозначена текущая добыча и закачка жидкости на скважинах, размер круговой диаграммы соответствует количеству добываемой и закачиваемой жидкости. Рассчитанные данные осреднялись ежемесячно и использовались в качестве исходной информации в тестируемом алгоритме. Кроме того, для

приближения синтетических данных к реальным в них вносился “шум” до 3-х процентов для дебита и приёмистости и до 5-ти процентов для давления от текущего значения.

Для тестирования алгоритма для нагнетательной скважины INJE15 было смоделировано проведение двух мероприятий: гидравлический разрыв пласта и частичная изоляция перфорированного интервала. Даты проведения этих двух мероприятий делят период разработки на три временных

интервала: 01.2000 - 06.2003, 07.2003 - 06.2005 и 07.2005 - 01.2010. В рамках полученных интервалов гидропроводность вблизи скважины и коэффициент связи с пластом будут стремиться к своим средним значениям.

В результате работы алгоритма были рассчитаны значения гидропроводности

вблизи скважины и значения коэффициента связи с пластом. Сопоставление динамики изменения исходных (синтетических) значений гидропроводности с восстановленными на примере скважины № INJE15 представлено на рисунке 2. В качестве исходных значений выступают значения, рассчитанные из параметров синтетической модели.

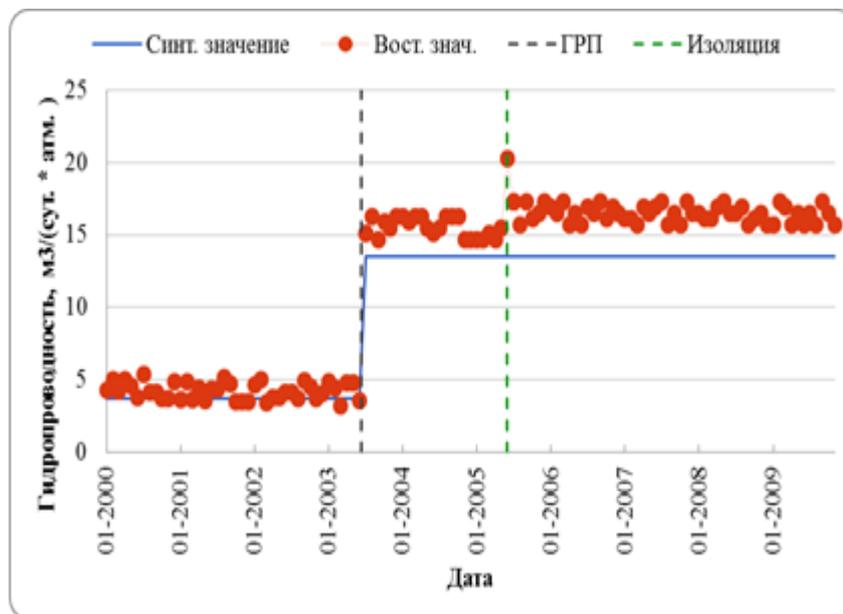


Рисунок 2 - Зависимость от времени исходных и восстановленных значений гидропроводности вблизи скважины INJE15.

Проведение ГРП значительно увеличивает гидропроводность прискважинной области, что на рисунке 2 отражается скачком расчётных и восстановленных значений после даты проведения (07.2003). Моменты проведения мероприятий на рисунках 2 и 3 обозначены вертикальными пунктирными линиями. Как видно из графика восстановленные значения незначительно отличаются от исходных на каждом из интервалов, но с достаточной

точностью повторяют динамику изменения гидропроводности. Таким образом, при анализе восстановленных значений становится возможным выделение интервалов с существенно отличающимися значениями.

Частичная изоляция перфорированного интервала, проведённая 07.2005 в исходной синтетической модели была смоделирована снижением коэффициента связи с пластом для скважины № INJE15. Динамика изменения коэффициента связи с пластом представлена на рисунке 3.

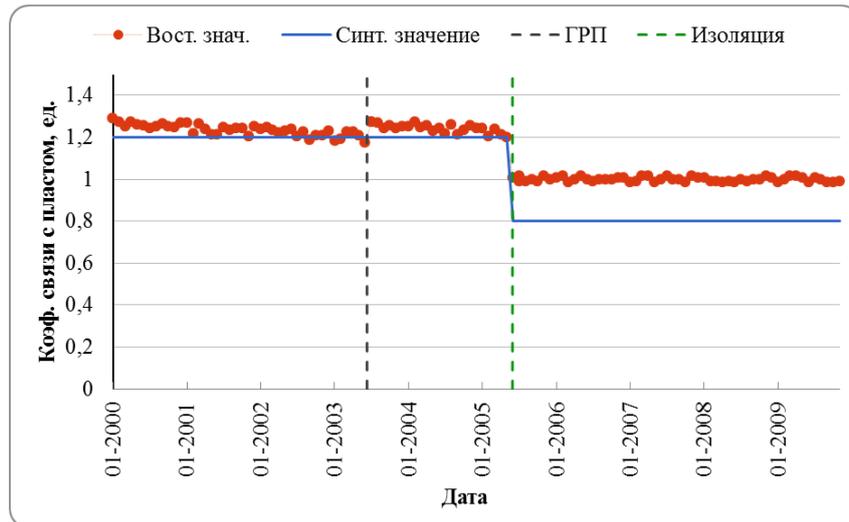


Рисунок 3 - Зависимость от времени исходных и восстановленных значений коэффициента связи с пластом для скважины INJE15.

Восстановленные значения коэффициента связи с пластом также удовлетворительно совпадают с исходными значениями для первых 2-х интервалов. Различие около 20% для третьего интервала является допустимым с учётом наложения эффекта от двух событий. Кроме того при анализе двух графиков можно заметить небольшие “скачки” восстановленных значений после мероприятий. Это свидетельствует о том, что в рассматриваемых случаях присутствует

наложение эффектов от мероприятий.

Для нагнетательных скважин при обработке промысловых данных часто используют графики Холла [5], которые позволяют оценить режим работы нагнетательных скважин. График Холла строится в осях “накопленная приемистость” - “накопленная разница давлений”. Для исследуемой скважины график Холла приведён на рисунке 4.

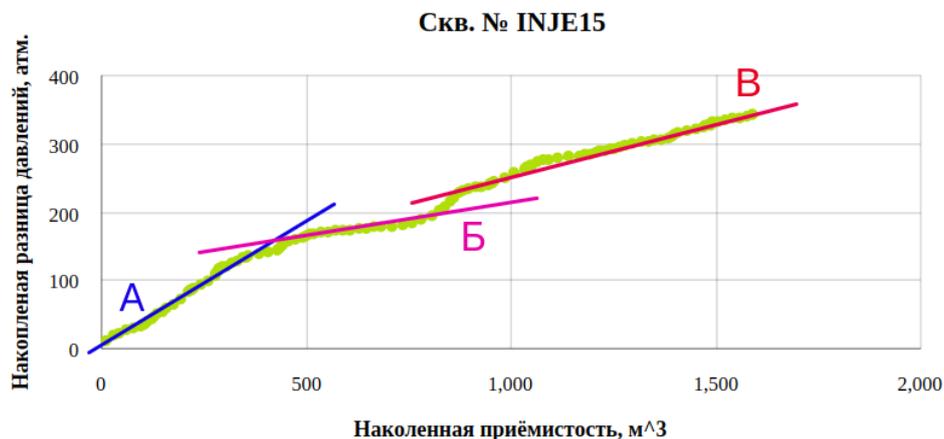


Рисунок 4 - Диагностический график Холла с выделенными интервалами разных режимов работы нагнетательной скважины.

На графике также можно выделить три участка, которые соответствуют выделенным временным интервалам и имеют разный угол наклона (А, Б и В). Изменение угла наклона свидетельствует об изменении режима фильтрации в системе скважина - прискважинное пространство - пласт. В итоге приводит к снижению количества

## Результаты и выводы

В работе предложено развитие алгоритмов и подходов, представленных ранее в [1,2]. Разработанный подход позволяет учитывать экспертную (априорную) информацию, повышая обусловленность задачи, что в конечном итераций и повышает качество настройки

модели. На примере синтетического месторождения было выполнено тестирование предложенного алгоритма. Выделение временных интервалов между мероприятиями на скважине и их учёт в целевой функции позволило выявить эффекты от мероприятий. Таким образом, становится возможным оценить масштаб

влияния мероприятия на призабойную зону и прискважинное пространство. Оценка эффекта от проведённых мероприятий позволит более обоснованно планировать новые мероприятия на скважинах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16-29-15105.

## The solution of the inverse problem of the restoration of hydraulic conductivity for an oil field, taking into account geological and technical measures at wells

A.A. Gubaidullin, V.P. Kosjakov

**Abstract.** The paper proposes an approach that allows the use of formalized expert knowledge when solving the inverse problem of restoring the hydraulic conductivity of an oil reservoir. A study has been carried out on the possibility of separating the effect of geological and technical measures on the change in the hydraulic conductivity of the bottomhole zone and on the change in the hydraulic conductivity of the near-well space. The proposed algorithm was tested on the example of a synthetic oil field.

**Keywords:** reservoir pressure, hydraulic conductivity, geological and technical measures, inverse problem, adaptation, development of oil fields.

### Литература

1. А.А.Губайдуллин, В.П.Косяков. Численно-аналитический алгоритм решения обратной задачи восстановления гидропроводности нефтяного месторождения при использовании промысловых данных. "Вест. кибернетики", (2016), № 3(23), 26–34.
2. А.А.Губайдуллин, В.П.Косяков. Алгоритм решение задачи восстановления гидропроводности нефтяного месторождения в условиях неполноты промысловых данных. "Вест. кибернетики", 2017, № 1(25), 67–73.
3. К.С.Басниев, Н.М.Дмитриев, Р.Д.Каневская, В.М.Максимов. Подземная гидромеханика. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2006.
4. K.Svanberg. The method of moving asymptotes. A new method for structural optimization. "International Journal for Numerical Methods in Engineering", (1987) № 24(2): 359 - 373.
5. R.S.Buell, H.Kazemi, F.H.Poettmann. Analyzing Injectivity of Polymer Solutions with the Hall plot. "SPE Reservoir Engineering", (1990), № 5(01), 41–46.

# Интерпретация гидродинамических исследований горизонтальных скважин при неустановившейся фильтрации

И.В. Афанаскин<sup>1</sup>, С.Г. Вольпин<sup>2</sup>, А.А. Колеватов<sup>3</sup>,  
П.В. Крыганов<sup>4</sup>, Ю.М. Штейнберг<sup>5</sup>

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия

E-mail's: <sup>1</sup>ivan@afanaskin.ru, <sup>2</sup>sergvolpin@gmail.com, <sup>3</sup>sanych1980@gmail.com,  
<sup>4</sup>kryganov@mail.ru, <sup>5</sup>yurash22@gmail.com

**Аннотация.** В работе представлен анализ и обобщение математических моделей для интерпретации гидродинамических исследований горизонтальных скважин методами нестационарной фильтрации. Даны рекомендации и рассмотрены примеры интерпретации реальных промысловых данных.

**Ключевые слова:** горизонтальная скважина, гидродинамические исследования, неустановившаяся фильтрация.

## Введение

В виду истощения ресурсной базы нефтяной промышленности России в разработку все чаще вовлекаются коллекторы с трудноизвлекаемыми запасами. При этом часто используются горизонтальные скважины, например, при:

- ✓ разработке тонких нефтяных оторочек — для увеличения максимального безводного и безгазового дебита нефти (по сравнению с вертикальными скважинами);
- ✓ разработке пластов, насыщенных нефтями с повышенной вязкостью, низкопроницаемых коллекторов и пластов с малой общей толщиной — для увеличения коэффициента продуктивности (по сравнению с вертикальными скважинами);
- ✓ использовании специальных технологий, предусматривающих применение горизонтальных скважин как элемент технологической цепочки добычи, например, парогравитационный дренаж или закачка воздуха «от носка к пятке».

Однако использование горизонтальных скважин в разработке месторождений несет в себе ряд проблем, связанных с их высокой стоимостью, сложностью их бурения, эксплуатации и исследования. Для правильного использования таких скважин необходимо точно знать параметры пласта по каждой конкретной вновь пробуренной скважине. Для

этих целей применяются гидродинамические исследования на неустановившихся режимах работы. Поэтому изучение математических моделей для интерпретации гидродинамических исследований горизонтальных скважин методом нестационарной фильтрации является важным вопросом современной нефтяной промышленности.

## 1. Математические модели для интерпретации исследований

Гидродинамические исследования скважин представляют собой эксплуатацию скважины с заданным дебитом по специальной программе с измерением забойного давления высокоточными манометрами. Интерпретация таких исследований — это решение обратной задачи подземной гидродинамики с целью определения параметров пласта и скважины при известных переменных во времени забойных давлениях и дебитах.

Для интерпретации гидродинамических исследований при неустановившейся фильтрации необходимо получить соответствующие решения уравнения пьезопроводности, связывающие забойное давление и время при постоянном дебите скважины. При этом геометрические параметры скважины и пласта, а также фильтрационно-емкостные параметры будут коэффициентами в этом решении.

Представим горизонтальную скважину как линейный сток в бесконечном по простиранию

пласте, расположенный параллельно непроницаемым кровле и подошве, рис. 1. Проницаемость пласта в направлениях осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  различна, но вдоль осей постоянна. Рассматривается фильтрация однофазной слабосжимаемой жидкости в упругом пласте, описываемая уравнением пьезопроводности [3]. Тогда решение уравнения в общем виде будет иметь следующий вид [12, 17, 18]:

$$P_D(x_D, y_D, z_D, z_{wD}, L_D, t_D) = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \sqrt{\frac{k_h}{k_y}} \times \int_0^{t_D} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{k_h/k_x + x_D}}{2\sqrt{\tau}}\right) \exp\left(\frac{-y_D^2}{4\tau}\right) \times \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \exp(-n^2 \pi^2 L_D^2 \tau) \cos(n\pi z_D) \times \cos(n\pi z_{wD}) \right] \right\} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}} \quad (1)$$

где  $x_D = \frac{2x}{L} \sqrt{\frac{k_h}{k_x}}$  — безразмерная координата

по оси  $X$ ,  $y_D = \frac{2y}{L} \sqrt{\frac{k_h}{k_y}}$  — безразмерная

координата по оси  $Y$ ,  $L_D = \frac{2L}{h} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}$  —

безразмерная длина скважины,  $z_D = \frac{z}{h}$  —

безразмерная координата по оси  $Z$ ,  $k_h = \sqrt{k_x k_y}$  — горизонтальная проницаемость,

$t_D = \frac{0.001055 k_h t}{\phi \mu c_i L^2}$  — безразмерное время,

$P_D = \frac{k_h h}{141.2 q B \mu} \Delta P$  — безразмерное

давление. Остальные обозначения стандартные либо приведены на рис. 1.

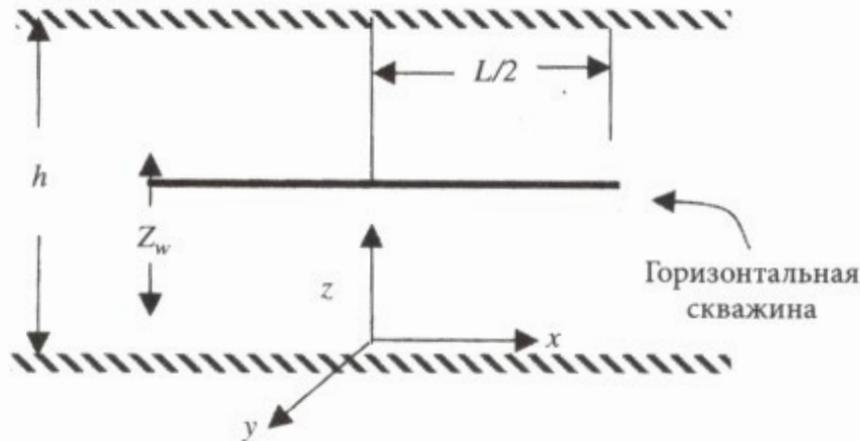


Рис. 1. Пояснение к обобщенному решению [5]

Зависимость (1) описывает давление в произвольной точке пласта. Для давления на забое скважины необходимо принять:

$$P_D = P_{wD} = \frac{k_h h}{141.2 q B \mu} (P_i - P_w),$$

$$z_D = z_{wD} = \frac{z_w}{h}, \quad y_D = r_{wD} = \frac{2r_w}{L} \sqrt{\frac{k_h}{k_y}}. \quad (2)$$

На рис. 2 приведена зависимость безразмерного давления от безразмерного времени для горизонтальной скважины при различных значениях безразмерной длины скважины, построенная по формуле (1). Промежуток времени между пунктирными прямыми AA и BB — это временной интервал

перехода от раннего радиального режима течения к позднему радиальному (псевдорadiaльному) режиму.

Существует большое количество различных математических моделей для интерпретации гидродинамических исследований скважин, которые отличаются строением пласта, условиями на скважине и условиями на внешних границах. Для определения интерпретационной модели и выделения характерных режимов течения используется диагностический график Бурде [1, 6, 7]. Он строится в билогарифмических координатах и представляет собой семейство двух кривых: кривой зависимости изменения забойного давления (верхняя) и ее производной по функции суперпозиции (нижняя) от времени

после изменения дебита скважины. Функция суперпозиции представляет собой функцию времени и дебитов при работе скважины со сложной историей. В общем виде функция суперпозиции записывается, как:

$$X = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{q_j}{q_n} \log \left( \frac{t_n - t_{j-1} + \Delta t}{t_n - t_j + \Delta t} \right) \right]. \quad (3)$$

При работе горизонтальной скважины на неустановившейся фильтрации можно выделить несколько основных режимов течения, рис. 3:

1. Ранний радиальный режим течения (вертикальное радиальное течение) — линии тока перпендикулярны каждой точке поверхности скважины.
2. Полурадиальный режим течения возникает в случае существенного смещения горизонтальной скважины в сторону кровли или подошвы.
3. Линейный режим течения — линии тока параллельны кровле и подошве пласта.

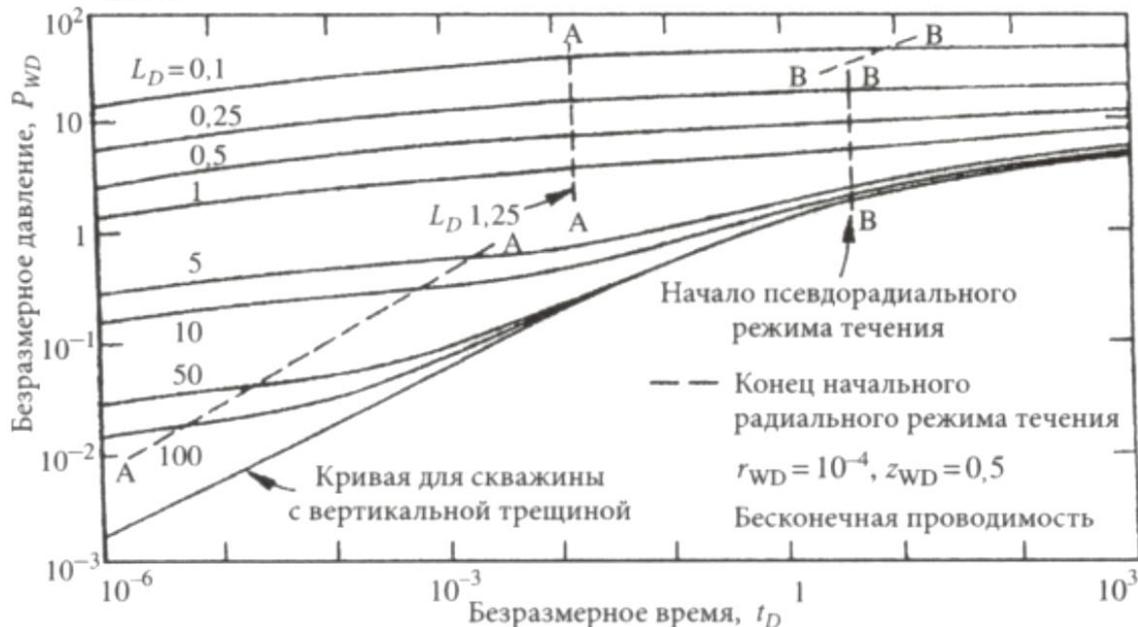


Рис. 2. Зависимость безразмерного давления от безразмерного времени для горизонтальной скважины [5]

Рассмотрим ранний радиальный режим течения.

Время окончания раннего радиального режима течения может быть определено, как [11]:

$$t_{e1} = \frac{190 d_z^{2,095} r_w^{-0,095} \phi \mu c_l}{k_v}, \quad (4)$$

где  $d_z$  — расстояние от кровли пласта до центра горизонтальной скважины.

Продолжительность этого режима может

4. Поздний радиальный (псевдорадиальный) режим течения — радиальный приток жидкости к горизонтальной скважине как к точке.

На рис. 3 также указаны соответствующие режимам течения участки диагностического графика. На практике в зависимости от сочетания параметров пласта и скважины, а также в результате влияния ствола скважины некоторые режимы могут отсутствовать даже при очень больших временах исследования. Под влиянием ствола скважины понимаются несовпадения дебита на устье скважины и на забое в результате расширения или сжатия флюида в стволе скважины и изменения уровня жидкости в стволе скважины. Аналогичный эффект может возникать в результате послепритока — инерционного притока жидкости в ствол скважины после ее остановки.

быть определена по формуле [16]:

$$t_{e1} = \min \left\{ \frac{1800 d_z^2 \phi \mu c_l}{k_v}; \frac{125 L^2 \phi \mu c_l}{k_v} \right\}. \quad (5)$$

Кроме того, принимая  $k_x = k_y = k_h$  и

$$\text{рассчитывая } L_D = \frac{2L}{h} \sqrt{\frac{k_v}{k_h}}, \quad r_{WD} = \frac{2r_w}{L},$$

используя рис. 2 для определения  $t_D$  при

пересечении кривой  $P_{wD}(t_D)$  с прямой AA можно определить длительность этого режима по следующей формуле [18]:

$$t_{el} = \frac{t_D \phi \mu c_t L_D^2}{0.001055 k_h}. \quad (6)$$

Из этого режима течения обычно

определяют анизотропию пласта по проницаемости (отношение проницаемостей в вертикальном и горизонтальном направлениях) и механический скин-фактор.

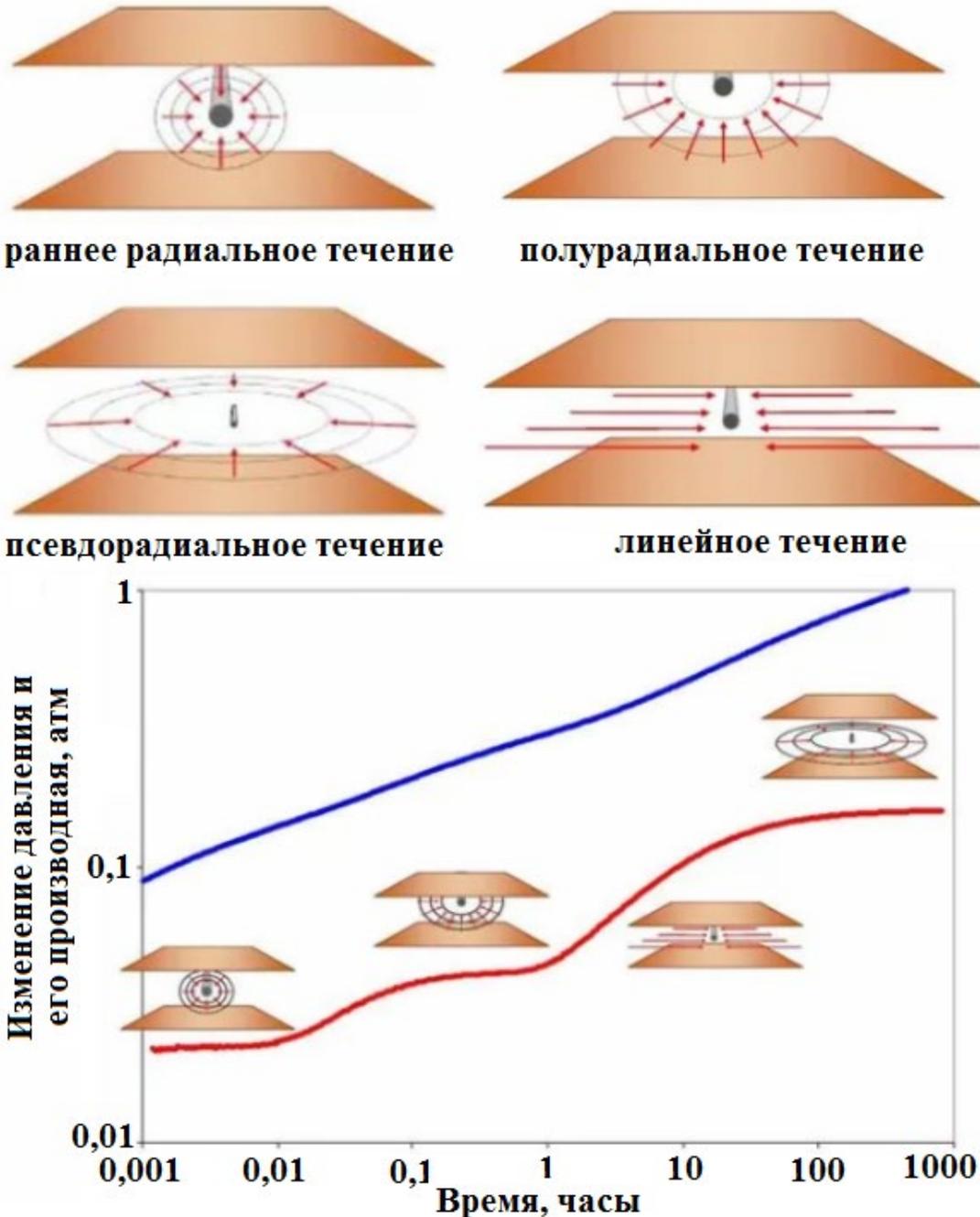


Рис. 3. Режимы течения жидкости к горизонтальной скважине и типовой диагностический график Бурде [2]

При пуске скважины в работу уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{162.6qB\mu}{L\sqrt{k_v k_y}} \left[ \log \left( \frac{\sqrt{k_v k_y}}{\phi \mu c_t r_w^2} t \right) - 3.23 + 0.868S_m \right] \quad (7)$$

где  $S_m$  — механический скин-фактор (скин-фактор загрязнения призабойной зоны).

Уравнение для скин-фактора:

$$S_m = 1.151 \left[ \frac{P_{1hr} - P_w(t=0)}{m_1} - \log \left( \frac{\sqrt{k_v k_y}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.23 \right],$$

$$m_1 = \frac{162.6qB\mu}{L\sqrt{k_v k_y}}. \quad (8)$$

При остановке скважины уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{162.6qB\mu}{L\sqrt{k_v k_y}} \left[ \log \left( \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right) + \gamma_1 \right], \quad (9)$$

где

$$\gamma_1 = \frac{L}{h} \sqrt{\frac{k_v}{k_x}} \left[ \log \left( \frac{k_x}{\phi \mu c_t L^2} \right) - 2.023 \right] - \log(t_p) - \log \left( \frac{\sqrt{k_v k_y}}{\phi \mu c_t r_w^2} \right) + 3.227 + 0.868S_m$$

Механический скин-фактор определяется аналогично (8).

*Рассмотрим линейный режим течения.*

Время окончания линейного режима течения [11]:

$$t_{e2} = \frac{20.8\phi \mu c_t L^2}{k_v}. \quad (10)$$

Время начала линейного режима течения [16]:

$$t'_{e2} = \max \left\{ \frac{4800D_x^2 \phi \mu c_t}{k_x}; \frac{1800D_z^2 \phi \mu c_t}{k_v} \right\}, \quad (11)$$

где  $D_x$  — наибольшее расстояние между скважиной и границей в направлении оси X,  $D_z$  — наибольшее расстояние между скважиной и границей в направлении оси Z.

Время окончания также можно оценить [16]:

$$t_{e2} = \frac{160\phi \mu c_t L^2}{k_x}. \quad (12)$$

Из этого режима течения обычно определяют работающую длину горизонтальной скважины и геометрический скин-фактор.

При пуске скважины в работу уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{8.128qB}{Lh} \sqrt{\frac{\mu}{k_y \phi c_t}} \sqrt{t} - \frac{141.2qB\mu}{L\sqrt{k_y k_v}} (S_z + S_m) \quad (13)$$

где  $S_z$  — псевдо скин-фактор (геометрический скин-фактор) [14]:

$$S_z = \ln \left( \frac{h}{r_w} \right) + 0.25 \ln \left( \sqrt{\frac{k_y}{k_v}} \right) - \ln \left[ \sin \left( 180 \frac{z_w}{h} \right) \right] - 1.838 \quad (14)$$

Уравнение для скин-фактора:

$$S_z = \frac{0.058}{h} \sqrt{\frac{k_v}{\phi \mu c_t}} \frac{P_{1hr} - P_w(t=0)}{m_2} - S_m,$$

$$m_2 = \frac{8.128qB}{Lh} \sqrt{\frac{\mu}{k_y \phi c_t}}. \quad (15)$$

При остановке скважины уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{8.128qB}{hL} \sqrt{\frac{\mu}{k_y \phi c_t}} \left( \sqrt{\Delta t} - \frac{L\sqrt{t_p}}{h} \right) + \frac{141.2qB\mu}{h\sqrt{k_y k_v}} (S_z + S_m) \quad (16)$$

*Рассмотрим поздний радиальный режим течения.*

Время начала позднего радиального режима течения [11]:

$$t_{e3} = \frac{1480L^2 \phi \mu c_t}{k_x} \quad (17)$$

или иначе [5]:

$$t_{e3} = \frac{1230L^2 \phi \mu c_t}{k_v} \quad (18)$$

или еще [16]:

$$t_{e3} = \frac{1480L^2 \phi \mu c_t}{k_x}. \quad (19)$$

Кроме того, принимая  $k_x = k_y = k_h$  и рассчитывая  $L_D = \frac{2L}{h} \sqrt{\frac{k_y}{k_h}}$ ,  $r_{WD} = \frac{2r_w}{L}$ ,

используя рис. 2 для определения  $t_D$  при пересечении кривой  $P_{WD}(t_D)$  с прямой ВВ можно определить длительность этого режима по формуле (6).

Время окончания радиального режима течения для ограниченного пласта [11]:

$$t'_{e3} = \frac{297(L_{x1} + L_{xd})^{2.095} L^{-0.095} \phi \mu c_t}{k_x}, \quad (20)$$

где  $L_{x1}$  — расстояние по оси X до начала горизонтальной скважины,  $L_{xd}$  — расстояние по оси X до конца горизонтальной скважины.

Иначе время окончания радиального режима течения [16]:

$$t'_{e3} = \min \left\{ \frac{2000 \phi \mu c_t (d_x + L/4)^2}{k_x}; \frac{1650 \phi \mu c_t d_y^2}{k_y} \right\}, \quad (21)$$

где  $d_x$  и  $d_y$  — кратчайшее расстояние от горизонтальной скважины до границы в направлении осей X и Y соответственно.

Из этого режима течения обычно определяют общий скин-фактор, проницаемость в горизонтальной плоскости  $k_h = \sqrt{k_x k_y}$  и пластовое давление для случая остановки скважины.

При пуске скважины в работу уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{162.6qB\mu}{h\sqrt{k_x k_y}} \left[ \log \left( \frac{k_x}{\phi \mu c_t L^2} t \right) - 2.023 \right] - \frac{141.2qB\mu}{L\sqrt{k_y k_v}} (S_z + S_m) \quad (22)$$

Уравнение для скин-фактора:

$$S_m + S_z = \frac{1.151L}{h} \sqrt{\frac{k_y}{k_x}} \left[ \frac{P_{1hr} - P_w(t=0)}{m_3} - \log \left( \frac{k_x}{\phi \mu c_t L^2} \right) + 2.023 \right] \\ m_3 = \frac{162.6qB\mu}{h\sqrt{k_x k_y}}. \quad (23)$$

При остановке скважины уравнение неустановившейся фильтрации может быть

записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{162.6qB\mu}{h\sqrt{k_x k_y}} \log \left( \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right). \quad (24)$$

Кроме приведенных на рис. 3 режимов течения возможны еще режимы течения под влиянием границ.

Рассмотрим позднее линейное течение под влиянием двух параллельных границ.

Время окончания позднего линейного режима течения определяется, как [16]:

$$t_{e4} = \max \left\{ \frac{4800 \phi \mu c_t D_x^2}{k_x}; \frac{1800 \phi \mu c_t D_z^2}{k_z} \right\}, \quad (25)$$

где  $D_x$  и  $D_z$  — наибольшие расстояния до границ вдоль соответствующих осей.

По этому режиму определяют расстояние до ближайших границ.

При пуске скважины в работу уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{8.128qB}{2x_e h} \sqrt{\frac{\mu}{k_y \phi c_t}} \sqrt{t} - \frac{141.2qB\mu}{L\sqrt{k_y k_v}} (S_m + S_z + S_x) \quad (26)$$

где  $x_e$  — длина пласта вдоль оси X, рис. 4,  $S_x$  — скин-фактор в результате искривления линий тока из-за влияния границ:

$$S_x = \ln \left( \sqrt{\frac{30.88}{C_f}} \right), \quad (27)$$

где  $C_f$  — фактор формы.

Для центрального расположения скважины по данным [9] можно построить следующую корреляцию:

$$C_f = -4.3493 \left( \frac{L}{2x_e} \right)^3 + 7.8847 \left( \frac{L}{2x_e} \right)^2 - 5.8469 \frac{L}{2x_e} + 3.0901 \quad (28)$$

причем для (28) коэффициент детерминации  $R^2 = 0.9779$  и  $0.1 \leq L/(2x_e) \leq 1$ .

Аналогичную работу можно проделать при другом расположении скважины.

При остановке скважины уравнение неустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{8.128qB}{2x_e h} \sqrt{\frac{\mu}{k_y \phi \mu c_t}} (\sqrt{t_p} - \sqrt{\Delta t}). \quad (29)$$

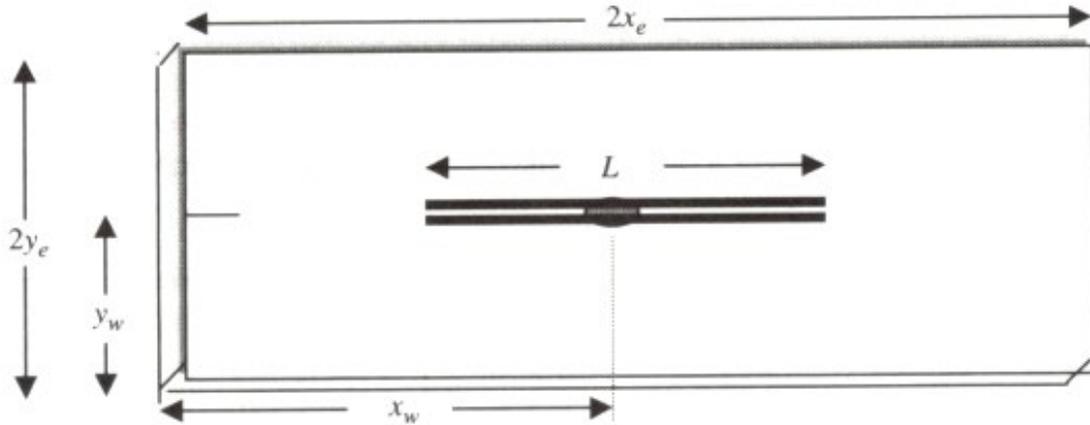


Рис. 4. Расположение горизонтальной скважины в прямоугольной зоне дренирования [5]

Уравнение для скин-фактора:

$$S_x + S_z + S_m = \frac{0.058L}{hk_x} \times \sqrt{\frac{k_v}{\phi \mu c_t}} \frac{P_{1hr} - P_w(\Delta t = 0)}{m_4},$$

$$m_4 = \frac{8.128qB}{2x_e h} \sqrt{\frac{\mu}{k_y \phi \mu c_t}}. \quad (29)$$

В полностью замкнутом пласте установившееся течение отсутствует, так как давление в любой точке пласта после достижения возмущения границ падает в процессе отбора жидкости. Тогда реализуется псевдоустановившийся (псевдостационарный) режим и забойное давление становится линейной функцией времени.

Время начала псевдоустановившегося режима [10]:

$$t_{pss} = \frac{\phi \mu c_t A}{0.000264 k_h} t_{DA}, \quad (30)$$

где  $A$  — площадь дренирования, а  $t_{DA}$  определяют по таблицам из [10].

По этому режиму определяют площадь пласта.

При пуске скважины в работу уравнение псевдоустановившейся фильтрации может быть записано следующим образом:

$$P_w = P_i - \frac{141.2qB\mu}{h\sqrt{k_x k_y}} \left[ \ln\left(\frac{R_e}{L}\right) - AC + S_m + S_z + S_{CA} - C' + \frac{2\sqrt{k_x k_y}}{\phi \mu R_e^2} t \right] \quad (31)$$

где  $R_e$  — эффективный радиус пласта,  $AC = 0.75$  для круговой зоны и  $AC = 0.738$  для прямоугольной зоны,  $S_{CA}$  — геометрический скин-фактор (определяется по таблицам из [10]),  $C'$  — фактор формы (определяется по таблицам из [10]).

Интерпретацию обычно начинают с позднего радиального режима течения. При отсутствии какого-либо режима течения для интерпретации исследований необходимо использовать априорную информацию.

## 2. Примеры интерпретации гидродинамических исследований горизонтальных скважин при неустановившейся фильтрации

Приведенное выше описание режимов течения в горизонтальных скважинах описывает в некотором роде идеализированные случаи. Это связано прежде всего с геометрией скважины, свойствами пласта и положением скважины в толще пласта коллектора. Другими словами, возможность обнаружения на диагностическом графике тех или иных режимов течения зависит от соотношения эффективной толщины и эффективной длины скважины, от удаленности кровли и подошвы пласта от горизонтального участка ствола скважины; от типа границы; от величины влияния ствола скважины (ВСС), а также от длительности самого исследования, т.к. поздний радиальный режим достигается только

в случае, если скважина выглядит как «точечный» источник относительно объема пласта [2]. Для иллюстрации перечисленных особенностей кривых восстановления давления (КВД), регистрируемых в горизонтальных скважинах при исследовании их методом восстановления давления, ниже приведен ряд диагностических графиков в билогарифмических координатах, построенных по результатам нескольких реальных исследований на одном из месторождений Западной Сибири. Интерпретация проведена с помощью ПО Saphir [4].

Участок производной изменения давления на диагностическом графике, построенном по КВД, рис. 5, за период 0.1 часа, вероятно, был искажен ВСС. Участок времени от 1 часа до 100 часов, соответствует линейному режиму течения с последующим выходом на поздний радиальный режим. Т.е. свойства пласта, определенные по результатам такого исследования вполне соответствуют случаю, когда скважина уже может быть представлена как «точечный источник» относительно объема пласта. Аналогичные результаты были получены по итогам исследования скважин

X02, рис. 6), и X03, рис. 7. Резюмируя эти три исследования можно сказать, что участки производных, характеризующих начальное радиальное течение, по приведенным исследованиям однозначно идентифицировать не удалось, т.к. длительность ВСС оказалась больше, однако это не помешало в итоге однозначно определить свойства пластов-коллекторов, вскрытых скважинами.

Результаты интерпретации исследований скважин №№ XX51, X02, X03 приведены в табл. 1.

В качестве иллюстрации необходимости соблюдения длительности исследования ниже приведен диагностический график в билогарифмических координатах по скважине X34, рис. 8. Кроме наличия ВСС по графику производной можно сказать, что длительность исследования не в полной мере позволяет идентифицировать поздний радиальный режим, значит, приведенное совмещение содержит в себе некоторую неопределенность и определение положения участка, характеризующего радиальную фильтрацию, произведено субъективно на основании опыта интерпретатора.

Таблица 1

Результаты интерпретации исследований скважин №№ XX51, X02, X03

Параметр	Скважина № XX51	Скважина № X02	Скважина № X03
Коэффициент влияния ствола $C$ , $\text{м}^3/\text{атм}$	0,14	0,14	0,192
Проницаемость $k$ , мД	320	288	345
Анизотропия $k_z/k_r$ , д.ед.	0,02	0,02	0,016
Эффективная длина горизонтальной секции $L$ , м	580,7	548	461
Скин-фактор механический $S_m$ , безразм.	0	0,014	0,002
Скин-фактор геометрический $S_g$ , безразм.	-6,24	-6,5	-6,53
Скин-фактор полный $S$ , безразм.	-6,32	-6,48	-6,53
Экстраполированное пластовое давление $P_i$ , атм.	249,51	162,69	166,95

На рис. 9 приведен диагностический график по исследованию скважины X04. Так же, как и в предыдущих случаях, ранний радиальный режим «скрыт» ВСС. Линейный и поздний радиальный режимы диагностируются вполне однозначно в периоде от 10 до 300 часов. Затем на графике производной отмечается резкий подъем, указывающий на то, что скважина находится либо рядом с границей пласта, либо испытывает влияние соседней добывающей скважины. При этом исследование можно считать успешным, т.к. влияние границы происходит позже, чем проявление позднего радиального режима,

характеризующего свойства пласта-коллектора в зоне дренирования данной горизонтальной скважины.

Результаты интерпретации исследований скважин №№ X34, X04 приведены в табл. 2.

## Заключение

В работе выделены основные режимы притока жидкости к горизонтальной скважине при неустановившейся фильтрации. Приведено обобщенное решение уравнения пьезопроводности для горизонтальной

скважины. Даны границы режимов притока и формулы для их интерпретации. Даны рекомендации по интерпретации результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин на неустановившихся режимах. Рассмотрено 5 примеров

интерпретации реальных исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН на 2019 год по программе Президиума РАН № 2 (I27), тема (проект) № 0065-2019-0111.

Таблица 2

Результаты интерпретации исследований скважин №№ X34, X04

Параметр	Скважина № X34	Скважина № X04
Коэффициент влияния ствола $C$ , м <sup>3</sup> /атм	0,135	0,118
Проницаемость $k$ , мД		313
Анизотропия $k_z/k_r$ , д.ед.	0,016	0,024
Эффективная длина горизонтальной секции $L$ , м	789	452
Скин-фактор механический $S_m$ , безразм.	0	0
Скин-фактор геометрический $S_z$ , безразм.	-6,92	-5,92
Скин-фактор полный $S$ , безразм.	-6,92	-5,95
Экстраполированное пластовое давление $P_i$ , атм.	238,34	149,04
Расстояние до границ, м.		576, 697

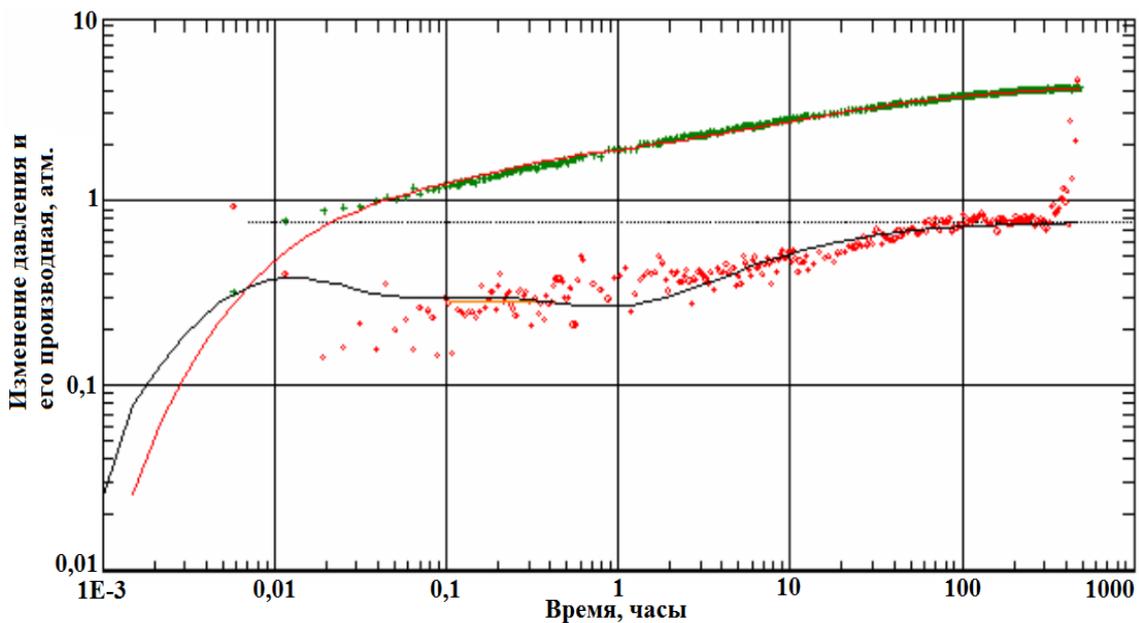


Рис. 5. Диагностический график КВД. Скв. XX51

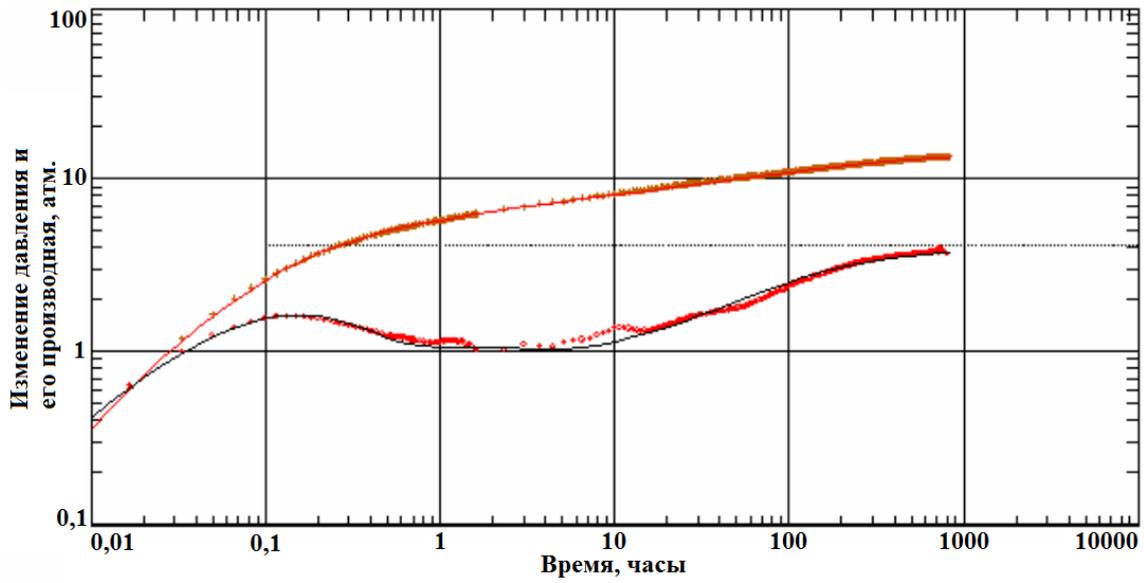


Рис. 6. Диагностический график КВД. Скв. X02

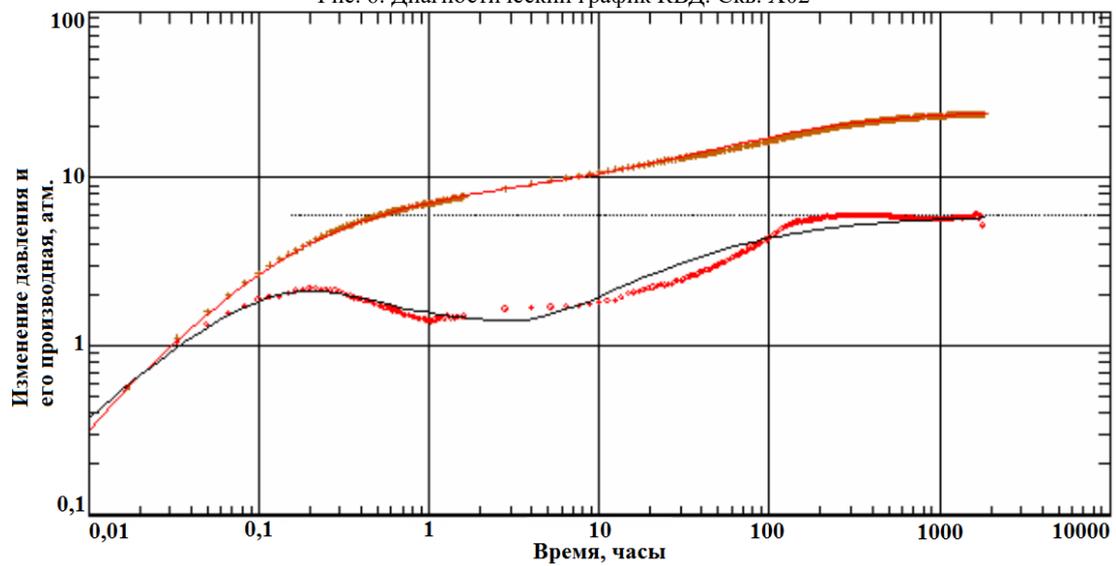


Рис. 7. Диагностический график КВД. Скв. X03

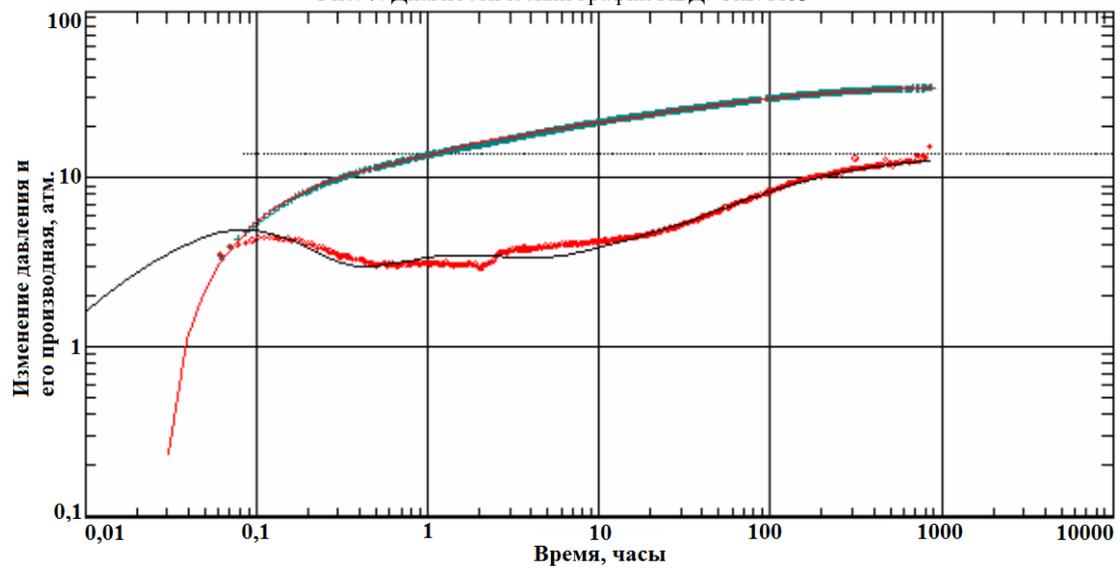


Рис. 8. Диагностический график КВД. Скв. X34

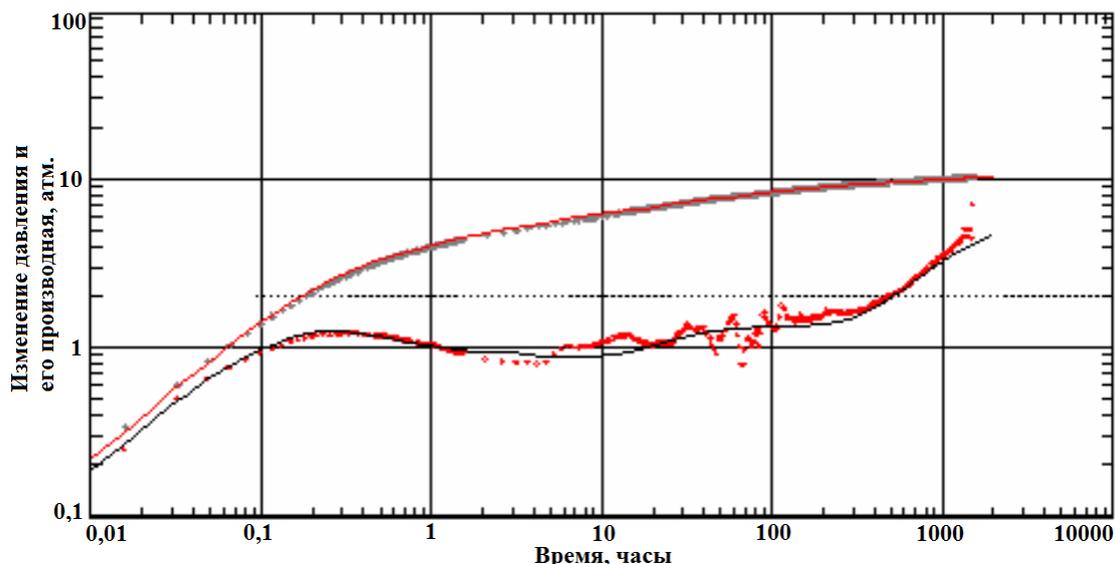


Рис. 9. Диагностический график КВД. Скв. X04

## Interpretation of Horizontal Wells Testing at Unstable Flow

I.V. Afanaskin, S.G. Volpin, A.A. Kolevator, P.V. Kryganov, YU.M. Shteinberg

**Abstract.** The paper presents an analysis and generalization of mathematical models for the interpretation of horizontal wells testing using non-stationary flow methods. Recommendations are given and examples of interpretation of real production data are considered.

**Key words:** horizontal well, well test, transient flow.

### Литература

1. Бурде Д. Интерпретация результатов исследований скважин // Материалы лекций. Petroleum Engineering and Related Management Training Gubkin Academy. Москва, 1994. 109 с.
2. Деева Т.А., Камартинов М.Р., Кулагина Т.Е. и др. Гидродинамические исследования скважин: анализ и интерпретация данных. Томск: ЦППС НД ТПУ, 2009. – 243 с.
3. Кульпин Л.Г., Мясников Ю.А. Гидродинамические методы исследования нефтегазоводоносных пластов. М.: Недра, 1974. – 200 с.
4. Оливье Узе, Дидье Витура, Оле Фьяре. Анализ динамических потоков. Теория и практика интерпретации данных ГДИС и анализа добычи, а также использование данных стационарных глубинных манометров. Capra Engineering, 2009. – 359 с.
5. Чодри А. Гидродинамические исследования нефтяных скважин. М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2001. - 687 с.
6. Bourdet D. et al. A New Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis // World Oil. 1983. May. P. 95–106.
7. Bourdet D. Well Test Analysis: The Use of Advanced Interpretation Models. 2002. - 436 p.
8. Brown K.E. The Technology of Artificial Methods. OK, Tulsa: Penn Well Publishing Co, 1984.
9. Earlougher R.C.Jr. Advances in Well Test Analysis. Monograph Vol. 5 of the Henry L. Doherty Series in Society of Petroleum Engineers of AIME, 1977.
10. Fetkovich M.J., Vienot M.E. Shape Factors, CA, Expressed as a Skin,  $S_{CA}$  // J. Pet. Technol. 1985. May. P. 321-322.
11. Goode P.A., Thambynayagam R.K.M. Pressure Drawdown and Buildup Analysis for Horizontal Wells in Anisotropic Media // SPE Formation Eval. 1987. Dec. P. 683-697.

- 
12. Daviau F., Mouronval G., Bourdarot G. and Curutchet P. Pressure Analysis for Horizontal Wells // SPE 14251. 1985.
  13. Golan M., Whitson C.H. Well Performance. MA, Boston: International Human Resources Development Corporation, 1986.
  14. Mutalik P.N., Godbole S.P. and Joshi S.D. Effect of Drainage Area Shapes on Horizontal Well Productivity // SPE 18301. 1988.
  15. Kuchuk F.J., Goode P.A., Wilkinson D.J. and Thambynayagam R.K.M. Pressure Transient Behavior of Horizontal Wells with and without Gas Cap or Aquifer // SPE 17413. 1988.
  16. Odeh A.S., Babu D.K. Transient Flow Behavior of Horizontal Wells Pressure Drawdown and Buildup Analysis // SPE Formation Eval. 1990. March. P. 7-15.
  17. Clonts M.D., Ramey H.J.Jr. Pressure Transient Analysis for Wells with Horizontal Drainage Holes // SPE 15116. 1986.
  18. Ozkan E., Raghavan R. and Joshi S.D. Horizontal Wells Pressure Analysis // SPE Formation Eval. 1989. Dec. P. 567-575.
  19. Joshi S.D. Argumentation of Well Productivity Using Slant and Horizontal Wells // J. Pet. Technol. 1988. June. P. 729-739.

# Сложно-функциональный блок для измерения температуры кристалла СБИС

Б.Ю. Рогаткин, Ю.Б. Рогаткин

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, [boris240@cs.niisi.ras.ru](mailto:boris240@cs.niisi.ras.ru), [ryb@cs.niisi.ras.ru](mailto:ryb@cs.niisi.ras.ru)

**Аннотация** — Представлен сложно-функциональный блок для измерения температуры микропроцессора с температурным датчиком на основе двух p-n переходов в прямом смещении, работающих при разных плотностях тока. Аналоговый сигнал с датчика температуры обрабатывается с помощью 10-разрядного АЦП и специализированного контроллера. Сложно-функциональный блок для измерения температуры кристалла реализован по технологии КМОП с проектными нормами 65 нм и предназначен для использования в условиях воздействия внешних факторов.

**Ключевые слова** — измерение температуры, надежность СБИС, аналого-цифровой преобразователь.

## 1. Введение

Важной задачей при разработке СБИС является повышение надежности ее работы в различных условиях эксплуатации. Одними из основных показателей условий работы является температура кристалла СБИС. За рубежом проблеме мониторинга температуры в различных точках кристалла микросхемы уделяют большое внимание, эта проблема широко отражена в литературе, например, [1, 2]. Локальный перегрев приводит к снижению надежности работы СБИС, происходит ухудшение электрических характеристик СБИС, прежде всего снижение быстродействия, увеличивается вероятность функционального отказа. Увеличение температуры приводит к увеличению энергопотребления, что негативно сказывается на времени работы от автономного источника питания.

## 2. Структура сложно-функционального блока

Данная работа посвящена задаче разработки простой и эффективной системы измерения температуры кристалла СБИС на основе сложно-функционального блока (СФ-блока), предназначенного для изготовления по КМОП технологии с проектными нормами 65 нм.

В адресном пространстве СБИС микропроцессора СФ-блок измерения температуры кристалла СБИС имеет

управляющие регистры, предназначенные для записи конфигурации блока и чтения измеряемых параметров температуры.

На рисунке 1 приведена упрощенная структурная схема СФ-блока измерения температуры кристалла СБИС. Блок содержит схему нормализации, на вход которой поступает сигнал с датчика температуры. Назначение схемы нормализации состоит в масштабировании входных сигналов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) к его полной шкале.

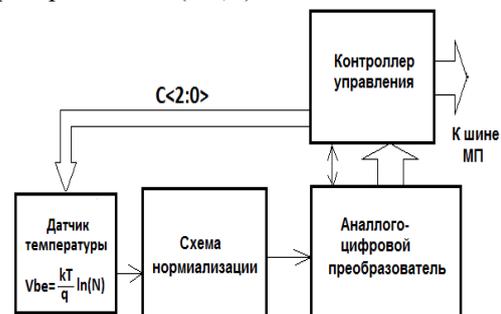


Рис. 1. Структурная схема блока измерения температуры.

Таким образом, схема нормализации обеспечивает максимально возможное, с учетом используемого АЦП, качество сигнала. Качество аналогового сигнала с наложенными на него шумами определяется отношением сигнал/шум на входе системы сбора данных и напрямую связано с разрядностью АЦП.

В качестве датчика температуры используется аналоговый датчик,

основанный на разности напряжений база-эмиттер ( $\Delta V_{be}$ ) двух биполярных транзисторов с коллектором на подложку, работающих при разных плотностях тока. При использовании ( $\Delta V_{be}$ ) вместо  $V_{be}$  ток  $I_s$  - обратный ток насыщения в уравнении Шокли [3] исключается:

$$\Delta V_{be1} = V_{be1} - V_{be2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{I_s} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{NI_s} = \frac{kT}{q} \ln(N), \quad (1)$$

где  $N$  - соотношение площадей транзисторов.

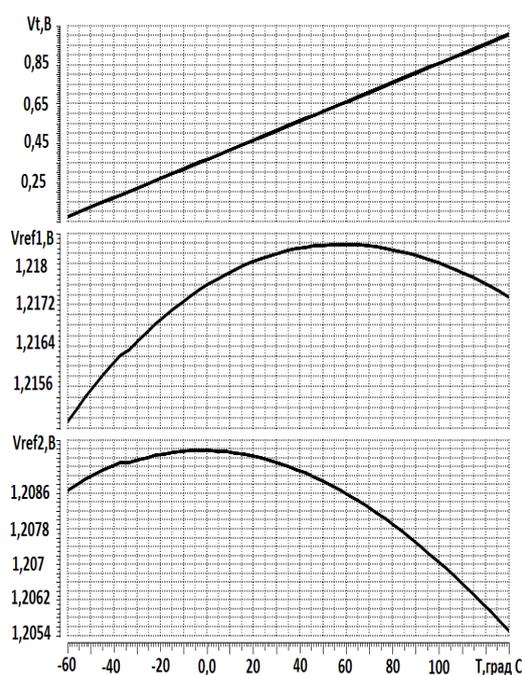


Рис. 2. Температурные зависимости выходного напряжения аналогового датчика температуры после схемы нормализации ( $V_t$ ) и опорного напряжения внутреннего источника ( $V_{ref1}$ ,  $V_{ref2}$ )

В датчике температуры имеется возможность цифрового управления температурной зависимостью выходного напряжения сигналами из контроллера управления (сигналы  $C_{<2:0>}$ ). Это используется для минимизации влияния особенностей технологического процесса изготовления СБИС на выходной сигнал температурного датчика в конкретном случае, а также для линеаризации передаточной характеристики СФ-блока для измерения температуры СБИС. В качестве аналого-цифрового преобразователя используется 10-разрядный АЦП поразрядного уравнивания [4]. На рисунке 2 представлены температурные зависимости сигнала датчика температуры  $V_t$  на выходе схемы нормализации и двух

вариантов зависимости опорных напряжений внутреннего источника опорного напряжения от сигнала управления контроллера  $C_i$ :  $V_{ref1}$  для  $C_2=C_0=1$ ,  $C_1=0$ ;  $V_{ref2}$  для  $C_2=C_1=1$ ;  $C_0=0$ .

Приведенные на рисунке 2 зависимости могут быть аппроксимированы полиномами второго порядка вида:

$$\begin{aligned} V_t(T) &= a_0 + a_1 \times T + a_2 \times T^2; \\ V_{ref}(T) &= b_0 + b_1 \times T^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражение, описывающее передачу температуры в выходной код, будет следующим:

$$V_t(T) \times K_{АЦП}(V_{ref}) = N_{изм}, \quad (3)$$

где  $N_{изм}$  - выходной код СФ-блока,  $K_{АЦП}$  - коэффициент передачи АЦП, линейно зависящий от опорного напряжения  $V_{ref}$ .

### 3. Основные характеристики

Для максимальной линеаризации передаточной характеристики СФ-блока (3) рационально максимально скомпенсировать влияние вторых производных из выражения (2). Это достигается путем выбора управляющих сигналов  $C_i$ .

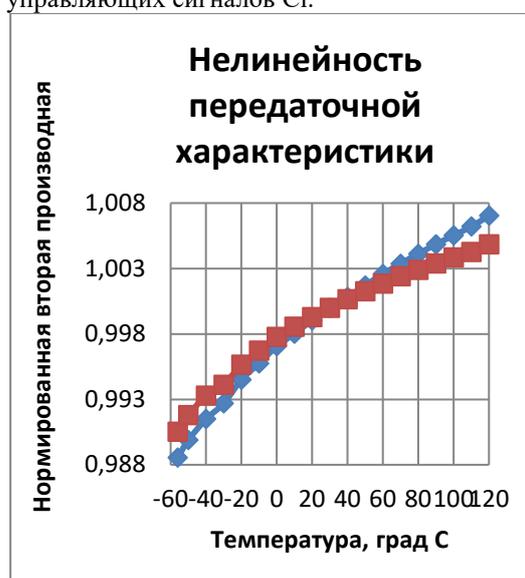


Рис.3. Температурная зависимость второй производной передаточной характеристики СФ-блока для разных значений управляющих сигналов контроллера

На рисунке 3 показано влияние управляющих сигналов  $C_i$  на нелинейность передаточной характеристики АЦП.

Диапазон изменения входного сигнала АЦП при изменении температуры от минус 60 до плюс 130 градусов Цельсия составил

(50 ÷ 1050) мВ при полной шкале АЦП 1200 мВ.

Моделирование проводилось для объемной КМОП технологии с нормами 65 нм с учетом экстрагированных паразитных параметров конструкции. На рисунке 4 приведена передаточная характеристика рассматриваемой системы измерения температуры в полном объеме.

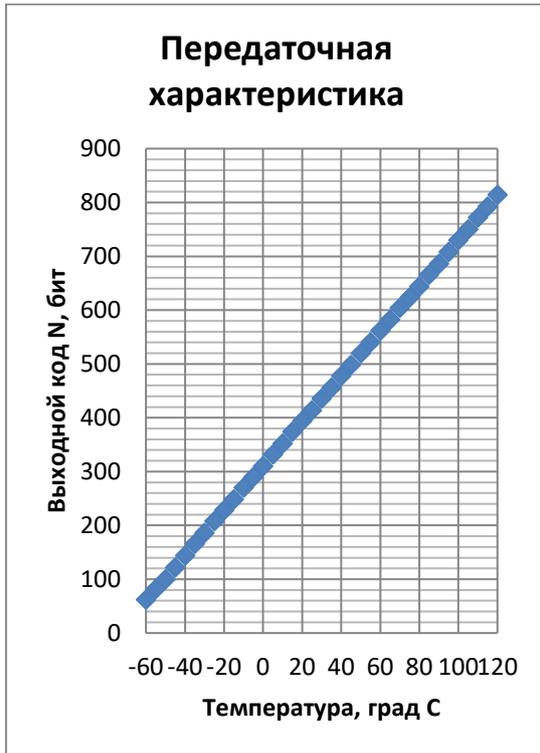


Рис. 4. Зависимость выходного кода СФ-блока от температуры СБИС.

Для выработки цифрового сигнала АЦП требуется 10 периодов частоты синхронизации  $F_{CLK}$ . Частота синхронизации выбирается из условия обеспечения допустимой динамической погрешности, учитывая, что схема выборки и хранения на входе АЦП отсутствует, а сигнал изменяется достаточно медленно. Для оценки величины частоты выработки цифрового сигнала ( $F_S = F_{CLK}/10$ ) можно воспользоваться известной формулой [5]:

$$h \leq \Delta X_{дин} = \max \left\{ \frac{dV_{вх}}{dt} \right\} \frac{10}{F_{CLK}},$$

где  $h$  — значение младшего значащего разряда,  $\Delta X_{дин}$  — динамическая погрешность второго рода, а  $\max \{dV_{вх}/dt\}$  — максимальная скорость изменения входного сигнала АЦП.

Для выработки цифрового сигнала АЦП требуется 10 периодов частоты синхронизации  $F_{CLK}$ . Частота синхронизации

выбирается из условия обеспечения допустимой динамической погрешности, учитывая, что схема выборки и хранения на входе АЦП отсутствует, а сигнал изменяется достаточно медленно. Для оценки величины частоты выработки цифрового сигнала ( $F_S = F_{CLK}/10$ ) можно воспользоваться известной формулой [4]:

$$h \leq \Delta X_{дин} = \max \left\{ \frac{dV_{вх}}{dt} \right\} \frac{10}{F_{CLK}},$$

где  $h$  — значение младшего значащего разряда,  $\Delta X_{дин}$  — динамическая погрешность второго рода, а  $\max \{dV_{вх}/dt\}$  — максимальная скорость изменения входного сигнала АЦП.

#### 4. Методика измерения температуры

Для измерения температуры необходимо произвести калибровку датчика. Результаты будут правомерны для всех кристаллов с данной пластины. Методика калибровки следующая:

1. Установить температуру СБИС, соответствующую наименьшей из рабочего диапазона, например, минус 60 С°. Определить значения выходного кода  $N_{-60}$ .
2. Установить температуру СБИС, соответствующую наибольшей из рабочего диапазона, например, плюс 130 С°. Определить значения выходного кода  $N_{+130}$ .
3. Выбрать коэффициенты  $C \langle 2:0 \rangle$  для минимизации нелинейности передаточной характеристики. Повторить пп. 1,2.

Значение температуры  $T_{изм}$  для измеренного значения кода  $N_{изм}$  вычисляется по формуле:

$$T_{изм} = T_1 \times \frac{N_{T_2}}{N_{T_2} - N_{T_1}} - T_2 \times \frac{N_{T_1}}{N_{T_2} - N_{T_1}} + \frac{T_2 - T_1}{N_{T_2} - N_{T_1}} \times N_{изм}, \quad (5)$$

где выходной код  $N_{T_1}$  при температуре  $T_1$ , выходной код  $N_{T_2}$  при температуре  $T_2$ .

Тогда в общем виде выражение (5) запишется как:

$$T_{изм} = A + K_n \times N_{изм}, \quad (6)$$

где  $K_n$  — эквивалентный коэффициент передачи, определяемый коэффициентом передачи температуры на выход схемы нормализации и коэффициентом передачи АЦП.

При  $T_1 = -60$  С°,  $T_2 = +130$  С° для разработанного СФ-блока в выражении (5)  $A = -74,84$ ;  $K_n = 0,239$ . Рассчитанная с помощью выражения (6) погрешность измерения температуры кристалла СБИС приведены на рисунке 5.

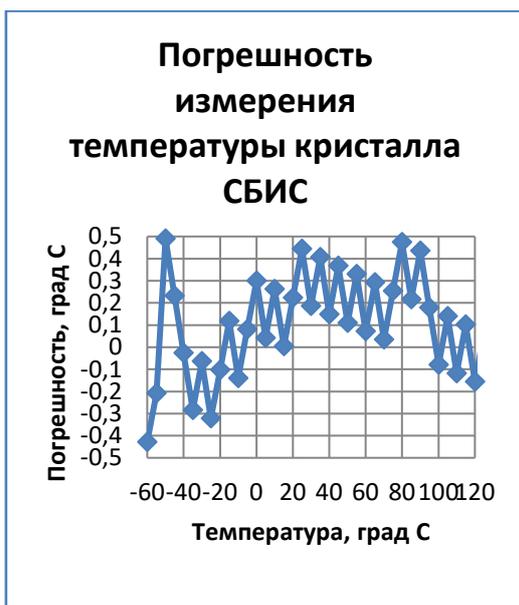


Рис. 5. Зависимость погрешности измерений системой измерений температуры кристалла СБИС в диапазоне от -60 до +130 градусов Цельсия.

Как видно, в этом случае расчетная погрешность не превышает  $\pm 0,5 \text{ C}^\circ$ . Общий вид топологии представлен на рисунке 6. Размеры блока составляют 312 x 324 мкм. Конструктивно СФ-блок может быть, как вставлен в общее кольцо площадок СБИС, так использоваться и отдельно, вне упомянутого кольца.

## 5. Контроллер СФ-блока

Контроллер СФ-блока предназначен для управления СФ-блоком для измерения температуры в составе СБИС микропроцессора, а также имеет в своем составе модуль управления частотой ядра СБИС. Интеграция контроллера в СБИС реализована с помощью программной модели на основе регистрового файла. Регистровый файл контроллера доступен по внутренней шине стандарта AXI.

Контроллер имеет возможности контроля допустимого диапазона температуры СБИС микропроцессора, формирование сигнала прерывания при выходе температуры за пределы заданного диапазона. Возможность получения текущих данных по температуре СБИС. Контроль параметров, заданных в конфигурации контроллера, осуществляется в реальном режиме времени, параллельно с основной работой СБИС. Являясь частью СБИС

контроллер, в зависимости от измеряемых значений может управлять частотой синхронизации ядра микропроцессора, избегая тем самым сбоев, связанных с локальным перегревом или своевременно сообщить о выходе за заданный диапазон измерений через прерывание в системном контроллере СБИС.



Рис. 6. Общий вид топологии СФ-блока.

Конфигурационные регистры контроллера, доступные как для записи, так и для чтения, предназначены для задания режима и диапазона измерений, разрешения прерываний от контроллера, разрешения автоматического снижения частоты работы ядра СБИС, для задания режима усреднения измерений по нескольким выборкам. Программное преобразование кода АЦП в абсолютное значение температуры происходит на основе калибровочных значений по формулам (5), (6), полученных при аттестации микросхемы и загружаемых из внешней памяти в конфигурационные регистры контроллера. Текущие результаты измерений в виде 10-разрядного двоичного кода записываются в статусные регистры, доступные только для чтения. Также в статусных регистрах хранится информация о причинах возникновения прерывания от контроллера, нарушениях границ диапазонов измерений, коды событий, связанные с текущим режимом работы СБИС в температурном диапазоне, флаг работы на штатной частоте СБИС. В режиме однократных измерений контроллер, усредняя значения кода с АЦП, обновляет статусный регистр измерений.

## 6. Заключение

Изложенные выше результаты были использованы при разработке систем мониторинга СБИС управляющего микропроцессора с низким

энергопотреблением для встраиваемых применений и СБИС микропроцессора космического назначения. Публикация подготовлена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме №0065-2019-0008.

# Hard IP-Core for measuring the temperature of Crystal VLSI

**B. Y. Rogatkin, Y. B. Rogatkin**

**Abstract** — Hard IP-Core for measuring the temperature of a microprocessor with a temperature sensor based on two p-n transitions in direct displacement operating at different current densities is presented. The analog signal from the temperature sensor is processed using a 10-bit ADC and a dedicated controller. Complex-functional unit for measuring the temperature of the crystal is implemented by CMOS technology with design standards of 65 nm and is designed for use under the influence of external factors.

**Keywords** — temperature measurement, VLSI reliability, analog-to-digital converter.

## Литература

1. Y. Leng, G. Zhao, Q. Li, C. Sun, and S. Liu A High Accuracy Signal Conditioning Method and Sensor Calibration System for Wireless Sensor in Automotive Tire Pressure Monitoring System . Proc. WiCOM. Sept. (2007), 1833–1837.
2. N. Verma, and A. Chandrakasan A 256 kb 65 nm 8T Subthreshold SRAM Employing Sense-Amplifier Redundancy . IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 43 (2008), № 1, 141–149.
3. Я.А.Федотов. Основы полупроводниковых приборов. Учебное пособие.- изд.2, испр. и доп.М., Советское радио, 1969.
4. Rudy van de Plassche. CMOS Integrated Analog to Digital and Digital to Analog Converters. – Boston, Kluwer Academic Publishers, 2003.
5. Stenin V.Ja. Analogo-cifrovye sistemy. [Uchebnoe posobie], MIFI, 1990.

# Обобщенная модель радиационно-индуцированного тока поверхностной рекомбинации в биполярных транзисторах

В.С. Першенков, А.И. Жуков, В.А. Фелицын, А.С. Бакеренков, В.В. Беляков, В.А. Телец, А.С. Родин

НИЯУ МИФИ, [VSPershenkov@mephi.ru](mailto:VSPershenkov@mephi.ru), [zhukovai1996@mail.ru](mailto:zhukovai1996@mail.ru), [as\\_bakerenkov@list.ru](mailto:as_bakerenkov@list.ru), [VAFelitsyn@mephi.ru](mailto:VAFelitsyn@mephi.ru),  
[VATelets@mephi.ru](mailto:VATelets@mephi.ru), [VVBelyakov@mephi.ru](mailto:VVBelyakov@mephi.ru), [ASRodin@mephi.ru](mailto:ASRodin@mephi.ru)

**Аннотация:** На основе учета зарядового состояния радиационно-индуцированных поверхностных ловушек, положения эффективного уровня Ферми, определяющего сечение захвата ловушек, и данных о накоплении объемного заряда и поверхностных состояний проведен расчет тока поверхностной рекомбинации в биполярных транзисторах при накоплении полной дозы ионизирующего излучения.

**Ключевые слова:** эффективный уровень Ферми, радиационно-индуцированный ток поверхностной рекомбинации, биполярные приборы.

## 1. Введение

Срок службы бортовых электронных систем космических аппаратов определяется деградацией под действием ионизирующего излучения характеристик используемой электронной компонентной базы.

Для компонентной базы систем, в состав которой входят биполярные транзисторы, операционные усилители, компараторы и БиМОП микросхемы.

Основной причиной деградации является образование дополнительных радиационно-индуцированных ловушек на границе раздела «окисел – полупроводник» под действием дозы ионизирующего излучения [1]-[8], что вызывает увеличение тока поверхностной рекомбинации.

Интерес к дозовым эффектам в биполярных приборах не ослабевает до настоящего времени, в связи с эффектом низкой интенсивности [9].

В настоящей работе расчет тока поверхностной рекомбинации выполнен с учетом заряда поверхностных состояний на основе расчета положения эффективного уровня Ферми и данных о накоплении объемного заряда и радиационно-индуцированных ловушек с использованием конверсионной модели, которая учитывает взаимодействие электронов кремниевой подложки с положительным зарядом в окисле [10],[11].

## 2. Ток поверхностной рекомбинации

Ток поверхностной рекомбинации получается интегрированием рекомбинационных потерь по всей поверхности пассивной базовой области под окислом:

$$I_s = q \int_S U_s dS, \quad (1)$$

где  $q$  – заряд электрона;  $U_s$  – скорость поверхностной рекомбинации;  $S$  – площадь пассивной базы под защитным окислом.

Скорость поверхностной рекомбинации изменяется по мере распространения инжектированных носителей вдоль поверхности базовой области. Для оценки максимальной величины тока базы (наихудший случай) можно использовать величину скорости рекомбинации на границе эмиттерного перехода, где концентрация инжектированных носителей максимальна. В этом случае соотношение (1) можно переписать

$$I_s = q U_s(0) S, \quad (2)$$

где  $U_s(0)$  – значение скорости поверхностной рекомбинации на границе перехода эмиттер-база.

## 3. Скорость поверхностной рекомбинации

При воздействии ионизирующего излучения в запрещенную зону кремния вводятся радиационно-индуцированные поверхностные состояния, которые приводят к росту рекомбинационных потерь.

На рис.1 пунктиром показано возможное энергетическое распределение ловушек в запрещенной зоне для  $p$ -базы  $n^+$ - $p$ - $n$  транзистора. Сплошные линии соответствуют некоторым эффективным уровням залегания акцепторных и донорных ловушек. В данной работе используется обычное предположение о том, что в верхней половине запрещенной зоны ловушки имеют акцепторную природу, а в нижней половине – донорную [2]. Заполненная электроном акцепторная ловушка отрицательно заряжена, в свободном состоянии акцепторная ловушка нейтральна. Донорная ловушка в свободном состоянии положительно заряжена, а в занятом электроном состоянии нейтральна.

Сечение захвата ловушки зависит от ее зарядового состояния. Нейтральная ловушка имеет сечение захвата порядка размера атома, т.е. около  $10^{-15}$  см<sup>2</sup>. Сечение захвата заряженной ловушки для носителей противоположного знака, вследствие кулоновского притяжения, увеличивается на один-два порядка и может составлять  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  см<sup>2</sup>. Для носителей одного знака с ловушкой, вследствие кулоновского отталкивания, сечение уменьшается до  $10^{-17}$  -  $10^{-16}$  см<sup>2</sup>. Зарядовое состояние ловушек зависит от их энергетического положения относительно эффективного уровня Ферми  $E_{Feff}$  [8]: выше уровня Ферми ловушки свободны, ниже – заняты электронами.

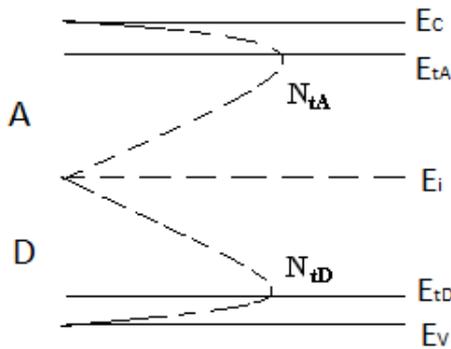


Рис.1. Энергетическое расположение поверхностных акцепторных (A)  $N_{tA}$  и донорных (D)  $N_{tD}$  ловушек в запрещенной зоне кремния ( $E_C$  – уровень зоны проводимости;  $E_V$  – уровень валентной зоны;  $E_i$  – середина запрещенной зоны).  $E_{tA}$  и  $E_{tD}$  – эффективные уровни залегания акцепторных и донорных ловушек.

Анализ рекомбинационно-генерационных процессов [12]-[14], проведенный в приложении, позволил получить следующее выражение для

скорости поверхностной рекомбинации:

$$U_s = v_T \sigma_{tA}^0 N_{tA} (1 - f_{tA}) n_s + v_T \sigma_{tD}^+ N_{tD} \times (1 - f_{tD}) n_s - v_T \sigma_{tA}^0 N_{tA} f_{tA} n_{tA} - v_T \sigma_{tD}^+ N_{tD} f_{tD} n_{tD}. \quad (3)$$

Положение эффективного уровня Ферми  $E_{Feff}$ , как показано в приложении, вычисляется из выражения:

$$E_{Feff} = kT \ln \left( \frac{1}{2(A_A + A_D - B_D - B_A)} \times \left( \left( A_D e^{\frac{E_{tD}}{kT}} + A_A e^{\frac{E_{tA}}{kT}} - (B_D + B_A) \left( e^{\frac{E_{tD}}{kT}} + e^{\frac{E_{tA}}{kT}} \right) \right)^2 + 4(B_D + B_A) e^{\frac{E_{tD} + E_{tA}}{kT}} \times (A_A + A_D - B_D - B_A) + (B_D + B_A) \left( e^{\frac{E_{tD}}{kT}} + e^{\frac{E_{tA}}{kT}} \right) - A_D e^{\frac{E_{tD}}{kT}} - A_A e^{\frac{E_{tA}}{kT}} \right) \right) \right), \quad (4)$$

где  $A_A = N_{tA} (\sigma_{tA}^- (p_s + p_{tA}) + \sigma_{tA}^0 (n_s + n_{tA}))$ ;  $A_D = N_{tD} (\sigma_{tD}^0 (p_s + p_{tD}) + \sigma_{tD}^+ (n_s + n_{tD}))$ ;  $B_A = N_{tA} (\sigma_{tA}^- p_s + \sigma_{tA}^0 n_s)$ ;  $B_D = N_{tD} (\sigma_{tD}^0 p_s + \sigma_{tD}^+ n_s)$ .

В выражения для  $U_s$  (3) и  $E_{Feff}$  (4) входят значения концентраций электронов  $n_s$  и дырок  $p_s$ , зависящие от величины прямого смещения эмиттерного перехода и поверхностного потенциала. Для  $n^+$ - $p$ - $n$  транзистора можно записать [8]

$$n_s = \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{U_{BE} + \phi_s}{\varphi_T}}, \quad (5)$$

$$p_s = N_A e^{-\frac{\phi_s}{\varphi_T}}, \quad (6)$$

где  $N_A$  – концентрация акцепторной примеси у поверхности базовой области;  $U_{BE}$  – смещение перехода эмиттер-база;  $\phi_m = kT/q$  – тепловой потенциал;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\phi_s$  – поверхностный потенциал.

Поверхностный потенциал определяется из условия баланса заряда в окисле и полупроводнике на границе Si/SiO<sub>2</sub> [15]. С учетом заряда на поверхностных состояниях можно записать [8]

$$Q_{ot} + Q_{it} = \sqrt{2\epsilon_{Si}\epsilon_0 N_A kT} \times \left( e^{-\frac{\phi_s}{\varphi_T}} + \frac{\phi_s}{\varphi_T} - 1 \right) + \frac{n_i^2}{N_A} e^{\frac{U_{BE}}{\varphi_T}} \times \left( e^{\frac{\phi_s}{\varphi_T}} - \frac{\phi_s}{\varphi_T} - 1 \right), \quad (7)$$

где  $Q_{ot}$  – плотность положительного заряда в объеме окисла;  $Q_{it}$  – плотность заряда на поверхностных ловушках,  $\epsilon_{Si}$  и  $\epsilon_0$  – диэлектрические проницаемости кремния и вакуума.

В выражение (4) для положения

эффективного уровня Ферми  $E_{Feff}$  входит поверхностный потенциал  $\phi_s$ . В соотношении (7) заряд  $Q_{it}$  является функцией эффективного уровня Ферми, т.е. величины  $E_{Feff}$  и  $\phi_s$  взаимосвязаны. Поэтому их определить путем совместного решения уравнений (4) и (7). Это может быть сделано только численным методом.

#### 4. Радиационно-индуцированные заряд в объеме окисла и плотность поверхностных состояний

При воздействии ионизирующего излучения происходит встраивание положительного заряда в окисле  $Q_{ot}$  и поверхностных состояний  $N_{it}$  на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub> ( $N_{it}$  обобщенное обозначение ранее использованных плотностей  $N_{LA}$  и  $N_{LD}$ ). Анализ данных процессов в данной работе проведен с использованием, так называемой, конверсионной модели [10],[11], согласно которой образование поверхностных ловушек происходит за счет взаимодействия электронов кремниевой подложки с положительно заряженными водородными комплексами в окисле около границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> [16],[17]. В простейшем случае предполагается наличие двух центров (мелких и глубоких) залегания положительного заряда, конверсия (отжиг) которых за счет взаимодействия с электронами подложки приводит к генерации поверхностных состояний. Ниже проведен анализ встраивания  $Q_{ot}$  и  $N_{it}$  на примере конверсии глубоких центров залегания положительного заряда.

Кинетика встраивания положительного заряда описывается уравнением:

$$\frac{dQ_{ot}}{dt} = K_D P - \frac{Q_{ot}}{\tau_D}, \quad (8)$$

где  $Q_{ot}$  – плотность положительного заряда;  $K_D$  – обобщенная постоянная, характеризующая дисперсионный перенос и захват дырок на глубокие ловушки в окисле;  $P$  – интенсивность ионизирующего излучения;  $\tau_D$  – постоянная времени конверсии (отжига) глубоких центров.

Первый и второй члены в правой части (8) характеризуют соответственно накопление и отжиг положительного заряда.

Согласно конверсионной модели отжиг положительного заряда приводит к

образованию поверхностных состояний:

$$\frac{dN_{it}}{dt} = K_{oi} \frac{Q_{ot}}{\tau_D}, \quad (9)$$

где  $N_{it}$  – плотность поверхностных состояний;  $K_{oi}$  – коэффициент конверсии [11].

Из решения уравнений (8) и (9) следует

$$Q_{ot} = K_D P \tau_D (1 - e^{-\frac{t}{\tau_D}}), \quad (10)$$

$$N_{it} = K_{oi} K_D P t + K_{oi} K_D P \tau_D (e^{-\frac{t}{\tau_D}} - 1). \quad (11)$$

Соотношения (10) и (11) позволяют вычислять значения заряда  $Q_{ot}$  и плотность поверхностных состояний  $N_{it}$  для заданной поглощенной дозы  $D$  и интенсивности излучения  $P$ .

#### 5. Расчет радиационно-индуцированного тока поверхностной рекомбинации

Для расчета величины положительного заряда в окисле  $Q_{ot}$  и концентрации поверхностных состояний  $N_{it}$  необходимо экспериментально экстрагировать, так называемые, подстроечные коэффициенты:  $K_D$ ,  $\tau_D$  и  $K_{oi}$  (см. раздел 4). Методика экстракции подстроечных коэффициентов с использованием высокоинтенсивного облучения при повышенной температуре описана в [10,11].

Предполагается, что радиационно-индуцированные поверхностные состояния имеют природу  $AD$  центров [18], т.е. акцепторные и донорные уровни располагаются симметрично относительно середины запрещенной зоны и  $N_{LA}=N_{LD}$ . Совместное решение уравнений (4) и (7) позволяет определить залегание эффективного уровня Ферми  $E_{Feff}$  и величину поверхностного потенциала  $\phi_s$ .

Таким образом, получаются все необходимые данные для расчета радиационно-индуцированного тока поверхностной рекомбинации с использованием соотношений (3) и (2).

#### 6. Заключение

Данные настоящей работы позволяют описать радиационную деградацию входных токов операционных усилителей и компараторов, используемых в бортовых космических системах. Используемый системный подход включает, как важный элемент анализа, расчет взаимосвязанных параметров, таких как положение

эффективного уровня Ферми и поверхностный потенциал, и изменение сечения захвата поверхностных ловушек в зависимости от их зарядового состояния. Предлагаемая физическая модель может служить основой для создания методик прогнозирования и сертификации схем для долговременной работы в условиях радиационного воздействия факторов космического пространства. Экспериментальная проверка модели и разработка ее практических приложений требует отдельной самостоятельной работы.

## Приложение

Для упрощения расчетов предполагается, что поверхностные ловушки акцепторной и донорной природы занимают некоторые эффективные уровни в верхней и нижней половине запрещенной зоны  $E_{tA}$  и  $E_{tD}$  (рис.2). Следуя подходу, изложенному в [14], нетрудно получить для акцепторных ловушек:

$$r_{aA} = v_T \sigma_{tA}^0 N_{tA} (1 - f_{tA}) n_s, \quad (\text{П1})$$

$$r_{bA} = v_T \sigma_{tA}^0 N_{tA} f_{tA} n_{tA}, \quad (\text{П2})$$

$$r_{cA} = v_T \sigma_{tA}^- N_{tA} f_{tA} p_s, \quad (\text{П3})$$

$$r_{dA} = v_T \sigma_{tA}^- N_{tA} (1 - f_{tA}) p_{tA}, \quad (\text{П4})$$

где  $r_{aA}$  и  $r_{bA}$  – скорость захвата и эмиссии электрона;  $r_{cA}$  и  $r_{dA}$  – скорость захвата и эмиссии дырки;  $v_T$  – тепловая скорость;  $\sigma_{tA}^0$  – сечение захвата нейтральной акцепторной ловушки;  $N_{tA}$  – эффективная концентрация акцепторных ловушек;  $\sigma_{tA}^-$  – сечение захвата отрицательно заряженной акцепторной ловушки;  $n_s$  и  $p_s$  – поверхностные концентрации электронов и дырок;

$$n_{tA} = n_i e^{\frac{E_{tA} - E_i}{kT}}; \quad (\text{П5.1})$$

$$p_{tA} = n_i e^{\frac{E_i - E_{tA}}{kT}}; \quad (\text{П5.2})$$

$$f_{tA} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_{tA} - E_{F\text{эфф}}}{kT}}}, \quad (\text{П5.3})$$

где  $n_i$  – концентрация электронов в собственном кремнии;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура;  $E_{tA}$  – эффективный уровень акцепторных ловушек;  $E_{F\text{эфф}}$  – эффективный уровень Ферми.

Для донорных ловушек:

$$r_{aD} = v_T \sigma_{tD}^+ N_{tD} (1 - f_{tD}) n_s, \quad (\text{П6})$$

$$r_{bD} = v_T \sigma_{tD}^+ N_{tD} f_{tD} n_{tD}, \quad (\text{П7})$$

$$r_{cD} = v_T \sigma_{tD}^0 N_{tD} f_{tD} p_s, \quad (\text{П8})$$

$$r_{dD} = v_T \sigma_{tD}^0 N_{tD} (1 - f_{tD}) p_{tD}, \quad (\text{П9})$$

где  $r_{aD}$  и  $r_{bD}$  – скорость захвата и эмиссии электрона;  $r_{cD}$  и  $r_{dD}$  – скорость захвата и эмиссии дырки;  $\sigma_{tD}^+$  – сечение захвата положительно заряженной донорной ловушки;  $N_{tD}$  – эффективная концентрация донорных ловушек;  $\sigma_{tD}^0$  – сечение захвата нейтральной донорной ловушки;

$$n_{tA} = n_i e^{\frac{E_{tD} - E_i}{kT}}; \quad (\text{П10.1})$$

$$p_{tD} = n_i e^{\frac{E_i - E_{tD}}{kT}}; \quad (\text{П10.2})$$

$$f_{tD} = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_{tD} - E_{F\text{эфф}}}{kT}}}. \quad (\text{П10.3})$$

С учетом одновременного действия акцепторных и донорных ловушек можно записать

$$r_a = r_{aA} + r_{aD}, \quad r_b = r_{bA} + r_{bD}, \quad (\text{П11})$$

$$r_c = r_{cA} + r_{cD}, \quad r_d = r_{dA} + r_{dD}, \quad (\text{П12})$$

где  $r_a, r_b, r_c,$  и  $r_d$  – скорости захвата и эмиссии электронов и дырок с акцепторных и донорных ловушек.

Скорость поверхностной рекомбинации  $U_s$  равна:

$$U_s = r_a - r_b = r_c - r_d. \quad (\text{П13})$$

Выражение для  $U_s$  получается после подстановки в (П13) значения (П1-П4) или (П6-П9) (формула (3) в разделе 3).

В выражение для  $U_s$  входит неизвестный параметр  $E_{F\text{эфф}}$  (эффективный уровень Ферми), который определяет зарядовое состояние ловушек и тем самым величины соответствующих сечений захвата. В стационарном неравновесном состоянии справедливо соотношение

$$r_a - r_b = r_c - r_d. \quad (\text{П14})$$

Подставляя в (П14) выражения (П11) и (П12), получаем уравнение для определения положения эффективного уровня Ферми. Решение этого уравнения приведено в разделе 3, формула (4).

# Physical mechanism of the true dose rate effect in Enhanced Low Dose Rate Sensitivity (ELDRS) devices

V.S. Pershenkov, A.S. Zhukov, V.V. Belyakov, A.S. Bakerenkov<sup>1</sup>, V.A. Telets, V.A. Felitsyn, A.S. Rodin

**Abstract:** The calculation of the surface recombination current in bipolar transistors during the accumulation of the total dose of ionizing radiation is carried out based on consideration of the charge state of radiation-induced interface traps, the position of the effective Fermi level determining the trap capture cross-section, and data of the accumulation of the volume charge and interface states.

**Keyword:** effective Fermi level, radiation-induced surface recombination current, bipolar devices.

## Литература

- 1 V.S. Pershenkov, V.D. Popov, A.V. Shalnov, Interface radiation effects in elements of integrated circuits, Moscow, Energoatomisdat, 1998. (in Russian)
- 2 S.L. Kosier, R.D. Schrimpf, R.D. Nowlin, D.M. Fleetwood, M. DeLaus, R.L. Pease, W.E. Combs, A. Wei, F. Chai, Charge separation for bipolar transistors, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 40, no.6, pp. 1276-1285, 1993.
- 3 G.I. Zebrev. Modeling and simulation of the enhanced low-dose-rate sensitivity of thick isolating layers in advanced ICs // *Russian Microelectronics*, 2006.
- 4 D.V. Gromov, V. V. Elesin, G. V. Chukov, and V. V. Repin "Radiation effects in bipolar transistors based on silicon-germanium heterostructures," in *Proc. 19th Int. Crimean Conf. Microwave and Telecommunication Technology, CriMiCo 2009*, Sevastopol, Crimea, Ukraine, Sept. 14 - 18, 2009, pp. 726-727.
- 5 P. K. Skorobogatov, and A.Y. Nikiforov, "Simulation of bulk ionization effects in SOI devices," *Russian Microelectronics*, vol. 27, no. 1, pp. 1-6, 1998.
- 6 O. Akhmetov, D.V. Boychenko, D. V. Bobrovskiy, A. I. Chumakov, O. A. Kalashnikov, and A.Y. Nikiforov, "System on module total ionizing dose distribution modeling," in *Proc. 29th Int. Conf. on Microelectronics*, MIEL 2014, Belgrade, Serbia, May 2014, pp. 329-331.
- 7 X.J. Chen, H.J. Barnaby, Ronald L. Pease, R.D. Schrimpf, Dale G. Platteter, G. Dunham, Radiation-induced base current broadening mechanisms in gate bipolar transistor, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no.6, pp. 3178-3185, 2004.
- 8 X.J. Chen, H.J. Barnaby, The effect of radiation-induced interface traps on base current in gated bipolar test structures, *Solid-State Electronics*, vol. 52, pp. 683-687, 2008.
- 9 R.L. Pease, R.D. Schrimpf, D.M. Fleetwood, ELDRS in bipolar linear circuits: a review, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 56, no.4, pp. 1894-1908, 2009.
- 10 V.S. Pershenkov, D.V.Savchenkov, A.S. Bakerenkov, V.N. Ulimov, A.Y. Nikiforov, A.I. Chumakov, A.A. Romanenko, The conversion model of low dose rate effect in bipolar transistors, // *RADECS*, статья № 5994661, pp. 290-297, 2009.
- 11 V.S. Pershenkov, D.V.Savchenkov, A.S. Bakerenkov, V.N. Ulimov, Conversion model of enhanced low-dose-rate sensitivity for bipolar ICs // *Russian Microelectronics*, 39 (2), pp. 91-99, 2010.
- 12 W. Shockley, W.T. Read, Statistics of recombination of holes and electrons, *Phys. Rev.* **87**, p.835, 1952.
- 13 R.N. Hall, Electron-hole recombination in germanium, *Phys. Rev.* **87**, p.387, 1952.
- 14 A.S. Grove, *Physics and technology of semiconductor devices*, John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- 15 S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices*. New York, Wiley, 1981
- 16 A. V.Sogoyan, S. V. Cherepko, V. S. Pershenkov, V. I. Rogov, V. N. Ulinov, V. V. Emelianov, "Thermal- and Radiation-Induced Interface Traps in MOS Devices", *RADECS Proc*, pp.69 -72, 1997.

17 A.V. Sogoyan, S.V. Cherepko, V.S. Pershenkov, The hydrogenic-electron model of accumulation of surface states on the oxide-semiconductor interface under the effects of ionizing radiation, *Russian Microelectronics*, 43 (2), pp. 162-164, 2014.

18 V.S. Pershenkov, S.V. Cherepko, A.V. Sogoyan, V.V. Belyakov, V.N. Ulimov, V.V. Abramov, A.V. Shalnov, V.I. Rusanovsky, Proposed two-level acceptor-donor (AD) center and nature of switching traps in irradiated MOS structures, *IEEE transactions on Nuclear Science*, vol. 43, №6, pp. 2579-2586, 1996.

# Преобразователь «временной интервал - код» для ЦФАПЧ по технологии КМОП 65нм

В.В.Мастеров

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия

E-mail: [masterov@cs.niisi.ras.ru](mailto:masterov@cs.niisi.ras.ru)

**Аннотация.** В данной работе представлен преобразователь «временной интервал - код» с высокой разрешающей способностью для цифровой фазовой автоподстройки частоты. В преобразователе используются пять линий задержек, что позволяет достичь разрешения  $\sim 5$ пс. Преобразователь потребляет 1,46мВт при напряжении питания 1В и рабочей частоте 100МГц.

**Ключевые слова:** преобразователь «временной интервал-код», линия задержки, ЦФАПЧ.

## 1. Введение

Преобразователь «временной интервал -код» является одним из компонентов цифрового устройства фазовой автоподстройки частоты (ЦФАПЧ). Его задача заключается в нахождении взаимного расположения фаз опорного сигнала и деленного сигнала осциллятора. Преобразователь должен обладать достаточно высоким разрешением ( $< 10$ пс), что позволяет снизить фазовый шум ЦФАПЧ.

Задача устройства заключается в преобразовании временного промежутка между фронтами двух входных сигналов START и STOP в цифровой код. Существуют различные виды преобразователей "временной интервал - код": на базе линии задержки; на базе кольцевого осциллятора [1]. Преобразователи на базе линии задержки в свою очередь делятся на два вида: флэш-АЦП и преобразователь Верньера [2]. Флэш-АЦП представляет собой линию задержки, в которой к выходу каждого инвертора подключен регистр, записывающий состояние выхода инвертора при наступлении фронта сэмплирующего сигнала. Флэш-АЦП является самым простым преобразователем «временной интервал - код», но имеет самую низкую разрешающую способность. Однако, в отличие от остальных преобразователей, может быть реализован без схемы калибровки.

В данной работе представлена реализация преобразователя «временной

интервал-код» на основе флэш-АЦП по технологии с топологической нормой 65нм.

## 2. Принцип работы преобразователя

В работе [3] представлен конвейерный преобразователь, работа которого состоит из двух стадий обработки.

Первая ступень имеет малую разрешающую способность, но неограниченный динамический диапазон, т.к. состоит из высокочастотного осциллятора и счетчика импульсов. При появлении положительного фронта сигнала STOP генерируется временной остаток, который в дальнейшем используется для работы второй ступени.

Конвейерная структура используется для увеличения динамического диапазона и для улучшения разрешающей способности АЦП. В рамках данной работы представляет интерес вторая ступень вышеописанного преобразователя, так как в системе ЦФАПЧ период деленного сигнала осциллятора, который может находиться в пределах 600пс, может быть покрыт динамическим диапазоном второй ступени.

В данной работе реализована вторая ступень. Данная ступень представляет собой набор из пяти параллельных идентичных линий задержек (рис.1). Ее разрешение равно четверти времени задержки одного буфера и оно достигается применением управляемых нагрузочных конденсаторов.

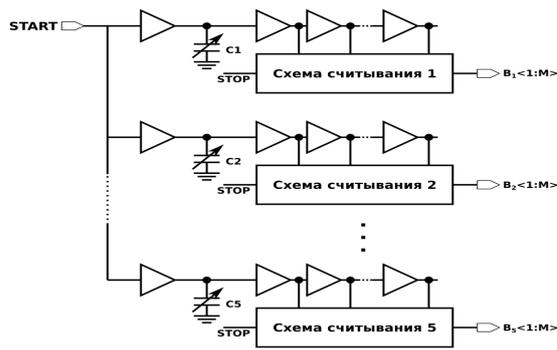


Рисунок 1. Блок схема преобразователя с большим разрешением.

Сигнал START поступает на линии задержки через буферы с управляемыми нагрузочными емкостями. Каждая линия задержки имеет свой декодер, при поступлении положительного фронта сигнала STOP считывает состояние линии задержки и выдает значение положения фронта сигнала START. Итоговое значение преобразователя получается из суммирования выходных значений четырех декодеров и последующего арифметического деления на 4.

Процесс калибровки является необходимым для данного преобразователя, т.к. конфигурация входных буферов должна быть настроена таким образом, чтобы фронт сигнала START проходил через каждый буфер с задержкой  $(n-1)\tau_{BUF}/4$ , где  $n$  – номер линии задержки ( $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ),  $\tau_{BUF}$  – время задержки буфера. На рисунке 2,б показана требуемая конфигурация в результате калибровки. Процесс калибровки можно считать завершенным, когда на выходах декодеров будут установлены значения, удовлетворяющие условию  $b_5 - b_1 = 1$ , где  $b_5$  и  $b_1$  выходные значения декодеров пятой и первой линий задержки соответственно.

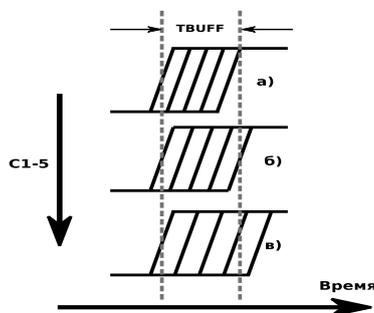


Рисунок 2. Фронты входных сигналов линий задержки в случаях: а - величины нагрузок слишком малы; б - рабочая конфигурация; в - величины нагрузок слишком велики.

В рабочем режиме участвуют четыре из пяти линий задержек. Пятая используется только в процессе калибровки.

### 3. Реализация

Схема линии задержки представлена на рисунке 3. Дифференциальные выходы буфера соединены друг с другом посредством инверторов с целью снижения влияния разбросов параметров на свойство нелинейности преобразователя. Каждая линия задержки содержит 40 буферов.

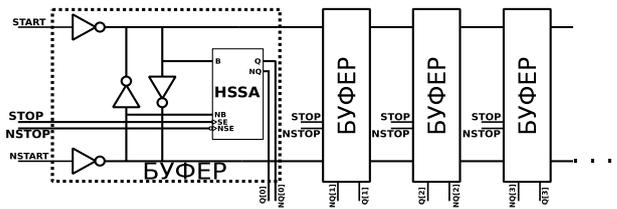


Рисунок 3. Схема линии задержки

Для обеспечения считывания состояния линии задержки необходимо использование высокочувствительных триггеров (рисунок 4) [4].

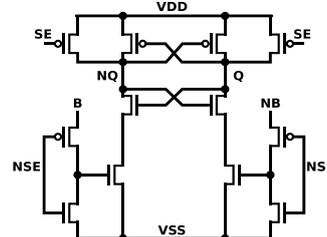


Рисунок 4. Схема высокочувствительного триггера.

Выходы линии задержки подключены к декодерам, которые определяют относительное положение фронтов.

Как правило, период опорного тактового сигнала FREF в несколько раз больше периода деленного сигнала осциллятора СКВ в системе ЦФАПЧ. Если подавать деленный сигнал осциллятора напрямую на преобразователь, то это скажется на увеличении потреблении энергии. Для решения данной проблемы предлагается использовать схему преобразования сигналов FREF и СКВ в сигналы START и STOP. Кроме этого существует проблема близости фронтов FREF и СКВ вследствие того, что они не синхронизованы между собой. В случае чрезвычайной близости для генерации

сигнала STOP должен использоваться последующий фронт сигнала CKV. Блок схема преобразователя входных сигналов показан на рисунке 5.

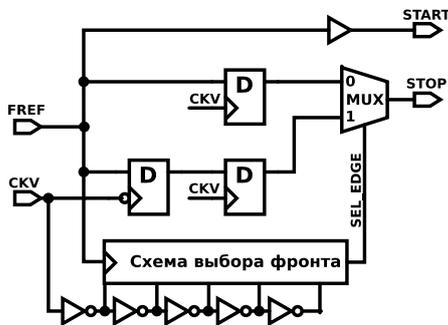


Рисунок 5. Схема конвертирования сигналов FREF и CKV в сигналы START и STOP

Сигнал FREF сэмпляется положительным и отрицательным фронтом сигнала CKV. Сэмплированные сигналы затем подаются на мультиплексор. Наличие близости фронтов определяется применением линии задержки, по состоянию которой генерируется сигнал SEL\_EDGE. Как показывает анализ, для линии задержки достаточно пяти буферов.

#### 4. Топология, моделирование и анализ фазового шума

Топология линий задержек представлена на рисунке 6. Занимаемая площадь равна 0,018 мм<sup>2</sup>.

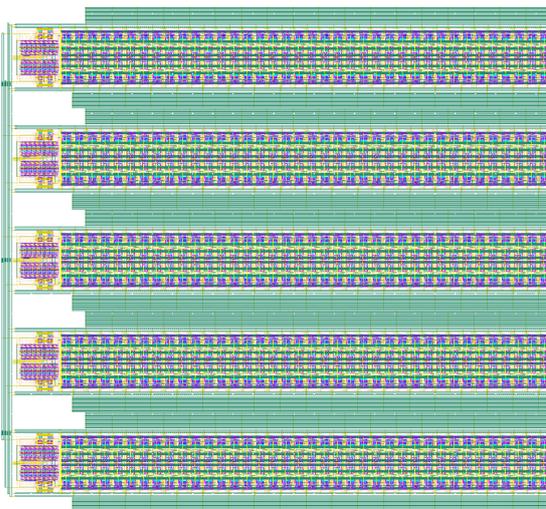


Рисунок 6. Топология блока линий задержек с входными буферами.

Моделирование проводилось в среде проектирования Cadence Virtuoso. Блок

декодера был реализован при помощи языка Verilog. На входы линий подавались два входных сигнала с частотой 100МГц, фаза сигнала STOP модулирована с амплитудой 10пс. Разница фаз между сигналами START и STOP и соответствующий код на выходе преобразователя показаны на рисунке 7.

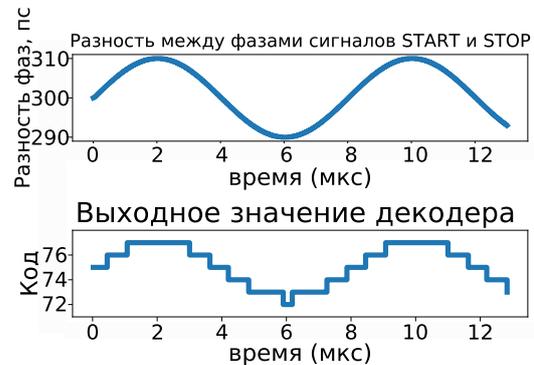


Рисунок 7. Результаты моделирования линий задержек

По результатам моделирования видно, что разрешение преобразователя достигает ~5пс. Аналоговая часть потребляет 1,46мВт при напряжении питания 1В. Диапазон входного сигнала равен 600пс.

Для получения оценки вклада шума квантования преобразователя в фазовый шум ЦФАПЧ была использована аналитическая модель, представленная на рисунке 8 [5].

Фазовый шум ЦФАПЧ имеет выражение

$S_{DCO}(z) = S_{DCO1}(z) + S_{DCO2}(z) + S_{DCO3}(z)$ , где  $S_{DCO1}$  – вклад шума квантования преобразователя,  $S_{DCO2}$  – шум вследствие колебаний частоты осциллятора,  $S_{DCO3}$  – вклад шума квантования осциллятора, управляемого кодом.

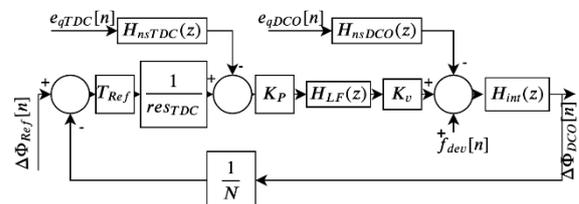


Рисунок 8. Модель ЦФАПЧ для получения мощности фазового шума

Вклад шума квантования преобразователя описывается выражением

$S_{DCO1}(z) = \left(\frac{res_{TDC}}{T_{ref}}\right)^2 |H_{cl1}(z)H_{nsTDC}(z)|^2 S_{qTDC}(z)$ , где  $res_{TDC}$  – разрешающая способность преобразователя «временной-интервал –

код»,  $T_{Ref}$  – период опорного сигнала,  $H_{cll}$  – передаточная функция ФАПЧ в режиме замкнутой петли,  $H_{nsTDC}$  – передаточная функция шума квантования преобразователя,  $S_{qTDC}$  – шум квантования, который описывается следующим выражением:

$$S_{qTDC}(z) = \frac{res_{TDC}^2}{12}.$$

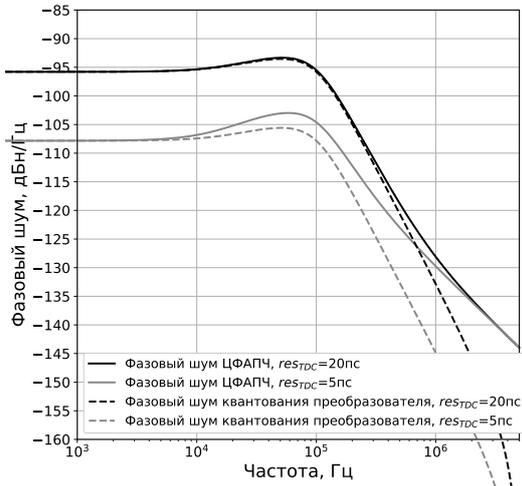


Рисунок 9. Графики фазовых шумов для преобразователя и ФАПЧ в случаях разрешения преобразователя 5пс и 20пс.

В результате вычислений получена оценка влияния шума квантования на систему ЦФАПЧ (рис. 9). На рисунке видно, что преобразователь с разрешением 5пс показывает улучшение фазового шума на 12 дБн по сравнению с преобразователем, который имеет разрешение 20пс в области низких частот смещения.

## 5. Заключение

Реализован преобразователь «временной интервал-код» по принципу флэш-АЦП с возможностью калибровки. Достигнутое разрешение равно 5пс, рабочая частота 100МГц.

Преобразователь спроектирован для реализации по технологии объемного кремния КМОП с проектными технологическими нормами 65 нм. Преобразователь может быть использован в аппаратуре с низким потреблением энергии, поскольку при штатном напряжении питания 1В потребляемая мощность преобразователя составляет не более 1,5 мВт.

---

# Time-to-digital Converter for ADPLL in 65nm CMOS

V.V.Masterov

**Abstract.** Time-to-digital converter implementation presented. Five delay lines are used to achieve high resolution with step less than single gate delay. Input range is 600ps. The device consumes 1.46mWt with operating frequency 100MHz.

**Keywords:** time-to-digital converter, delay line, ADPLL

## Литература

1. P. Dudek, S. Szczepanski, J.V. Hatfield, A High-Resolution CMOS Time-to-Digital Converter Utilizing a Vernier Delay Line, "IEEE Transactions on Solid-State Circuits", vol. 35, no. 2, February 2000, pp. 240-247.
2. M.Z. Straayer, M.H. Perrott, A Multi-Path Gated Ring Oscillator TDC with First-Order Noise Shaping, "IEEE Journal of Solid-State Circuits", vol. 44, no. 4, April 2009, pp. 1089-1098.
3. J. Borremans, K. Vengattarmane, J. Craninckx, A 6fJ/step, 5.5ps Time-to-Digital Converter for a Digital PLL in 40nm Digital LP CMOS, IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 23-25 May 2010, pp. 417-420.
4. Shalini, A. Kumar, Design of High-Speed And Low Power Sense Amplifier for SRAM Applications, "International Journal of Scientific & Engineering Research", vol. 4, issue 7, July 2013, pp. 402-406.
5. F. Brandonisio, M.P. Kennedy, Noise-Shaping All-Digital Phase-Locked Loops: Modeling, Simulation, Analysis and Design, M.: Springer, 2014.

# Моделирование характеристик инвертора на КНИ МОП нанотранзисторах с полностью охватывающим затвором

Н. В. Масальский

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, Россия,

E-mail: volkov@niisi.ras.ru

**Аннотация.** Обсуждается применимость наноразмерного МОП-транзистора с объединенными активными областями (ОМОПТ) с полностью охватывающим затвором овальной формы. Рассмотрены конструкция и принцип его работы. Показано, что ОМОПТ выполняет функцию инвертирования выходного сигнала. Выполнено моделирование наноразмерного ОМОПТ. Результаты моделирования показывают, что ОМОПТ функционирует в диапазоне низких напряжений питания и в гигагерцовом диапазоне.

**Ключевые слова:** КНИ МОП транзистор, полностью охватывающий затвор, коротко-канальные эффекты, логический вентиль, низкое напряжение питания

## Введение

Среди многообразия архитектур современных полевых нанотранзисторов многообещающими являются те, у которых канал окружен затвором, одной из которых является архитектура с полностью охватывающим затвором [1-3]. Концепция с полностью охватывающим затвором характеризуется двукратным превосходством по подавлению коротко-канальных эффектов (ККЭ) по сравнению с традиционными транзисторными архитектурами [4]. Также данная конструкция отличается улучшенной подпороговой характеристикой и повышенной плотностью тока в режиме сильной инверсии. Отличительной особенностью такой конструкции транзистора является возможность размещения в вертикальном положении. С одной стороны, существенно возрастает степень интеграции [5-6] – это положительный момент. С другой стороны, серьезно усложняется монтаж микросхемы, что приводит к ее удорожанию. Однако, некоторые конструктивные решения позволяют преодолеть эту проблему и такие разработки находят широкое применение [3]. Одним из креативных продолжений вертикальной схемы является структура - объединенный МОП транзистор (ОМОПТ), которая была предложена сравнительно недавно.

Концепция ОМОПТ состоит в

объединении рабочих (канальных) областей p-канального и n-канального транзисторов. Фактически ОМОПТ состоит из двух МОП транзисторов: n-канальный и p-канальный, но с одним общим затвором. Сток и исток такой транзисторной структуры будет состоять из двух разнородно легированных частей с высоким уровнем концентрации носителей. Напротив, для достижения высокой эффективности ОМОПТ необходимо, чтобы объединенная рабочая область была низколегированной, в идеале ее проводимость была близка к собственной проводимости кремния. Тогда при подаче на исток напряжения питания ( $U_{ds}$ ), он «смещается в прямом направлении» (исток состоит из двух частей легированных n+ и p+ примесями и фактически представляет обычный p-n переход и то же самое справедливо и для стока). Приложенное смещение открывает процесс инжекции носителей (дырок и электронов) в объединенную рабочую область. Их распределение в канале зависит от напряжения на затворе ( $U_g$ ). Так при  $U_g > 0$  в канале преобладают электроны, а при  $U_g < 0$  – дырки [7]. По сути ОМОПТ является вентиляем, у которого вход - затвор, выход - общий сток. Если  $U_g \approx 0$ , то выше проводимость p-канального транзистора, а если  $U_g \approx U_{ds}$ , выше проводимость n-канального транзистора [7].

Очевидно, что в такой конструкции резко снижается общее количество носителей, участвующих в процессе переноса, что еще

более критически скажется при масштабировании. Прямое увеличение диаметра активной области ( $d$ ) ограничено, т. к. в данном случае снижается эффективность подавления ККЭ [8]. Действительно, характеристическая длина  $l$  зависит от  $d$  в

$$\text{виде } l = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_s \ln\left(1 + \frac{2t_{ox}}{d}\right)}{2\varepsilon_{ox}}}, \quad \varepsilon_s, \varepsilon_{ox} -$$

диэлектрическая проницаемость активной области и подзатворного окисла,  $t_{ox}$  - толщина подзатворного окисла, и с ростом параметра  $d$  выполнение условия  $10l \ll L_g$ , где  $L_g$  - длина затвора транзистора, может стать критическим.

Увеличение уровня легирования стоков и истоков ограничивается экспоненциальным ростом прямых туннельных токов сток-исток и снижением напряжения пробоя, что характерно для любой архитектуры МОП нанотранзистора [8].

В настоящей работе мы анализируем применимость конструкции овальной формы ОМОПТ для нивелирования рассмотренных выше ограничений. В нашем случае контакт двух разнородно легированных областей происходит в плоскости проходящей через маленькую ось овала. Основные каналы формируются в зонах связанных с большой осью овала. Этим достигается основная цель – повышение числа носителей заряда. При этом в меньшей степени снижается эффективность подавления ККЭ. Очевидным преимуществом вертикально размещенного ОМОПТ с овальным затвором то, что он занимает минимальную площадь – один топологический квадрат [1].

В настоящей работе при помощи численного моделирования проведена оценка эффективности электро-физических характеристик наноразмерного ОМОПТ овальной формы.

## 1. Модель ОМОПТ

Базовая конструкция анализируемого устройства, сечение которого по большой оси представлено на рис. 1, включает соединенные сток и исток, которыми служат p-n-переходы.

Для низколегированной рабочей области параметры ОМОПТ могут варьироваться в достаточно широко при помощи выбора материала затвора, фактически подбирая нужную работу выхода. Тем самым, изменяя

напряжение плоских зон, что позволяет контролировать ключевых характеристики транзистора – пороговое напряжение, крутизну подпороговой характеристики и DIBL-эффект [1].

Например, если материал затвора таков, что пороговые напряжения n- и p-канального транзисторов по модулю примерно одинаковы, то реализуется следующий сценарий.

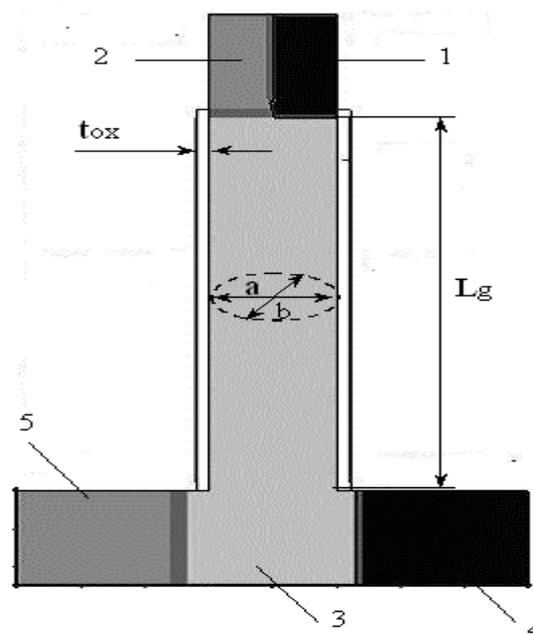


Рис. 1. Структурная схема ОМОПТ транзистора с полностью охватывающим затвором овальной формы, где 1 – n+ -исток, 2 – p+ -исток, 3 – объединенная активная область, 4 – n+ -сток, 5 – p+ -сток, обозначения:  $L_g$  – длина затвора,  $a$  – большой диаметр объединенной активной области,  $t_{ox}$  – толщина подзатворного диэлектрика

В соответствии с выше сказанным при  $U_g = 0$  в канале присутствуют только дырки, и на стоке устанавливается высокое напряжение сравнимое с  $U_{ds}$ .

При  $U_g = U_{ds}$  – только электроны, и на стоке устанавливается низкое напряжение близкое к 0 [7].

Таким образом, при подаче импульсного сигнала на затвор на выходе (стоке) появляется его проинвертированный отклик, т. е. ОМОПТ работает как инвертор.

Следует отметить, что рассмотренный сценарий реализуется для материала со средне-зонной работой выхода [9].

Моделирование характеристик наноразмерного ОМОПТ с параметрами указанными в таблице 1 выполнялось с помощью программы DESSIS пакета ISE TCAD [10].

Таблица 1. Параметры прототипа ОМОПТ,

Параметр	Прототип
$L_g$ , нм	45
$t_{ox}$ , нм	1.8
$a$ , нм	20
$b$ , нм	7
$n_i$ , $cm^{-3}$	$10^{13}$
$N_{ds}$ , $cm^{-3}$	$3.3 \times 10^{19}$
$v_{SRH}$ , $cm/c$	$3 \times 10^5$
$t_{SRH}$ , мкс	10
$A_d$ , эВ	4.65

где:  $t_{ox}$  – толщина подзатворного окисла (оксид кремния),  $a$  – большой диаметр,  $b$  – маленький диаметр,  $n_i$  – собственная концентрация носителей,  $N_{ds}$  – концентрация легирования областей стока и истока (мышьяк ( $n^+$ -область), бор ( $p^+$ -область)),  $v_{SRH}$  – скорость поверхностной рекомбинации по механизму Шокли-Рида-Хола,  $t_{SRH}$  – время жизни неосновных носителей заряда по механизму Шокли-Рида-Хола,  $A_d$  – работа выхода.

## 2. Результаты моделирования

Смоделированная передаточная характеристика ОМОПТ, представлена на рис. 2 для различных значений  $U_{ds}$ . (При представлении результатов моделирования мы использовали графический пакет программы схемотехнического моделирования HSPICE)

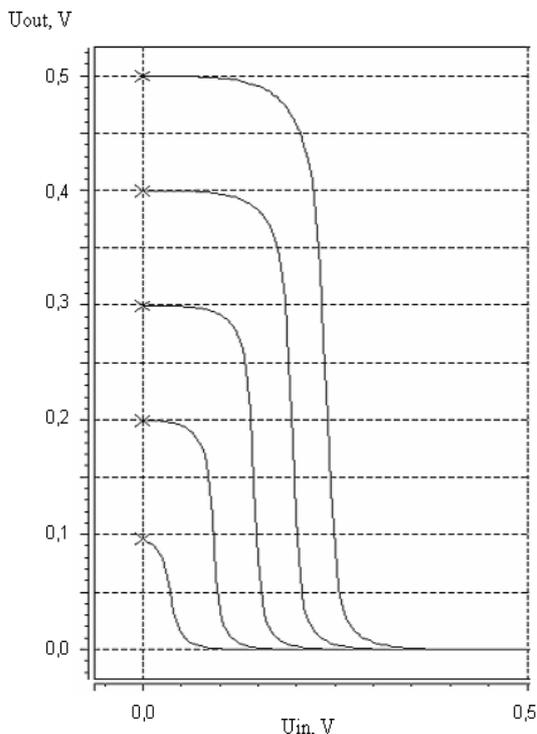


Рис. 2. Семейство передаточных характеристик ОМОПТ, где  $U_{ds}$  изменяется от 0.5 до 0.1 В

Результаты моделирования показывают, что работоспособность ОМОПТ сохраняется в широком диапазоне  $U_{ds}$ . Что примечательно и в области низких приложенных напряжений (менее 0.5 В) прибор ведет себя близко к идеальному инвертору с высоким коэффициентом усиления по напряжению. Однако, подпороговый ток транзистора не намного, но выше по сравнению с классическим МОП транзистором. Это результат постоянно открытого  $p$ - $n$ -перехода объединенного истока. Следовательно, и статическая мощность транзистора будет выше. Это предопределяет необходимость заранее проанализировать способы теплоотвода на стадии разработки проекта микросхемы.

Динамические характеристики ОМОПТ в режиме большого высокочастотного сигнала рассчитывались для ненагруженного транзистора и для линейки трех последовательно соединенных ОМОПТ. Здесь мы полагаем, что все свободное пространство между транзисторами заполнено  $SiO_2$ , в частности, для удобства монтажа.

На рис. 3 приведена переходная характеристика отдельного ОМОПТ. Для входного сигнала с амплитудой 0.5 В и частотой 10 ГГц временная задержка переключения транзистора ( $\tau$ ) составляет менее 5 пс. Так же следует отметить, что устройство практически без искажений передает импульсную последовательность.

Динамическая характеристика для цепочки трех одинаковых ОМОПТ для аналогичной импульсной последовательности представлена на рис. 4. В данном случае временная задержка переключения первого ОМОПТ не превышает 10 пс, а всей цепочки 30 пс. Из полученных данных можно констатировать, что задержка ОМОПТ линейно возрастает с ростом числа вентилях  $n_{FO}$ , которыми он управляет. При снижении напряжения питания зависимость  $\tau(n_{FO})$  остается линейной, но с другими количественными показателями.

Дополнительное исследование основных частотных параметров (крутизна и выходная проводимость) анализируемого ОМОПТ установило, что они остаются неизменными до частот порядка 200 ГГц.

Следовательно, обобщая полученные результаты можно предположить, что устройства на ОМОПТ могут найти применение при разработке аналоговых и цифровых схем применимых для и

высокочастотных и низковольтных приложений.

ОМОПТ допускает большое разнообразие конструктивных исполнений: с одним затвором или с несколькими, с неравномерно легированной активной областью, с совмещенными затворами с разной работой выхода, архитектурой «underlap» [11]. Использование последней позволяет успешно решить задачу повышения плотности прямого тока и

снижению уровня подпорогового тока. Такая конфигурация в совокупности с затворами с разной работой выхода упрощает задачу проектирования логических вентилях для реализации сложных логических функций. Дополнительным неоспоримым преимуществом таких устройств является их высокая степень интеграции. При этом их коэффициент усиления можно повысить при помощи оригинальных конструкторских решений.

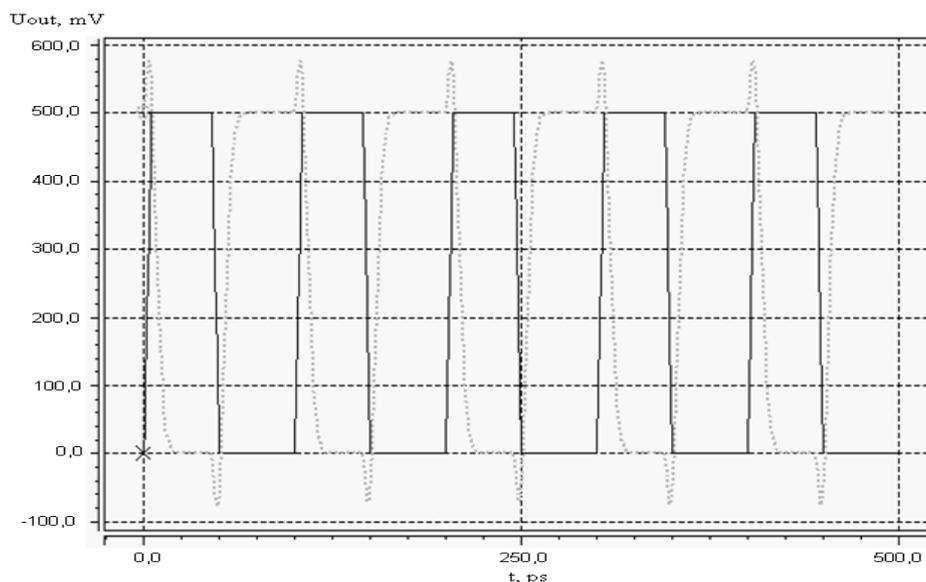


Рис. 3. Переходные процессы в ОМОПТ, где сплошная линия – входной сигнал, точечная – выходной сигнал.

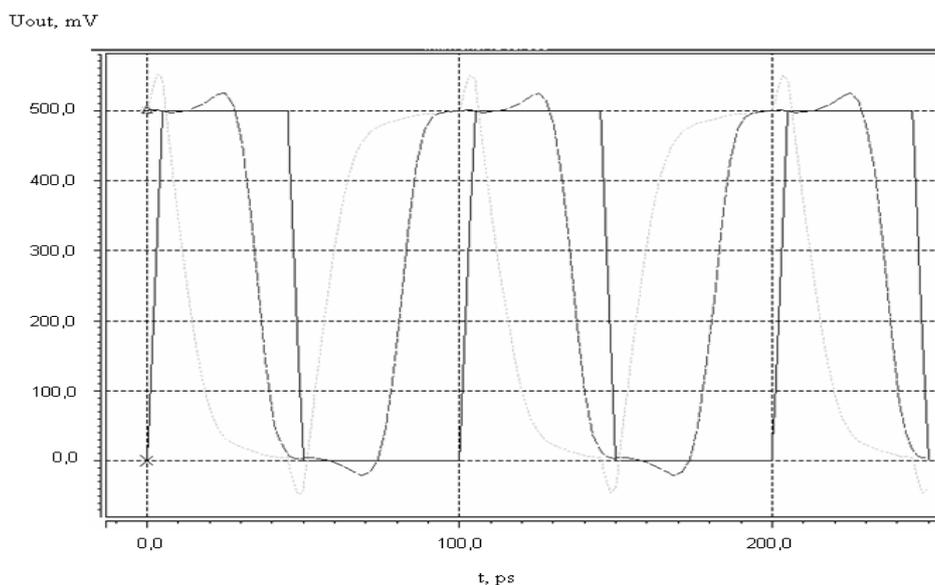


Рис. 4. Переходные процессы в цепочке ОМОПТ, сплошная линия – входной сигнал, пунктирная – выходной сигнал.

## Заклучение

Разработана конструкция вертикального МОП нанотранзистора с объединенной активной областью овальной формы с полностью охватывающим затвором. Предложенное устройство выполняет функцию инвертирования входного сигнала. Проведено численное моделирование транзистора с длиной затвора 45 нм и размерами активной области 20 на 7 нм. Из результатов моделирования следует, что транзистор является низковольтным, способным функционировать при напряжениях ниже 0.5 В в гигагерцовом диапазоне частот с высоким коэффициентом усиления. Полученные результаты создают

предпосылки для развития предложенной концепции, поскольку будущие устройства будут отличаться низким напряжением питания, высоким быстродействием, минимальной занимаемой площадью, что соответствует современным требованиям к транзисторам для аналоговых и цифровых приложений.

Автор благодарит Масальскую В.Н. за помощь в подготовке иллюстраций.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по проведению фундаментальных научных исследований (ГП 14) по теме (проекту) N 0065-2019-0001.

# Simulation of characteristics of the inverter on surrounding gate SOI CMOS nanotransistors

N. Masalsky

**Abstract.** The applicability of the SOI MOS nanotransistor is discussed with the integrated active areas (OMOST) with surrounding gate of an oval form. Construction and the principle of its work are considered. It is shown that OMOST performs function of inverting of a signal output. Modeling of nanodimensional OMOST is executed. Results of modeling show that OMOST functions in the range of low supply voltages and in the gigahertz range.

**Key word:** SOI CMOS nanotransistor, surrounding gate, short - channel effects, a logical gate, low supply voltage

## Литература

1. J.P. Collinge. Multiple gate SOI MOSFET. «Solid State Electron». V. 48(2004), № 6, 897-905.
2. B.S. Doyle. High performance fully depleted trigate CMOS transistors. «IEEE Electron Device Lett.». v. 24(2003), № 4, 263-265.
3. J.-P. Colinge. FinFETs and Other Multi-Gate Transistor. NewYork, Springer-Verlag, 2008.
4. I. Ferain, C. A. Colinge, J. Colinge. Multigate transistors as the future of classical metal–oxide–semiconductor field-effect transistors. «Nature». v. 479(2011), 310–316.
5. J. Appenzeller. Toward Nanowire Electronics. «IEEE Transactions on Electron Devices». v. 55(2008), № 11, 2827-2845.
6. W. Lu. Nanowire Transistor Performance Limits and Applications. «IEEE Transactions on Electron Devices. v. 55(2008), № 11, 2859-2876.
7. D. Neamen. Semiconductor physics & devices: basic principles. New York, McGaw-Hill, 2011.
8. Н.В. Масальский. 2 D аналитическая модель распределения потенциала полностью обедненного КМОП нанотранзистора с полностью охватывающим затвором. «Труды НИИСИ РАН». Т. 9(2019), № 1, 38-43.
9. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М., Мир, 1984.
10. ISE TCAD Release 10. User's manual. 2004. (<http://www.synopsys.com/>)
11. Н. В. Масальский. Оптимизация параметров двух затворных суб- 20 нм КНИ КМОП транзисторов с архитектурой «без перекрытия». «Микроэлектроника». Т.41(2012), № 1, 57-64.

# Моделирование импульсов помех в КМОП тройном мажоритарном элементе при воздействии одиночных ионизирующих частиц

Ю. В. Катунин<sup>1</sup>, В. Я. Стенин<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, <sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

E-mails: katunin@cs.niisi.ras.ru; vystenin@mephi.ru

**Аннотация:** В данной работе представлено моделирование средствами TCAD тройного мажоритарного элемента по проектной норме “объемный КМОП 65 нм” на устойчивость к воздействиям одиночных ядерных частиц. Переходный процесс при воздействии частицы моделируется сбором заряда транзисторами с трека частицы, который может сопровождаться появлением импульса ошибки на выходе элемента. При моделировании использованы треки вдоль нормали к поверхности кристалла с входными точками трека на стоках и истоках транзисторов. Линейная передача энергии на трек составляет 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг.

**Ключевые слова:** импульс помехи, моделирование, нестационарное состояние, одиночная ядерная частица, помехоустойчивость, троичный мажоритарный элемент.

## 1. Введение

Результат воздействия одиночной ядерной частицы на комбинационный логический элемент представляет собой импульс ошибки [1] или временное нестационарное состояние (Single Event Transient – SET). Повышенная устойчивость к воздействию одиночных частиц зависит от схемы и топологического проектирования элемента. Распространенным методом повышения помехоустойчивости элементов комбинационной логики является тройное модульное резервирование (Triple Modular Redundancy - TMR) [2].

При проектных нормах менее 100 нм в КМОП СБИС становится существенным разделение заряда между транзисторами смежных элементов [3], обусловленное диффузионным переносом неосновных носителей заряда, образованных на треке частицы. Этот эффект может быть полезен при проектировании топологии элементов для коррекции импульса ошибки (помехи) [4]. Подобная методика была использована при проектировании логики суммирования выходных сигналов ассоциативных ячеек памяти буфера трансляции адресов [5].

В нашей работе представлены результаты моделирования средствами TCAD сбора заряда транзисторами с треков частиц в КМОП тройных мажоритарных

элементах (Triple Majority Gate – TMG) на основе использования только логических элементов И-НЕ. Такой TMG элемент с обычной традиционной топологией часто используется на практике в связи с малой занимаемой площадью и приемлемой устойчивостью к воздействиям одиночных частиц [6]. В данной работе представлен вариант TMG элемента с топологией, оптимизированной с целью практического использования эффекта диффузионного разделения заряда между расположенными рядом транзисторами для коррекции импульсов помех на выходе TMG элемента.

## 2. КМОП элемент с мажоритарной логикой на логических элементах И-НЕ

В системах при тройном модульном резервировании используются три канала (логические фазы) для дублирующего вычисления одной и той же булевой функции. При возникновении одиночных ядерных частиц выходные сигналы фаз могут отличаться. Троичные мажоритарные элементы (TMG элементы) используются для выбора правильного выходного сигнала по логике совпадения, по крайней мере, двух из трёх входных сигналов TMG элемента. Однако сами TMG элементы чувствительны

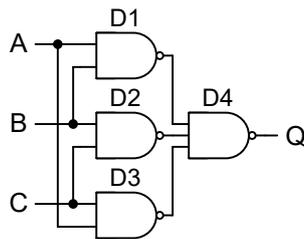


Рис. 1. Функциональная схема элемента с тройной мажоритарной логикой на основе логических элементов И-НЕ.

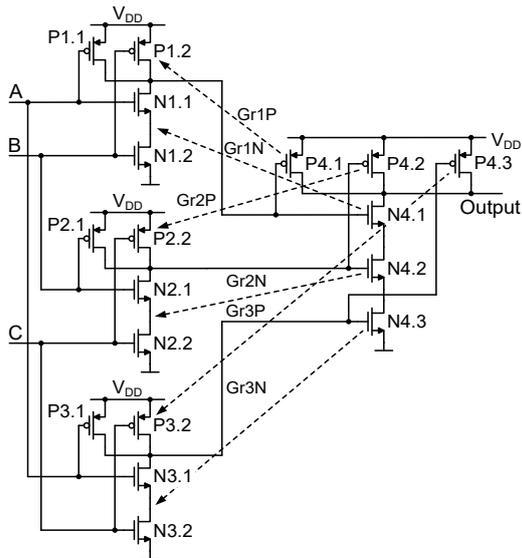


Рис. 2. Схема тройного мажоритарного элемента на основе трех логических элементов 2И-НЕ и одного элемента 3И-НЕ.

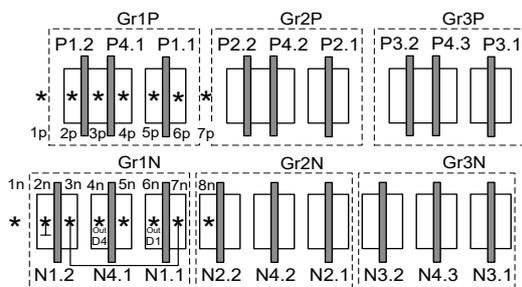


Рис. 3. Эскиз топологии тройного мажоритарного элемента с чередованием транзисторов трех логических элементов 2И-НЕ и одного элемента 3И-НЕ, точки входов треков отмечены маркером “звездочка”.

к воздействиям одиночных частиц, что требует повышения их помехоустойчивости. На рис. 1 проведена функциональная схема элемента с тройной мажоритарной логикой на основе использования только логических элементов И-НЕ.

На рис. 2 представлена транзисторная версия схемы TMG элемента, основанная только на элементах И-НЕ. Используя

топологию с чередованием на кристалле транзисторов одного типа канала из двух каскадно включенных элементов И-НЕ, можно обеспечить коррекцию помех совместным сбором транзисторами заряда с трека одиночной частицы.

Штриховые линии со стрелками на рис. 2 указывают на требуемое совместное близкое расположение транзисторов логических 2И-НЕ элементов D1, D2, D3 и 3И-НЕ элемента D4 для осуществления коррекции возникающих импульсов помех.

На рис. 3 приведен эскиз топологии этого TMG элемента с чередованием на кристалле транзисторов одного типа канала.

Все транзисторы расположены на рис. 3 в шести группах, три одинаковые группы NМОП транзисторов Gr1N–Gr3N и три одинаковые группы PМОП транзисторов Gr1P–Gr3P.

В каждой группе один транзистор, относящийся к выходному элементу D4 (3И-НЕ), окружен двумя транзисторами, входящими в один из входных элементов D1–D3 (2И-НЕ).

Сбор заряда запертыми транзисторами каждого из входных элементов D1–D3, находящегося в той же группе транзисторов, может вызвать импульс помехи на его выходе входного элемента.

По этой причине транзистор выходного элемента D4, находящийся в той же группе транзисторов, перейдет в запертое состояние и станет чувствительным к сбору заряда с того же трека.

Совместный сбор заряда транзисторами логических элементов, которые находятся в одной общей цепочке рядом, будет способствовать коррекции импульса помехи на выходе элемента D4 в тех случаях, когда он логически не маскируется по другому входу D4.

Точки входов треков на рис. 3 отмечены маркерами “звездочка”. Шаг смещения точек входов треков составляет 0.25 мкм, и они проходят через стоковые и истоковые области транзисторов (рис. 3). Амплитуды импульсов помех определялись по максимуму отклонения напряжения на выходе TMG элемента от стационарного логического уровня узла, а длительность помехи - как длительность отклонения на уровне 0.7 В от стационарного логического уровня выходного узла TMG элемента.

На рис. 4 приведен эскиз обычной традиционной топологии TMG элемента на основе использования только логических элементов И-НЕ.

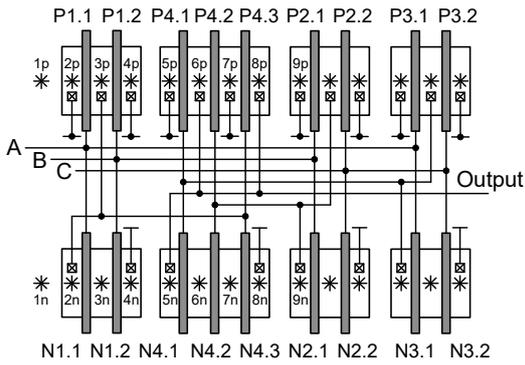


Рис. 4. Эскиз обычной топологии TMG элемента на трех логических элементах 2И-НЕ и одном элементе 3И-НЕ, точки входов трекв отмечены маркером “звездочка”.

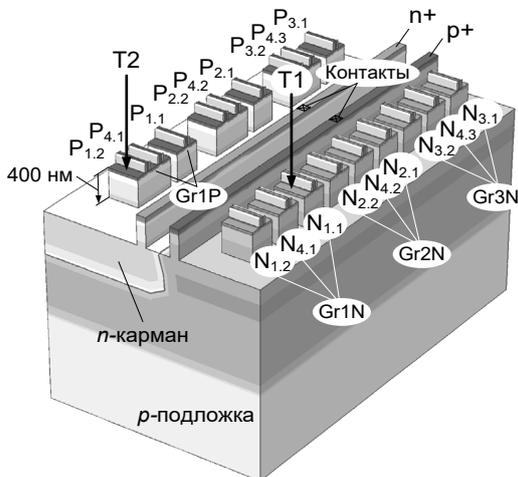


Рис. 5. 3D TCAD приборная физическая модель элемента троичной мажоритарной логики на основе только логических элементов И-НЕ.

### 3. Методика моделирования средствами TCAD

На рис. 5 приведена 3-D TCAD (Technology Computer-Aided Design) приборная физическая модель тройного мажоритарного элемента (TMG элемента) с предложенной топологией. Конструкция элемента состоит из транзисторных групп с неглубокой траншейной изоляцией (Shallow Trench Isolation – STI). Все транзисторы соответствуют шести группам транзисторов Gr1N–Gr3N и Gr1P–Gr3P на рис. 3 Каждая группа включает два транзистора элемента 2И-НЕ (одного из D1–D3) и один транзистор того же типа проводимости элемента 3И-НЕ D4, затвор которого подключен к выходу

соответствующего элемента 2NAND. Неглубокая траншейная изоляция STI транзисторов (глубина 400 нм) не показана на рис. 5 с целью более ясного изображения групп транзисторов Gr1N–Gr3N и Gr1P–Gr3P. На рис. 5 области, обозначенные как n+ и p+, являются частью охранных колец, изолирующих области расположения NМОП и РМОП транзисторов.

Переходные процессы в логических элементах при сборе заряда с трека одиночной частицы, исследуемые в TMG элементах при трехмерном моделировании средствами TCAD, зависят от линейной передачи энергии частицей на трек (linear energy transfer – LET) [1] и направления трека. В работе использованы треки с направлениями вдоль нормали к поверхности приборной части модели (на рис. 5 примеры треков T1 и T2). Используются треки с линейной передачей энергии на них 60 МэВ·см<sup>2</sup>/мг, что соответствует максимуму диапазона линейной передачи энергии, наиболее часто используемого для экспериментального исследования элементов СБИС при воздействии тяжелых заряженных частиц [7, 8].

Трехмерная приборная физическая модель разработана на основе моделей транзисторов, представленных в работе [9]. Ширина N- и РМОП-транзисторов 400 нм. Результаты получены с помощью симулятора Sentaurus при температуре 25°C и напряжении питания 1.0 В для структуры по 65 нм КМОП объемной технологии.

Поскольку по составу транзисторов и топологии группы Gr1N–Gr3N одинаковы, как одинаковы и группы Gr1P–Gr3P, то приведены результаты моделирования помех и их коррекции при сборе заряда с трека только для пары групп Gr1N, Gr1P, образованных из транзисторов логических элементов D1 и D4 (рис. 1).

### 4. Результаты моделирования

На рис. 6 – рис. 8 приведены зависимости амплитуд и длительностей импульсов помех (ошибок) на выходе TMG элементов как функции положения точки входа трека в группе NМОП транзисторов Gr1N (рис. 6 и рис. 7) и положения точки входа трека в группе РМОП транзисторов Gr1P (рис. 8 и рис. 9). Эти зависимости даны сплошными линиями для TMG элемента с предложенной топологией. На этих же рис. 6 – рис. 8 пунктирными линиями приведены

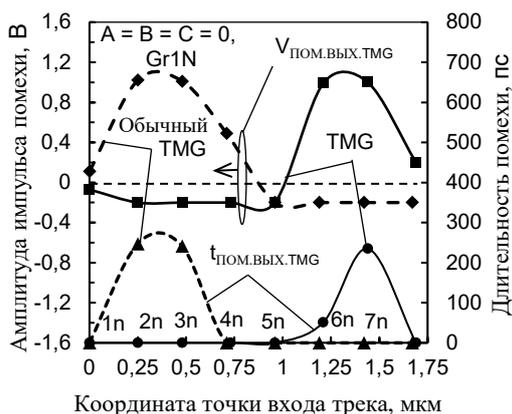


Рис. 6. Амплитуды и длительности импульсов помех в зависимости от положения точки входа трека в группе NМОП транзисторов Gr1N при сигналах на входах TMG элемента  $A = B = C = 0$  для треков с  $LET = 60 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ .

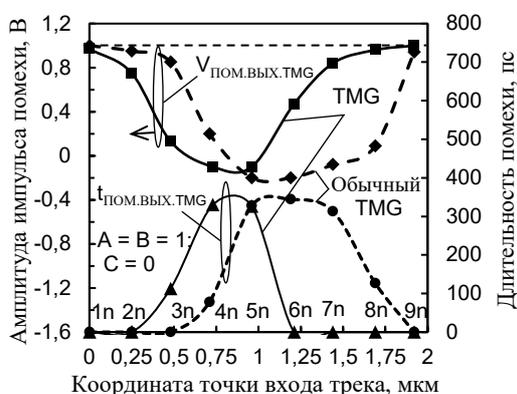


Рис. 7. Амплитуды и длительности импульсов помех в зависимости от положения точки входа трека в группе NМОП транзисторов Gr1N при сигналах на входах TMG элемента  $A = B = 1$ ,  $C = 0$  для треков с  $LET = 60 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$ .

зависимости для TMG элемента с обычной традиционной топологией (обозначены на графиках как «Обычный TMG»).

На рис. 6 и рис. 8 приведены графики зависимостей с хорошей коррекцией длительности импульсов ошибки на выходе TMG элемента с предложенной топологией для группы транзисторов Gr1N элемента TMG, когда на входах  $A = B = C = 0$  (рис. 6) и в группе транзисторов Gr1P, когда на входах элемента  $A = B = 1$ ,  $C = 0$  (рис. 8).

На рис. 7 и 9 приведены зависимости с незначительной коррекцией длительности импульсов ошибки на выходе элемента TMG с предложенной топологией. На всех рис. 6 – рис. 8 приведены также и зависимости амплитуд и длительностей импульсов помех (ошибок сравнения входных сигналов) на выходе TMG элемента с традиционной обычной топологией, эти зависимости даны

пунктирными линиями и обозначены как «Обычный TMG».

Тонкими штриховыми линиями на рис. 6 – рис. 8 отмечены уровни напряжений, соответствующие логическим нулю “0” или единице “1”, которые соответствуют уровню выходного сигнала TMG элемента в стационарном состоянии без импульсов помех на выходе.

#### А. Сбор заряда с треков NМОП транзисторами группы Gr1N

Зависимости с коррекцией импульсов ошибок на выходе TMG элемента с предложенной топологией при сигналах на входах  $A = B = C = 0$  (сплошные линии на рис. 6) практически не имеют отклонений напряжения на узлах в группе транзисторов Gr1N для входных точек трека 1n–5n. Максимальные импульсы погрешности на выходе элемента TMG с коррекцией имеют место при прохождении трека через точку 6n (сток N1.1) и точку 7n (сток N1.2).

Это является результатом сбора заряда с трека транзисторами N1.1 и N1.2, соединенными последовательно в элементе 2И-НЕ D1 (рис. 2).

На рис. 7 приведены зависимости для группы транзисторов Gr1N TMG элемента, когда на входах  $A = B = 1$ ;  $C = 0$ .

В этом случае элемент 3И-НЕ D4 (рис. 2) при сборе заряда с треков имеет максимальные ложные выходные сигналы  $V_{\text{пом.вых. TMG}} = 1.1 \text{ В}$  с длительностью 330 пс для входной точки 4n, значительные отклонения наблюдаются при сборе заряда запертым NМОП транзистором N4.1 элемента 3И-НЕ D4 (точки трека 3n–5n зависимостей на рис. 7 и на эскизе топологии на рис. 3).

В этом случае сбор заряда проводят транзисторы N1.1, N1.2 с их последовательным соединением в группе Gr1N элемента 2И-НЕ D1 (рис. 1) и транзистор N4.1 с последовательным соединением с транзисторами N4.2 и N4.3 в элементе D4. Отклонения от логического уровня на выходе элемента TMG имеют значения 0.6–1.1 В при длительности 100–325 пс. Предлагаемый элемент TMG показывает немного лучшие характеристики устойчивости по сравнению с элементом TMG с обычной традиционной топологией, но хуже, чем в режиме при входных сигналах  $A = B = C = 0$  при коррекции длительности выходных импульсов ошибки на рис. 6.

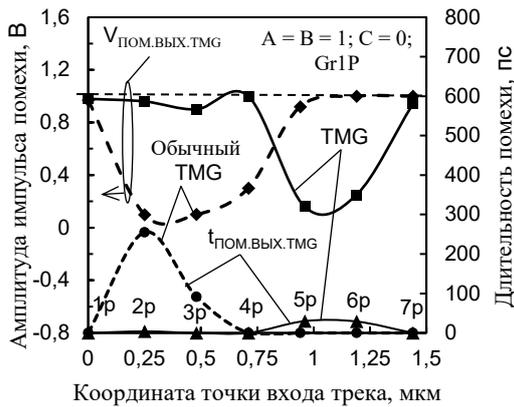


Рис. 8. Амплитуды и длительности импульсов помех в зависимости от положения точки входа трека в группе РМОП транзисторов Gr1P при сигналах на входах ТМГ элемента  $A = B = 1$ ;  $C = 0$  для треков с  $LET = 60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ .

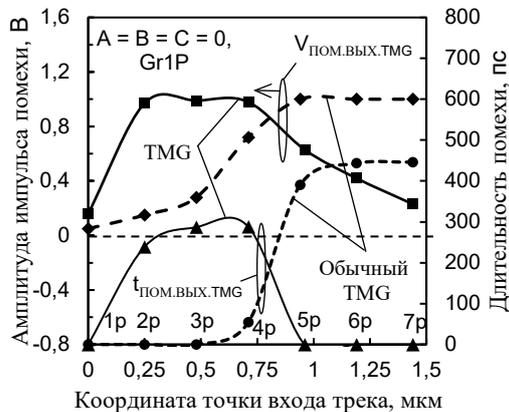


Рис. 9. Амплитуды и длительности импульсов помех в зависимости от положения точки входа трека в группе NМОП транзисторов Gr1P при сигналах на входах ТМГ элемента  $A = B = C = 0$  для треков с  $LET = 60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ .

### Б. Сбор заряда с треков РМОП транзисторами группы Gr1P

Зависимости с коррекцией (сплошные линии на рис. 8) практически не имеют отклонений напряжения на узлах от логического состояния узла в группе Gr1P для точек входа трека 1р–4р (рис. 3) и соответственно для этих точек входа нет импульсов помех (ошибок) на выходе ТМГ элемента с предложенной топологией при сигналах на входах  $A = B = 1$ ;  $C = 0$  (сплошные линии на рис. 8). Это случай сбора заряда с треков с входными точками 1р–4р (рис. 3) РМОП транзисторами P1.1 и P1.2, соединенными параллельно в элементе 2И-НЕ D1 и транзистором P4.1 элемента 3И-

НЕ D4, соединенным затвором с стоками транзисторов P1.1, P1.2 (рис. 2).

Максимальные амплитуды импульсов помех (ошибок) на выходе ТМГ элемента с предложенной топологией при сигналах на входах  $A = B = 1$ ;  $C = 0$  составляют 0.8–0.9 В для точек входа трека 5р и 6р, однако эти импульсы малыми длительностями, которые не превышают 30 пс (рис. 8).

На рис. 9 приведены амплитуды и длительности импульсов помех (ошибок) на выходах ТМГ элементов в зависимости от положения точки входа трека в группе РМОП транзисторов Gr1P для ТМГ элемента с предложенной топологией при сигналах на входах ТМГ элемента  $A = B = C = 0$  для треков с  $LET = 60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ . Амплитуды импульсов помех (ошибок) на выходе ТМГ элемента с предложенной топологией для точек входа трека 2р–5р (рис. 9) составляют 0.6–1.0 В при длительности 250–300 пс.

Практически такие же значения амплитуд помех у ТМГ элемента с обычной традиционной топологией (пунктирные линии на рис. 9) при точках входа треков 4р–7р, но длительности импульсов помех больше и составляют 390–450 пс. В этом случае мы не имеем существенной коррекции помех по сравнению с ТМГ элемента с обычной традиционной топологией.

## 5. Примеры переходных процессов при сборе заряда с трека

### А. Сбор заряда транзисторами группы Gr1N

На рис. 10а приведены зависимости напряжений на узлах ТМГ элемента в группе транзисторов Gr1N для случая воздействия на сток NМОП транзистора N1.1 элемента И-НЕ D1, когда входы ТМГ  $A = B = C = 0$ . Эти графики относятся к точке входа трека 6п в группе зависимостей на рис. 6.

В исходном состоянии до образования трека транзисторы N1.1, N1.2 заперты, а транзистор N4.1 открыт. Сбор заряда через сток NМОП транзистор N1.1 (входная точка 6п на рис. 3) при возникновении трека в момент времени (рис. 10а)  $t = 100 \text{ пс}$  переводит транзистор N1.1 в инверсный режим смещения.

В исходном состоянии до образования трека транзисторы N1.1, N1.2 заперты, а

транзистор N4.1 открыт. Сбор заряда через сток NМОП транзистор N1.1 (входная точка бп на рис. 3) при возникновении трека в момент времени (рис. 10а)  $t = 100$  пс переводит транзистор N1.1 в инверсный режим смещения.

При этом происходит снижение напряжения (рис. 10а) на стоке NМОП транзистора N1.1 (выходе элемента 2И-НЕ D1) до “минус” 0.6 В и соответственно на затворе NМОП транзистора N4.1 из D4, расположенного в группе Gr1N (рис. 2 и 3), что переводит транзистор N4.1 из открытого в запертый режим смещения. Находящийся в инверсном режиме смещения транзистор N1.1 (рис. 10а) поддерживают напряжение отрицательной полярности на затворе транзистора N4.1, что держит его в запертом состоянии, и он, собирая заряд с трека, снижает напряжение импульса помехи на своем стоке (и соответственно выходе D4 и выходе TMG элемента), возникшего при его заперении.

Это способствует коррекции длительности импульса ошибки на выходе TMG элемента. Через 50 пс после начала сбора заряда напряжение на стоке транзистора N4.1 становится меньше, чем 0.7 В, и далее уровень помехи на выходе элемента TMG удерживается на уровне менее 0.53 В до окончания сбора заряда с трека. В этом случае имеет место коррекция (минимизации) амплитуды и длительности импульса ошибки на выходе TMG элемента (см. на рис. 6 данные для точки входа бп). Соответственно для всех точек входа трека в диапазоне от 1п до бп (рис. 6) длительности импульсов помех менее 20–50 пс.

Графики на рис. 10б относятся к точке входа трека 4п в группе зависимостей на рис. 7. На рис. 10б приведен пример зависимостей напряжений на узлах TMG элемента в группе транзисторов Gr1N при сборе заряда с точкой входа трека 4п (рис. 3) при входных сигналах  $A = B = 1$ ,  $C = 0$ . Изначально открытые транзисторы N1.1 и N1.2 в начале сбора заряда сразу после возникновения трека в момент  $t = 100$  пс переходят в инверсный режим смещения при напряжении на стоках  $-(0.16-0.1)$  В. Одновременно из запертого в инверсное состояние переходит и транзистор N4.1 (рис. 10б) с начальным напряжением на стоке -0.7 В. Это напряжение задает начало импульса ошибки на выходе TMG элемента. Далее транзистор N4.1 собирает и выводит заряд через свой сток  $pn$ -переход. Этот процесс формирует на выходе TMG элемента

импульс ошибки с амплитудой 1 В и длительностью 330 пс, равной длительности сбора заряда. Для смежных с точками 3п и 5п с входной точки трека 4п (рис. 7) результаты формирования импульсов ошибки аналогичны (длительности импульсов помехи 130 пс и 300 пс на рис. 7). В этом случае нет существенной коррекции импульса помехи для этих точек входа трека, однако в целом параметры импульсов помех у элемента TMG с предложенной топологией лучше по сравнению с элементом TMG с обычной традиционной топологией (см. рис. 7).

### *Б. Сбор заряда транзисторами группы Gr1P*

Графики на рис. 11а относятся к точке входа трека 4р в группе PМОП транзисторов Gr1P для зависимостей на рис. 8. На рис. 11а приведены графики изменения напряжений на узлах TMG элемента, иллюстрирующие результат сбора заряда с трека, проходящего через сток открытого PМОП транзистора P4.1 элемента 3И-НЕ D4 (точка входа трека 4р на рис. 3), когда входные сигналы TMG элемента  $A = B = 1$ ,  $C = 0$ . Транзистор 4.1 (рис. 2) находится в открытом состоянии и в начале сбора заряда в момент возникновения трека при  $t = 100$  пс переходит в режим инверсного смещения, что в итоге фиксирует выходное напряжение элемента TMG на уровне близком к постоянному значению логическое единицы “1”.

Запертые PМОП транзисторы P1.1 и P1.2 собирают заряд с трека, формируя импульсы положительной полярности на своих стоках и на затворе транзистора P4.1 (пунктирная линия на рис. 11а). Импульс на затворе P4.1 (на выходе D1) не запирает транзистор P4.1 и TMG элемент сохраняет практически неизменным выходной логический уровень “1” без импульса ошибки. В этом случае имеем существенную минимизацию амплитуды и полностью исключается импульс ошибки.

На рис. 11б приведены графики изменения напряжений на узлах TMG элемента, иллюстрирующие результат сбора заряда с трека с точкой трека 5р, которая является смежной с точкой трека 4р, проходящего через сток PМОП транзистора, когда входные сигналы TMG элемента  $A = B = 1$ ,  $C = 0$ . Точка входа трека 5р проходит через сток транзистора P1.1 элемента 2И-НЕ D1 (рис. 3), расположенного рядом с транзистором P4.1.

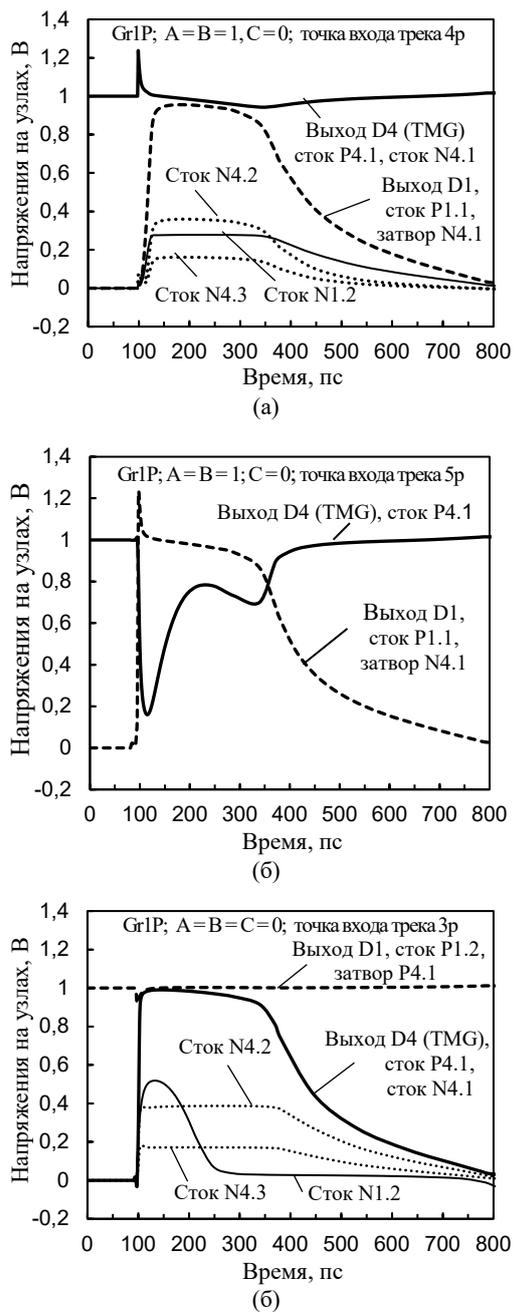


Рис. 11. Зависимости напряжений на узлах во времени в группе транзисторов Gr1P для треков с  $LET = 60 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{мг}$ : (а) точка входа трека 4p, на входах TMG элемента  $A = B = 1$ ;  $C = 0$ ; (б) точка входа трека 5p, на входах  $A = B = 1$ ;  $C = 0$  (в) для точки входа трека 3p при сигналах на входах TMG элемента  $A = B = C = 0$ .

В этом случае в начале сбора заряда во время возникновения трека при  $t = 100 \text{ пс}$  в режим инверсного смещения переходит транзистор P1.1, через сток которого проходит трек. В итоге транзистор P4.1 запирается, не переходит в инверсный режим смещения и, находясь в запертом состоянии, собирает заряд, который увеличивает

напряжение на его стоке и выходе TMG элемента, образуя короткий импульс помехи с длительностью 30 пс по уровню 0.7 В от пьедестала импульса. Соответственно во всем диапазоне точек входа треков от 1p до 7p у импульсов помех на выходе предложенного TMG элемента (рис. 8) длительности не превышают 30 пс.

Графики на рис. 11в относятся к точке входа трека 3p в группе зависимостей на рис. 8 для случая, когда входные сигналы TMG элемента равны  $A = B = C = 0$ .

Зависимости напряжений на узлах TMG элемента на рис. 11в приведены для трека с точкой входа 3p, проходящего через область общих истоков PMOП транзисторов P1.2 и P4.1 (рис. 3) из D1 и D4 элементов, когда входные сигналы TMG элемента равны  $A = B = C = 0$ . Входные сигналы поддерживают транзисторы P1.2 и P1.1 открытыми во время сбора заряда, что сохраняет изначально запертый транзистор P4.1 в этом состоянии и он собирает заряд с трека с точкой входа 3p, формируя на выходе элемента TMG импульс ошибки с амплитудой 1 В и длительностью 290 пс.

Амплитуды импульсов ошибки на выходе TMG элемента (рис. 9) для смежных с 3p точек входа трека, а именно точек 2p, 4p имеют значения 1.0 В и длительности 240–290 пс, определяемые временем сбора заряда. В этом случае мы не имеем существенной коррекции помех по сравнению с TMG элемента с традиционной топологией.

Практически такие же значения амплитуд помех у TMG элемента с обычной традиционной топологией для точек входа треков 4p–7p (пунктирные линии графиков на рис. 9), но длительности импульсов помех для них больше и составляют 390–450 пс.

## 6. Заключение

КМОП тройной мажоритарный элемент на комбинационных логических элементах И-НЕ с предложенной топологией, обеспечивающей коррекцию длительности импульсов помех (ошибок) на выходе мажоритарного элемента, в основном имеет лучшие характеристики устойчивости к воздействиям одиночных ядерных частиц по сравнению с вариантом с обычной традиционной топологией. Этот элемент имеет меньше транзисторов и меньше площадь, чем мажоритарный элемент на комбинационных элементах И и ИЛИ, и

может быть основой при разработке модульной логики резервирования в 28 и 65-нм КМОП системах с повышенной устойчивостью к воздействиям одиночных ядерных частиц. Коррекция импульса помехи отсутствует в TMG элементе с обычной традиционной топологией без чередования транзисторов логических комбинационных элементов D1, D2, D3 и элемента D4, что приводит к существенным импульсам помех, возникают при всех вариантах сигналов на

входах этого TMG элемента.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, проект № 0065-2019-0008 "Архитектурные и схемотехнические методы снижения энергопотребления и повышения сбоеустойчивости микропроцессоров и коммуникационных контроллеров высокопроизводительных ЭВМ".

## Simulation of Single Event Transients in the CMOS Triple Majority Gate at Impacts of Single Ionizing Particles

Yu.V. Katunin, V.Ya. Stenin

**Abstract** - This paper presents the TCAD simulation results for triple majority gate, designed on 65-nm CMOS bulk technology, which investigated for sensitivity to impacts of single ionizing particles. Transient process caused by particle impact is simulated by charge collection from the particle track through transistor pn-junctions, which can be accompanied by the appearance of an error pulse at the gate output. Tracks along the normal to the crystal surface with input track points on the transistors' drains and sources were used in the simulation. Linear energy transfer to the track is 60 MeV·cm<sup>2</sup>/mg.

**Keywords** – fault tolerance, noise pulse, single event transient, single particle, simulation, triple majority gate

### Литература

1. M. Nicolaidis. Soft errors in modern electronic systems. New York, Springer, 2011. 27 – 54.
2. N.D. Hindman, L.T. Clark, D.W. Patterson, K.E. Holbert. Fully automated testable design of fine-grained triple mode redundant logic. «IEEE Transactions on Nuclear Science», v. 58 (2011), № 6, 3046 – 3052.
3. N.N. Mahatme, S. Jagannathan, T.D. Loveless, L.W. Massengill, B.L. Bhuvu, S.-J. Wen, R. Wong. Comparison of combinational and sequential error rates for a deep submicron process. «IEEE Transactions on Nuclear Science», v. 58 (2011), № 6, 2719 – 2725.
4. N.M. Atkinson, A.F. Witulski, W.T. Holman, J.R. Ahlbin, B.L. Bhuvu, L.W. Massengill. Layout technique for single-event transient mitigation via pulse quenching. «IEEE Transactions on Nuclear Science», v. 58 (2011), № 3, 885 – 890.
5. Yu.V. Katunin, V.Ya. Stenin. TCAD simulation of the 65-nm CMOS logical elements of the decoders with single-event transients' compensation. «Proc. of 2018 Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) – Moscow, 14–16 Mar. 2018», 1–6.
6. I.A. Danilov, M.S. Gorbunov, A.A. Antonov. SET tolerance of 65 nm CMOS majority voters: a comparative study. «IEEE Transactions on Nuclear Science», v. 61 (2014), № 4, 1597 – 1602.
7. K.M. Warren, A.L. Stenberg, J.D. Black, R.A. Weller, R.A. Reed, M.H. Mendenhall, R.D. Schrimpf, L.W. Massengill. Heavy ion testing and single-event upset rate prediction considerations for a DICE flip-flop. «IEEE Transactions on Nuclear Science», v. 56 (2009), № 6, 3130 – 3137.
8. M.S. Gorbunov, P.S. Dolotov, A.A. Antonov, G.I. Zebrev, V.V. Emeliyanov, A.B. Boruzdina, A.G. Petrov, A.V. Ulanova. Design of 65 nm CMOS SRAM for space applications: a comparative study. «IEEE Transactions on Nuclear Science», v. 61 (2014), № 4, 1575 – 1582.
9. R. Garg, S.P. Khatri. Analysis and design of resilient VLSI circuits: mitigating soft errors and process variations. New York, Springer, 2010. 194 – 205.

# Методические особенности и основные результаты исследований КМОП СБИС микропроцессоров и микроконтроллеров на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения

В.Д. Калашников, Д.О. Титовец, Д.С. Костюченко

НИЯУ МИФИ, АО «ЭНПО СПЭЛС», г. Москва, vdkal@spels.ru, dotit@spels.ru, dskos@spels.ru

**Аннотация** - В статье представлены методические особенности проведения испытаний КМОП СБИС микропроцессоров и микроконтроллеров на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения (ИИИ), рассмотрены основные эффекты, возникающие при воздействии ИИИ, а также приведены основные результаты исследований для СБИС различного функционала и проектных норм.

**Ключевые слова** – методика радиационных испытаний, импульсное ионизирующее излучение, КМОП СБИС, эффекты мощности дозы, тиристорный эффект.

## 1. Введение

К СБИС микропроцессоров и микроконтроллеров (МП и МК), применяемым в аппаратуре специального назначения, предъявляются требования по функционированию в условиях воздействия различных радиационных (специальных) факторов [1]. При этом во время и после воздействия импульсного ионизирующего излучения в СБИС МП и МК могут возникать следующие основные радиационные эффекты:

1. Тиристорный эффект [2-6] – радиационно-индуцированное срабатывание (включение) паразитных тиристорных структур карман-подложка (для СБИС, изготовленных по технологии КМОП КНИ – не характерен).

2. Катастрофический отказ – необратимая потеря работоспособности и/или необратимый выход параметра за нормы.

3. Временная потеря работоспособности (ВПР) – выход параметра за пределы установленных норм.

4. Сбои в триггерных узлах и ячейках памяти [5-8], такие как: а) сбои выходных логических уровней; б) потеря информации в регистровых структурах из-за просадки на внутренних шинах питания, протекания больших токов через активные структуры ячейки, а также из-за импульсных помех по линиям данных и тактирования; в) наруше-

ние работы внутренних блоков МП и МК, в частности процессорного ядра вследствие потери информации в регистрах специального назначения и импульсных помех, нарушающих работу внутренних аппаратных схем, в том числе – вводя их в «запрещённые» состояния.

Эти эффекты проявляются в виде нарушения функционирования, «зависания» МП и МК или, при больших уровнях воздействия, – самопроизвольного сброса МП и МК. Эффект может сопровождаться изменением тока потребления как в меньшую, так и в большую сторону и ошибочно может быть воспринят в качестве тиристорного эффекта.

5. Сбои в аналоговых блоках СБИС.

Основными критериальными параметрами, определяющими радиационную стойкость СБИС МП и МК, как правило, являются: функционирование; статические электрические параметры (выходные напряжения при соответствующей нагрузке, токи утечки и статические токи потребления); динамические параметры: задержки распространения, времена выборки, предельные рабочие частоты, зависимости типа минимального напряжения питания от частоты, динамические токи потребления и прочее.

В работе рассматриваются особенности проявления указанных эффектов и методики их контроля, а также

приводятся основные результаты исследований типовых представителей отечественных СБИС МП и МК с современными проектными нормами при воздействии ИИИ.

## 2. Методические особенности регистрации радиационных эффектов

*Тиристорный эффект и катастрофический отказ*

Наиболее опасным эффектом во время воздействия ИИИ является возникновение тиристорного эффекта (ТЭ) – образования паразитных р-п-р-структур. Критерием тиристорного эффекта (ТЭ) является резкое возрастание тока потребления, устраняемое только отключением питания. Порог тока потребления для регистрации ТЭ устанавливается на уровне 150...300% от значения тока потребления в рабочем режиме. Возникновение ТЭ может приводить к локальному разогреву и, как следствие, выходу микросхемы из строя, т.е. появлению катастрофического отказа (КО).

В ходе исследований определяют уровень возникновения ТЭ и КО. При возникновении тиристорного эффекта экспериментально определяют его пороговый уровень, проводят исследовательские работы по установлению методов и средств его подавления в составе аппаратуры, а также проводят экспериментальное определение сохранения работоспособности изделий в процессе и после выдержки в состоянии ТЭ. Часто требуется определить значения электрических параметров возникающего ТЭ.

При резком возрастании тока потребления микросхемы осуществляется попытка аппаратного сброса, если сброс не приводит к восстановлению номинального значения тока потребления – регистрируется ТЭ. В случае регистрации ТЭ, проводится кратковременное выключение и включение питания СБИС. После восстановления питания осуществляется проверка работоспособности. Критерием работоспособности является отсутствие ТЭ и ошибок функционального контроля после воздействия.

Критичный режим функционирования СБИС в ходе воздействия ИИИ при контроле тиристорного эффекта (ТЭ) и катастрофического отказа (КО), как правило:

(а) максимальное напряжение питания (как по ядру, так и по периферии); (б) нормальные климатические условия или повышенная рабочая температура среды; (в) статический режим работы микросхемы при котором минимизировано влияние функциональных блоков микросхемы на ток потребления. Все перечисленные условия приводят к максимально возможным ионизационным токам и минимизации просадок напряжения питания во время воздействия ИИИ, что считается критичным режимом работы.

Отличительной особенностью СБИС МП и МК являются большие ионизационные токи при ИИИ, которые могут приводить к просадкам напряжения [9] и сбросить ТЭ, приведя к некорректной оценке уровня возникновения ТЭ. При достаточно больших уровнях воздействия ИИИ из-за просадок напряжение питания вовсе может снизиться до нуля. Данный эффект является нежелательным, поскольку влечет за собой следующие проблемы:

- снижение напряжения питания может привести к возникновению сбоев. В таком случае останется неизвестной причина возникновения сбоя: как результат воздействия ИИИ, или из-за влияния просадки.
- вероятность обнаружения ТЭ снижается при понижении напряжения питания, а при просадке до нуля и вовсе отсутствует. В результате чего нельзя гарантировать отсутствие ТЭ в микросхеме при стабильно заданном питании.

*Временная потеря работоспособности*

Во время и непосредственно после воздействия ИИИ, как правило, допускается временная потеря работоспособности изделий (ВПП), т.е. временное отклонение значений параметров за пределы норм [10], при этом требования по стойкости формулируются так, что ВПП не должно превышать 2 мс. ВПП для СБИС МП и МК регистрируется как по выходным логическим уровням ( $U_{OH}$ ,  $U_{OL}$ ), так и по функционированию [10].

В первом случае за ВПП принимается время от выхода соответствующего уровня за пределы норм до его восстановления. При переключении логического уровня в инверсное или в Z- состояние на микросхему подается сигнал сброса. В этом случае за

ВПР принимается время от момента воздействия до восстановления выходного логического уровня с учётом времени загрузки микросхемы.

Во втором случае процедура регистрации ВПР сложнее. Определение ВПР по функциональному контролю проводится с помощью контроля сигнала на определенном выводе. До воздействия микросхема непрерывно выдает на контролируемый вывод переменный сигнал (меандр). При этом надо иметь в виду возможное возникновение эффектов «зависания» при ИИИ. «Зависание» при воздействии ИИИ может прервать работу СБИС МП и МК до подачи аппаратного сигнала «сброс», что в случае ручного управления может составлять секунды, что превышает нормативные значения ВПР в 2 мс. За ВПР принимается время от сбоя меандра в момент или после воздействия до его восстановления с учётом времени загрузки микросхемы. По определению за работоспособность СБИС принимается состояние, при котором СБИС способна выполнять заданную функцию с параметрами, установленными требованиями технической документации. Однако, для МП и МК, которые могут выполнять различные функции в зависимости от программы, за работоспособность часто принимают функционирование, когда МП и МК правильно выполняют задачу по заданной программе. Это является не верным, т.к. время загрузки исполняемой программы после подачи сигнала сброса также является штатной функцией микросхемы и при этом время загрузки может измеряться десятками и сотнями миллисекунд. Таким образом, ВПР – это время с момента воздействия импульса ионизирующего излучения (ИИИ) до момента, когда микросхема восстанавливает свою работоспособность, т.е. может быть перезапущена, совершить инициализацию и реализовать заданную функцию (см. рисунок 1).

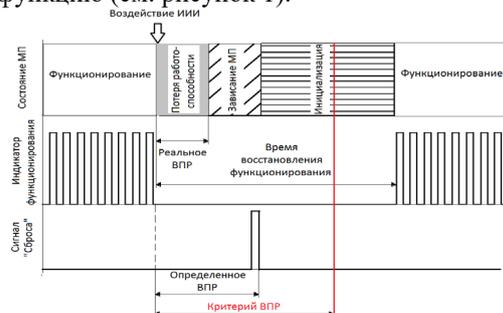


Рисунок 1 – Диаграмма определения ВПР СБИС МП и МК во время воздействия ИИИ

Соответственно, для подтверждения ВПР необходимо обеспечить перезапуск СБИС МП и МК в течение заданного времени (как правило, 2 мс) и убедиться в его функционировании. Для этого должна быть написана специальная программа контроля функционирования с минимальным временем инициализации и подтверждением работоспособности, например, с помощью контроля изменения внешнего сигнала на линии пользовательского порта. Перезапуск МП и МК можно осуществлять либо синхронно с радиационным импульсом подачей сигнала «сброс» через заданное время, либо подачей сигнала типа «меандр» на вход сигнала «сброс» с частотой, достаточной для того, чтобы во время неактивного состояния сигнала «сброс» микросхема успевала восстанавливать функционирование (см. рисунок 2), при этом для ВПР меньше 2 мс частота не должна быть меньше 1 кГц.

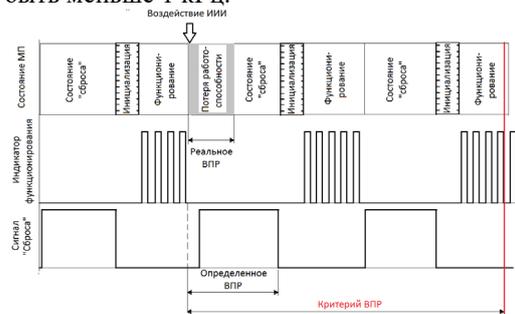


Рисунок 2 – Диаграмма реализации методики подтверждения критерия ВПР.

Второй способ значительно проще, но в большинстве случаев не позволяет точно определить значение ВПР. Для СБИС МП и МК, время инициализации которых превышает критериальное значение ВПР, значение ВПР определяется подачей сигнала «сброс» синхронно с импульсом воздействия через регулируемое время, необходимое для инициализации МП, после чего проверяется функционирование. Минимальное время между воздействием и сигналом «сброс», при котором МП восстанавливает функционирование спустя время инициализации, и является ВПР. При самопроизвольном сбросе достаточно контролировать время восстановления функционирования микросхемы после воздействия ИИИ, оно не должно превышать суммы времени инициализации МП и 2 мс.

Данная методика может быть использована для других классов сложно-функциональных цифровых СБИС – ПЛИС, БМК и др.

### Эффекты сбоев (уровень бессбойной работы)

В ходе оценки стойкости СБИС МП и МК по функциональному и параметрическому контролю при воздействии ИИИ используется понятие «уровень бессбойной работы» (УБР) – максимальный уровень воздействия, при котором микросхема функционирует в пределах допустимых норм.

Оценка УБР производится по таким критериям работоспособности как:

- Напряжение логических уровней;
- Функционирование (отсутствие сбоя).
- Параметры АЦП и ЦАП.

Ниже рассмотрим методики регистрации УБР по перечисленным выше

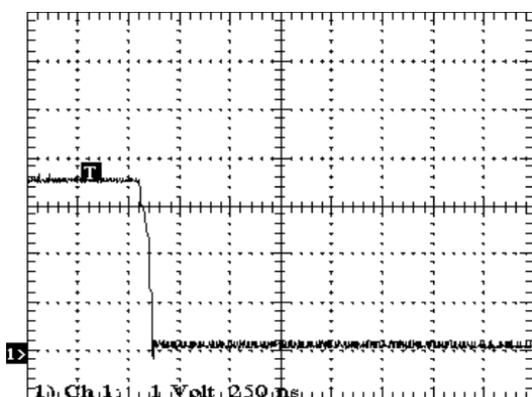


а)

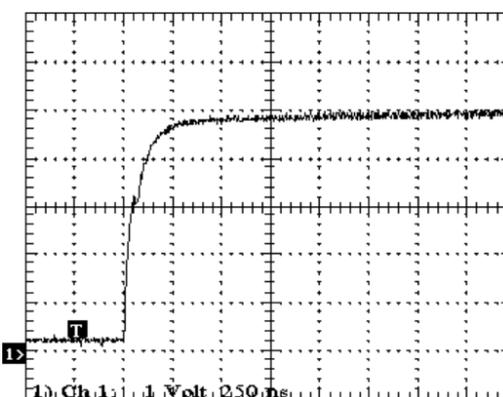


б)

Рисунок 3 – Кратковременное переключение логических уровней: (а) логической 1 и (б) логического 0



а)



б)

Рисунок 4 – Переключение логических уровней в инверсное состояние: (а) логической “1” и (б) логического “0”

Измерение амплитуды сбоя сигнала логического нуля производится при максимальном напряжении питания микросхемы, а амплитуды сбоя сигнала логической единицы при минимальном напряжении питания микросхемы. Эти режимы являются критическими для измерения сбоя логических уровней, т.к. при воздействии ИИИ сбой логического уровня происходит в направлении его инверсии (т.е. происходит понижение выходного

критериям.

Одним из результатов воздействия ИИИ является изменение значений выходного напряжения логических уровней. Возможны как кратковременные (менее 2 мс) изменения напряжений (см. рисунок 3) с последующим возвратом в исходное состояние, так и переключения выходного уровня в инверсное состояние (см. рисунок 4). Важно, чтобы микросхема могла стабильно выдавать выходной логический уровень при заданном токе через этот выход. Для этой цели выходы логических сигналов нагружают с расчетом на максимально допустимый ток.

напряжения для логической единицы и повышение выходного напряжения для логического нуля).

Контроль только выходных напряжений  $U_{OL}$  и  $U_{OH}$  может быть неинформативен. Необходимо проводить контроль УБР по функционированию с задействованием наиболее критичных блоков:

- блоки памяти (контроль сохранности тестовых данных);

- арифметико-логическое устройство (АЛУ) (контроль выполнения набора арифметических и логических команд);
- порты ввода-вывода (прием и передача тестовой посылки данных);
- PLL;
- таймеры-счетчики;
- контроллер прерываний.

Сбой PLL проявляется как кратковременное прекращение генерации сигнала, изменение выходной частоты (увеличение или уменьшение) с последующим восстановлением. На рисунке 5 показано, что при незначительном сбое напряжения логической единицы происходит сбой блока PLL.

Многokратно экспериментально показано, что при максимальной тактовой частоте (см. рисунок 6) и минимальном напряжении питания ядра (см. рисунок 7) микросхемы наиболее чувствительны к ИИИ [11]. Поэтому режим при минимальном напряжении питания ядра является наиболее критичным для микросхемы в данном случае.

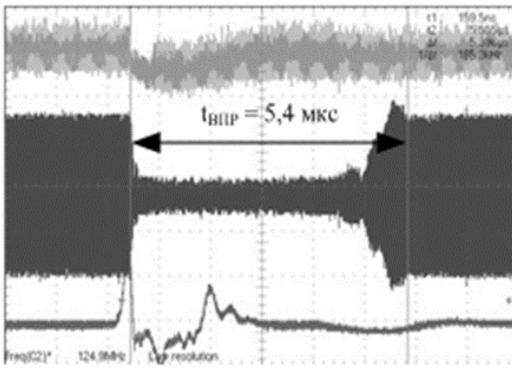


Рисунок 5 – Сбой уровня логической единицы и блока PLL

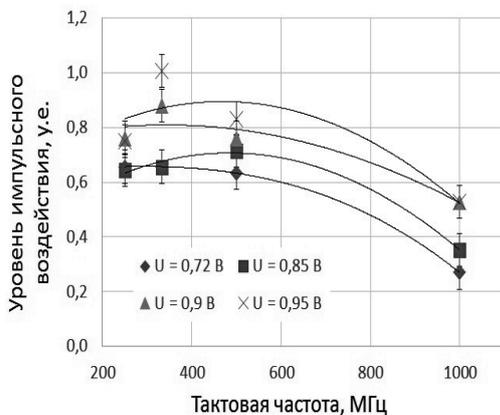


Рисунок 6 – Зависимость УБР от тактовой частоты для одного образца при различных напряжениях питания

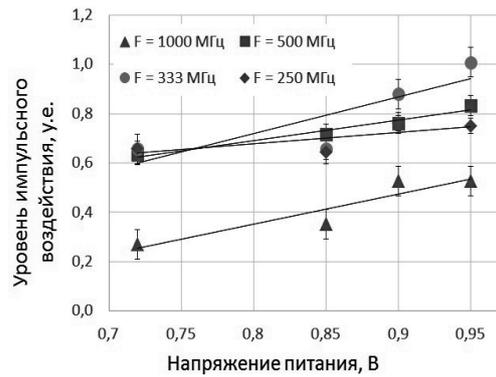


Рисунок 7 – Зависимость УБР от напряжения питания для одного образца при различных тактовых частотах

В состав СБИС МП и МК довольно часто входят аналого-цифровые блоки, такие как АЦП и ЦАП, которые потенциально являются чувствительными к воздействию ИИИ и требуют обязательного контроля при испытаниях. Контроль УБР и ВПР для АЦП осуществляется по записи изменения выходного кода при оцифровке входного напряжения. В процессе воздействия проводится оцифровка входного напряжения, накапливается информация об изменении выходного кода АЦП в момент и после испытательного воздействия. Критерием начала измерения ВПР служит выход за установленные нормы интегральной нелинейности (INL) результата преобразования АЦП. Из-за сбоя автокалибровки АЦП, окончанием времени измерения ВПР служит восстановление преобразования входного напряжения АЦП в рамках установленной нормы INL с учетом новых параметров автокалибровки. За УБР принимается максимальное значение воздействия, при котором не возникает изменение выходного кода более, чем значение дифференциальной нелинейности (DNL).

Контроль УБР для ЦАП осуществляется по параметрам выходного напряжения. Контроль функционирования проводится в динамическом режиме – на вход ЦАП подается код, соответствующий напряжению на выходе ЦАП (10% полной шкалы (ПШ), 50% ПШ, 90% ПШ). Выход напряжения ЦАП за установленные нормы считается сбоем. ВПР определяется по наибольшему времени выхода напряжения ЦАП за установленные нормы.

Как сказано выше, контроль ТЭ при испытаниях на воздействие ИИИ сопровождается резким возрастанием тока

потребления. В СБИС МП и МК важно не перепутать резкие скачки тока потребления при ТЭ и при эффектах функциональных прерываний/сбоев (ФС), которые наиболее характерны при воздействии отдельных ядерных частиц космического пространства [12], но и не редки при воздействии ИИИ.

Типовая процедура детектирования эффекта функционального сбоя может осуществляться по процедуре, схематично показанной на рисунке 8. При резком возрастании тока потребления на выход RESET приходит сигнал сброса, если ток сбрасывается до уровня исходного – то это не ТЭ. В случае, если при команде сброса ток не входит в норму, то регистрируется ТЭ, осуществляется сброс питания (включая сброс входов), т.е. классическое парирование ТЭ.

Функциональные сбои (прерывания) могут возникать в различных блоках и в большинстве случаев связаны со сбоями в регистрах специального назначения. К методам парирования функциональных прерываний относится не только описанная выше команда сброса (RESET), но и более «мягкие», такие как внешнее прерывание (INT), немаскируемое прерывание (NMI), сброс от Watch dog timer (WDI) и в случае, когда обозначенные выше способы не помогают, тогда сброс по команде RESET. В ходе радиационного эксперимента важно определять уровни возникновения каждого из эффектов ФС в зависимости от метода обработки прерываний, т.е. определять метод выхода из ФС.

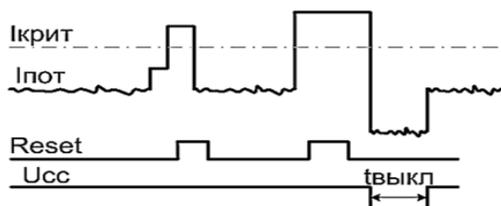


Рисунок 8 – Схематичное изображение процедуры разделения ТЭ и функциональных сбоев (прерываний) при резком возрастании тока потребления

### 3. Требования к испытательной оснастке и программному обеспечению

Как правило, питание исследуемых микросхем обеспечивается с помощью внешнего источника питания через соединительные провода, которые имеют

собственное сопротивление. В результате при высоких токах потребления исследуемого образца (больше 1 А), характерных для СБИС МП и МК, на проводах могут теряться десятки и сотни милливольт, что потенциально критично для функционирования микросхемы, а также проявления тиристорного эффекта. Данную разность можно компенсировать путем подстройки выходного напряжения на самом источнике питания. В целях контроля реального напряжения на плате с микросхемой используется обратная связь. Однако при проведении радиационных исследований возможны значительные колебания тока потребления, как за счет детерминированного изменения режима функционирования с динамического на статический, в том числе пониженного энергопотребления и обратно, так и за счет недетерминированных изменений тока потребления в результате функциональных сбоев.

Если детерминированные изменения режима можно предусмотреть, снижая напряжение питания перед изменением режима и тем самым не допускать превышения при переходе из динамического в статический режим, то скачки тока в результате функциональных сбоев непредсказуемы.

Автоматическая подстройка напряжения, как правило, достаточно медленная (сотни мс), в результате чего при смене режима могут возникать кратковременные превышения напряжения питания выше допустимых значений (см. рисунок 9). Данная проблема может быть решена как за счет уменьшения сопротивления проводов, так и путем использования источников питания с более быстрой обратной связью.

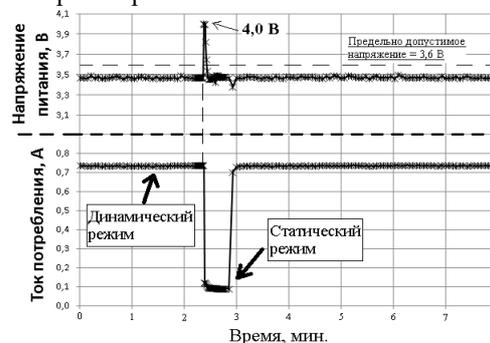


Рисунок 9 – Пример выхода напряжения питания за допустимые границы в момент перехода микросхемы из динамического режима в статический

К другим методам борьбы с просадками питания в момент воздействия ИИИ можно отнести установку керамических конденсаторов большой емкости в цепях питания для компенсации динамического изменения тока потребления. Однако наилучшего эффекта удастся достичь путем организации питания микросхемы с использованием вторичных источников питания соответствующей мощности, устанавливаемых непосредственно возле исследуемой микросхемы и защищенных от воздействия ИИИ (см. рисунок 10).

Проведение радиационных исследований связано с использованием моделирующих установок – ускорителей. Данные установки, как правило, являются источниками сильных электромагнитных (ЭМ) помех, и, как следствие, исследуемая микросхема во время проведения радиационного эксперимента помимо воздействия радиации также подвергается воздействию ЭМ излучения, что может вызвать ряд нежелательных последствий.

Проблем стоит ожидать, если печатная плата с исследуемым образцом разведена и распаяна с многочисленными нарушениями правил проектирования печатных плат. Следует не допускать использование проводов, проходящих вне плоскости печатной платы, особенно образующих при этом проводящий контур, который является наиболее чувствительным к ЭМ помехе. Кроме того, наличие множества сигнальных линий большой длины, а также обильного количества переходных отверстий влечет к общему снижению помехоустойчивости оснастки.

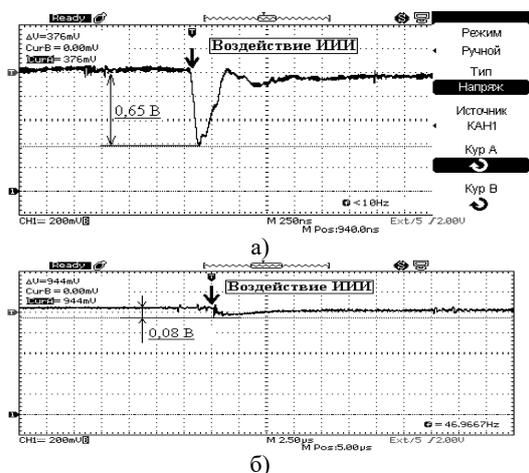


Рисунок 10 – Просадка напряжения по каналу питания ядра для сложно функциональной СБИС в случаях использования внешнего (а) и вторичного (б) источников питания

Второй наиболее уязвимой частью оснастки являются соединительные провода, обеспечивающие связь исследуемой микросхемы с измерительным оборудованием. Использование неэкранированных проводов для обеспечения питания микросхемы, а в большей степени для передачи информации по шине данных приводит к наведению сильной помехи в проводнике.

Подобные помехи могут привести к следующим результатам:

- скачок напряжения в цепи питания, в результате которого на входах питания микросхемы окажется потенциал, выходящий за границы допустимых норм;
- помеха в линии данных может привести к функциональному сбою;

Таким образом, корректное проведение радиационных исследований на моделирующих установках с высокими ЭМ помехами становится практически невозможным при использовании оснастки, сильно восприимчивой к ЭМ помехам. В результате требуется обращаться к различным способам организации экранирования испытательной оснастки от внешнего ЭМ излучения. Одним из примеров такого экранирования является применение алюминиевой оболочки, обернутой вокруг оснастки и шлейфа данных, который необходим для обмена информацией между микросхемой и персональным компьютером (ПК).

Для достижения наименьшего влияния ЭМ помехи на оснастку следует разрабатывать ее с учетом способов борьбы с ЭМ излучением:

- следовать правилам проектирования печатных плат [13];
- не использовать соединения компонентов при помощи проводов, проходящих вне плоскости печатной платы;
- обмен информацией между ПК и микросхемой осуществлять с помощью последовательного интерфейса;
- использовать экранированные кабели для связи микросхемы с остальным оборудованием.

Необходимость экранировать оснастку косвенно накладывает требования на нее еще одно требование – физические габариты и конструктив.

Оснастка должна иметь размеры и конструкцию, позволяющие устанавливать ее

на различных модулирующих установках с учетом их конструктивных особенностей, например, должно обеспечиваться правильное функционирование технологических детекторов и датчиков самой установки. В печатной плате с исследуемым образцами должны быть предусмотрены отверстия для ее надежной фиксации на монтажной раме моделирующей установки.

Также необходимо предусмотреть возможность установки дополнительного оборудования, например стенда контроля и задания температурного режима. Следует учитывать необходимую длину и толщину проводов, необходимых для подачи питания и передачи данных. В случае необходимости использования на печатной плате с образцом дополнительных активных элементов (транзисторы, диоды, контроллеры, микросхемы внешней памяти и т.д.) для задания режима и/или проведения контроля функционирования исследуемой микросхемы требуется обеспечить их защиту от воздействия радиации. Зачастую во время испытаний требуется проводить воздействие непосредственно на сам кристалл микросхемы, то есть к нему требуется обеспечить открытый доступ, предусмотрев:

1) сквозное отверстие достаточного диаметра при использовании колодок;

2) вырез на печатной плате под микросхемой для возможности проведения радиационного или лазерного воздействия на кристалл со стороны подложки или в случаях, когда кристалл в микросхеме располагается приборным слоем вниз, в сторону печатной платы.

#### **4. Основные результаты исследований**

С учетом методик контроля доминирующих радиационных эффектов, описанных в предыдущих разделах, были

проведены исследования ряда отечественных КМОП СБИС МП и МК к воздействию ИИИ.

Сводные результаты исследований в зависимости от функциональных характеристик СБИС и технологии приведены в таблице 1.

Анализ результатов показывает, что применение специальных библиотек, направленных на повышенную радиационную стойкость (RHBD) способно устранить возникновение ТЭ до уровня более  $10^{12}$  ед/с при этом до указанного уровня не характерно возникновение катастрофических отказов даже для технологии 28 нм.

Типовой уровень бессбойной работы СБИС МП и МК при ИИИ находится, как правило, в диапазоне от  $10^7$  до  $10^7$  ед/с.

При этом уровень сбоев по функциональным характеристикам сопоставим или ниже сбоев по выходным логическим уровням, что подтверждает важность контроля УБР по функционированию.

#### **5. Выводы**

В статье представлены методические особенности проведения испытаний КМОП СБИС МП и МК на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения.

Приведены методики регистрации доминирующих радиационных эффектов и критериальных параметров.

Перечислены необходимые условия подготовки оснастки для испытаний КМОП СБИС на стойкость к воздействию ИИИ.

Изложены основные результаты исследований типовых представителей отечественных СБИС МП и МК с современными проектными нормами при воздействии ИИИ.

Таблица 1 – Сводные результаты исследований отечественных КМОП СБИС МП и МК к воздействию ИИИ в зависимости от функциональных характеристик и технологии

№ СБИС	Основные функциональные характеристики СБИС	Технология, нм	Фабрика	Уровень стойкости, ед/с*			
				КО	ТЭ	Сбои по лог.уровням	Сбои по ФК (кричный блок)
1	32-разрядные радиационно-стойкие сбоеустойчивые контроллеры информационно-управляющего интерфейса	180	отечеств.	более $5,2 \cdot 10^{12}$	более $5,2 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^9$ (зависание, парируемое блоком watchdog)
2	8-разрядный микроконтроллер с $f$ тактовой до 33 МГц	180	X-FAB	более $1,1 \cdot 10^{11}$	$9,2 \cdot 10^9$	$3,8 \cdot 10^8$	$3,8 \cdot 10^8$
3	высокопроизводительный процессор ЦОС с суперскалярной архитектурой	90	отечеств.	более $2,6 \cdot 10^{10}$	более $2,6 \cdot 10^{10}$	$1,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^7$
4	высокопроизводительный процессор ЦОС с суперскалярной архитектурой	65	TSMC	более $5,1 \cdot 10^{11}$	более $5,1 \cdot 10^{11}$	$3,2 \cdot 10^9$	$8,7 \cdot 10^8$ (самопроизвольный сброс)
5	64-разрядный одноядерный микропроцессор	65	TSMC	более $1,8 \cdot 10^{11}$	$4,9 \cdot 10^9$	$2,9 \cdot 10^{10}$	$9,0 \cdot 10^7$ (сбои в кэш-памятях)
6	64-разрядный микропроцессор со встроенной графикой	40	TSMC	более $2,1 \cdot 10^9$	более $2,1 \cdot 10^9$	**	$1,7 \cdot 10^9$
7	СБИС класса «система на кристалле» на базе процессорных ядер ЦОС	28	Global Foundry	более $3,4 \cdot 10^{12}$	$4,1 \cdot 10^{11}$	$3,3 \cdot 10^{10}$	$10^{10}$ (самопроизвольный сброс)
8	32-разрядные RISC микроконтроллеры	КНИ 180	X-FAB	более $10^{13}$	более $10^{13}$	$1,6 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^9$ (сбои в ОЗУ)

Примечание: \* для всех СБИС ВПП составляет менее 2 мс; \*\*параметр не контролировался

## CMOS VLSI microprocessors and microcontrollers to the dose-rate effects hardness test procedure

V.D. Kalashnikov, D.O. Titovets, D.S. Kostyuchenko.

**Abstract** - The paper presents CMOS VLSI microprocessors and microcontrollers to the dose-rate effects hardness test procedure. The main dose-rate effects are considered and the critical IC's parameters are represented.

**Keywords** – dose-rate effects test procedure, CMOS VLSI, dose-rate effects, latchup.

### Литература

1. ОСТ В 11 0998 - Микросхемы интегральные. Общие технические условия
2. J. F. Leavy and R. A. Poll, «Radiation-induced integrated circuit latchup», IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. NS-16, pp.96 -103 1969
3. B.L. Gregory, and B.D. Shafer, "Latchup in CMOS Integrated Circuits," IEEE Trans. On Nuclear Science, NS-20, Dec. 1973, pp.293-299
4. W. Morris, "CMOS Latchup," Invited Talk, Latchup Session, Proceedings of the International Reliability Physics Symposium (IRPS), May 2003, pp.86-92.

- 
5. Никифоров А.Ю., Телец В.А., Чумаков А.И. Радиационные эффекты в КМОП интегральных схемах. - М.: Радио и связь, 180 с., 1994.
  6. Агаханян Т.М., Аствацатурьян Е.Р., Скоробогатов П.К. Радиационные эффекты в интегральных микросхемах. - М.: Энергоатомиздат, 254 с., 1989.
  7. Woodruff, R.L., Nelson, D.A., and Scherr, S., Predicting Transient Upset in Gate Arrays, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987, vol. 34, no. 6, pp. 1426–1430.
  8. Messenger G.C., Ash M.S. Single Event Phenomena. - N.Y.: Chapman&Hall, 1997. - 368 p.
  9. В.С. Фигуров, В.В. Байков, В.В. Шелковников. Оценка влияния «просадки» питания на уровень возбуждения тиристорного эффекта у КМОП ИС при воздействии импульсного ионизирующего излучения // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, 2010, с. 39-45.
  10. О.А. Калашников, И.О. Лоскутов, П.В. Некрасов, «Особенности измерения времени потери работоспособности микропроцессорных СБИС» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость – 2015», выпуск 18, Москва, 2015, стр. 253-255.
  11. К.А. Москаленко, В.А. Марфин, О.А. Калашников, А.И. Чумаков, С.А. Носков, «Зависимость уровня бесбойной работы от тактовой частоты и напряжения питания современного процессора» // Радиационная стойкость электронных систем – «Стойкость – 2018», выпуск 21, Москва, 2018, стр. 189-190.
  12. R. Koga, S. H. Penzin, K. B. Crawford, and W. R. Crain, "Single Event Functional Interrupt (SEFI) sensitivity in microcircuits", Proc. 4th Radiation and Effects Components and Systems (RADECS), pp.311 -318 1997
  13. B. Carter. Circuit Board Layout Techniques // Op Amps for Everyone, 2002, с.17.1-17.31

# Специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования и верификации PDK

О.Р. Загидуллина, А.С. Надин., И.Е. Трифанихина, Д.С. Шипицин

АО “НИИМЭ”. 124460, Россия, Москва, Зеленоград, 1-ый Западный проезд, 12/1.

E-mail: ozagidullina@niime.ru, anadin@niime.ru, itrifanikhina@niime.ru, dshipitsin@niime.ru

**Аннотация:** С уменьшением технологических норм цена ошибки на всех этапах проектирования СБИС возрастает, следовательно повышаются требования к уровню качества комплекта средств проектирования (КСП, Process Design Kit - PDK). В статье описывается специализированное программное обеспечение для автоматизированного тестирования PDK “Golden Library Tool Kit” (GL), его ключевые особенности и модули. GL позволяет сократить время и повысить эффективность разработки и тестирования PDK, и снизить влияние человеческого фактора.

**Ключевые слова:** комплект средств проектирования; верификация; автоматизированное тестирование; регрессионное тестирование.

## Введение

Как известно, основная тенденция развития микроэлектроники – постоянное увеличение степени интеграции микросхем путем уменьшения размеров элементов – сдерживается возникновением короткоканальных эффектов в МОП-транзисторе [1].

Несмотря на это кремний, параллельно с которым развиваются перспективные полупроводники, продолжает оставаться главным материалом микроэлектроники.

Основными причинами этой тенденции являются отлаженные процессы производства и способность фабрик внедрять инновации в кремниевые процессы с минимальным риском для компаний, занимающихся разработкой ИС [2].

Эффективность и безошибочность внедрения стали возможными благодаря высокому качеству конструкторско-технологических платформ проектирования.

Базовый состав конструкторско-технологической платформы проектирования:

- комплект средств проектирования аналоговых и цифро-аналоговых схем (КСП, Process Design Kit - PDK);
- комплект средств проектирования цифровых схем (DDK);
- специализированные средства поддержки работы с САПР на всем

маршруте проектирования СБИС и ИС типа СнК;

- SPICE модели;
- маршруты проектирования аналоговых, цифро-аналоговых и цифровых СБИС;
- компиляторы памяти ОЗУ/ПЗУ [3].

PDK является важной составляющей платформы проектирования – это интерфейс между программными средствами разработки интегральных схем и технологическим процессом конкретной фабрики, позволяющим учесть особенности технологии изготовления. В состав PDK входят набор библиотек, командных файлов для проведения физической верификации топологии ИС, экстракции паразитных параметров, SPICE-модели и специализированное ПО собственной разработки. PDK используется для проектирования, моделирования, создания и проверки дизайна, перед передачей его на производство. По мере уменьшения технологических норм увеличивается время разработки и производства, повышаются требования к ресурсам, что влечет за собой рост капиталовложений [4]. В связи с этим к качеству PDK предъявляются особые требования.

Для обеспечения высокого качества выпускаемых PDK, был разработан инновационный набор специализированного программного обеспечения “Golden Library Tool Kit” (GL).

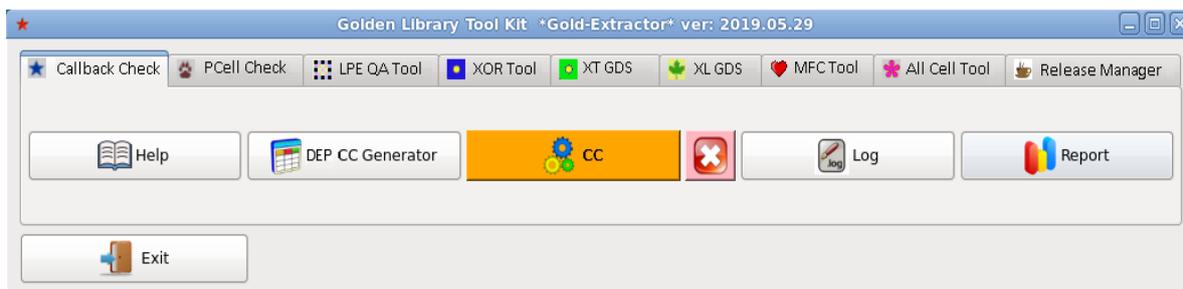


Рис. 1. Базовый интерфейс “Golden Library Tool Kit”

Ключевые особенности GL:

- интуитивно-понятный графический интерфейс;
- автоматизированное выполнение консолидированного сбора результатов;
- графическое представление результатов;
- модульный принцип построения.

Для оптимизации работы модули GL интегрируются с платформой распределенных вычислительных сред на базе Oracle Grid Engine. Базовый интерфейс GL представлен на рисунке 1.

Графический интерфейс модулей позволяет задавать необходимые параметры и диапазоны их изменения, пути к командным файлам, библиотеке или конкретным устройствам. Часть необходимых конфигурационных файлов можно создать с помощью встроенных генераторов, например, device parameter file при помощи DEP CC generator (задает режим генерации тестовых схем), pcell parameter file при помощи PCP generator (содержит максимальные и минимальные значения параметров прибора и шаг с которым необходимо их изменять). Также имеется возможность подключения файлов, содержащих дополнительные условия генерации тестовых структур, определения вариантов используемой ориентации приборов, например, отражение вокруг оси плюс поворот на 90°, и настроить ключи для DRC и LVS.

В статье детально рассмотрены модули GL: Callback Check, PCell Check, XOR Test и All Cells Tool.

## 1. Модуль Callback Check

Основное назначение модуля – тестирование встроенных внутренних процедур автоматизации разрабатываемой технологической библиотеки. Алгоритм работы модуля Callback Check представлен на рисунке 2.

Модуль предоставляет возможность автоматической генерации тестовых структур, тестирования интеграции и SPICE моделей. Он также позволяет осуществлять тестирование возможности аннотации при моделировании (Back annotation), verilog представлений и CDF параметров и расчетов внутренних системных переменных (Operating Point, Instance parameter и т.п.). Тестирование производится в среде разработки ИС Cadence IC.

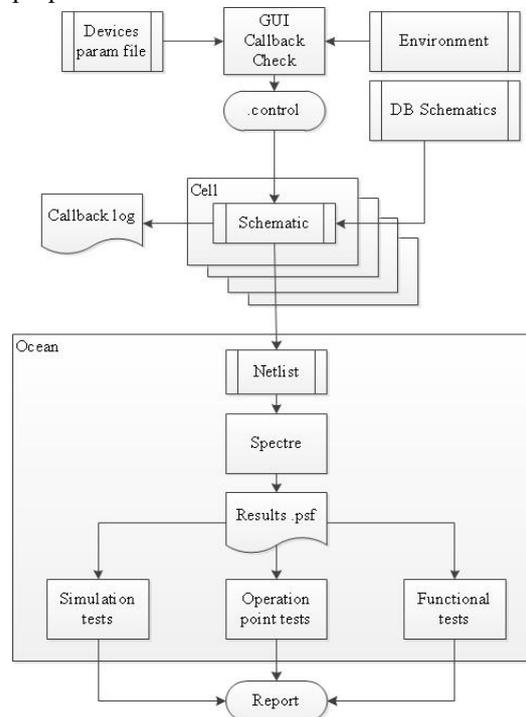


Рис. 2. Общий алгоритм работы модуля Callback Check

## 2. Модуль Pcell check

Модуль предназначен для тестирования и генерации параметризованных ячеек. Алгоритм работы модуля представлен на рисунке 3. К ключевым возможностям автоматизации, предоставляемых модулем, относятся:

- контроль генерации параметризованных ячеек;

- генерация тестовых структур;

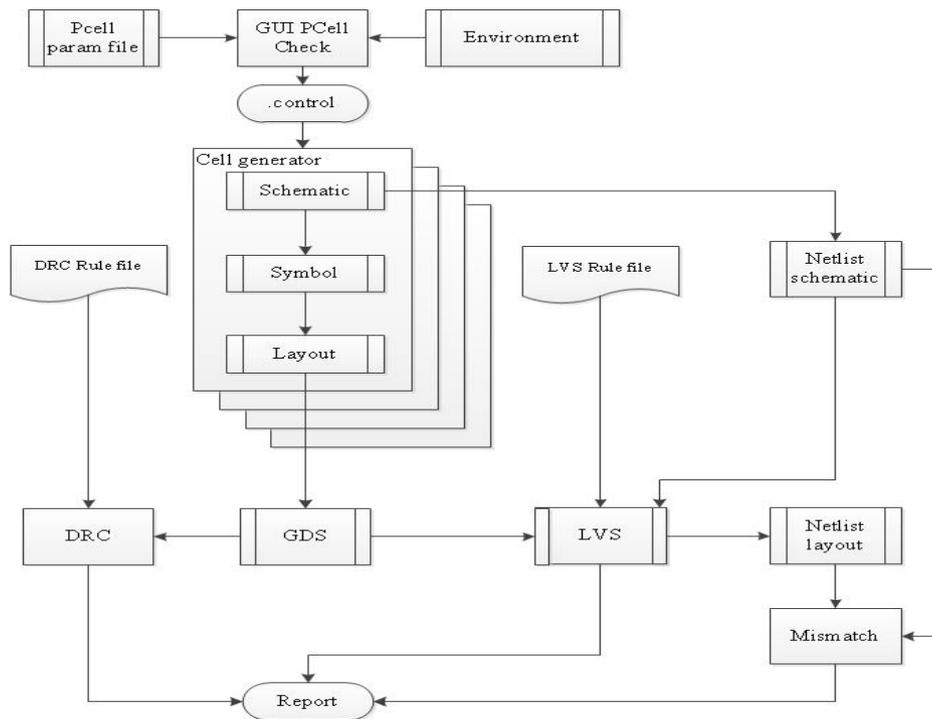


Рис. 3. Алгоритм работы модуля Pcell Check

- встроенная верификация полученных тестовых структур;
- контроль работы скриптов автоматизации PDK (аналоговых элементов библиотеки);
- автоматизированное средство контроля переменных.

В результате работы модуль генерирует библиотеку, структурная схема которой представлена на рисунке 4.

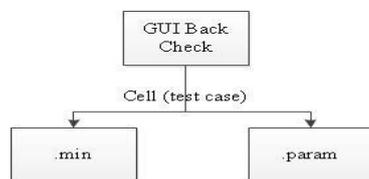


Рис. 4. Структурная схема библиотеки, сгенерированной модулем PCell Check

Полученная библиотека содержит ячейки с расширением .param и .min. Первые содержат символическое, схематическое и топологические представления прибора со всевозможным перебором параметров указанных в PCP файле, а ячейка с расширением .min - содержит только прибор с минимально заданными параметрами.

### 3. Модуль XOR Test

XOR Test (XT) модуль осуществляет регрессионное тестирование командных файлов DRC на основе ранее созданной базы данных проектов[5]. Алгоритм работы модуля представлен на рисунке 5.

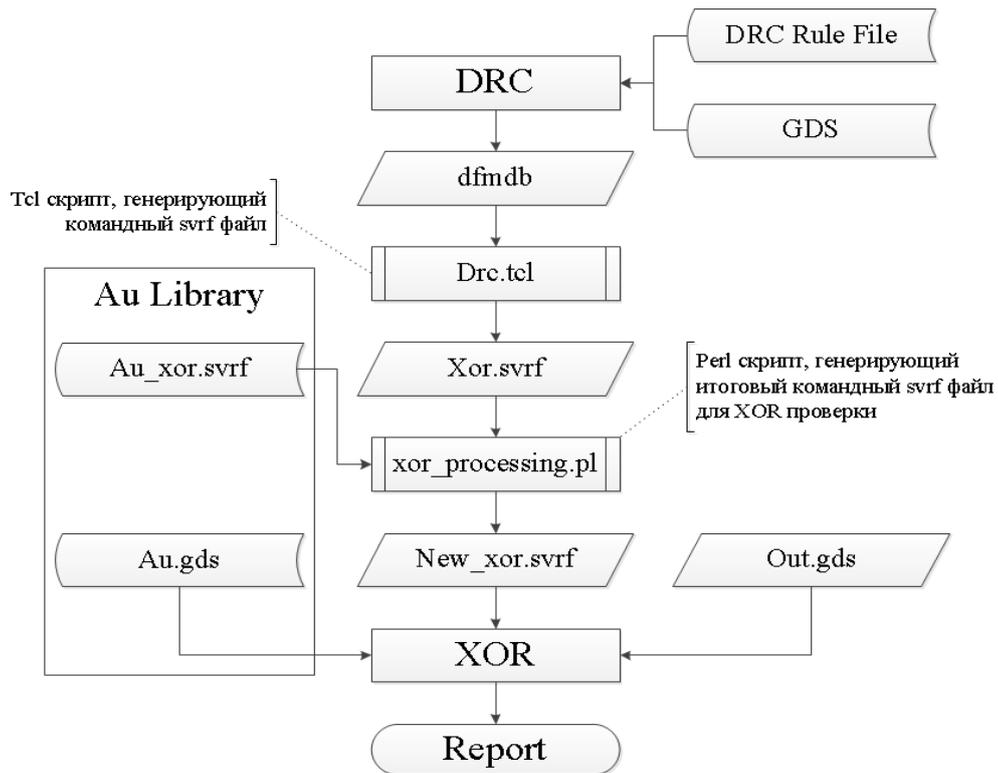


Рис. 5. Общий алгоритм работы модуля XOR Test

Ключевые возможности автоматизации, предоставляемые модулем:

- регрессионное тестирование командных файлов DRC;
- контроль и отслеживание изменений в командных файлах;
- аттестация новых версий САПР для физической верификации;
- отчет по каждому проекту
- возможность воспользоваться визуализатором Calibre RVE, с целью визуального контроля маркеров ошибок.

#### 4. Модуль All cells tool

All Cells Tool модуль предназначен для комплексного тестирования, состоит из четырех утилит, которые могут работать как с целой библиотекой, так и с отдельными устройствами (ячейками). Утилиты позволяют осуществить контроль топологии стандартных ячеек путем взаимной стыковки во всех допустимых ориентациях, позволяют преобразовывать библиотеку в netlist, воссоздавать электрическую схему из netlist и сгенерировать из элементов библиотеки топологию. Блок-схема работы утилит представлена на рисунке 6.

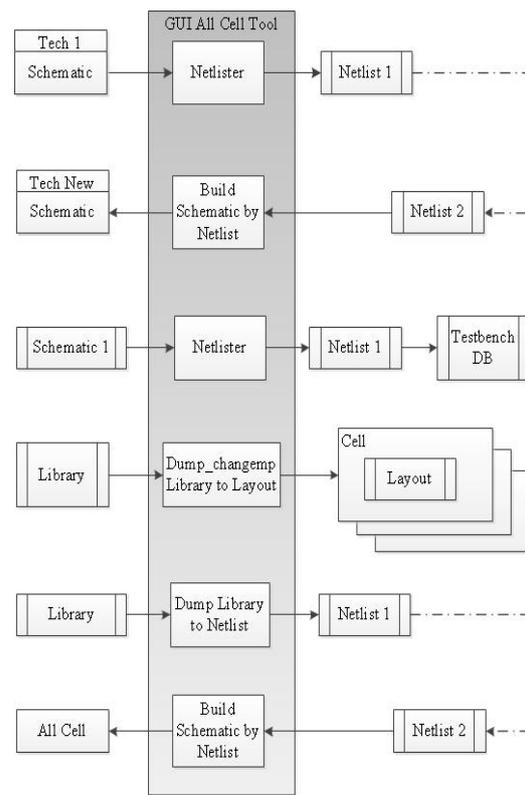


Рис. 6. Общий алгоритм работы модуля All Cell Tool

## Заключение

GL позволяет сократить время и повысить эффективность разработки и тестирования PDK, при этом снижается влияние человеческого фактора. Инструмент технологически независим, применим для валидации PDK и может быть востребован внешними дизайн-центрами для аттестации новых версий САПР в своем маршруте проектирования.

Модули были успешно внедрены в АО “НИИМЭ” и используются при разработке и тестировании комплектов средств проектирования, а также при аттестации новых версий САПР в маршруты проектирования.

# Specialized software for automated testing and verification of PDK

O. R. Zagidullina, A. S. Nadin, I. E. Trifanikhina, D. S. Shipitsin

**Abstract** –The price of mistake increases on every step of VLSI design with reducing of technological scales. Consequently, it causes a rising of requirement volumes to PDK (Process Design Kit) quality level. This paper is devoted to description of special software for automatic testing of PDK which is called "Golden Library Tool Kit" and of its main features and modules. GL allows reducing operation time and increasing performance of design and testing of PDK and also reduces a human factor.

**Keywords** – Process Design Kit; verification; automated testing; regression testing.

## Литература

1. Королев М.А., Красюков А.Ю., Крупкина Т.Ю., Чаплыгин Ю.А., 3D двухзатворный беспереходной МОП-транзистор // Журн. Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2018. №2 (170). с. 8-16.
2. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО “НИИМЭ и Микрон” // В сборнике: История отечественной электроники В 2-х томах. Москва, 2012. С. 539-563.
3. Ильин С. А., Кочанов С. К., Ласточкин О. В., Надин А. С., Новиков А. А., Шипицин Д. С. Конструкторско-технологическая платформа проектирования СБИС на базе отечественной технологии КНИ 90 нм // Сборник тезисов 3-ой Международной научной конференции “Интегральные схемы и электронные модули”, Алушта, 2017, С. 293-296.
4. Просий А.Д., Ранчин С.О., Шелепин Н.А., Обеспечение качества в современном полупроводниковом производстве // Журн. Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2015. № 4 (160). с. 39-43.
5. Загидуллина О.Р. Метод регрессионного тестирования командных файлов DRC // Сборник тезисов 25-ой Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов “Микроэлектроника и информатика - 2018”

# Метод повышения пропускной способности систем хранения данных — двухступенчатый контроллер твердотельного накопителя

А.А. Дубровин

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, E-mail: [dubrovin@cs.niisi.ras.ru](mailto:dubrovin@cs.niisi.ras.ru).

**Аннотация:** В данной работе проведен обзор методов повышения пропускной способности подсистемы хранения данных. Предложен способ масштабируемости и модернизируемости таких систем, с возможностью увеличения пропускной способности каждого контроллера твердотельного накопителя за счет организации двухступенчатой иерархии.

**Ключевые слова:** SSD, Flash NAND, контроллеры твердотельных накопителей, системы хранения данных.

## Введение

Задачи класса больших данных — социально-экономический феномен, связанный с появлением технологических возможностей собирать, хранить и анализировать массивы данных порядка ПБ во многих отраслях и проблемных областях. Огромные массивы данных присутствуют в астрономии, физике, геология, биология и др. Новые инструменты научных исследований производят значительные объемы данных, хранить которые необходимо неопределенно долго. Например, большой обзорный телескоп (Large Synoptic Survey Telescope (LSST)) за ночь производит 30 ТБ данных, а за все время его работы накоплен архив более чем 200 ПБ. Главный детектор ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) большого адронного коллайдера (БАК) детектирует 40 миллионов событий в секунду, каждое эквивалентно примерно 25 МБ данных. В результате установка обеспечивает 1 ПБ исходных данных в секунду. Современные аппаратные возможности не в состоянии записывать в реальном времени такие потоки данных, поэтому необходимо развивать характеристики систем хранения данных [1].

Задачи класса Big Data включают в себя подуровни [1]:

- 1) расширенная аналитика и наука о данных (Advanced Analytics and Data Science);
- 2) бизнес-аналитика (Business Intelligence and Analytics);
- 3) управление информацией предприятия (Enterprise Information Management);

- 4) технологии “вычислений в оперативной памяти” (In-Memory Computing Technology);

- 5) информационная инфраструктура (Information Infrastructure).

Инфраструктура для задач класса Big Data строится на базе стандартных серверов, сетей, систем хранения данных (СХД), гипервизоров и кластерного ПО. Комплексы, построенные путем масштабирования стандартных x86-серверов с Ethernet 10GbE, позволяют достигать вычислительных мощностей, сравнимых со специализированными суперкомпьютерами [2]. Хранение данных в таких структурах организовано системой хранения данных или избыточным массивом независимых дисков (Redundant Array of Independent Disks (RAID), массивами из отдельных носителей или отдельными носителями (Just a bunch of disks (JBOD)) под управлением самостоятельного контроллера твердотельного накопителя (КТН). СХД может включать в себя как RAID, так и отдельные накопители, при этом кроме накопителей необходим процессор и специализированное программное обеспечение.

Система хранения данных — это программно-аппаратное решение по организации надёжного хранения большой емкости информационных ресурсов и предоставления к ним гарантированного доступа [3].

Структура СХД — это [4]:

- 1) инфраструктура доступа к устройству хранения,
- 2) подсистема резервного копирования и архивирования данных,
- 3) программное обеспечение

управления хранением,

4) система управления и мониторинга системы в целом.

Особенности требований к СХД порождают проблемы дальнейшего улучшения ее характеристик, так как часть из них ограничена элементами более низкого уровня, часть — архитектурой, а также применяемыми интерфейсами и программным обеспечением.

На практике к СХД подключается множество серверов, что диктует ряд ключевых требований к характеристикам подобных систем [3, 5]:

1) Надежность и отказоустойчивость.

В СХД предусмотрено полное или частичное резервирование всех компонент: блоков питания, путей доступа, процессорных модулей, дисков, кэша и т.д.

Обязательно наличие системы мониторинга и оповещения о возможных и существующих проблемах.

2) Средства управления и контроля.

Управление СХД осуществляется через web-интерфейс или командную строку, в ней есть функции мониторинга и несколько вариантов оповещения администратора о неполадках.

В том числе доступны аппаратные технологии диагностики производительности.

3) Производительность.

Производительность определяется числом и типом накопителей, объемом кэш-памяти, вычислительной мощностью процессорной подсистемы, числом и типом внутренних и внешних интерфейсов, а также возможностями гибкой настройки и конфигурирования.

4) Масштабируемость.

В СХД обычно присутствует возможность увеличения числа накопителей, объема кэш-памяти, аппаратной модернизации и расширения функционала с помощью специального ПО.

Все перечисленные операции производят без значительного переконфигурирования и потерь функциональности, что позволяет экономить и гибко подходить к проектированию ИТ-инфраструктуры.

На основе требований появились различные методы построения СХД.

## 1. Обзор ограничений и проблем развития информационной структуры систем хранения данных

Под понятием производительности СХД имеют в виду ряд параметров: задержка доступа к данным, число операций в секунду, пропускная способность. Задержка связана преимущественно с контроллерами и носителями низкого уровня, в то время как число операций определяется как частотой работы управляющей системы, так и частотой работы устройства. Пропускная способность же ограничена сверху используемым интерфейсом, при этом для носителей значение пропускной способности равно произведению числа операций в секунду на величину одного блока данных. Уровни СХД классифицируют по критерию частоты обращения к данным, эти уровни условно делят на три виртуальные области. Это производится с целью оптимизации времени доступа к данным с помощью кэширования, но как следствие выход из строя накопителя на каждом из уровней приводит к различному результату.

На самом нижнем уровне хранения располагаются данные, доступ к которым осуществляется наиболее редко в сравнении с остальными уровнями. В случае выхода из строя одного накопителя нижнего уровня происходит резервное копирование с верхнего уровня, но при этом возникает изменение времени доступа к данным.

На втором уровне хранения располагается хранилище кэшированных данных с нижнего уровня. Здесь выход из строя накопителя отразится на времени доступа к данным, равному времени кэширования с самого нижнего уровня, при этом доступ к данным сохранится.

Выход из строя накопителя из верхнего уровня приведет к значительному увеличению времени доступа к данным, так как обмен данными происходит на относительно высоких скоростях. Например, восстановление данных с заполненного 16-терабайтного SSD-накопителя с интерфейсом SATA III при скорости записи 500 МБ/с требует порядка 9 часов, при условии штатной работы СХД, процесс восстановления может на порядок превышать минимальное время.

Необходимость в миграции данных связана с природой данных. Кривая распределения числа обращений к данным по времени напоминает гауссову кривую – количество обращений к свежим данным, требующим быстрого доступа, невелико, по мере старения данных оно возрастает, а далее падает и к архивированным данным на медленных устройствах количество обращений существенно меньше пикового.

Это свойство данных побуждает к созданию многоуровневых СХД, причем на нынешнем уровне развития технологии можно реализовать 4-х уровневую модель: на 0 уровне – SSD, на них хранятся наиболее востребованные данные; на 1-ом уровне – быстрые диски SAS; на 2-ом уровне – медленные диски SAS, на 3-ем уровне – ленты [5].

Основные проблемы информационной структуры систем хранения данных включают в себя следующее:

1) Недостаточная емкость памяти и ее скорость роста (представлена в работе [6]).

2) Недостаточная производительность - равная отношению пропускной способности к размеру блока хранения данных (представлена в работе [7]).

3) Горизонтальное и параллельное масштабирование и модернизация (представлена в работе [5, 8, 9]).

4) Повышение частот интерфейсов намного превышает пределы скоростной работы постоянной памяти, что повышает необходимость оптимизации параллелизма ПО (представлена в работе [5]).

5) Большие задержки (представлена в работе [5]).

6) Разнородность инфраструктуры (представлена в работе [5]).

Основной проблемой является разнородная инфраструктура СХД: организациям нередко приходится поддерживать десятки СХД различных классов и поколений от разных производителей, поскольку разные приложения предъявляют разные требования к хранению данных. В разнородной инфраструктуре уровень утилизации СХД оказывается низким, управляемость — слабой, к тому же сложность такой инфраструктуры хранения велика.

Еще одна серьезная проблема — модернизация СХД. Зачастую СХД, приобретенная три-пять лет назад, уже не справляется с растущими объемами данных

и требованиями к скорости доступа к ним, поэтому приобретается новая система, на которую переносятся данные с прежней. По сути, заказчики повторно платят за объемы хранения, требуемые для размещения данных и кроме того несут расходы на установку новой СХД и перенос данных на нее. При этом прежние СХД, как правило, еще не настолько устаревшие, чтобы отказываться от них полностью, поэтому заказчики пытаются приспособить их под другие задачи [5].

Касательно проблемы, связанной с емкостью твердотельных накопителей: согласно прогнозу, представленному компанией Seagate, в 2013 году доступная емкость накопителей могла содержать 33% открытого содержимого сети интернет, а к 2020 году — менее 15%. Более того, Seagate предполагает, что доступная емкость накопителей к 2020 году будет недостаточна для того, чтобы соответствовать минимальным требованиям, и приведет к недостатку емкости порядка 6 ZBs [6]. Кроме создания накопителей, проблемой является организация работы большого их числа совместно с учетом обеспечения надежности данных.

С другой стороны, есть проблема, связанная с производительностью. С точки зрения частоты запросов ввода-вывода, устройства хранения данных на порядок медленнее, чем сетевые устройства. Например, самые быстрые SSD-устройства работают со скоростью около 1M IOPS (операций ввода-вывода в секунду) на устройство, в то время как современные сетевые контроллеры (network interface controller) способны обрабатывать более 70M пакетов в секунду. С развитием многоядерности увеличение количества параллельных потоков стало распространенным подходом к повышению производительности устройства хранения данных [7].

Также существует актуальная проблема создания и применения универсального протокола доступа. Одним из предполагаемых вариантов ее решения является разрабатываемый протокол NVMe-over-Fabric с использованием протокола TCP. Данный протокол должен обеспечивать скорости чтения и записи данных во флэш-накопители с прямым доступом через Ethernet без специального оборудования, за исключением специальных сетевых адаптеров [10].

Таким образом, без решения ряда

вышеописанных проблем дальнейшее развитие некоторых областей знаний осложнено значительными ограничениями ресурсов и возможностей для анализа.

## 2. Архитектурные особенности контроллера NVMe в сравнении с AHCI

В настоящее время существуют разнообразные интерфейсы приема-передачи данных: например, PCIe 4x16 поддерживает 31.5 Гбайт/с, в то время как скорость одного канала ONFI NAND flash составляет до 800 Мбайт/с. Таким образом, чтобы соответствовать характеристикам приемо-передающего интерфейса, контроллеры, работающие с медленными схемами памяти, должны поддерживать высокую степень параллелизма, что приводит к появлению узкого места в работе параллельных файловых систем, проблемы надежности и производительности которых описаны в работе [11].

Применение схем с более высокими характеристиками или увеличение их числа приводит к растущим требованиям к параллельным очередям контроллера диска и возможностям приемо-передающего интерфейса, которые обоснованы необходимостью использования максимально возможной скорости чтения или программирования данных. Определение этих требований и зависимостей необходимо при разработке оптимальной архитектуры высокопроизводительных контроллеров носителей памяти большого объема и информационной структуры систем хранения данных.

Отдельные накопители данных включают в себя контроллер диска, интерфейс передачи данных от микропроцессора к контроллеру диска, контроллер памяти и схемы памяти на основе определенной технологии. Блок-схема представлена структуры AHCI SSD на рис. 1 и NVMe SSD на рис. 2.

Различия в функционировании данных устройств основаны на переносе части функций работы с медленными устройствами памяти с хост-контроллера на само устройство. В результате целью работы является повышение пропускной способности информационной структуры системы хранения данных при условии сохранения ее надежности и анализ возможности модернизруемости и масштабируемости СХД с применением дополнительных архитектурных решений.

## 3. Преимущества двухступенчатого КТН

Предложенная архитектура КТН основана на том, что устройство NVMe может выступать в роли самостоятельного хост-контроллера NVMe, что дает возможность для построения подобных друг другу систем, обладающих возможностями перераспределения нагрузки между ступенями иерархии. Пример двухступенчатой архитектуры изображен на рис. 3. В сравнении с рис. 2 в двухступенчатой реализации присутствует модуль мастер-контроллера SATA или PCIe, который выступает хост-контроллером для следующей ступени КТН.

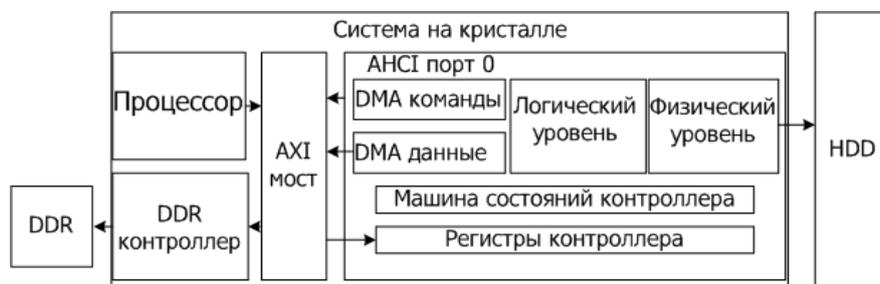


Рис. 1. Блок-схема представления структуры AHCI контроллера

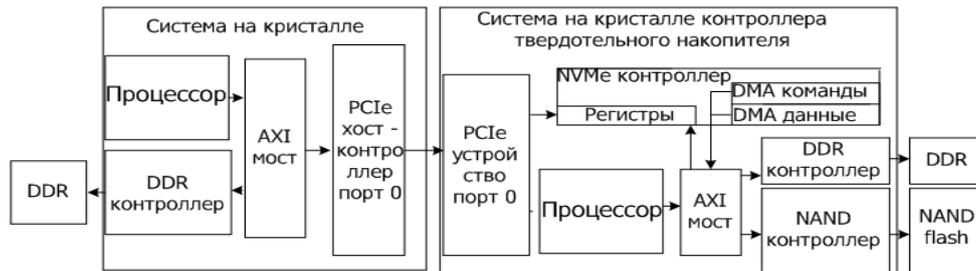


Рис. 2. Блок-схема представления структуры NVMe контроллера



Рис. 3. Блок-схема представления структуры NVMe контроллера с дополнительным устройством, модернизированный 2-х ступенчатый контроллер



Рис. 4. Зависимость пропускной способности (Гбит/с) систем КТН времени (с): двухступенчатый NVMe PCIe 3x8 (1), двухступенчатый NVMe PCIe 3x4 (2), одноступенчатый NVMe PCIe 3x4 с подключенным 1 устройством SATA III (3), NVMe PCIe 3x4 (4) устройство при последовательной записи.

Для двухступенчатой архитектуры проведено моделирование поведения NVMe PCIe 3x8 (1), двухступенчатый NVMe PCIe 3x4 (2), одноступенчатый NVMe PCIe 3x4 с подключенным 1 устройством SATA III (3), NVMe PCIe 3x4 (4) на рис. 4, при последовательной записи моделирование в среде Cadence Ncsim с идеальными моделями блоков. Параметры блоков представлены в таблице №1.

График (4) отражает планируемые значения пропускной способности разрабатываемого устройства со стандартным интерфейсом PCIe 3x4, график (3) отображает подключение двух устройств, одно из которых AHCI SATA III устройство подключено к другому устройству с интерфейсом PCIe 3x4. График (2) и (1) отличается от (3) тем, что подключены два одинаковых устройства PCIe 3x4 и PCIe 3x8

соответственно. Особенность решения представленного на графике (2), заключается в избыточности пропускной способности внутренней в сравнении с внешним интерфейсом, что позволяет выделить время для работы внутренних алгоритмов, например, фоновое очищение, также эта избыточность дает возможность перейти к большему числу линий и перейти к устройству двухступенчатого NVMe PCIe 3x8, представленного на графике (1). Переход от одноступенчатого NVMe PCIe 3x4 к двухступенчатому требует размещение на кристалле дополнительного модуля контроллера интерфейсом передачи, что занимает часть площади системы на кристалле, и такие системы требуют применения двух и более устройств для получения преимуществ.

Таблица №1. Параметры блоков используемые для моделирования поведения многоступенчатых систем хранения данных

Параметр	SSD NVMe PCIe 3x4/8	SSD AHCI SATA III
Объем динамической памяти, Гбит	16	16
Пропускная способность интерфейса, Гбит/с	19,2/38,4	4,8
Суммарный объем энергонезависимой памяти, Гбит	8000	1000
Объем одной микросхемы памяти, Гбит	500	500
Число подключенных микросхем памяти	16	2

Пропускная способность одной микросхемы памяти, Гбит/с	0,8	0,8
Суммарная пропускная способность микросхемы памяти, Гбит/с	12,8	1,6

## Заключение

Задачи класса больших данных нашли широкое применение в астрономии, физике, геологии, биологии и пр. Новые инструменты научных исследований производят значительные объемы данных, хранить которые необходимо неопределенно долго. Обеспечение возможностей и ресурсов, необходимых для проведения научных экспериментов, требуется для дальнейшего развития данных отраслей. Приведенный метод аппаратного улучшения характеристик имеет возможность горизонтальной масштабируемости и увеличения пропускной способности. Применение архитектуры двухступенчатого контроллера позволяет сократить разницу между пропускной способностью высокочастотных быстродействующих интерфейсов и подмножеством системы энергонезависимой памяти, например при приведенных параметрах системе достаточно применение двухступенчатого NVMe PCIe 3x4, чтобы достигнуть избыточной пропускной способности.

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (проведение фундаментальных научных исследований) по теме № 0065-2019-0004.

# Increasing the bandwidth of data storage system using two-stage SSD

A.A.Dubrovin

**Abstract** - Methods that improve bandwidth performance of data storage subsystems are reviewed in this paper. Organization of a two-stage hierarchy SSD is proposed as a solution to reach bandwidth performance scalability. It is concluded that usage of an additional interface for data reception and transmission allows connection of additional devices, which results in enhanced performance as well as enables scalability for storage systems with a limited number of storage devices slots.

**Keywords** - Non-Volatile Memory Host Controller Interface, SSD, Flash NAND, solid state disc.

## Литература

1. Global CIO — официальный портал ИТ-директоров России. [Электронный ресурс] // Поминки по Big Data URL: <http://www.globalcio.ru/workshops/1358/> (дата обращения: 25.03.2019).
2. Проект OSP.RU Web-сайт издательства "Открытые системы". [Электронный ресурс] // Большие Данные — новая теория и практика URL: <https://www.osp.ru/os/2011/10/13010990/> (дата обращения: 25.03.2019).
3. Электронная энциклопедия. [Электронный ресурс] // Появление систем и сетей хранения данных URL: <https://studopedia.info/10-50535.html> (дата обращения: 25.03.2019).
4. Курс лекций “Информационные технологии” МТУСИ. [Электронный ресурс] // URL: <https://ppt-online.org/295838> (дата обращения: 25.03.2019).
5. Система хранения данных - СХД. [Электронный ресурс] // TAdviser - российский интернет-портал и аналитическое агентство. URL: <http://www.tadviser.ru/index.php> /Статья:Система\_хранения\_данных (дата обращения: 25.03.2019)
6. Wasim Ahmad Bhat. Is a Data-Capacity Gap Inevitable in Big Data Storage?// University of Kashmir, Computer Volume 51, Issue 9, September 2018, p. 54 - 62.
7. Andrew A. Chien. Software challenges for the changing storage landscape. // Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Volume 61 Issue 11, November 2018, p. 136-145.
8. Блог компании purestorage. [Электронный ресурс] // СХД С ПОДДЕРЖКОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО МАСШТАБИРОВАНИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ URL: <https://www.purestorage.com/ru/products/flashblade/scale-out.html> (дата обращения: 25.03.2019).
9. Специальный проект hitachi [Электронный ресурс] // Инфраструктура BIG DATA – день сегодняшний URL: <https://www.hitachivantara.com/ru-ru/pdf/brochure/hitachi-infrastructure-bid-data-ru.pdf> (дата обращения: 25.03.2019).
10. NVMe-o-Fabric. [Электронный ресурс] // *The Register* is a leading global online tech publication URL: [https://www.theregister.co.uk/2018/07/26/tcp\\_nvme\\_over\\_fabrics\\_ethernet/](https://www.theregister.co.uk/2018/07/26/tcp_nvme_over_fabrics_ethernet/) (дата обращения: 25.03.2019).
11. S. R Alam, H. N El-Harake, K. Howard, N. Stringfellow, F. Verzelloni. Parallel I/O and the Metadata Wall // PDSW '11 Proceedings of the sixth workshop on Parallel Data Storage, Seattle, November, 13, 2011. - NY, est. ACM New York, 2011, P. 13-18.

# Кинетика и концентрации активных частиц в плазме галогенводородов

<sup>1,2)</sup>Ефремов А. М., <sup>1)</sup>Мурин Д.Б., <sup>2)</sup>Бетелин В. Б.

<sup>1)</sup> ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

<sup>2)</sup> ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН. E-mail's: [amefremov@mail.ru](mailto:amefremov@mail.ru), [dim86@mail.ru](mailto:dim86@mail.ru)

**Аннотация:** Проведено сравнительное исследование кинетики активных частиц в плазме НХ (X = F, Cl, Br) в условиях, характерных для процессов плазмохимического и реактивно-ионного травления микро- и нано-структур. Установлены зависимости концентраций исходных веществ и продуктов плазмохимических реакций от концентрации электронов. Выявлены факторы, определяющие различия стационарного состава плазмы в исследуемых системах.

**Ключевые слова:** галогенводороды, плазма, константа скорости, скорость реакции, концентрация.

## 1. Введение

Процессы вакуум-плазменной очистки поверхности полупроводниковых пластин и структурирования различных функциональных слоев с использованием галогенсодержащих газовых сред являются неотъемлемой частью технологии изделий современной микро- и нано-электроники.

Результаты многочисленных исследований кинетических закономерностей и выходных параметров процессов травления материалов интегральной электроники, подробно рассмотренные в ряде обзорных статей и монографий [1-13], позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Химическое взаимодействие плазмы с широким кругом неорганических материалов (в том числе – с кремнием и его соединениями, полупроводниками групп  $A^2V^3$  и  $A^3V^5$ , а также большинством металлов и их оксидов) обеспечивается атомами галогенов. Эти частицы обладают высокой адсорбционной способностью и легко образуют химические связи с атомами обрабатываемой поверхности.
- 2) Стационарный режим гетерогенной химической реакции и технологически приемлемые скорости травления (газификации атомов поверхности) наблюдаются лишь в том случае, когда условия процесса обеспечивают эффективный отвод продуктов взаимодействия с поверхностью в газовую фазу. Использование фоторезистивных масок и ряд других технологических факторов ограничивают максимальные рабочие температуры поверхности

величинами порядка 50-80 °С, при которых галогениды большинства металлов и полупроводников имеют низкую летучесть. Это обуславливает необходимость подключения ионно- и фото-стимулированных механизмов очистки обрабатываемой поверхности от продуктов химических реакций.

- 3) Для многих существующих технологических процессов наблюдается ситуация, когда изменения скорости травления при варьировании рабочих параметров (давление и скорость потока газа, удельная мощность) отражают соответствующие изменения концентрации и плотности потока атомов галогенов. Это свидетельствует о том, что процесс травления протекает в кинетическом режиме, по первому кинетическому порядку относительно концентрации атомов в газовой фазе. Характерным признаком такого режима являются аррениусовские температурные зависимости скорости травления и вероятности взаимодействия, определяемой как отношение скорости к плотности потока атомов на поверхность. Характерные значения эффективной энергии активации  $\sim 0.1-1$  эВ позволяют рассматривать в качестве лимитирующей стадии процесса адсорбционно-десорбционные явления на обрабатываемой поверхности.

Из вышесказанного однозначно следует, что разработка новых и совершенствование существующих технологий плазменного травления в направлении поиска оптимальных газовых

сред требует детальных исследований кинетики и механизмов плазмохимических процессов, определяющих стационарные концентрации атомов галогенов в плазме. Перспективными плазмообразующими системами для проведения процессов плазмохимического и реактивно-ионного травления являются газы семейства  $HX$ , где  $X$  – это атом галогена  $F, Cl, Br$  или  $I$ . В качестве основных достоинств галоген-водородов по сравнению с традиционно используемыми галогенсодержащими газами необходимо отметить: 1) отсутствие полимеризационных явлений, приводящих к загрязнению обрабатываемой поверхности твердыми продуктами плазмохимических реакций (как это неоднократно отмечалось для газов семейства фреонов  $C_xH_yX_z$  [6-10]); 2) низкие степени диссоциации, обуславливающие преимущество в анизотропии травления по сравнению с молекулярными галогенами вида  $X_2$ ; и 3) специфические эффекты обработки, обусловленные совместным действием двух видов химически активных частиц – атомов галогена и водорода. К последним можно отнести, например, протекание восстановительных реакций при травлении оксидных соединений и эффективную газификацию органических веществ [5, 6].

Целью данной работы являлось сравнительное исследование кинетики активных частиц и стационарного состава плазмы  $HF, HCl$  и  $HBr$  в условиях, характерных для процессов плазмохимического и реактивно-ионного травления.

## 2. Методическая часть

Для получения информации по составу газовой фазы и анализа кинетики плазмохимических процессов использовалась 0-мерная (оперирующая величинами, усредненными по объему плазмы) кинетическая модель. Алгоритм моделирования базировался на совместном решении уравнений химической кинетики для нейтральных частиц в квазистационарном приближении при заданных параметрах электронной компоненты плазмы. В качестве последних выступали температура (средняя энергия) электронов ( $T_e = 3$  эВ) и концентрация электронов ( $N_e = 10^9 - 10^{11}$  см<sup>-3</sup>). Абсолютные значения и диапазоны изменения данных величин являются характерными для неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазмы, возбуждаемой в

промышленных плазмохимических реакторах емкостного и индукционного типов при давлениях  $p \sim 10 - 300$  Па [12, 13]. Использование  $N_e$  в качестве свободного параметра модели обусловлено тем, что данная величина однозначно отражает уровень удельной электрической мощности, вкладываемой в плазму.

При записи кинетических уравнений полагалось, что плазма галогеноводородов представляет собой пятикомпонентную ( $HX - H - X - H_2 - X_2$ ) систему по нейтральным невозбужденным частицам. Приведенный в Табл. 1 набор процессов был сформирован по результатам наших предшествующих исследований [14–18]. В этих работах было показано также, что при использовании предложенных кинетических схем имеет место удовлетворительное согласие расчетных параметров плазмы  $HCl, HBr$  и  $CHF_3$  (где основным компонентом является  $HF$ ) с результатами экспериментальных измерений. Поэтому вопросы адекватности кинетических схем в рамках данной работы не рассматривались.

Расчеты велись для условий реактора идеального смешения цилиндрической геометрии, удовлетворяющей условию  $r \ll l$ , где  $r$  – радиус реактора, а  $l$  – длина зоны плазмы. Для удобства сопоставления результатов данной работы с результатами предшествующих исследований [17, 18] принимали: 1)  $r = 1.5$  см; и 2) начальная (до зажигания плазмы) концентрация частиц в реакторе  $N_0 = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, что соответствует  $p \sim 100$  Па при температуре нейтральных частиц  $T_{gas} = 400$  К.

Константы скоростей диссоциации молекулярных компонентов плазмы электронным ударом (R1-R3) определялись при интегрировании экспериментально измеренных сечений диссоциации [19–21] с максвелловской функцией распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). По нашим оценкам, погрешность определения  $k_1 - k_3$  за счет использования максвелловского приближения для ФРЭЭ не превышает погрешности измерения соответствующих сечений. Константы скоростей газофазных атомно-молекулярных процессов (R4-R7) хорошо известны по результатам многочисленных экспериментальных исследований и доступны по справочным данным [22]. Частоты (константы скорости первого порядка) гетерогенной гибели атомов водорода (R8) и галогенов (R9) оценивались с использованием экспериментальных данных по вероятностям

рекомбинации  $\gamma$  [23] по соотношению  $k \approx \gamma v_T / 2r$ , где  $v_T = \sqrt{8RT_{gas}/\pi M}$  – средняя скорость теплового движения соответствующих частиц. Вероятности параллельных механизмов внутри R8 и R9 принимались равными.

### 3. Результаты и обсуждение

Известно, что основными механизмами образования активных частиц в условиях неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазмы являются процессы под действием электронного удара. На рис. 1 представлено сравнение констант скоростей диссоциации молекулярных компонентов плазмы по механизмам R1 и R2. Из рисунка видно, что при  $T_e = \text{const}$  абсолютные величины  $k_1$  и  $k_2$  возрастают в ряду F-Cl-Br. Данный эффект обусловлен как ростом сечения диссоциации в области 3–10 эВ (из-за увеличения эффективного размера диссоциирующих частиц), так и снижением пороговой энергии процесса (см. Табл.1).

Расчеты показали, что основными продуктами плазмохимических реакций в HF

в исследованном диапазоне условий являются атомы фтора и водорода (рис. 2(a)). Из анализа кинетики плазмохимических процессов следует, что выполнение условия  $n_F \approx n_H$  обеспечивается сочетанием нескольких факторов. Во-первых, реакции R2 и R3 не оказывают заметного влияния на кинетику образования атомов обоих сортов ( $R_1 \gg R_2$  и  $R_1 \gg R_3$ ) из-за низких концентраций F<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> в газовой фазе. Причиной последнего эффекта являются низкие скорости генерации молекул фтора и водорода, определяемые только гетерогенной рекомбинацией атомов по механизмам R8 и R9 в условиях  $R_8 \gg R_5$  и  $R_9 \gg R_4$ . Во-вторых, чрезвычайно низкие константы скоростей R4 и R5 (и, как следствие, справедливость условия  $R_1 \gg R_4 + R_5$ ) позволяют не учитывать вклад этих процессов в суммарные скорости образования атомов обоих сортов. Таким образом, газофазные атомно-молекулярные реакции R4-R7 не оказывают принципиального влияния на кинетику нейтральных частиц в плазме HF.

Кинетические характеристики плазмохимических процессов с участием нейтральных частиц

Таблица 1

		X = F		X = Cl		X = Br	
		$\varepsilon_{th}$ , эВ	$k$ , см <sup>3</sup> /с	$\varepsilon_{th}$ , эВ	$k$ , см <sup>3</sup> /с	$\varepsilon_{th}$ , эВ	$k$ , см <sup>3</sup> /с
R1	$HX + e \rightarrow H + X + e$	5.9	$3.2 \times 10^{-10}$	5.5	$1.2 \times 10^{-9}$	4.3	$1.6 \times 10^{-9}$
R2	$X_2 + e \rightarrow X + X + e$	4.3	$1.8 \times 10^{-9}$	3.0	$1.1 \times 10^{-8}$	2.4	$1.2 \times 10^{-8}$
R3	$H_2 + e \rightarrow H + H + e$	8.8	$8.1 \times 10^{-10}$	8.8	$8.1 \times 10^{-10}$	8.8	$8.1 \times 10^{-10}$
R4	$HX + X \rightarrow X_2 + H$		$1.3 \times 10^{-64}$		$1.9 \times 10^{-33}$		$2.5 \times 10^{-34}$
R5	$HX + H \rightarrow H_2 + X$		$3.4 \times 10^{-30}$		$1.7 \times 10^{-13}$		$9.2 \times 10^{-12}$
R6	$H_2 + X \rightarrow HX + H$		$4.0 \times 10^{-11}$		$7.4 \times 10^{-14}$		$1.7 \times 10^{-20}$
R7	$X_2 + H \rightarrow HX + X$		$3.0 \times 10^{-12}$		$3.3 \times 10^{-11}$		$5.3 \times 10^{-11}$
R8	$H \rightarrow H(s) + X \rightarrow HX$ + $H \rightarrow H_2$		$8.0 \times 10^{-5}$		$8.0 \times 10^{-5}$		$8.0 \times 10^{-5}$
R9	$X \rightarrow X(s) + H \rightarrow HX$ + $X \rightarrow X_2$		$1.6 \times 10^{-4}$		$5.0 \times 10^{-4}$		$6.0 \times 10^{-3}$

Примечания: 1) Константы скоростей реакций R1–R3 приведены для  $T_e = 3$  эВ; 2) Константы скоростей реакций R4–R7 приведены для  $T_{gas} = 400$  К; 3) Для реакций R8 и R9 указаны вероятности рекомбинации  $\gamma$  на стекле/кварце.

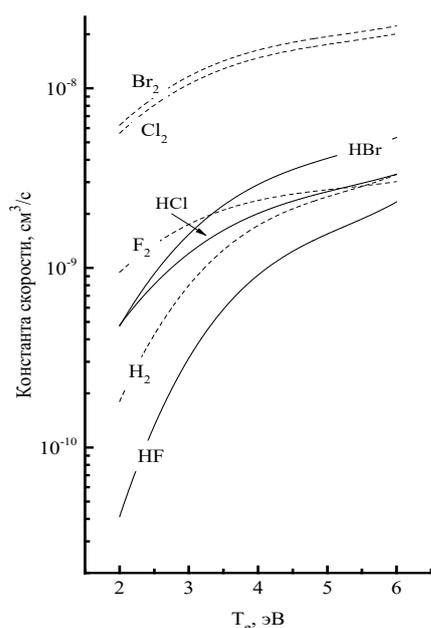


Рис. 1. Константы скоростей диссоциации электронным ударом исходных частиц (R1) и молекулярных продуктов плазмохимических реакций (R2, R3).

И, в-третьих, несмотря на  $\gamma_H < \gamma_F$  (см. Табл. 1), константы скоростей R8 и R9 очень близки из-за более высокой скорости теплового движения (меньшей массы) атомов водорода. Поэтому стационарные концентрации атомов H и F в плазме определяются общим источником в лице R1, а также практически одинаковыми частотами гибели в R8 и R9. Необходимо отметить также, что в диапазоне  $N_e < 5 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$  доминирующими нейтральными частицами плазмы являются молекулы HF. Низкие скорости (а, следовательно, и степени) диссоциации этих частиц в плазме обусловлены низкими значениями константы скорости R1 из-за высокой пороговой энергии и низкого сечения процесса.

Основным продуктом плазмохимических реакций в хлористом водороде являются атомы хлора, концентрация которых в диапазоне  $N_e > 10^{10} \text{ см}^{-3}$  превышает концентрацию исходных молекул (рис. 2(б)).

В отличие от плазмы HF, в данном случае кинетика и концентрации нейтральных частиц в значительной степени определяются объемными атомно-молекулярными процессами R5-R7 при пренебрежимо малой роли R4 из-за низкой константы скорости данного процесса.

В частности, выполнение условия  $R_5 + R_7 > R_6$  приводит к тому, что эффективная скорость генерации атомов Cl в объеме плазмы  $R_1 + R_5 + R_7 - R_6$  практически в два раза превышает скорость диссоциации исходных молекул HCl по R1.

Напротив, эффективная скорость объемной генерации атомов H, составляющая  $R_1 + R_6 - R_5 - R_7$ , оказывается значительно меньше по сравнению с R1, что приводит к  $n_{Cl} \gg n_H$ .

Немонотонное поведение концентрации H<sub>2</sub> с ростом  $N_e$  является результатом конкуренции процессов образования и гибели этих частиц в парах реакций R5 + R8 и R3 + R6.

Самая низкая среди всех нейтральных компонент плазмы концентрация молекул Cl<sub>2</sub> является результатом быстрой гибели этих частиц по R7, при этом во всем исследованном диапазоне  $N_e$  выполняется условие  $R_7 > R_2$ .

Отметим также, что высокие скорости R6 и R7 обеспечивают эффективную конверсию продуктов плазмохимических реакций в исходные молекулы HCl.

Результатом этого являются низкие степени диссоциации и доминирование концентрации HCl в плазме в области  $N_e < 10^{10} \text{ см}^{-3}$ .

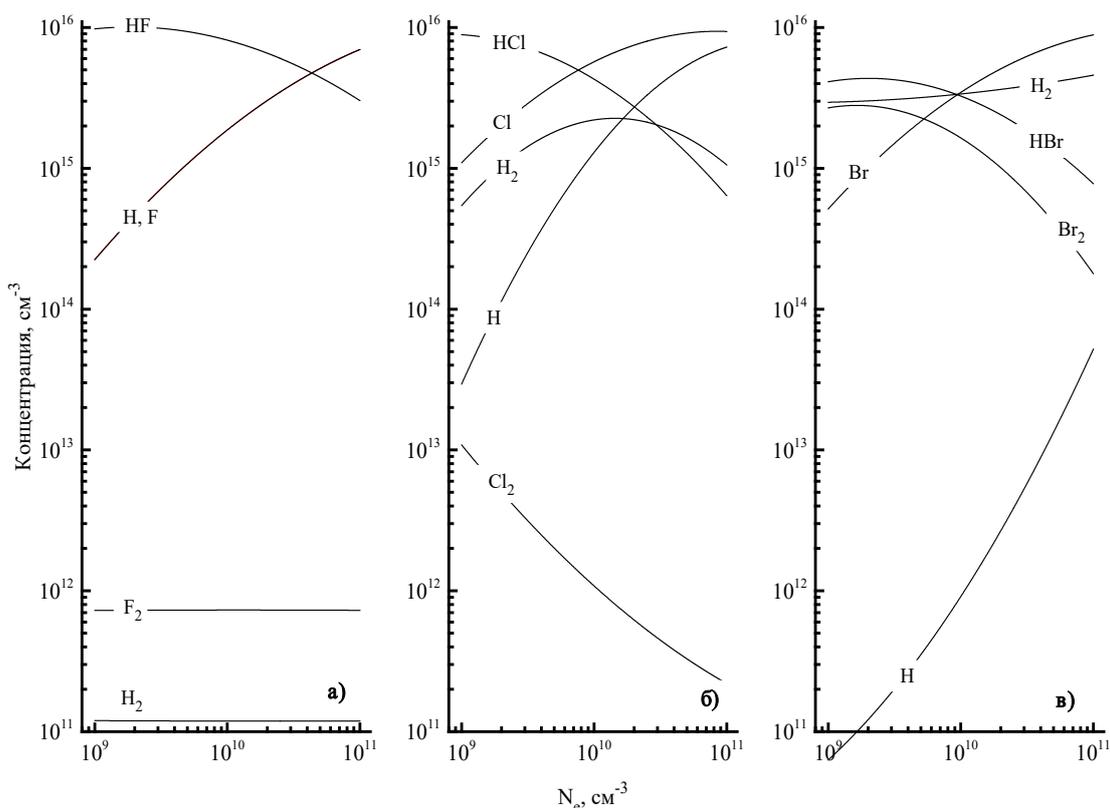


Рис. 2. Концентрации нейтральных частиц в плазме HF (а), HCl (б) и HBr (в)

Основными продуктами плазмохимических реакций в HBr являются Br, Br<sub>2</sub> и H<sub>2</sub> (рис. 1(в)). Анализ кинетики плазмохимических процессов показал, что механизмы образования и гибели нейтральных частиц в плазме HBr качественно аналогичны рассмотренным выше для плазмы HCl. В частности, стационарные концентрации атомов в значительной степени определяются кинетикой газофазных атомно-молекулярных реакций R4-R7, при этом высокие константы скоростей R5 и R7 приводят к выполнению условия  $R_5 + R_7 \gg R_4 + R_6$ . Это предопределяет существенные различия эффективных скоростей генерации атомов Br ( $R_1 + 2R_2 + R_5 + R_7 \gg R_1$ ) и H ( $R_1 + 2R_3 - R_5 - R_7 \ll R_1$ ) в объеме плазмы, что обеспечивает к  $n_{Br} \gg n_H$ . Высокая концентрация молекул брома и справедливость условия  $n_{Br_2} > n_{Br}$  в области  $N_e < 10^{10} \text{ см}^{-3}$  являются следствием высокой скорости образования Br<sub>2</sub> при гетерогенной рекомбинации атомов брома по механизму R9. Последнее обеспечивается значительно более высокими вероятностями

рекомбинации атомов Br по сравнению с F и Cl. Очевидно, что с ростом концентрации электронов этот эффект нивелируется увеличением скорости диссоциации молекул Br<sub>2</sub> по механизму R2.

Высокая концентрация молекул водорода и выполнение условия  $n_{H_2} > n_H$  во всем исследованном диапазоне  $N_e$  обусловлены сочетанием высоких скоростей генерации H<sub>2</sub> по R5 и низких частот гибели этих частиц в R3 и R6.

Резкое возрастание концентрации атомов водорода при увеличении  $N_e$  является следствием аналогичного снижения скорости их гибели по механизму R7 из-за уменьшения концентрации Br<sub>2</sub>.

Соответственно, резкий рост скорости образования H<sub>2</sub> за счет гетерогенной рекомбинации атомов водорода обеспечивает постоянство концентрации этих частиц в широком диапазоне  $N_e$ .

Резюмируя вышесказанное, можно выделить несколько основных моментов, определяющих различия кинетики активных частиц и состава плазмы в исследуемых системах:

- 1) Степень диссоциации исходных молекул ( $\alpha$ ) при одинаковом значении  $N_e$  увеличивается в ряду HF - HCl - HBr. Очевидно, что причиной данного эффекта являются как различия констант скоростей R1 (т. е. процесса инициирования распада исходных молекул), так и особенности кинетики атомно-молекулярных реакций.

В частности, при  $N_e = 10^9 \text{ см}^{-3}$  выполнение условия  $\alpha_{\text{HBr}}/\alpha_{\text{HCl}} \sim 5.3$  не может быть обеспечено только за счет аналогичного соотношения  $k_1$ , которое фактически составляет  $\sim 1.3$ .

Поэтому основной причиной различия степеней диссоциации в данных системах является эффективный распад HBr по R5, а также восстановление HCl по R6 и R7.

Сближение величин  $\alpha_{\text{HBr}}$  и  $\alpha_{\text{HCl}}$  у верхней границы исследованного диапазона  $N_e$  связано, главным образом, с замедлением скорости роста  $\alpha_{\text{HBr}}$ .

Это связано с тем, что резкое увеличение концентрации атомов водорода (в  $\sim 850$  раз при  $N_e = 10^9-10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) приводит к аналогичному изменению скорости R7, которая является источником молекул HBr.

- 2) Концентрация атомов галогенов при  $N_e = \text{const}$  увеличивается в ряду HF - HBr - HCl, что формально не согласуется с отмеченными различиями степеней диссоциации исходных молекул.

Такая ситуация является следствием более высокой скорости гетерогенной рекомбинации атомов Br при близких скоростях генерации Cl и Br по механизму R1.

Бликие абсолютные значения  $n_{\text{Cl}}$  и  $n_{\text{Br}}$  позволяют предположить, что основные особенности кинетики травления металлов и полупроводников в плазме HBr и HCl будут обусловлены различиями вероятностей гетерогенного взаимодействия, летучести образующихся продуктов и параметров ионной бомбардировки.

- 3) Концентрация атомов водорода при  $N_e = \text{const}$  снижается в ряду HF - HCl - HBr, что также формально противоречит изменению степеней диссоциации исходных молекул. С другой стороны, из рис. 2 можно видеть, что увеличение степени диссоциации исходных молекул в ряду HF - HCl - HBr сопровождается ростом концентраций молекулярных галогенов. Согласно табл. 1 и анализу кинетики плазмохимических процессов, реакции атомов водорода с молекулами галогенов по механизму R7 являются основными каналами гибели этих частиц в плазме HCl и HBr. Таким образом, условие  $\alpha_{\text{HBr}} > \alpha_{\text{HCl}} > \alpha_{\text{HF}}$  автоматически означает аналогичные соотношения для скоростей R7 и обратные – для величин  $n_{\text{H}}$ .

Публикация выполнена в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН (проведение фундаментальных научных исследований) по теме № 0065-2019-0006 «Фундаментальные и прикладные исследования в области субволновой голографической литографии, физико-химических процессов травления 3D нанометровых диэлектрических структур для развития критических технологий производства ЭКБ».

# Kinetics and densities of active species in hydrogen-halides plasmas

Efremov A. M., Murin D. B., Betelin V. B.

**Abstract:** The comparative study of active species kinetics in HX (X = F, Cl, Br) plasmas under the conditions of plasma-chemical and reactive-ion etching processes for micro-and nano-structuring was carried out. The dependencies of the densities for both initial substances and products of plasma chemical reactions on electron density were obtained. The factors determining the differences in steady-state plasma compositions were found.

**Keywords:** hydrogen halides, plasma, rate coefficient, reaction rate, density.

## Литература

1. D. L. Flamm, V. M. Donnelly, D. E. Ibbotson. Basic chemistry and mechanisms of plasma etching. «Journal of Vacuum Science and Technology B», V. 1 (1983), 23-30.
2. А. А. Орликовский, Д. И. Словецкий. Проблемы плазмохимического травления в микроэлектронике. «Микроэлектроника» т.16 (1987), №6, 497-512.
3. Д.И. Словецкий. Гетерогенные реакции в неравновесной галогенсодержащей плазме. В кн. «Химия плазмы». М., Энергоатомиздат, 1989, вып.15, 208-231.
4. H. F. Winters, J. W. Coburn, T. G. Chuang. Surface processes in plasma assisted etching environments. «Journal of Vacuum Science and Technology B», V. 1 (1983), 469-480.
5. D. V. Graves. Plasma processing. «IEEE Transaction on Plasma Science», V. 22 (1994), 31-42.
6. Плазменная технология в производстве СБИС М., Мир, 1987.
7. Б.С. Данилин, В.Ю. Киреев. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М., Энергоатомиздат, 1987.
8. J. R. Rooth Industrial Plasma Engineering. Philadelphia, IOP Publishing LTD, 2001.
9. Plasma Etching Processes for CMOS Devices Realization. London, ISTE Press-Elsevier, 2017.
10. T. Makabe, Z. Petrovic. Plasma electronics: applications in microelectronic device fabrication. New York, Taylor & Francis, 2006.
11. S. Wolf, R. N. Tauber. Silicon Processing for the VLSI Era. Volume 1. Process Technology. New York, Lattice Press, 2000.
12. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg. Principles of plasma discharges and materials processing. New York, John Wiley & Sons Inc., 2005.
13. K. Nojiri. Dry Etching Technology for Semiconductors. New York, Springer, 2015.
14. A. Efremov, Y. Kim, H. W. Lee, K. H. Kwon. A comparative study of HBr-Ar and HBr-Cl<sub>2</sub> plasma chemistries for dry etch applications. «Plasma Chemistry and Plasma Processing», V. 31 (2011), № 2, 259-271.
15. K. H. Kwon, A. Efremov, M. Kim, N. K. Min, J. Jeong, K. Kim. A model-based analysis of plasma parameters and composition in HBr/X (X=Ar, He, N<sub>2</sub>) inductively coupled plasmas. «Journal of Electrochemical Society», V. 157 (2010), № 5, H574-H579.
16. А. М. Ефремов, Д. Б. Мурин, К.-Н. Кwon. Параметры плазмы и кинетика активных частиц в смесях CF<sub>4</sub> (CHF<sub>3</sub>) + Ar переменного начального состава. «Микроэлектроника», Т. 47 (2018), № 6, 414-423.
17. А.М. Efremov, G.H. Kim, D.I. Balashov, C.I. Kim. Plasma parameters and chemical kinetics of an HCl dc glow discharge. «Vacuum», V. 81 (2006), 244-250.
18. А. М. Ефремов, В. И. Svetsov, D. V. Sitanov, D. I. Balashov. A comparative study of plasma parameters and gas phase compositions in Cl<sub>2</sub> and HCl direct current glow discharges. «Thin Solid Films», V. 516 (2008), 3020-3027.
19. W. L. Morgan. A Critical Evaluation of Low Energy Electron Impact Cross Sections for Plasma Processing Modeling. I: Cl<sub>2</sub>, F<sub>2</sub> and HCl «Plasma Chemistry and Plasma Processing», V. 12 (1992), 449-467.

20. A. M. Efremov, V. I. Svetsov, D. I. Balashov. Compilation of cross section data of elementary processes of HCl applicable for plasma modeling. «Contributions to Plasma Physics», V.39 (1999), 247-253.
21. L. G. Christophorou, J. K. Olthoff . Fundamental electron interactions with plasma processing gases. New York, Springer Science+Business Media, 2004.
22. NIST Chemical Kinetics Database (<http://kinetics.nist.gov/kinetics/index.jsp>).
23. A. M. Efremov, K. H. Kwon, D. A. Shabadarova. Comparative study of plasma parameters and compositions in CF<sub>4</sub>, Cl<sub>2</sub> and HBr + Ar gas mixtures. «Известия вузов. Химия и химическая технология», Т. 59 (2016), № 10, 11-18.

# Визуализация скалярных полей цифровой модели керна

М.В. Михайлюк, П.Ю. Тимохин

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия, E-mail: mix@niisi.ras.ru

**Аннотация:** В статье описывается модификация метода проекции максимальной интенсивности для визуализации скалярных полей цифровой модели керна. Идея модификации состоит в вычислении множеств пересекаемых лучом ячеек, расположенных в одной строке, столбце или слое кубического объема моделирования. Была проведена успешная апробация разработанного комплекса на цифровой модели образца керна баженовской свиты, которая подтвердила корректность предлагаемых решений и их применимость в исследованиях специалистов нефтегазовой отрасли.

**Ключевые слова:** цифровая модель керна, скалярное поле, визуализация, проекция максимальной интенсивности, OpenGL.

## Введение

Исследование породы керна играет важную роль в разработке новых методов повышения нефтеотдачи месторождений. Проблема состоит в том, что выполнение реальных экспериментов на керне приводит к его быстрому разрушению, а извлечение нового образца является дорогостоящей процедурой. Современным подходом к решению данной проблемы является проведение численных экспериментов на цифровой модели керна [1-3]. В частности, это моделирование движения жидкости через него, а также вычисление и 3D визуализация скалярных полей (температуры, давления и т.д.).

Эффективным инструментом исследования скалярных полей является визуализация их наибольших значений с помощью метода проекции максимальной интенсивности [4] (как правило, в областях наибольших значений содержится ключевая информация). Суть метода [5] заключается в том, что через каждый пиксел области вывода изображения на экране монитора из положения наблюдателя (виртуальной камеры) пропускается луч и среди ячеек куба моделирования, пересекающихся с этим лучом, выбирается ячейка с максимальным значением скалярного поля. Это значение переводится в цвет согласно заданной цветовой палитре и этим цветом закрашивается пиксел. Если луч не пересекает куб, то пиксел закрашивается цветом фона. Для уменьшения времени расчетов предлагаются различные подходы. В работе [6] ячейки, которые не влияют на значения максимальной интенсивности, отбрасываются. Остальные ячейки объема

помещаются в кэш для ускорения доступа к ним и соответствующей обработки.

В исследовании [7] предлагается для каждого луча предсказывать позицию ячейки с максимальной интенсивностью и из этой точки испускать лучи в двух противоположных направлениях.

Изображения, получаемые методом проекции максимальной интенсивности, обладают тем недостатком, что при их изучении трудно понять глубину отдельных областей.

Для решения этой проблемы в работе [8] предлагается использовать цветовую сферу, окружающую объект, и цвет каждого вокселя корректировать в зависимости от направления из центра этой сферы в воксел и расстояния от него до наблюдателя.

В данной работе рассматривается визуализация скалярных полей цифровой модели керна модифицированным методом проекции максимальной интенсивности с использованием графической библиотеки OpenGL. Модификация заключается в том, что на каждом шаге предлагается вычислять не одну следующую ячейку, а несколько ячеек, которые луч пересекает в одной строке. Кроме того, введение флагов позволяет записать алгоритм, не содержащий проверки условий направления луча. Это позволит в дальнейшем использовать GPU (в котором нежелательно использование условных операторов) для решения поставленной задачи. В качестве примера в работе рассматривается визуализация скалярного поля давлений, полученных путем математического моделирования протекания жидкости через оцифрованный образец керна баженовской свиты.

## Модифицированный метод проекции максимальной интенсивности

Для реализации метода проекции максимальной интенсивности нужно решить несколько задач: выписать уравнение луча, проходящего через пиксел; найти точку входа этого луча в куб моделирования и точку выхода из него; для каждой ячейки найти следующую по лучу ячейку; выбрать максимальное значение среди просмотренных ячеек, перевести его в цветовую палитру и закрасить рассмотренный пиксел.

Для решения поставленной задачи удобно

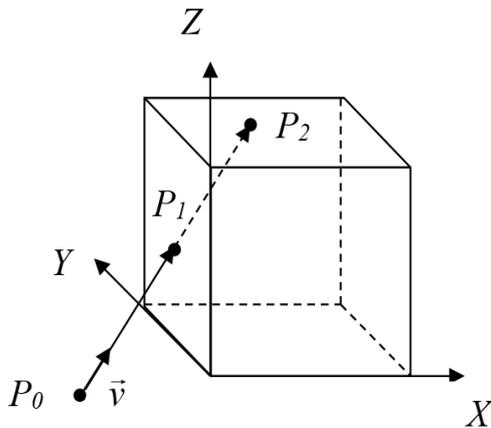


Рис. 1. Объем моделирования и луч в объектной системе координат

использовать локальную систему координат куба моделирования с началом в вершине куба и осями, совпадающими с его сторонами (см. рис. 1). В этой системе рассматриваемые лучи будут исходить из некоторой точки  $P_0$  и иметь вид  $P_0 + \vec{v}t$ , где  $\vec{v}$  - единичный вектор и

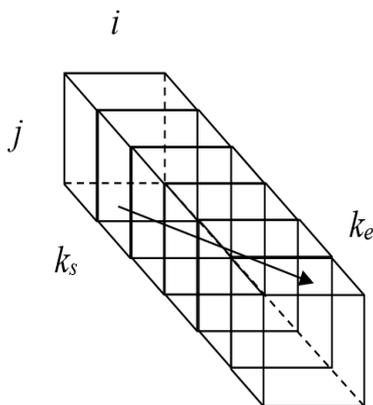


Рис. 2. Строка ячеек

$t \geq 0$ . Если луч  $\vec{v}t$  пересекает куб моделирования, то он входит в него в некоторой точке  $P_1$  и выходит из него в точке  $P_2$  (см. рис. 1). Рассмотрев пересечения луча с каждой гранью куба, легко вычислить значения  $t_1$  и  $t_2$  параметра  $t$ , соответствующие этим точкам.

Теперь нашей задачей будет, начиная с точки  $P_1$ , определить все ячейки куба моделирования, которые пересекаются с лучом, вплоть до точки  $P_2$ . Рассмотрим несколько случаев.

**Вычисление максимального значения в строке ячеек.** Пусть луч проходит некоторое множество ячеек строки (см. рис. 2), задаваемых значениями  $x = i, y = j, k$  изменяется от начальной ячейки  $k_s$  до конечной ячейки  $k_e$  (при этом может оказаться, что  $k_s \leq k_e$  и наоборот). Введем переменные  $m, i_{\max}, j_{\max}, k_{\max}$ , в которые будут записываться соответственно максимальное значение скалярного поля в вычисленном множестве ячеек и координаты максимальной ячейки (т.е. ячейки с максимальным значением) этого множества. Обозначим через

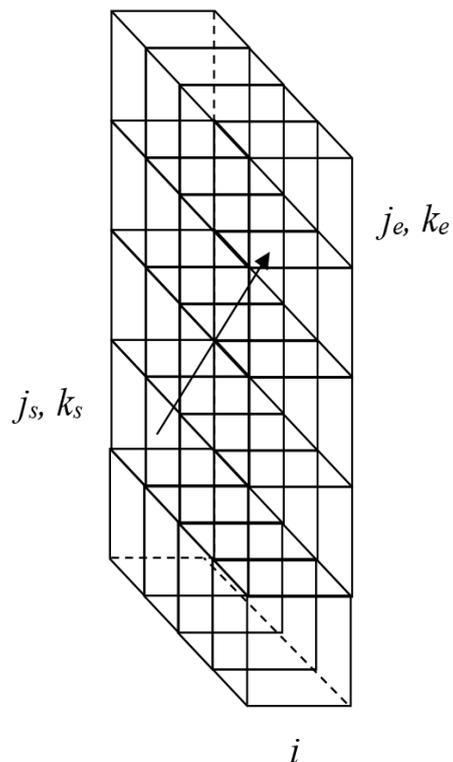


Рис. 3. Слой ячеек

$Max\_k(i, j, k_s, k_e, s_z)$  функцию вычисления максимальной ячейки в выделенной части строки вдоль луча. В ней параметр  $s_z = \pm 1$  означает шаг цикла и корректировку границы изменения счетчика цикла. Знак  $s_z$  положителен, если  $k_s \leq k_e$  и отрицателен в противном случае. Алгоритм

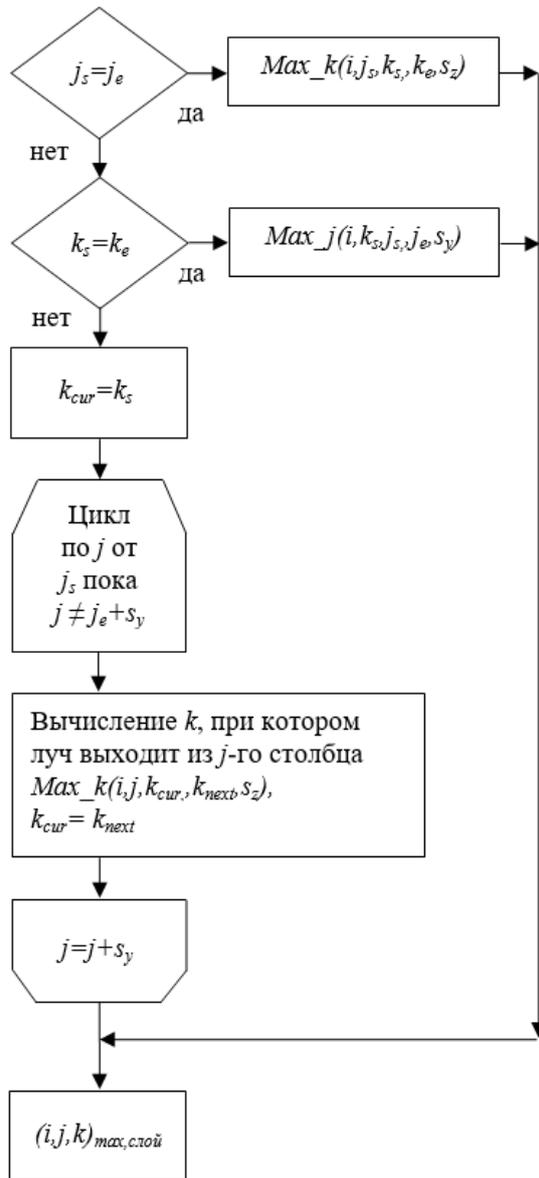


Рис. 4. Блок-схема поиска максимальной ячейки в слое

этой функции не очень сложный и мы его здесь не приводим. Аналогичные функции  $Max\_i(j, k, i_s, i_e, s_x)$  и  $Max\_j(i, k, j_s, j_e, s_y)$  можно написать для вычисления максимальной ячейки для подмножества ячеек столбцов по  $i$  и по  $j$ .

**Вычисление максимального значения в слое ячеек.** Пусть при фиксированном  $i$  луч проходит ячейки внутри одного  $i$ -го слоя, при этом  $j$  и  $k$  изменяются от начальных значений  $j_s$  и  $k_s$  до конечных значений  $j_e$  и  $k_e$  соответственно (см. рис. 3). Блок-схема функции  $Max\_j\_k(i, j_s, j_e, k_s, k_e, s_y, s_z)$  вычисления максимальной ячейки вдоль луча в этом диапазоне показана на рис. 4. Аналогичные функции  $Max\_i\_k(j, i_s, i_e, k_s, k_e, s_x, s_z)$  и  $Max\_i\_j(k, i_s, i_e, j_s, j_e, s_x, s_y)$  можно написать для вычисления максимальной ячейки для подмножества ячеек  $j$ -го и  $k$ -го слоев.

**Вычисление максимального значения вдоль луча в кубе ячеек.** В общем случае алгоритм определения множества ячеек вдоль луча зависит от направления этого луча (от знаков величин  $v_x, v_y$  и  $v_z$ ). Для того, чтобы избежать большого числа условий в алгоритме, введем флаги  $s_x$  и  $s_{1x}$ , которые вычисляются следующим образом:

Если  $v_x > 0$ , то  $s_x = 1$ . Если  $v_x < 0$ , то  $s_x = -1$ ;

Если  $v_x > 0$ , то  $s_{1x} = 1$ , иначе  $s_{1x} = 0$ ;

В остальных случаях значения флагов равны нулю. Флаги  $s_y, s_z, s_{1y}, s_{1z}$  вычисляются аналогично.

Куб ячеек можно рассматривать как множество слоев по  $i$  для  $0 \leq i < N$ . Начальные  $i_1, j_1, k_1$  и конечные  $i_2, j_2, k_2$  номера ячеек определяются точками входа и выхода луча из куба моделирования. Блок-схема вычисления максимального значения вдоль луча в кубе ячеек приведена на рис. 5.

Для закрашивания пикселей необходимо каждому значению скалярного поля сопоставить цвет, причем так, чтобы цвета «монотонно возрастали» при увеличении значения поля. В данной работе предлагается термальная палитра цветов, изменяющихся от голубого к синему, затем к пурпурному и, наконец, к красному. Для ориентации пользователя в левой части окна (см. рис. 6) выводится изображение палитры цветов. Справа от палитры выводится текстовая информация, задающая числовые значения скалярного поля для некоторых (реперных) цветов.

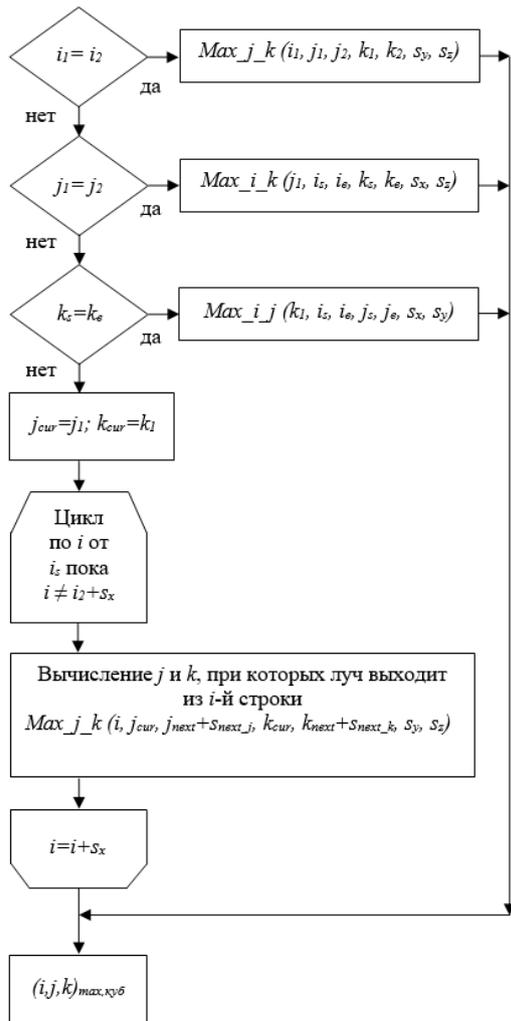


Рис. 5. Блок-схема поиска максимальной ячейки в кубе

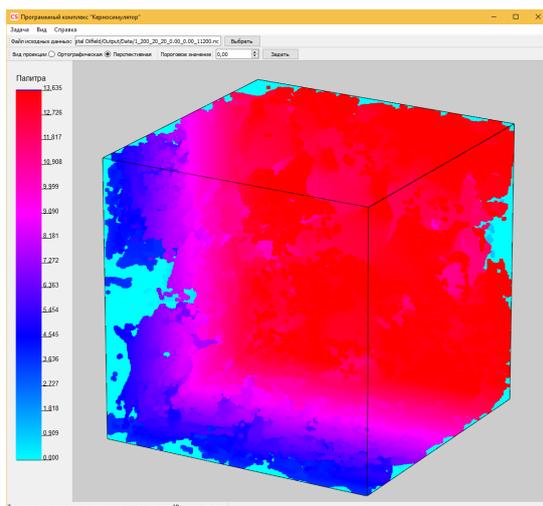


Рис. 6. Визуализация поля давления в цифровой модели керна с помощью модифицированного метода проекции максимальной проекции

## Заключение

В данной работе описана модификация метода проекции максимальной интенсивности для визуализации скалярных полей цифровых моделей керна.

Алгоритм реализован в программных модулях и встроен в созданный в ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН программный комплекс визуализации цифровой модели керна [9].

В работе использовалась цифровая модель керна баженовской свиты, полученная с помощью рентгеновского томографа HeliScan microCT (micro-computed tomography), разработанного в Австралийском национальном университете.

Она состоит из 215 файлов формата NetCDF, каждый из которых содержит значения масштабированного коэффициента поглощения рентгеновского излучения в ячейках сетки размером 2560x2560x40.

Эти значения записываются в виде целых 16-рядных чисел со знаком.

Размер квадратной ячейки равен 0,0015276 миллиметра.

Для моделирования протекания жидкости через керн выделяется кубическая область (куб моделирования) размера NxNxN ячеек, в каждой из которых вычисляется значение изучаемого скалярного поля.

С помощью цифровой модели образца керна баженовской свиты была проведена успешная апробация созданного программного комплекса, которая подтвердила корректность предлагаемых решений, их применимость для исследования петрофизических характеристик нефтяных пластов, а также для визуализации и анализа скалярных полей, полученных с помощью моделирования.

Публикация выполнена в рамках государственного задания по проведению фундаментальных научных исследований (ГП 14) по теме (проекту) «34.9. Системы виртуального окружения: технологии, методы и алгоритмы математического моделирования и визуализации» (0065-2019-0012).

# Visualization of scalar fields of digital core material model

M.V. Mikhaylyuk, P.Yu. Timokhin

**Abstract:** In the paper we describe the modification of the maximum intensity projection method to visualize scalar fields of a digital model of a core material. Modification idea is to compute sets of cells, which are intersected by a ray and positioned in a single row, column, or layer of the cubic modeling volume. Approbation of the developed program modules on the digital model of Bazhenov formation was provided, that shows correctness of the proposed decisions and their applicability in a research of oil and gas industry specialists.

**Keywords:** digital core material model, scalar field, visualization, maximum, intensity projection, OpenGL.

## Литература

1. Савицкий Я.В. Современные возможности метода рентгеновской томографии при исследовании керна нефтяных и газовых месторождений // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 15. – С. 28-37. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.15.4.
2. Язынина И.В., Шеляго Е.В., Абросимов А.А., Веремко Н.А., Грачёв Н.Е., Сенин Д.С. Новый подход к исследованиям керна с помощью рентгеновской микротомографии для решения задач петрофизики // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 1. – С. 19-24.
3. Степанов С.В., Патраков Д.П., Васильев В.В. и др. Цифровой анализ керна: проблемы и перспективы // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 2. – С. 18-22.
4. Charles D. Hansen, Chris R. Johnson. The Visualization Handbook. – Elsevier, Oxford– 2004. – 984 p.
5. Amanatides J., Woo A. A fast voxel traversal algorithm for ray tracing // In Eurographics 87– pp. 3-10.
6. Mroz L., Loffelmann H., Groller E. Advanced High-Quality Maximum Intensity Projection for Volume Visualization, 1999. [https://www.researchgate.net/publication/2773517\\_Advanced\\_High-Quality\\_Maximum\\_Intensity\\_Projection\\_for\\_Volume\\_Visualization](https://www.researchgate.net/publication/2773517_Advanced_High-Quality_Maximum_Intensity_Projection_for_Volume_Visualization).
7. Kwon O., Kang S.T., Kim S.H., Kim Y.H., Shin Y.G. Maximum intensity projection using bidirectional compositing with block skipping // Journal of X-Ray Science and Technology. – 2015. – № 23. – pp. 33-44.
8. Díaz J., Vázquez P. Depth-Enhanced Maximum Intensity Projection // In 8th IEEE/EG International Symposium on Volume Graphics. – 2010. – pp. 93-100.
9. Тимохин П.Ю., Михайлюк М.В. Технология создания мультизадачной графической оболочки системы визуализации цифровой модели керна // Вестник кибернетики. – 2018. – № 3 (31). – С.247-254.

# Автотестирование системы ПиктоМир

Н.О.Бесшапошников<sup>1</sup>, А.Г. Леонов<sup>2</sup>, К.А. Машенко<sup>3</sup>, А.Е. Орловский<sup>3</sup>

- 1) Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук».
- 2) Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» механико-математический факультет; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический госуниверситет» (МПГУ)
- 3) Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» механико-математический факультет; Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»;

**Аннотация:** Школьный курс информатики, включающий школьный алгоритмический язык, в так же, язык Пикто, базируются на цифровых педагогических программных системах КуМир и ПиктоМир. Из-за наличия большого числа разнообразных программных исполнителей, а также активного развития системы ПиктоМир, возникла потребность в проведении автотестирования, без участия разработчиков проверять корректность работы системы после каждого внесенного изменения в исходный код приложения.

В данной статье предлагается подход к конструированию автоматизированных систем тестирования с высокой степенью интеграции в тестируемое приложение. Система состоит из набора модулей, каждый из которых выполняет законченное действие. Схема проведения тестирования использует стандартный подход, когда при изменении приложения выполняется группа тестов и, на основе собранной системой информации, происходит верификация приложения.

**Ключевые слова:** автотестирование, программирование, тестирование, ПиктоМир, КуМир, алгоритмика.

Процесс тестирования является важной содержательной задачей. При составлении плана тестирования необходимо учитывать архитектуру и особенности тестируемого приложения, его дизайн и внутреннее устройство [1][2]. Попытка реализация такого комплексного подхода к организации процессу тестирования и была постановкой задачи, рассматриваемой ниже.

К основной задаче автоматизации тестирования можно отнести осуществление проверки корректности работы приложения при новых изменённых условиях. Чтобы зафиксировать последовательность действий испытуемого (учащегося) при решении задач в программной системе ПиктоМир [3] автоматически генерируются тесты, которые также включают в дополнительную служебную информацию о состоянии тестируемой системы. Эта информация (тесты) в режиме непрерывной интеграции системы автоматического тестирования сохраняются на сервере в виде отдельного

именованного задания на тестирование, которое становится доступным с момента его создания. Данное задание может быть исполнено автономно на версии программной системы или в наборе - пакете аналогичных заданий. С точки зрения тестирующей системы считается, что успешно выполненное задание обеспечивает некоторый уровень доверия к правильности функционирования приложения. В случае малозначительных изменений в тестируемой системе, например, добавления или модификации внутренних функций приложения, готовое задание или группа заданий проверяется на модифицированном приложении, результат работы сравнивается с хранимыми корректными данными, являющиеся атрибутом данного задания. При этом собирается некоторая, вообще говоря, избыточная информация о тестируемой системе, доступная для анализа вручную или с использованием нейросетевых технологий.

Можно считать, что результатом комплексного автоматизированного тестирования является предположение о корректности исполнения приложения после внесенных в него изменений. Конечно, проведенное тестирование не может гарантировать отсутствие ошибок в приложении, но постоянное накопление и обновление базы тестирующих заданий и проведение автономных тестов позволяет разработчикам эффективно выявить большее число ошибок в тестируемой системе, чем при обычном функциональном тестировании.

Далее будет приведена схема функционирования автоматической тестирующей системы, интегрированной с образовательной средой ПиктоМир.



В режиме автотестирования поверх окна текущей сцены приложения отображается специальное окно **TestingWindow**, реализованное с помощью **ccui.Layout()** [4], которое позволяет записать действия испытуемого с одновременным сбором информации о приложении — то есть, фактически создаётся новое тестовое задание для проверки корректности работы приложения:

```
startTesting();
```

В любой момент можно завершить задание, остановить запись теста, который сохранится на тестирующий сервер.

```
stopTesting();
```

Теперь задание доступно для проведения проверки приложения в автоматическом режиме. При изменении приложения можно запустить уже

существующее задание для проверки корректности работы тестируемой системы:

```
processTesting();
```

В процессе создания теста в специальном окне ведется протокол действий пользователя с указанием параметров. Выдержки из классов действий пользователя приведены ниже:

- Касание (**Touch**) [5], с атрибутами - временем выполнения действия, декартовыми координатами точки касания окна или экрана:  $x$  и  $y$ ,
- Движение (**Move**), с атрибутами - временем выполнения перемещения из начальной точки в конечную,  $x$  и  $y$  которых заданы прямоугольные координаты:  $x$  и  $y$ ,
- Ожидание (**Wait event**), является системной характеристикой времени, прошедшего с момента окончания предыдущего действия до начала следующего,

Пример протокола:

- Touch**  $x:633$   $y:22$  **time:40**
- Move**  $x1: 120$   $y1: 10$   
 $x2: 304$   $y2: 68$  **time: 110**
- Wait 150**

В разрабатываемой системе автоматического тестирования были использованы и модифицированы алгоритмы [6].

Автоматическая система тестирования включает в себя следующие модули:

- Модуль записи последовательных действий пользователя,
- Модуль сбора служебной информации о состоянии объектов программной системы,
- Модуль запуска заданий на автоматическое тестирование,
- Модуль верификации состояния тестируемых объектов,
- Модуль анализа результатов автоматического тестирования.

## Модуль записи действий

Для адекватного функционирования системы автотестирования необходимо эффективно различать действия

пользователя, например, касание экрана от движения по экрану. Для этого все действия пользователя перехватываются системой тестирования с помощью методов класса `cc.EventListener` [7]. Для этого создается специальный «слушатель» `listener` (здесь и далее приводятся классы и методы свободно распространяемой системой программирования `cocos2d-x` [8], которая используется в системе Пиктомир). Любое взаимодействие пользователя с приложением обрабатывается с помощью инструментов объекта `cc.eventManager` [9].

По окончании любого действия формируется событие `Wait event` с вычисленным временем, прошедшим до начала данного действия с момента окончания предыдущего. А также сохраняется информация о текущем действии. В результате каждому действию присваивается свой тип из списка `pm.testingUtils.TouchType`, который эквивалентен одному из ранее описанных действий.

Записанные действия хранятся в массиве `emulatedTouches`.

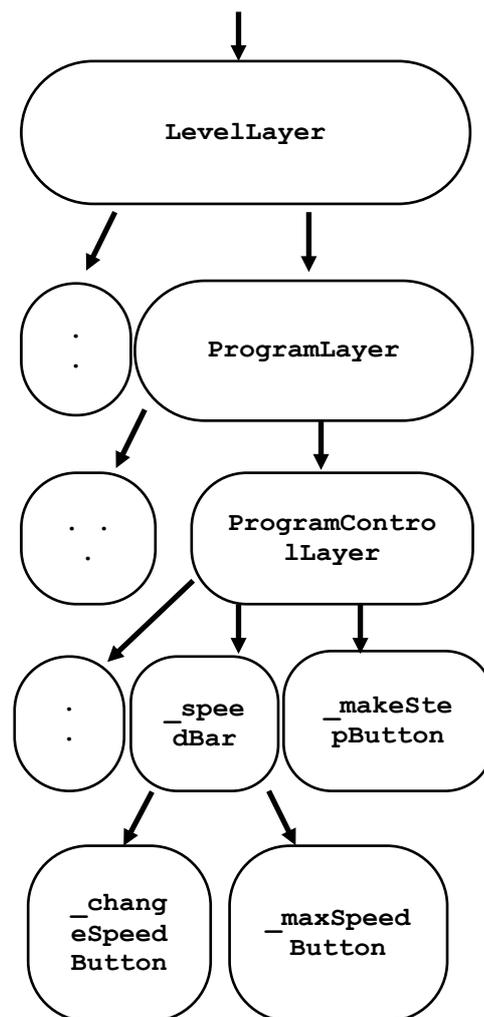
## Модуль сбора информации

При исполнении сценария в окне приложения собирается служебная информация о текущем состоянии объектов системы. В их число входят как объекты, видимые пользователем на экране (робот, элементы карты и т.д.), так и объекты, существующие только внутри приложения (алгоритмы роботов, свойства уровня и т.д.). Для этого рекурсивно строится дерево, отображающее все имеющиеся объекты [10]. Его структура демонстрирует принцип наследования в семействе всех объектов приложения. Затем используется рекурсия для сбора данных обо всех элементах построенного дерева. [11]

Обход дерева осуществляется запуском функции:

```
treeTraversal();
```

В основном у объектов извлекаются такие параметры, как позиция и размеры, но могут быть и дополнительные характеристики, например, текстура. Все действия и собранные о них данные хранятся в отдельных массивах, чтобы в дальнейшем действия можно было воспроизводить, а данные анализировать и сравнивать, учитывая особенности объектно-ориентированного программирования [12].



Все состояния объектов хранятся в массиве `states`.

## Модуль запуска заданий

Чтобы произвести сам процесс тестирования фактически необходимо в точности повторить уже созданный тест.

Для этого используется алгоритм эмуляции действий.

Когда запускается некоторый тест, библиотека функций `TestingUtils` начинает выполнение действий из массива: для `Wait event` запускается `Timeout` [13] на время, полученное из этого действия, аналогично извлекаются координаты и время выполнения из действий `Touch` и `Move` и запускаются специальные функции `emulateTouch()` и `emulateMove()` соответственно.

Таким образом, воспроизводится весь массив действий данного теста в том же порядке и с такими же временными отрезками, которые были в исходном тесте.

## Модуль верификации

По окончанию тестового задания имеется два массива, состоящие из состояний объектов.

Первый из них – корректные данные, второй же отображает информацию, полученную после запуска теста в измененных условиях.

Выполняется алгоритм, который «пробегают» по всем объектам из эталонного первого массива, сравнивая этот объект с его аналогом из второго массива.

Из каждого объекта извлекаются его свойства: это может быть другой объект, числовая или строчная характеристики.

Таким образом, снова используется рекурсия, пока алгоритм не дойдет до сравнения чисел или строк.

При сравнении двух состояний запускается:

```
compareStates();
```

## Модуль анализа результатов

При сравнении состояний тестируемых объектов возникает проблема синхронизации и сопоставления элементов двух массивов данных. Необходимо учитывать погрешность во времени (например, из-за **Timeout** при выполнении **Wait event** и эмуляции действий), “лишние” объекты (например, динамические объекты, которые могут быть в одном из массивов, но не быть в другом). Для этого существует несколько методов, минимизирующих погрешность сравнения. Во-первых, при поиске аналога для объекта из первого массива используется константа **CHECK\_NUMBER**, равная значению интервала времени, в рамках которого ищется аналогичный объект во втором массиве. Затем вычисляется данный сдвиг между первым и вторым массивом и учитывается при поиске следующих аналогичных объектов.

Также при сравнении позиций объектов используется функция **isPointInArea()**, в которой присутствует константа **AREA\_RADIUS**, равная радиусу окружности, в которой ищется позиция аналогичного объекта.

Учитываются “лишние” объекты, то есть существует некоторый порог для объектов, которые не удалось найти во втором массиве.

Процесс тестирования выполняется несколько раз и оценка результата проведенной работы на корректность учитывает число успешных запусков.

## Сравнение с аналогами

Основная проблема, по которой аналогичные системы автоматического тестирования не были применены для внедрения в систему ПиктоМир [14], заключается в процессе записи тестов. Как описано ранее, необходимо перехватывать именно взаимодействие пользователя с программой. Решение данной задачи не возможно в таких системах, как Watir [15], TestPlant eggPlant [16].

Кроме того, необходимо тестировать не только происходящее непосредственно на экране, но и внутренние данные системы ПиктоМир, доступ к которым возможен из тестирующей системы, находящейся внутри самого ПиктоМира. Например, инструмент Ranorex [17] не соответствует данному критерию.

Требуется обработка всех прикосновений пользователя до экрана планшета или телефона и кликов при помощи компьютерной мыши. Таких инструментов аналоги данной системы, в частности проект Katalon Studio [18], не предоставляют.

Система ПиктоМир поддерживает разные операционные системы и платформы [19]. Однако ряд сервисов допускает работу только на определенных операционных системах. К примеру, это может быть только Windows или только Mac OS. Также существуют сервисы, реализованные только на мобильных платформах: iOS или Android, или в принципе не поддерживают мобильные операционные системы. В качестве примера можно привести такие инструменты, как Tricentis Tosca [20] и Rational Robot [21].

Еще одна причина, из-за которой невозможно использование аналогов данной системы автотестирования, заключается в несовместимости со средствами, используемыми для написания системы ПиктоМир. Не все сервисы можно корректно использовать в системе программирования cocos2d-x. В частности, не удовлетворяют данным требованиям такие проекты, как Selenium [22].

Работа выполнена по теме 0065-2019-0010 госзадания 2019 года в отделе учебной информатики ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

# Autotesting of the PiktoMir system

N.O.Besshaposhnikov, A.G. Leonov, K.A. Maschenko, A.E. Orlovsky

**Abstract:** The school computer science course, which includes the school algorithmic language, as well as the Pikto language, are based on the digital pedagogical programming systems KuMir and PiktoMir. Due to the presence of a large number of various software executors, as well as the active development of the PiktoMir system, there was a need for automatic testing, without the participation of developers, to verify the correct operation of the system after each change to the application source code.

This article proposes an approach to the design of automated testing systems with a high degree of integration into the application under tests. The system consists of a set of modules, each of which performs a completed action. The testing scheme uses a standard approach, when a group of tests is executed when the application is changed, and, based on the information collected by the system, the application is verified.

**Keywords:** autotesting, programming, testing, PictoMir, Kumir, algorithm.

## Литература

1. Cem Kaner, Jack Falk, Hung Q. Nguyen Testing computer software, DiaSoft, 2001
2. Glenford J. Myers Art of software testing, John Wiley & Sons, 2004
3. Кушниренко А. Г., Леонов А. Г., Ройтберг М. А. Знакомим дошкольников младших школьников азами алгоритмики помощью систем ПиктоМир и Кумир, Труды НИИСИ РАН, 2015
4. Layout Class Reference [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://cocos2d-x.org/reference/native-cpp/V3.0rc1/d2/db7/classcocos2d\\_1\\_1ui\\_1\\_1layout.html](https://cocos2d-x.org/reference/native-cpp/V3.0rc1/d2/db7/classcocos2d_1_1ui_1_1layout.html) свободный
5. Touch Class Reference [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://cocos2d-x.org/reference/native-cpp/V3.0rc1/d8/d2a/classcocos2d\\_1\\_1touch.html](https://cocos2d-x.org/reference/native-cpp/V3.0rc1/d8/d2a/classcocos2d_1_1touch.html) свободный
6. Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein Introduction to Algorithms, MIT Press, 1990
7. cc.EventListener Class Reference [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://cocos2d-x.org/reference/html5-js/V3.0alpha/symbols/cc.EventListener.html> свободный
8. Cocos2d-x - open-source game framework, with a thin platform dependent layer. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.cocos2d-x.org/cocos2dx> свободный
9. cc.eventManager Class Reference [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://cocos2d-x.org/reference/html5-js/V3.7/symbols/cc.eventManager.html> свободный
10. Левитин А. В. Алгоритмы: Введение в разработку и анализ, Вильямс, 2006
11. Spampinato, D.G., Sridhar, U., Low, T.M. Linear algebraic depth-first search, Association for Computing Machinery, 2019
12. Jacobsen, Ivar, Magnus Christerson, Patrik Jonsson, Gunnar Overgaard Object Oriented Software Engineering, Addison-Wesley Professional, 1992
13. Scheduling: setTimeout and setInterval [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://javascript.info/settimeout-setinterval> свободный
14. Методическое пособие по системе Пиктомир [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.niisi.ru/piktomir/m2019.pdf> свободный
15. Watir – open-source library for automating tests [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.watir.com/> свободный
16. TestPlant eggPlant – software testing and monitoring [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.eggplant.io/> свободный
17. Ranorex – test automation for all [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.ranorex.com/> свободный
18. Katalon Studio – software test automation [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.katalon.com/> свободный

19. А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов, К. А. Прокин и др. ПиктоМир: опыт использования и новые платформы, Альт Линукс Москва, 2011
20. Tricentis Tosca – test automation management [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://www.tricentis.com/> свободный
21. Rational robot – средство автоматизации тестирования [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=465> свободный
22. Selenium – browser automation [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.seleniumhq.org/> свободный

# О периодических элементах $\sqrt{f}$ в эллиптических полях $L = k(x)(\sqrt{f})$ специального вида

М. М Петрунин<sup>1</sup>, Ю.Н. Штейников<sup>2</sup>

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва, Россия.  
E-mails: [petrunin@niisi.ras.ru](mailto:petrunin@niisi.ras.ru); [yuriisht@gmail.com](mailto:yuriisht@gmail.com)

**Аннотация.** В работе приводится полное изложение доказательства конечности числа нетривиальных эллиптических полей  $k(x)(\sqrt{f})$  с периодическим разложением в непрерывную дробь  $\sqrt{f} \in k((x))$ , для которых соответствующая эллиптическая кривая содержит  $k$ -точку порядка 16.

**Ключевые слова:** эллиптическое поле,  $S$ -единицы, непрерывные дроби, периодичность, базис Грёбнера, результат.

Пусть  $k$  – поле характеристики 0, и  $f \in k[x]$  – многочлен свободный от квадратов, положим  $L = k(x)(\sqrt{f})$  – квадратичное расширение поля  $k(x)$ .

В работе [1] для случая функциональных непрерывных дробей в поле формальных степенных рядов  $k((x))$  было доказано, что если поля констант  $k$  конечно, то элемент  $\sqrt{f}$  периодичен всегда. В [2,3] было показано, что в случае бесконечного поля констант свойство периодичности  $\sqrt{f}$  достаточно редкое явление. В статье [4] были явно найдены все такие нетривиальные многочлены степени  $\deg f = 3$  с рациональными коэффициентами, с точностью до естественного отношения эквивалентности, что  $\sqrt{f}$  обладает периодическим разложением в непрерывную дробь в  $k((x))$ .

В статье [5] был предложен новый эффективный метод для решения норменного уравнения, основанный на применении базисов Грёбнера. С помощью этого подхода было доказано утверждение о конечности числа многочленов  $f$  с периодическим разложением  $\sqrt{f}$  в непрерывную дробь таких, что гиперэллиптическое поле, ими определённое, содержит  $S$ -единицу степени

11. В работе [6] были сделано продвижение в направлении описания периодических  $\sqrt{f}$  в случае, когда многочлен  $f$  задаёт эллиптическое поле с числовым полем в качестве поля констант.

В работе [5] с точностью до естественного отношения эквивалентности была показана конечность числа нетривиальных эллиптических полей  $k(x)(\sqrt{f})$  с периодическим разложением в непрерывную дробь  $\sqrt{f} \in k((x))$ , для которых соответствующая эллиптическая кривая содержит  $k$ -точку четного порядка, не превосходящего 18 или  $k$ -точку нечетного порядка не превосходящего 11. Для  $k$  – конечного расширения  $\mathbb{Q}$  степени не более 4 найдены все такие поля. Однако в силу ограничений объёма в статье был приведен лишь краткий набросок доказательства, и был полностью разобран только случай наличия в гиперэллиптическом поле фундаментальной  $S$ -единицы степени 7.

Для полноты изложения мы помещаем здесь полное доказательство указанного результата в случае наличия в гиперэллиптическом поле фундаментальной  $S$ -единицы степени 16. А именно, мы покажем, что в этом случае существует лишь конечное число эллиптических полей с

периодическим разложением  $\sqrt{f}$  в непрерывную дробь в  $k((x))$ . Наши рассуждения основаны на эффективном методе решения норменного уравнения с помощью вычисления результатов, применения базисов Грёбнера в системах компьютерной алгебры Magma и Sage.

Напомним некоторые факты, которые потребуются нам для изложения. Положим  $\text{deg}h = 1$ , и без ограничения общности положим  $h = x$ . Пусть нормирование  $v_x$  поля  $k(x)$  имеет два продолжения  $v_x^+$  и  $v_x^-$  на поле  $L$ . Если  $\text{deg}f = 2g + 1$  для  $g \in \mathbf{N}$ , то положим  $S = \{v_x^+, v_\infty\}$ . Группа обратимых элементов кольца  $S$ -целых элементов поля  $L$  называется группой  $S$ -единиц. Если существует хотя бы одна нетривиальная  $S$ -единица (то есть отличная от константы поля  $k$ ), то в описанном нами случае группа  $S$ -единиц является прямым произведением  $k \setminus \{0\}$  и бесконечной циклической группы, её образующие называются фундаментальными  $S$ -единицами. Степенью  $S$ -единицы  $\lambda_1 + \lambda_2 \sqrt{f}$  называется показатель  $m$  в норменном выражении  $\lambda_1^2 - \lambda_2^2 f = bh^m$ ,  $b \in k \setminus \{0\}$ .

Будем говорить, что  $\alpha \in L$  разлагается в ряд в поле формальных степенных рядов  $k((x))$ , если имеет место разложение  $\alpha = \sum_{j \geq s} u_j x^j$ , где  $u_j \in k$ ,  $s \in \mathbf{Z}$  (более подробно см. [1]).

Периодичность разложения в непрерывную дробь  $\sqrt{f(x)}$  равносильна периодичности  $\sqrt{a^2 f(bx)}$  для произвольных  $a, b \in k \setminus \{0\}$ . Поэтому мы будем рассматривать такие многочлены с точностью до указанной эквивалентности. Сформулируем основной результат настоящей статьи.

**Теорема 1.** Пусть  $k$  – поле, и  $\text{char} k = 0$ . Тогда существует универсальная константа  $C$ , не зависящая от поля  $k$ , такая, что существует не более  $C$  попарно неэквивалентных над  $k$  многочленов  $f$ ,  $\text{deg} f = 3$ , для которых выполнены следующие условия:

- $\sqrt{f}$  – периодичен в  $k((x))$ ;
- поле  $L$  содержит фундаментальную  $S$ -единицу степени 16 для  $S = \{v_\infty, v_x^+\}$ .

Далее мы приводим критерий (см. в [3,8], а также [4]) периодичности элементов вида  $\sqrt{f}$  в формулировке из работы [7].

**Теорема 2.** Пусть многочлен  $f$  свободен от квадратов, а  $\text{deg}f = 2g + 1$ . Элемент  $\sqrt{f}$  периодичен тогда и только тогда, когда некоторого  $m \in \mathbf{N}$ , существует решение  $\mu_1, \mu_2, d_1, d_2 \in k[x]$ ,  $b \in k \setminus \{0\}$ ,  $f = d_1 d_2$ , уравнения

$$\mu_1^2 d_1 - \mu_2^2 d_2 = bx^m, \quad (1)$$

и решение для наименьшего такого  $m$  удовлетворяет условиям:

$$\text{deg} \mu_2 = \frac{m - \text{deg} d_2}{2}$$

$$\text{deg} \mu_1 \leq \frac{m + \text{deg} d_2}{2} - (2g + 1).$$

Результат позволяет сводить решение системы алгебраических уравнений к нахождению корней многочленов. В более общей форме он позволяет исключать переменные из системы алгебраических уравнений. В самом деле, пусть полиномиальная система

$$f_1(x_1, \dots, x_n) = 0, \dots, f_n(x_1, \dots, x_n) = 0;$$

где  $f_i \in k[x_1, \dots, x_n]$ , имеет решение  $(a_1, \dots, a_n)$ . Тогда полиномиальная система  $\{R(f_i, f_j) = 0\}$  для  $i = 2, \dots, n$ , где  $f_i$  рассматривается как полином от  $x_n$  над кольцом  $k[x_1, \dots, x_{n-1}]$ , состоит из  $n-1$  уравнений от переменных  $x_1, \dots, x_{n-1}$ , и имеет решение  $(a_1, \dots, a_{n-1})$ . Чтобы избежать обнуления результата, на каждом шаге предварительно вычислим наибольшие общие делители пар многочленов  $f_i$ :  $\text{GCD}(f_i, f_j)$ . Если ни один из корней первоначальной системы не обнуляет многочлен  $\text{GCD}(f_i, f_j)$ , то процедура деления многочленов  $f_i, f_j$  на многочлен  $\text{GCD}(f_i, f_j)$  корректна, и мы производим всевозможные такие сокращения.

Последовательное применение шагов

по исключению переменной позволяет получить в рассматриваемых нами случаях многочлен от одной переменной. С помощью переупорядочивания многочленов на каждом шаге мы можем добиться того, чтобы на последнем шаге был получен многочлен от заданной переменной. Исследование системы из таких многочленов позволяет найти все корни исходной системы. Для краткости будем называть эту итеративную процедуру  $R$ -преобразованием системы.

Пусть многочлен  $f$  раскладывается на множители, тогда полезно вместо исходного норменного уравнения рассматривать модифицированное уравнение. Введем соответствующее определение.

**Определение 3.** Пусть заданы  $g, m \in \mathbf{N}$ . Будем называть набор  $(\mu_1, \mu_2, d_1, d_2, b)$ , где  $b \in k \setminus \{0\}$ ,  $\mu_1, \mu_2, d_1, d_2 \in k[x]$ ,  $d_1 \neq 0$ ,  $d_2 \neq 0$ ,  $\mu_1(0) \neq 0$ ,  $\text{deg}d_1 + \text{deg}d_2 = 2g + 1$ , а произведение  $f = d_1 d_2$  свободно от квадратов, нетривиальным решением обобщённого норменного уравнения над  $k$ , если выполнено соотношение (1).

Пусть задано нетривиальное решение обобщённого норменного уравнения. Определим коэффициенты  $a_i, b_i, h_j, f_i$  из следующих равенств:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \sum_i a_i x^i; & \mu_2 &= \sum_t b_t x^t; \\ d_1 &= \sum_j h_j x^j; & d_2 &= \sum_l f_l x^l. \end{aligned} \quad (2)$$

Нетривиальное решение норменного уравнения (1) является также решением полиномиальной системы с переменными  $a_i, b_i, h_j, f_l$ .

Обозначим через  $lc(f)$  старший коэффициент многочлена  $f$ . Приведем здесь формулировку следующей леммы из работы [7].

**Лемма** Пусть  $m \in \mathbf{N}$  – наименьшее такое число, что существует нетривиальное решение обобщённого норменного уравнения над  $k$ , тогда для данного  $m$

1. существует нетривиальное решение над  $k$  с  $h_0 = f_0 = 1 = lc(\mu_2)$  и  $f_1 = 0$  или  $f_1 = 1$ .

2. при условии  $b_i, b_j, a_j, h_i \in k \setminus \{0\}$

существует нетривиальное решение над  $\bar{k}$  с

$$b_i = b_t = a_j = h_i = 1.$$

Приступим к выводу основной теоремы.

*Доказательство теоремы 1.* Краткий набросок доказательства был дан в статье [7], а здесь мы приводим изложение полного доказательства для рассматриваемого нами случая. По теореме 2 для того, чтобы  $\sqrt{f}$  был периодичен необходимо и достаточно при фиксированной степени фундаментальной  $S$ -единицы найти решение уравнения (1) для  $m = 8$ . При этом выполняются соотношения  $\text{deg}d_1 = 1, \text{deg}d_2 = 2, \text{deg}\mu_1 = 2, \text{deg}\mu_2 = 3$ . Ясно, что  $h_0 \neq 0, a_0 \neq 0, b_0 \neq 0, f_0 \neq 0$ , иначе сокращая на  $x$  в (1) заключаем, что степень единицы должна быть строго меньше 18. Из сравнения степеней левой и правой частей (1) и теоремы 2 нетрудно видеть, что  $lc(\mu_2) = b_3 \neq 0$ . В условиях теорем 1 не существует решений системы с  $f_1 = 0$ . Действительно, в противном случае, согласно пункту 2 леммы существует решение над полем  $\bar{k}$  с  $f_1 = 0$  системы норменного уравнения с  $f_2 = 1, f_1 = 0, b_3 = 1, b_0 = 1$ . Однако же базис Грёбнера этой системы обобщенного норменного уравнения в этом случае состоит из единицы, что равносильно отсутствию решений.

Воспользуемся пунктом 1 леммы, подставим в систему норменного уравнения  $f_1 = 1, f_0 = 1, b_3 = 1$  и получим следующие уравнения:

$$\left\{ \begin{aligned} -a_0^2 + b_0^2 &= 0 \\ -a_0^2 h_1 - 2a_0 a_1 + b_0^2 + 2b_0 b_1 &= 0 \\ b_0^2 f_2 - 2a_0 a_1 h_1 - a_1^2 - 2a_0 a_2 + 2b_0 b_1 + \\ &+ b_1^2 + 2b_0 b_2 = 0 \\ 2b_0 b_1 f_2 - a_1^2 h_1 - 2a_0 a_2 h_1 - 2a_1 a_2 + \\ &+ b_1^2 + 2b_0 b_2 + 2b_1 b_2 + 2b_0 = 0 \\ b_1^2 f_2 + 2b_0 b_2 f_2 - 2a_1 a_2 h_1 - a_2^2 + \\ &+ 2b_1 b_2 + b_2^2 + 2b_0 + 2b_1 = 0 \\ 2b_1 b_2 f_2 - a_2^2 h_1 + b_2^2 + \\ &+ 2b_0 f_2 + 2b_1 + 2b_2 = 0 \\ b_2^2 f_2 + 2b_1 f_2 + 2b_2 + 1 &= 0 \\ 2b_2 f_2 + 1 &= 0. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

После простого упрощения системы мы получаем эквивалентную систему от переменных  $b_0, b_1, b_2, h_1, f_2$

$$\begin{cases}
 -\frac{5}{8}b_0h_1^3 - \frac{1}{2}b_0f_2h_1 + \frac{3}{8}b_0h_1^2 + \frac{3}{4}b_1h_1^2 - \\
 -\frac{1}{2}b_0f_2 + b_1f_2 + \frac{1}{8}b_0h_1 - \frac{1}{2}b_1h_1 - \\
 -b_2h_1 + \frac{1}{8}b_0 - \frac{1}{4}b_1 + b_2 + 2 = 0 \\
 \frac{15}{64}b_0^2h_1^4 + \frac{1}{8}b_0^2f_2h_1^2 - \frac{7}{16}b_0^2h_1^3 - \\
 -\frac{7}{8}b_0b_1h_1^3 - \frac{1}{4}b_0^2f_2^2 - \frac{1}{4}b_0^2f_2h_1 - \frac{1}{2}b_0b_1f_2h_1 + \\
 + \frac{5}{32}b_0^2h_1^2 + \frac{7}{8}b_0b_1h_1^2 + \frac{3}{4}b_1^2h_1^2 + \frac{1}{4}b_0b_2h_1^2 + \\
 + \frac{1}{8}b_0^2f_2 - \frac{1}{2}b_0b_1f_2 + b_1^2f_2 + b_0b_2f_2 + \\
 + \frac{1}{16}b_0^2h_1 - \frac{1}{8}b_0b_1h_1 - \frac{1}{2}b_1^2h_1 - \frac{1}{2}b_0b_2h_1 - \\
 -b_1b_2h_1 - \frac{1}{64}b_0^2 + \frac{1}{8}b_0b_1 - \frac{1}{4}b_1^2 + \\
 + \frac{1}{4}b_0b_2 + b_1b_2 + 2b_0 + 2b_1 = 0 \\
 -\frac{9}{64}b_0^2h_1^5 - \frac{3}{8}b_0^2f_2h_1^3 + \frac{3}{16}b_0^2h_1^4 + \frac{3}{8}b_0b_1h_1^4 - \\
 -\frac{1}{4}b_0^2f_2^2h_1 + \frac{1}{4}b_0^2f_2h_1^2 + \frac{1}{2}b_0b_1f_2h_1^2 + \frac{1}{32}b_0^2h_1^3 - \\
 -\frac{5}{8}b_0b_1h_1^3 - \frac{1}{4}b_1^2h_1^3 - \frac{3}{4}b_0b_2h_1^3 + \frac{1}{8}b_0^2f_2h_1 - \\
 -\frac{1}{2}b_0b_1f_2h_1 - b_0b_2f_2h_1 - \frac{1}{16}b_0^2h_1^2 + \frac{1}{8}b_0b_1h_1^2 + \\
 + \frac{1}{2}b_1^2h_1^2 + \frac{1}{2}b_0b_2h_1^2 + b_1b_2h_1^2 + 2b_1b_2f_2 - \\
 -\frac{1}{64}b_0^2h_1 + \frac{1}{8}b_0b_1h_1 - \frac{1}{4}b_1^2h_1 + \frac{1}{4}b_0b_2h_1 - \\
 -b_1b_2h_1 - b_2^2h_1 + b_2^2 + 2b_0f_2 + 2b_1 + 2b_2 = 0 \\
 b_2^2f_2 + 2b_1f_2 + 2b_2 + 1 = 0 \\
 2b_2f_2 + 1 = 0
 \end{cases} \quad (4)$$

Применим  $R$ -преобразование системы. В каждом из случаев получается ненулевой многочлен от каждой из переменных, что завершает доказательство нашей теоремы. Выпишем уравнения, которые получились у нас в результате  $R$ -

преобразования системы, причём вместо каждого многочлена мы выпишем лишь его радикал. Полученная система является следствием над  $\overline{Q}$  исходной системы.

Обозначим через  $P_{x,k}$  – некоторый многочлен от переменной  $x$  степени  $k$ .

$$\begin{cases}
 b_0P_{b_0,6}P_{b_0,55}P_{b_0,107} = 0 \\
 (h_1 + 2)h_1(h_1 - 1)P_{h_1,2}P_{h_1,3}P_{h_1,6}P_{h_1,20}P_{h_1,48} = 0 \\
 (4f_2 - 3)(4f_2 - 1)f_2P_{f_2,2}P_{f_2,3}P_{f_2,6} = 0 \\
 (b_2 + 2)(3b_2 + 2)b_2P_{b_2,2}P_{b_2,3}P_{b_2,6} = 0 \\
 b_1(b_1 - 4)P_{b_1,2}P_{b_1,3}P_{b_1,6}P_{b_1,20}P_{b_1,48} = 0
 \end{cases} \quad (5)$$

В силу ограничений объёма, мы не имеем возможности привести полный вид всех многочленов, входящих в систему (5). Приведём для примера несколько многочленов:

$$\begin{aligned}
 P_{b_0,6} &= 35162859375b_0^6 + 964070910000b_0^5 + \\
 &+ 6924423153600b_0^4 - \\
 &- 5147602126848b_0^3 - 48716872445952b_0^2 + \\
 &+ 63203662036992b_0 + 674064760832;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{f_2,6} &= 76877824f_2^6 - 162641920f_2^5 \\
 &+ 102620928f_2^4 - 33014016f_2^3 \\
 &+ 8659440f_2^2 - 502200f_2 + 212625;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{b_2,6} &= 212625b_2^6 + 251100b_2^5 + 2164860b_2^4 + \\
 &+ 4126752b_2^3 + 6413808b_2^2 + \\
 &+ 5082560b_2 + 1201216;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{b_1,20} &= 8255648563200b_1^{20} - \\
 &- 182292029964288b_1^{19} + \\
 &+ 3700176823118016b_1^{18} - \\
 &- 41672730322305792b_1^{17} + \\
 &+ 220048281041334912b_1^{16} - \\
 &- 274861679147380224b_1^{15} - \\
 &- 2622240588850487424b_1^{14} + \\
 &+ 13231629527936646384b_1^{13} - \\
 &- 17982425793551807808b_1^{12} - \\
 &- 35374972142113715184b_1^{11} + \\
 &+ 167662143348451723824b_1^{10} -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -267859272743637980872b_1^9 + \\
& +220469209547236109547b_1^8 - \\
& -85941395765711763492b_1^7 - \\
& -150095028152499744b_1^6 + \\
& +11146097842624151552b_1^5 + \\
& +1592601206869000192b_1^4 + \\
& +44728120934137856b_1^3 - \\
& -1174039007592448b_1^2 + \\
& +32358283608064b_1 - 549755813888.
\end{aligned}$$

При вычислениях результата в ходе  $R$ -преобразования системы на шагах, приводящих к этим многочленам, происходит сокращение на нетривиальные общие множители:  $f_2, b_2, b_0$  или произведения их степеней. Сокращение в каждом из случаев корректно, так как  $b_0 \neq 0$  или базис Гребнера исходной системы, дополненный каждым из уравнений:  $b_2 = 0$  и  $f_2 = 0$ , сводится к ненулевой константе. Это обосновывает корректность сокращения в ходе  $R$ -

процедуры.

Также возникает сокращение на множитель  $b_1^2$ . Вычисляя Базис Гребнера исходной системы дополненный каждым из этих уравнений, мы находим явно все решения. Эти решения не удовлетворяют условию  $b_0 \neq 0$  и, следовательно, нам не подходят.

В заключение отметим, что в силу (5) каждая из исследуемых переменных  $b_0, b_1, b_2, h_1, f_2$  может принимать не более чем конечное число значений для любого поля  $k$ . Это и завершает доказательство теоремы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по проведению фундаментальных научных исследований по теме (проекту) N 0065-2019-0011 (Исследование групповых алгебраических многообразий и их связей с алгеброй, геометрией и теорией чисел).

## On the periodic elements $\sqrt{f}$ in elliptic fields $L = k(x)(\sqrt{f})$ of a special form

M. M. Petrunin, Yu. N. Shteinikov

**Abstract:** The paper presents a complete proof of finiteness of a number of non-trivial elliptic fields  $k(x)(\sqrt{f})$  with periodic expansion of  $\sqrt{f} \in k((x))$  into a continued fraction for which the corresponding elliptic curve contains a  $k$ -point of order 16.

**Keywords:** elliptic field,  $S$ -unit, continued fraction, periodicity, Gröbner basis, resultant

### Литература

- 1 Беньш-Кривец В. В., Платонов В. П. Группы  $S$ -единиц в гиперэллиптических полях и непрерывные дроби // Математический сборник. 2009. Т. 200, № 11. С. 15–44.
- 2 Платонов В. П., Петрунин М. М.  $S$ -единицы в гиперэллиптических полях и периодичность непрерывных дробей // ДАН. 2016. Т. 470, № 3. С. 260–265.
- 3 Платонов В. П., Петрунин М. М. Группы  $S$ -единиц и проблема периодичности непрерывных дробей в гиперэллиптических полях // Труды МИАН. 2018, Т. 302, С. 354–376.
- 4 Abel N. H. Ueber bie integration ber bifferential-formel  $\rho bx / \sqrt{R}$  wenn r unb  $\rho$  ganze functionen sinb. *Journal für bie reine unb angewanbte Mathematik*, V. 1, P. 185–221, 1826.
- 5 Tchebicheff P. Sur l'intégration des différentielles qui contiennent une racine carrée d'un polynome du troisieme ou du quatrieme degré // Journal des math. pures et appl. 1857. Vol. 2. P. 168–

192.

6 Schmidt Wolfgang M. On continued fractions and Diophantine approximation in power series fields // *Acta arithmetica*. 2000. Vol. 95, no. 2. P. 139–166.

7 Платонов В. П. Теоретико-числовые свойства гиперэллиптических полей и проблема кручения в якобианах гиперэллиптических кривых над полем рациональных чисел // *Успехи математических наук*. 2014. Т. 69:1, № 415. С. 3–38.

8 Петрунин М. М. S-единицы и периодичность квадратного корня в гиперэллиптических полях. 2017. // *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 474, № 2. С. 155–158.