Министерство образования и науки Российской Федерации

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт математики и механики им. Н.И.Лобачевского

Кафедра аэрогидромеханики

Специальность (направление): 010800.68 – Механика и математическое моделирование

Специализация: Механика жидкости, газа и плазмы

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕСОВЕРШЕНСТВА ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ НА КРИВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАБОЙНОГО ДАВЛЕНИЯ

Работа завершена:
"___"_____2014 г.
_____(М.А.Якимова)

Работа допущена к защите:
Научный руководитель
д.т.н.
"___"_____2014 г.
_____(М.Н.Шамсиев)

Заведующий кафедрой
док. физ.-мат. наук, профессор
"___"_____2014 г.
_____(А.Г.Егоров)

Казань — 2014

Содержание

Список обозначений……..3

Введение……..4

Виды несовершенства скважин.……6

Постановка задачи……10

Численное решение……...11

Результаты расчетов…….....13

Выводы……..... 20

Список литературы……...21

Приложение…….....23

Список обозначений

μ - вязкость газа $[мПа \cdot с]$

p - давление газа в пласте $[МПа]$

m_0 - пористость пласта

T - температура газа в пласте $[K]$

Z - коэффициент сверхсжимаемости газа

H - толщина пласта $[м]$

p_0 - пластовое давление на уровне кровле пласта $[МПа]$

T_k – температура на контуре $[K]$

$T_{ст}$ – стандартная температура $[K]$

r_c - радиус ствола скважины $[м]$

R_k - радиус контура питания $[м]$

L – толщина пласта $[м]$

L_w – глубина вскрытия пласта

Q – дебит скважины $[м^3/с]$

k_1 - проницаемость призабойной зоны $[мкм^2]$

k_2 - проницаемость удаленной зоны $[мкм^2]$

r_1 - радиус призабойной зоны $[м]$

R – газовая постоянная $[Дж/кг \cdot K]$

g – ускорение свободного падения $[м/с^2]$

t – время $[с]$

Введение

Кривые восстановления (падения) забойных давлений (КВД-КПД) являются одним из известных и распространенных методов гидродинамических исследований скважин на неустановившихся режимах фильтрации.

Под гидродинамическими исследованиями скважин (ГДИС) понимается система мероприятий, проводимых на скважинах по специальным программам замер с помощью глубинных приборов ряда величин (изменения забойных давлений, дебитов, температур во времени и др., относящихся к продуктивным нефтегазовым пластам), последующая обработка замеряемых данных, анализ и интерпретация полученной информации о продуктивных характеристиках - параметрах пластов и скважин и т.д. [4, 5]

Гидродинамические исследования при нестационарных режимах фильтрации проводятся методами восстановления давления (после остановки скважины, работающей на установившемся режиме) и стабилизации давления и дебита (при пуске остановленной скважины в определенном режиме работы). Сущность первого метода - наблюдения за изменением забойного (устьевого) давления и температуры с течением времени и построение по полученным данным кривой восстановления давления (КВД), второго - за изменением забойного (устьевого) давления, температуры, дебита скважины в результате чего строится кривая стабилизации давления (КСД). С помощью КВД и КСД определяются проводимость, пьезопроводность, пористость, проницаемость, неоднородность пластов - коллекторов и др. Кривые позволяют также оценивать изменение параметров пласта в процессе работы скважины (очищение призабойной зоны и др.). На форму КВД влияют приток газа в скважину после её остановки, неизотермичность процесса восстановления

давления, неоднородность пласта, межпластовые перетоки и др. Те же факторы влияют на форму КСД, однако чаще искажение вызывается изменением фильтрационных характеристик призабойной зоны скважины, неоднородностью пласта по площади и мощности.

Данные, полученные при газогидродинамических исследованиях, используются для подсчёта запасов газа, при составлении технологических проектов и анализе разработки месторождений, а также при планировании мероприятий по увеличению продуктивности скважин.

В данной работе рассматривается численное решение фильтрации реального газа. Исследуется влияние несовершенства вертикальной газовой скважины по степени вскрытия пласта и скин-эффекта на изменение забойного давления. Приводятся результаты численных расчетов.

1. Виды несовершенств скважин. Скин-эффект

Скважина представляет собой направленную горную выработку цилиндрической формы, сооружаемую с поверхности земли специальными механическими средствами. Характеризуется большой глубиной и малым диаметром (рис. 1).

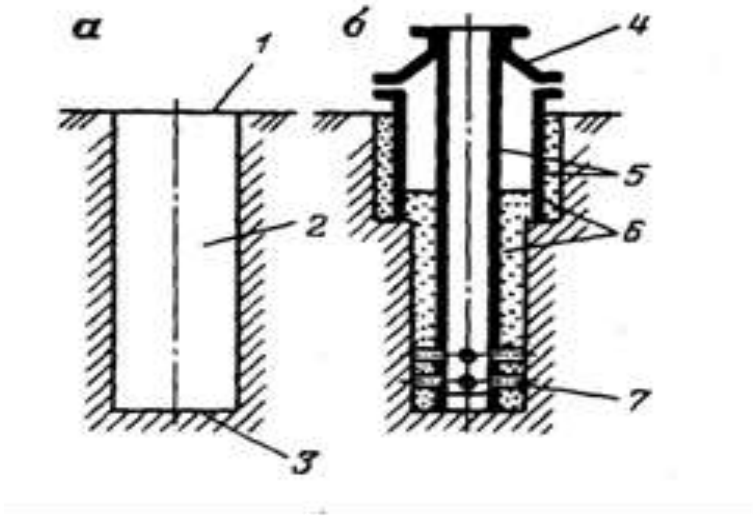

Рис. 1. Схема скважины

Начало скважины называют *устье 1*, ее дно в массиве горных пород – *забой 3*, цилиндрическая поверхность, называемая *стенкой*, образует *ствол 2*. В законченном виде стенки скважины закреплены стальными трубами *5* и цементом *6*, а продуктивный пласт имеет гидравлическое сообщение *7* со скважиной. Устье оборудуют специальной арматурой, установленной на фланце *4*. на которую подвешивают скважинное оборудование.

Гидродинамически совершенной называют скважину, имеющую форму цилиндра с постоянным радиусом и высотой, в которую газ поступает к открытому забою (препятствия на стенках скважины отсутствуют).

Приток газа в реальную скважину отличается от притока газа в гидродинамически совершенную тем, что в призабойной зоне и на забое скважины возникают дополнительные фильтрационные сопротивления из-за искривления и сгущения линии токов.

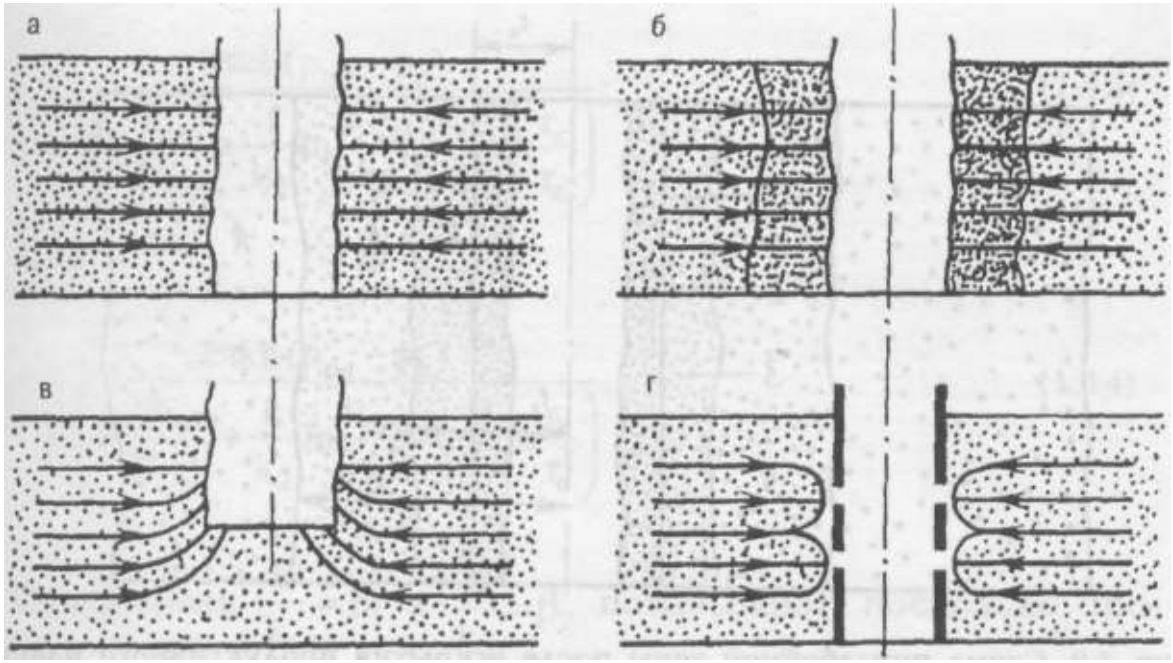

Рис.2 . Схема притока
в гидродинамически совершенную (а) и гидродинамически несовершенную скважину по качеству (б), степени (в) и характеру (г) вскрытия продуктивного пласта

Выделяют гидродинамически несовершенные скважины (рис.2.):

- по степени вскрытия, когда скважиной продуктивный пласт вскрыт не на всю толщину (рис.1. в),
- по характеру вскрытия, когда связь продуктивного пласта со скважиной осуществляется не через открытый забой, а через искусственные (перфорационные) каналы (рис.1. г).

В производственной практике встречаются также скважины несовершенные как по степени, так и по характеру вскрытия.

Несовершенство забоев влечет за собой появление дополнительных фильтрационных сопротивлений, возникающих в призабойной зоне у

стенок скважины и снижение дебитов в результате отклонения геометрии течения жидкости от плоскорадиального потока.

Степень и характер вскрытия пласта имеют важное значение при разработке месторождений нефти и газа, так как они определяют фильтрационные сопротивления, возникающие в призабойной зоне, и, в конечном итоге, производительность скважин. Выбор степени и характера вскрытия осуществляется в зависимости от физических свойств пластов, их толщины, степени неоднородности, способа разра ботки и т. д. Несовершенство скважин по степени и характеру вскрытия приводит к таким деформациям линий тока, которые приводят к возникновению в призабойной зоне сложных неодномерных течений. В связи с этим рассмотрение особенностей притока к гидродинамически несовершенным скважинам имеет большое практическое значение.

Различают скважины гидродинамически несовершенные также по качеству вскрытия пласта, когда проницаемость пористой среды в призабойной зоне уменьшена по отношению к природной проницаемости пласта.

Скин-фактор — гидродинамический параметр, характеризующий дополнительное фильтрационное сопротивлени течению флюидов в околоскважинной зоне пласта, приводящее к снижению добычи (дебита) по сравнению с совершенной (идеальной) скважиной. Причинами скин-фактора являются гидродинамическое несовершенство вскрытия пласта, загрязнение околоскважинной зоны, прочие нелинейные эффекты (турбулентное течение, разгазирование, сжатие скелета горной породы и т. д.). Из рис.1 запишем соотношение [2]:

$$C_1 = 2\left(\frac{k}{k_1} - 1\right)\ln\frac{R_0}{R_c} + \frac{Ck}{k_1}$$

Несовершенство по качеству вскрытия обозначается – C_1. Здесь С-коэффициент несовершенства по степени и характеру вскрытия; R_0-

радиус призабойной зоны; R_c - радиус ствола скважины; k_1, k - коэффициенты проницаемости призабойной зоны и за ее пределами.

Если C_1>0, то это говорит о плохом состоянии вскрытия. Для того чтобы $C_1 \leq 0$, необходимо проведение работ по интенсификации притока газа к скважине. Появление C_1говорит о том, что общепринятая форма КВД будет искажена.

3. Постановка задачи

Основные дифференциальные уравнения, описывающие неустановившееся движение газа в вертикальной скважине, выводятся из уравнения неразрывности и движения с учетом состояния газа. Процесс изотермической 2D фильтрации реального газа к вертикальной скважине описывается уравнением [2]:

$$m\frac{\partial p}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{k}{\mu}pr\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{\mu}p\frac{\partial p}{\partial z}\right), r\in(r_c,r_k), z\in(0,L), t>0, \qquad (1)$$

с начальными

$$p(r,z,0)=\frac{p_0}{1+\frac{zg}{RT_0Z_0}}, r\in(r_c,r_k), z\in(0,L), t>0, \qquad (2)$$

и граничными условиями

$$\int_{L_w}\left[\frac{k}{\mu}pr\frac{\partial p}{\partial r}\right]_{r=r_w}dz=2\pi\frac{T_0Z_0}{T_{c\grave{o}}}Q, \left(p(r_w,z,t)=P_z, z\in[0,L_w]\right) \qquad (3)$$

$$\left.\frac{\partial p}{\partial r}\right|_{r=r_w}=0, z\in[0,L_w] \qquad (4)$$

$$p(R_k,z,t)=\frac{p_0}{1+\frac{zg}{RT_0Z_0}}, z\in[0,L], t>0, \qquad (5)$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial z}\right]_{z=0}=\left[\frac{\partial p}{\partial z}\right]_{z=L}=0, r\in(r_w,R_k), t>0. \qquad (6)$$

где L - толщина пласта, L_w - глубина вскрытия пласта, μ - вязкость газа, m - пористость пласта, p_0 - пластовое давление на уровне кровле пласта, T_0, T_{cm} - пластовая и стандартная температура, r_w, R_k - радиус скважины и контура питания, Q - дебит скважины, Z_0 - сверхсжимаемость газа, k - проницаемость пласта.

4. Численное решение

Для численного решения системы (1) – (4) применяется метод конечных разностей [6]. Область решения покрывается неравномерной сеткой, которая сгущается к скважине. Построение такой сетки проводится с помощью преобразования координат $u = \ln r$ [1]. С условием преобразования система (1)-(6) запишется в виде:

$$m\frac{\partial}{\partial t} = \frac{1}{e^{2u}}\frac{\partial}{\partial u}\left(\frac{k}{\mu}p\frac{\partial p}{\partial u}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{\mu}p\frac{\partial p}{\partial z}\right), z \in [0, L], u \in (u_w, U_k), t > 0, \quad (7)$$

$$p(u, z, 0) = p_0 - z\frac{p}{RT_0Z_0}g, \quad (8)$$

$$\int_{L_w}\left[\frac{k}{\mu}p\frac{\partial p}{\partial u}\right]_{u=u_w} dz = 2\pi\frac{T_0Z_0}{T_{cm}}Q, \quad (9)$$

$$p(u_k, z, t) = \frac{p_0}{1 + \frac{zg}{RT_0Z_0}}, z \in [0, L], \quad (10)$$

$$\left[\frac{\partial p}{\partial z}\right]_{z=0} = \left[\frac{\partial p}{\partial z}\right]_{z=L} = 0, u \in (u_w, u_k). \quad (11)$$

В области $\Omega = \{\ln r_c = u_c < u < U_k = \ln R_k, 0 \le z \le L, 0 < t \le T\}$ вводятся сетки узлов $\varpi_r = \{u_i, u_c = u_1 < u_2 < ...u_N = U_k,$

$u_i = u_1 + (i-1)h_r, h_r = (u_N - u_1)/(N_r - 1), i = 1, N_r\},$

$$\varpi_\tau = \left\{z_j, 0 = z_1 < z_2 < ... < z_M = L, z_j = z_1 + (j-1)h_z, h_z = \frac{L}{(N_z - 1)}, j = \overline{1, N_z}\right\}$$

$\varpi_\tau = \{t_j, 0 = t_0 < t_1 < ... < t_M = T, t_j - t_{j-1} = \tau_j, j = 1, M\}$, и полагается

$p_{ij}^n = p(u\ , z_j, t_n).$

Для разностной аппроксимации краевой задачи (7)-(11) используется следующие неявные разностные схемы [6]:

$$\frac{m_0}{\tau_n}\left[p_{ij}^n - p_{ij}^{n-1}\right] = \frac{1}{e^{2u_i}h_r^2}\left[a_{ij}\left(p_{i+1j}^n - p_{ij}^n\right) - a_{i-1j}\left(p_{ij}^n - p_{i-1j}^n\right)\right] +$$

$$+\frac{1}{h_z^2}\left[b_{ij}\left(p_{ij+1}^n - p_{ij}^n\right) - b_{ij-1}\left(p_{ij}^n - p_{ij-1}^n\right)\right], i = \overline{2, N_r - 1},\ j = \overline{2, N_z - 1},$$

$$n = \overline{1, M}, \tag{12}$$

$$p_{ij}^0 = \frac{p_0}{1 + \dfrac{z_j g}{RT_0 Z_0}}, i = \overline{1, N_r}\ ,\ j = \overline{1, N_w}\ , \tag{13}$$

$$\sum_{j=N_w}^{N_z} a_{1j}\frac{p_{2j} - p_{1j}}{h_r}h_z = 2\pi\frac{T_0 Z}{T_{\tilde{n}\grave{o}}}Q, \tag{14}$$

$$p_{2j} = p_{0j}, j = \overline{1, N_w - 1}, \left(p_{1j} = P_z, j = \overline{N_w, N_z}\right), \tag{15}$$

$$p_{N_r j} = \frac{p_0}{1 + \dfrac{z_j g}{RT_0 Z_0}}, i = \overline{1, N_r}\ ,\ j = \overline{1, N_z}\ , \tag{16}$$

$$p_{i2} = p_{i0}, p_{iN_z+1} = p_{iN_z-1}\ ,\ i = \overline{2, N_r - 1}\ , \tag{17}$$

$$a_{ij} = \frac{k}{\mu}\left[\frac{p_{ij} + p_{i+1j}}{2}\right],\ b_{ij} = \frac{k}{\mu}\left[\frac{p_{ij} + p_{ij+1}}{2}\right]. \tag{18}$$

Полученная система нелинейных алгебраических уравнений (12)-(18) решается методом прогонки с итерациями, при этом в качестве начального приближения на каждом временном слое берутся значения с предыдущего слоя. **Метод прогонки** или **алгоритм Томаса** используется для решения систем линейных уравнений вида $Ax = F$.

На основе вычислительного алгоритма создан программный комплекс в среде Delphi. Листинг программы приведен в приложении.

5. Результаты расчетов

Исследуется влияние несовершенства вертикальной газовой скважины по степени вскрытия пласта и скин-эффекта на изменение забойного давления. Рассмотрим модельный круговой пласт со следующими данными: H = 50 *м*; R_k = 250 *м*; r_c = 0.1 *м*; p_0 = 20 *МПа*; $P_k = 100 Ìïà$; T_0 = 1 *К*; T_{cm} = 273 *К*; μ = 0.014 *мПа с*; m = 0.2; k = 0.01 *мкм*^{2}; *Т* = 10 *сут.*, $Z_0 = 1$.

На рисунках приведены поля давления при вскрытии пласта на 20%, 40%, 60%,80% . Из рисунков видно, что в окрестности вертикальной скважины, чем меньше вскрывается пласт, тем больше нарушается одномерность фильтрационного потока.

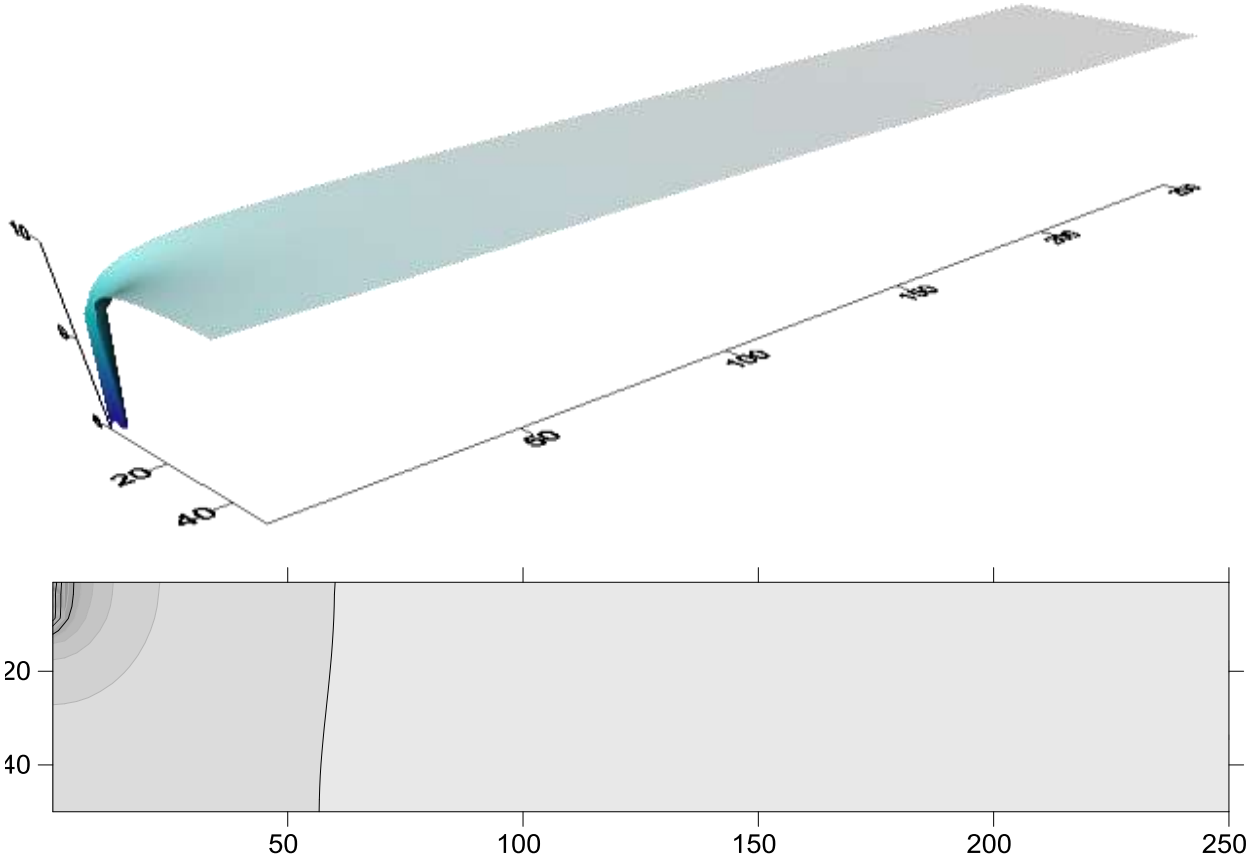

Рис.1.а. Поле давления при вскрытии пласта на 20%

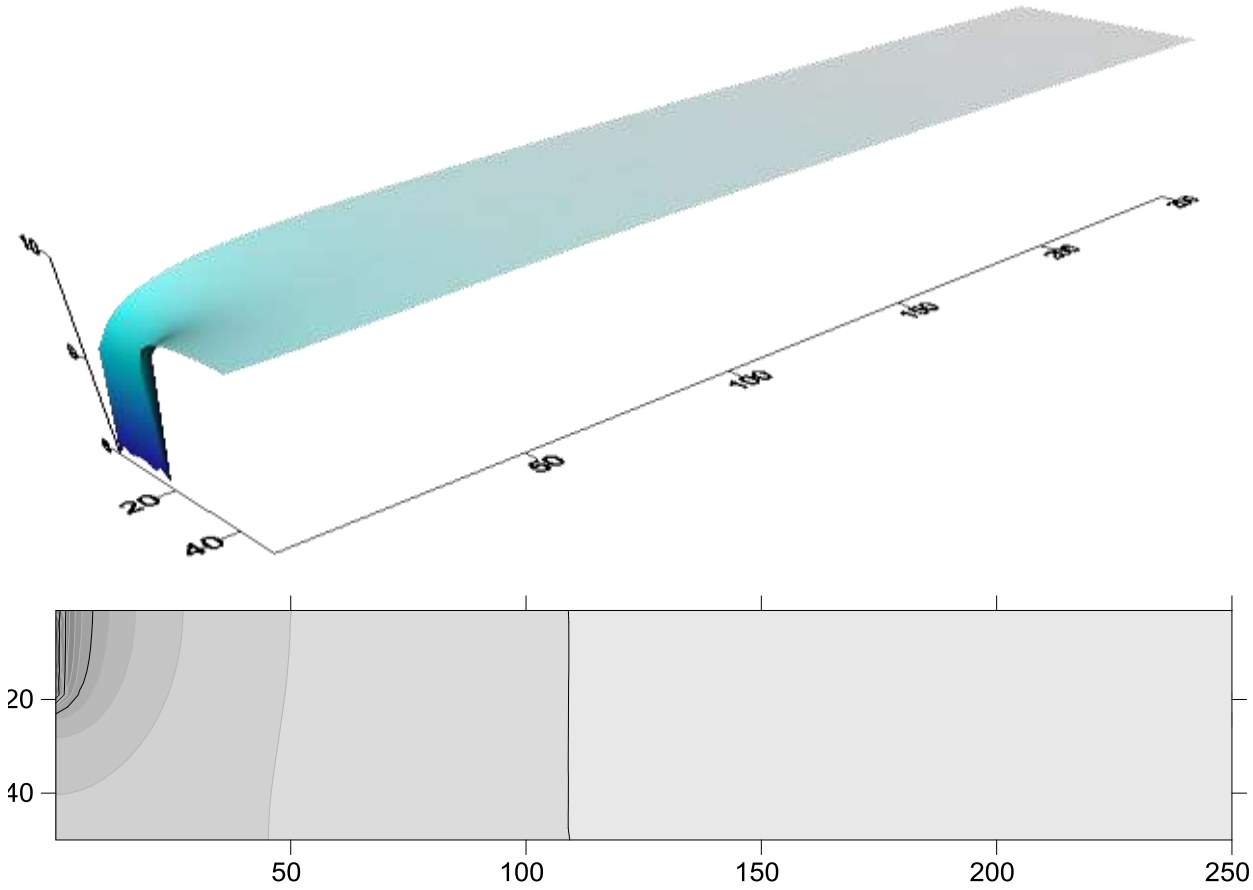

Рис.1. б. Поле давления при вскрытии пласта на 40%

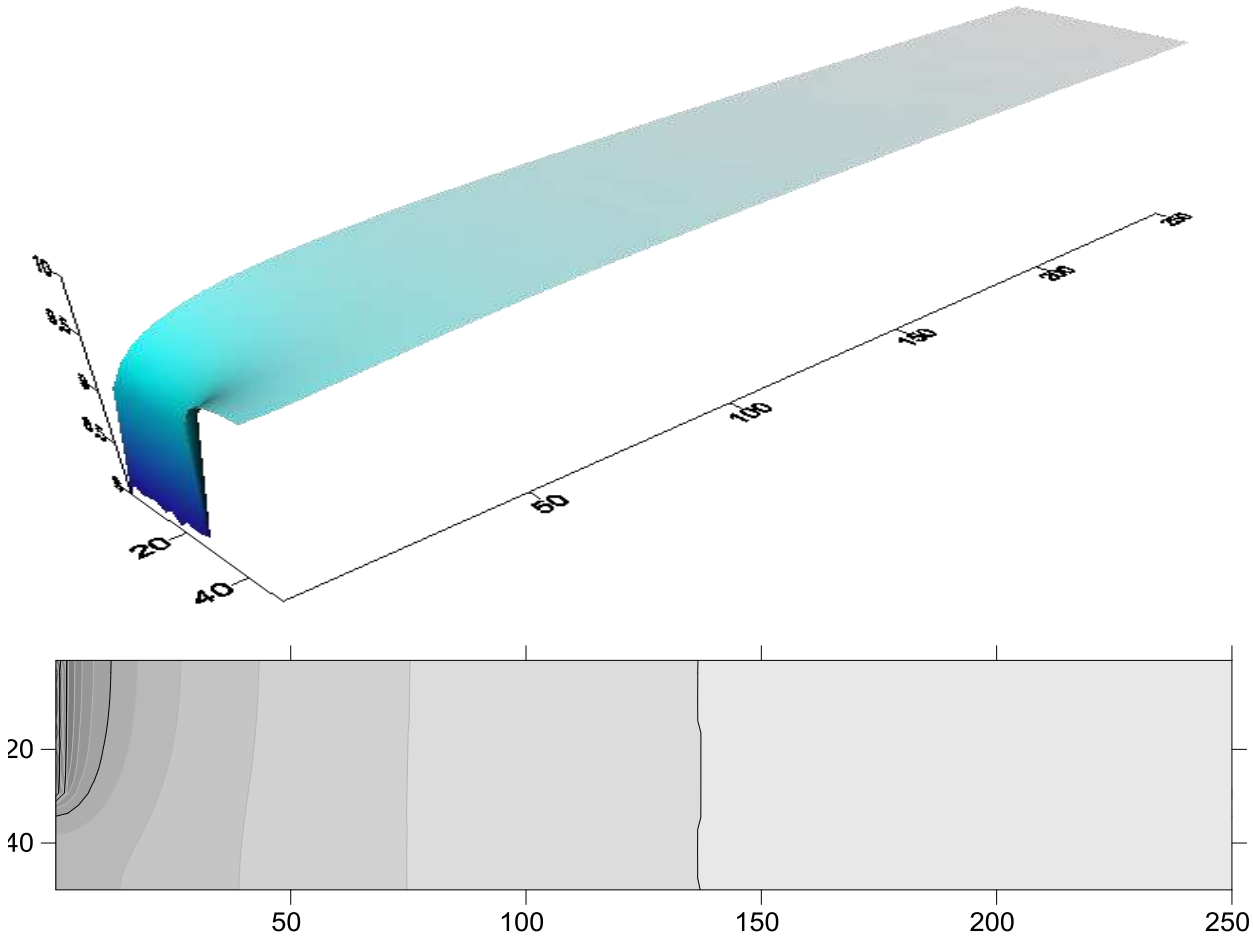

Рис.1.в. Поле давления при вскрытии пласта на 60%

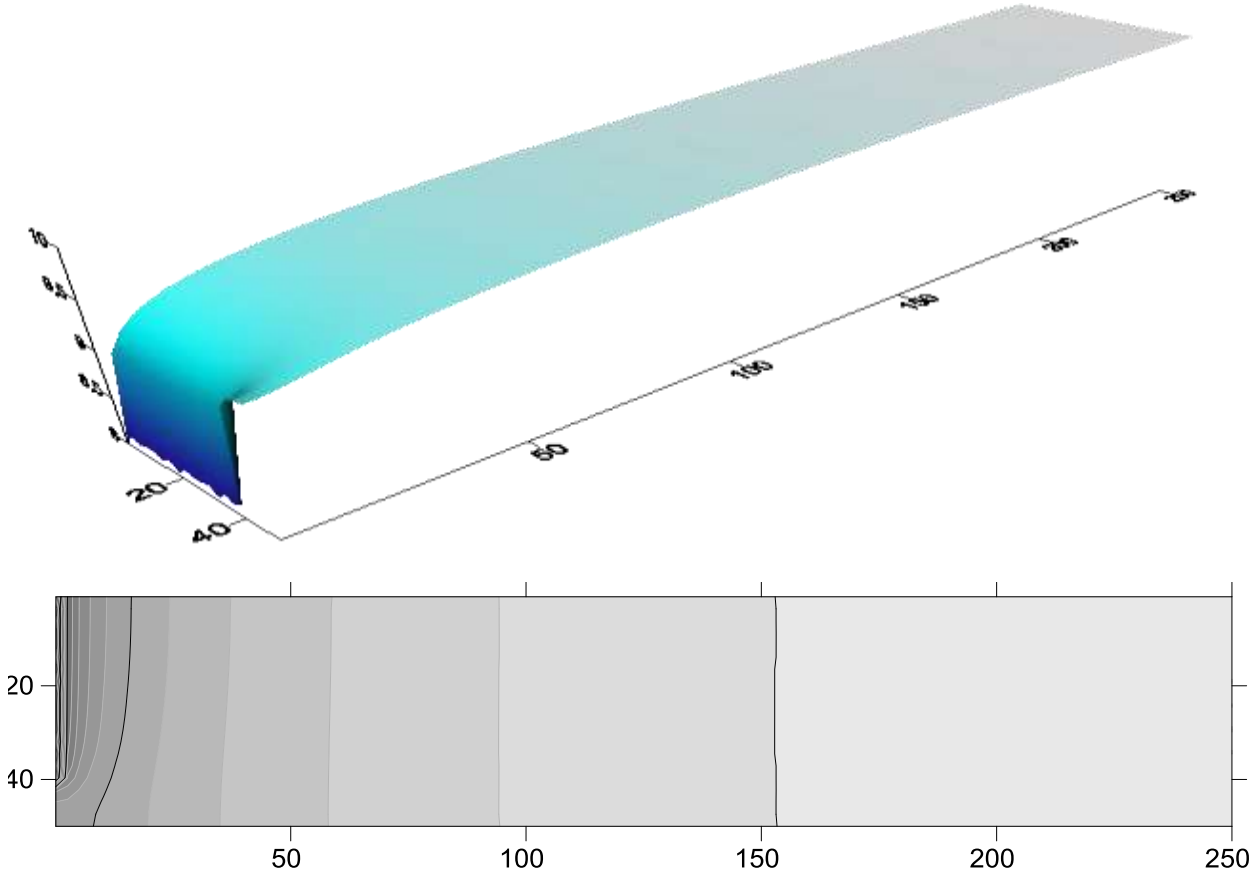

Рис.1.г.Поле давления при вскрытии пласта на 80%

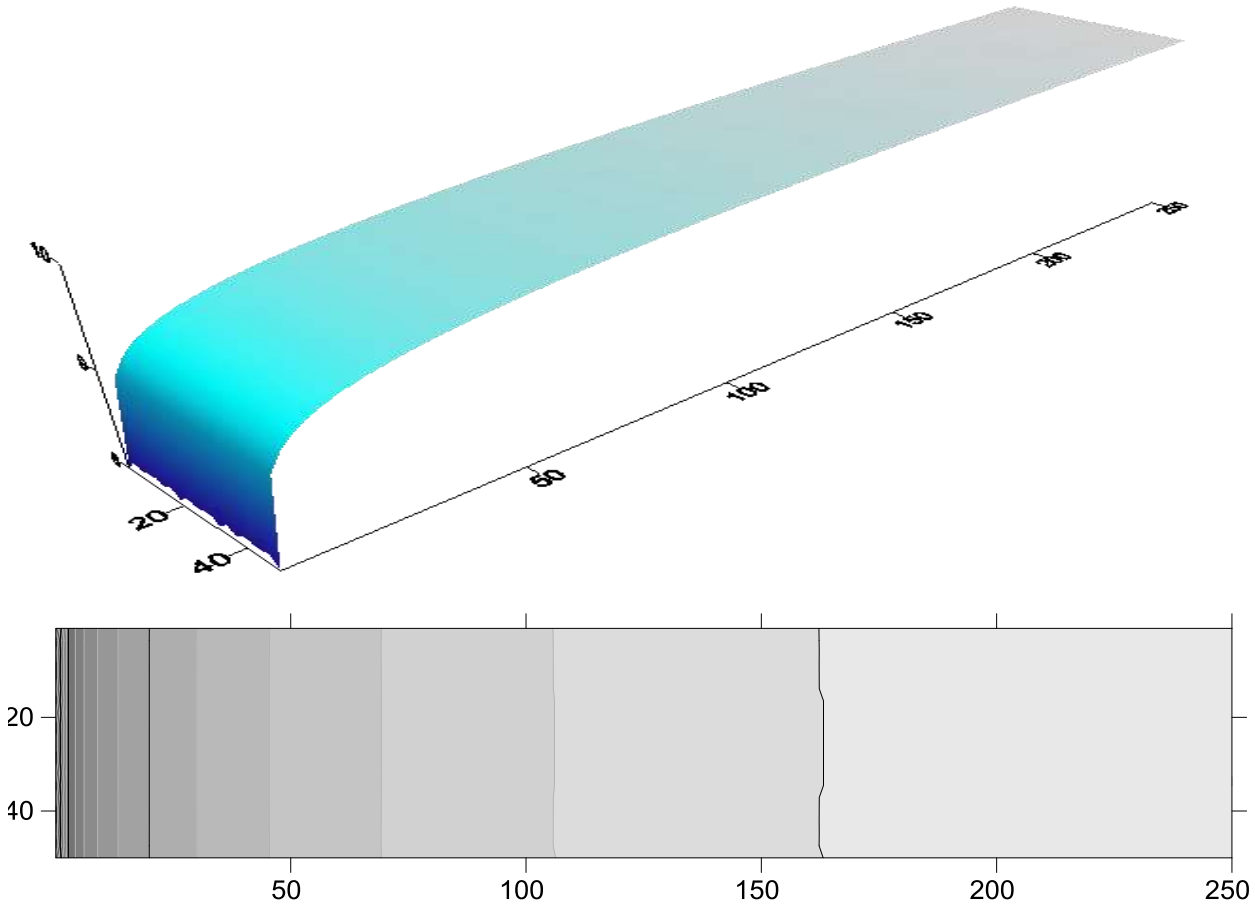

Рис. 1.д. Поле давления при полном вскрытии пласта

На рис. 2 приводятся кривые изменения давления и их логарифмические производные при различных степенях вскрытия пласта в полулогарифмических и билогарифмических координатах.

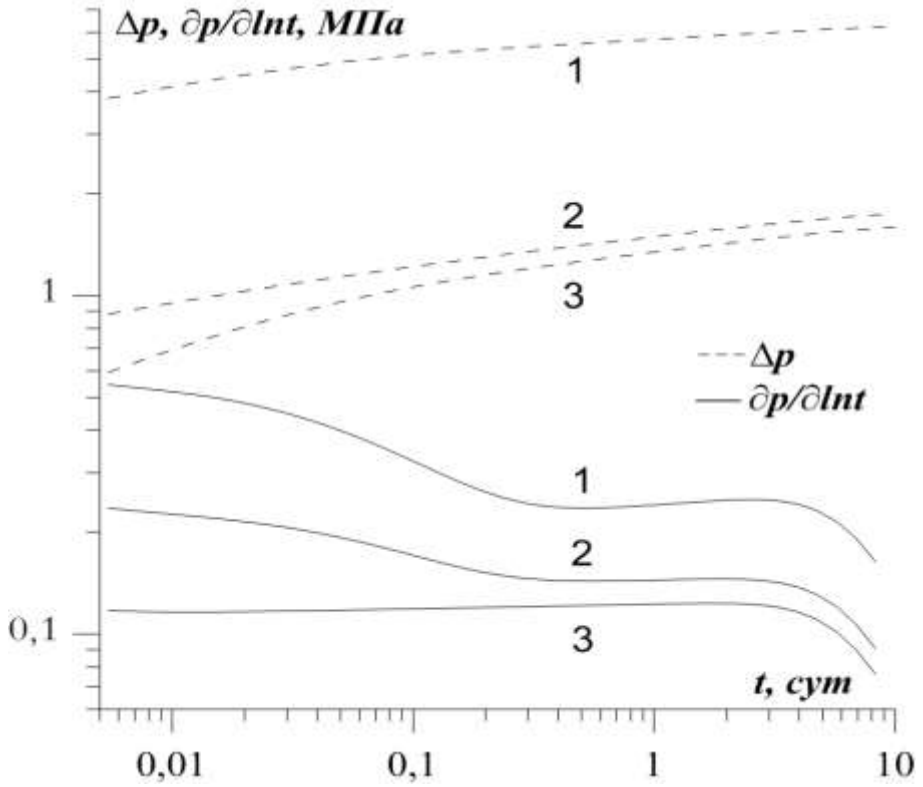

Рис.2. S=0. 1-25%, 2-50%, 3-100%

При полном вскрытии пласта кривая логарифмической производной давления является прямой линией (кривая 3), которую можно отнести к диагностическому признаку и плоскорадиальной фильтрации газа к скважине. Отклонение конечного участка кривой производного давления от прямой линии вниз характеризуется влиянием границы пласта. При не полном вскрытии пласта начальные участки кривых логарифмической производной давления откланяются от прямой линии вверх. Чем меньше вскрывается пласт, тем больше начальные участки откланяются от прямой линии.

На рис.3 и рис.4 показаны зависимости для различных скин-эффектов при полном вскрытии и не полном вскрытии пласта. В зависимости от скин–эффекта начальные участки кривых логарифмической производной давления отклоняются от кривой для однородного пласта либо верх, либо вниз. Наличие наклона начального участка кривой логарифмической производной давления можно отнести к диагностическому признаку

влияния несовершенства скважины. Влияние скин-эффекта на кривые восстановления давления при не полном вскрытии пласта недостаточно выражено (рис.4).

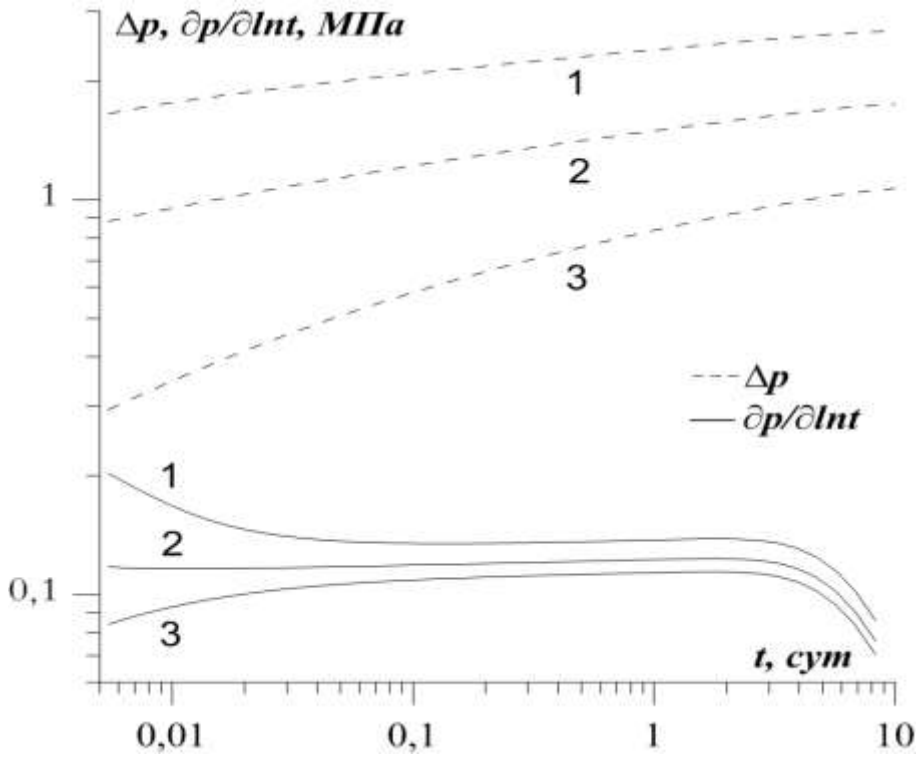

Рис.3.100%. 1-s>0, 2-s=0, 3-s<0

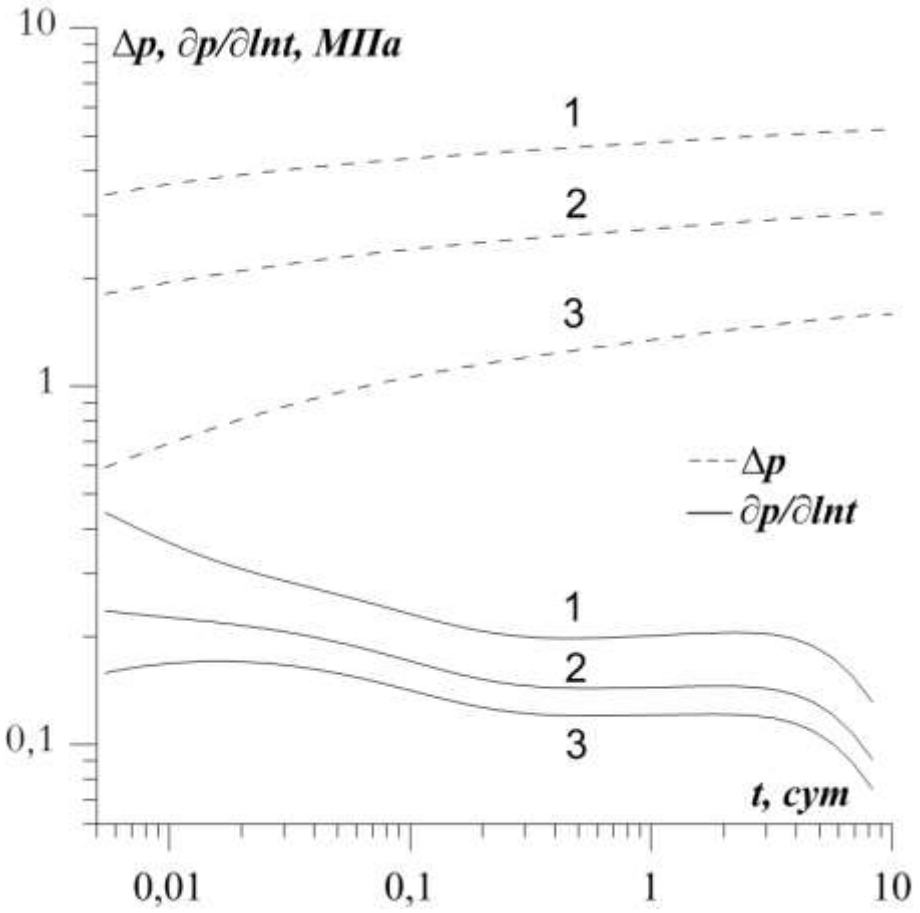

Рис.4. 50%. 1-s>0, 2-s=0, 3-s<0

На рис. 5. и рис. 6. представлены кривые логарифмической производной давления для различных скин-эффектов при полном и не полном вскрытии пласта. В первом случае S>0- означает, что призабойная зона загрязнена, это приводит к дополнительному сопротивлению, а несовершенство по вскрытию увеличивает сопротивление. Во втором случае S<0-призабойная зона имеет улучшенные свойства по сравнению с пластом. Несовершенство скважины по вскрытию увеличивает дополнительное сопротивление, а скин-эффект в свою очередь уменьшает это сопротивление.

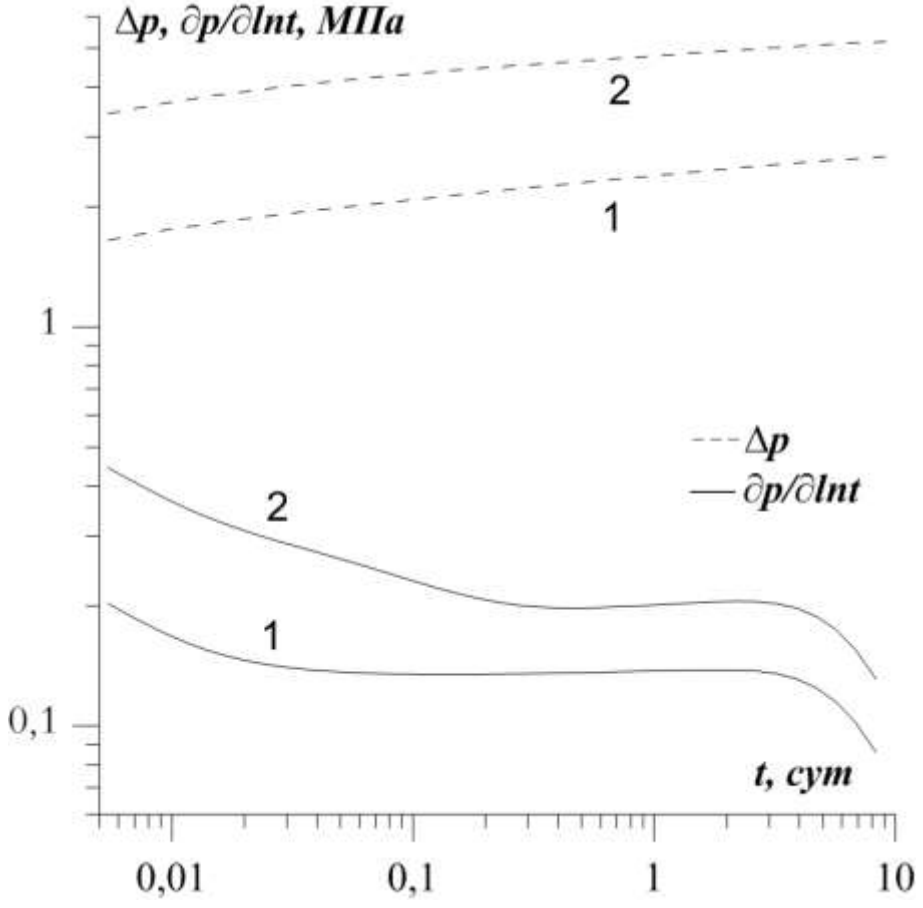

Рис.5. s>0. 1-100%, 2-50%.

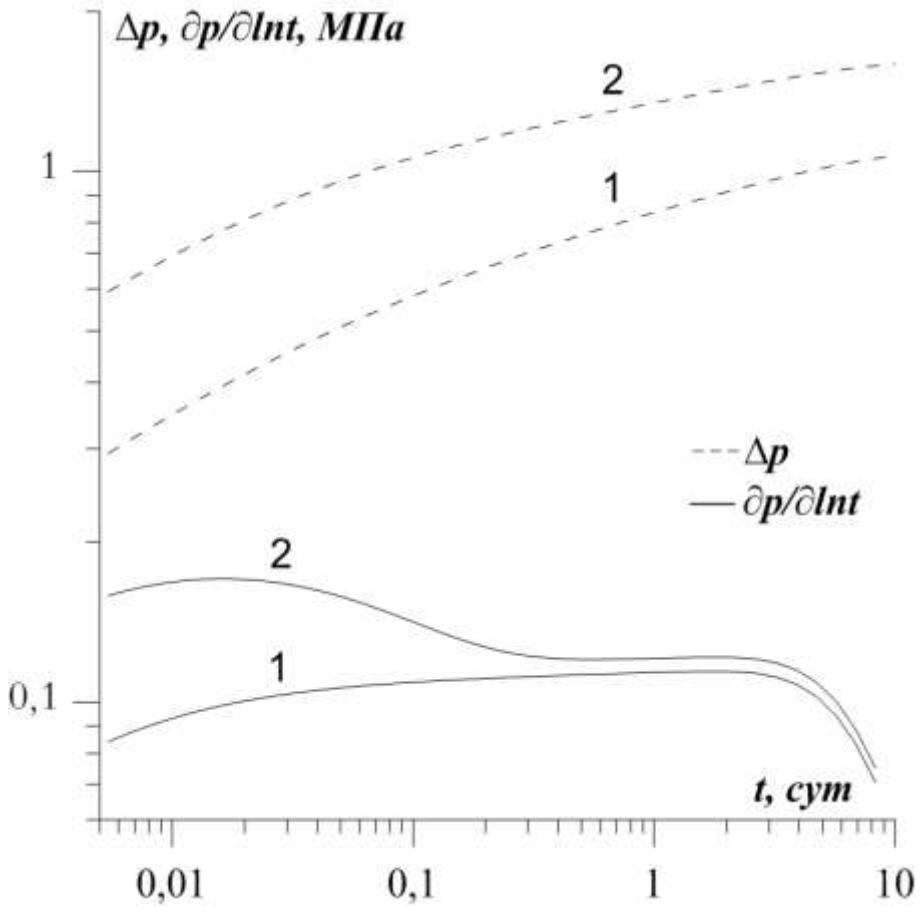

Рис.6. S<0, 1-100%, 2-50%

6. Выводы

1. Построен вычислительный алгоритм для численного моделирования 2D фильтрации реального газа к вертикальной скважине.
2. Не полное вскрытие пласта ведет к появлению дополнительного фильтрационного сопротивления в окрестности скважины связанной с неодномерностью течения.
3. Результаты расчетов показывают, что при загрязнении призабойной зоны для поддержания исходного дебита необходимо увеличивать депрессию в скважине.
4. При интерпретации результатов газогидродинамических исследований пластов с большой толщиной на нестационарных режимах фильтрации необходимо учитывать несовершенство вертикальной скважины, которое ведет к увеличению фильтрационных сопротивлений.

7. Список литературы

1. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х.Азиз, Э.Сеттари .- Москва: Наука, 1982.-407с.
2. Басниев, К.С. Подземная гидромеханика / И.Н Кочина, В.М. Максимов // Учебное пособие. - 1993.- 416с.
3. Бондарев, Э.А. Термогидродинамика систем добычи и транспорта газа / В.И.Васильев, А.Ф.Воеводин, Н.Н.Павлов, А.П. Шадрина.- Москва: Наука, 1988. – 270 с.
4. Гриценко, А.И. Руководство по исследованию скважин / З.С. Алиев, О.М.Ермилов, В.В.Ремизов, Г.А.Зотов.- Москва: Наука, 1995. – 523 с.
5. Коротаев, Ю.П. Избранные труды / Ю.П.Коротаев.- Москва: Недра, 1996. Т.1. – 301 с.
6. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А.Самарский.- Моска.: Недра,1982. 407с.
7. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, С.Е. Николаев.- Москва: Наука 1978. 352с.
8. Шагиев, Р.Г. Исследование скважин по КВД / Р.Г. Шагиев.- Москва:Наука,1998.
9. Вакула Я.В. Нефтегазовые технологии: Учебное пособие по дисциплине «Нефтегазовые технологии» для студентов, обучающихся по специальности 080502 «Экономика и управление на предприятии в нефтяной и газовой промышленности», очной и заочной форм обучения. – Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2006. – 168 с.
10. Куштанова Г.Г. Подземная гидромеханика. Учебно-методическое пособие для магистрантов физического факультета по направлению «Радиофизическиеметодыпообластямприменения»/

Г.Г. Куштанова, М.Н.Овчинников.−Казань: Изд-воКазан. (Приволж.) федер. ун-та, 2010, 67 с.

11. Якимова , М.А Исследование влияния скин-эффекта на изменение давления в вертикальной газовой скважине / М.А. Якимова, М.Н. Шамсиев // Материалы конференции «Актуальные проблемы естественных и гуманитарных наук». Зеленодольск, 2011.
12. Якимова, М.А. Анализ кривых изменения забойного давления в газовых скважинах / М.А.Якимова, М.Н.Шамсиев // Материалы итоговой образовательно-научной конференции студентов Казанского Университета, Казань, 2012.
13. Якимова, М.А. Анализ влияния несовершенства газовой скважины на кривые изменения забойного давления / М.А.Якимова, М.Н.Шамсиев // Актуальные проблемы физико-математических и гуманитарных наук: Материалы Международной научно-технической студенческой конференции (Казань-Зеленодольск, 28-29 ноября 2013 года.). - Казань: Казан. ун-та,2014.

8. Приложение

На основе вычислительного алгоритма создан программный комплекс в среде Delphi.

```
unit Unit1;
interface
uses
Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
Dialogs, StdCtrls, TeEngine, Series, ExtCtrls, TeeProcs, Chart, Buttons;
type
TForm1 = class(TForm)
Button1: TButton;
Chart1: TChart;
Edit1: TEdit;
Button2: TButton;
SaveDialog1: TSaveDialog;
Series1: TLineSeries;
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }

end;
Procedure Sollns();
Procedure H(n:Integer; R1,R2:double; var h:double; var u,r:array of double);
Procedure Fpres();

var
Form1: TForm1;
F:TextFile;
a, Coof_a,Coof_b,pres,presn,ps: array of array of double;
b,Coor_u,Coor_r,Coor_z: array of double;
Hr,Hz,poris,tn,Pk,Pz,Rk,rc,mu,pronic:double;
i,j,l,k,nx,mx,mlx,n,Col_r,Col_z, Col_t: Integer;
ch:integer;

implementation
```

```
{$R *.dfm}
 procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
 begin
 Pk:=100;Pz:=80;
 poris:=0.2;
 Hz:=1;
 Col_z:=50;
 Col_r:=51;
 Col_t:=144;
 Rk:=250;rc:=0.1;
 tn:=600;
 mu:=0.012;
 pronic:=0.01;
 end;

 procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
 {a[1..nx,1..mx], b[1..nx]
  nx - количество неизвестных
  mx - ширина матрицы
  mlx- диоганаль}
  var i,j, l:integer;
  begin
  nx:=Col_r*Col_z; mx:=2*Col_z+3; mlx:=Col_z+2;
  SetLength(a,Col_r*Col_z+1,2*Col_z+3+1);
  SetLength(b,Col_r*Col_z +1);
  SetLength(Coof_a, Col_r+1,Col_z+1);
  SetLength(Coof_b, Col_r+1,Col_z+1);
  SetLength(Pres,Col_r+1,Col_z+1);
  SetLength(Presn,Col_r+1,Col_z+1);
  SetLength(Coor_u, Col_r+1);
  SetLength(Coor_r, Col_r+1);
  SetLength(Ps,Col_r+1,Col_z+1);
  H(Col_r, rc,Rk,hr,Coor_u,Coor_r);
  for i:=1 to Col_r do for j:=1 to Col_z do Presn[i,j]:=Pk;
  for i:=1 to Col_r do for j:=1 to Col_z do Pres[i,j]:=Pk;
  for i:=1 to Col_r do for j:=1 to Col_z do Ps[i,j]:=Pk;

  for l:=1 to Col_t do
  begin
  ch:=Col_r*Col_z;
  while (ch>0) do
  begin
  Edit1.Text:=IntToStr(Ch);
```

```
Fpres();
ch:=0;
for i:=1 to Col_r do for j:=1 to Col_z do
begin
if (abs(Pres[i,j]-Ps[i,j])>0.00001) then ch:=ch+1;
Ps[i,j]:=Pres[i,j];
end;
end;
for i:=1 to Col_r do for j:=1 to Col_z do Presn[i,j]:=Pres[i,j];
end;
Form1.Series1.Clear;
for j:=1 to Col_r do Form1.series1.addxy(Coor_r[j],Pres[j,1]);
end;


Procedure H(n:Integer; R1,R2:double; var h:double; var u,r:array of double);
var
i:integer;
begin
u[1]:=ln(r1);
u[n]:=ln(r2);
r[1]:=r1;
r[n]:=r2;
h:=(u[n]-u[1])/(n-1);
for i:=2 to n-1 do
begin
u[i] :=u[1]+(i-1)*h;
r[i] :=exp(u[i]);
end;
end;

procedure Fpres();
var i,j:integer;
begin
for i:=1 to Col_r-1 do for j:=1 to Col_z do
Coof_a[i,j]:=pronic*(pres[i,j]+pres[i+1,j])/2/mu;
for i:=1 to Col_r do for j:=1 to Col_z-1 do
Coof_b[i,j]:=pronic*(pres[i,j]+pres[i,j+1])/2/mu;

for i:=1 to nx do
begin
b[i]:=0;
for j:=1 to mx do a[i,j]:=0;
end;
```

```
for i:=2 to Col_r-1 do
for j:=2 to Col_z-1 do
begin
k:=(i-1)*Col_z+j;
a[k,2]:=Coof_a[i-1,j]/(exp(2*Coor_u[i])*sqr(Hr));
a[k,mx-1]:=Coof_a[i,j]/(exp(2*Coor_u[i])*sqr(Hr));
a[k,mlx-1]:= Coof_b[i,j-1]/sqr(Hz);
a[k,mlx+1]:=Coof_b[i,j]/sqr(Hz);
a[k,mlx]:=-a[k,2]-a[k,mx-1]-a[k,mlx-1]-a[k,mlx+1]-poris/tn;
b[k]:=-poris*presn[i,j]/tn;
end;

for j:=1 to Col_z do
begin
i:=1;
k:=(i-1)*Col_z+j;
a[k,mlx]:=1; //// скважина
b[k]:=Pz;
end;

for j:=1 to Col_z do
begin
i:=Col_r;
k:=(i-1)*Col_z+j;
a[k,mlx]:=1; //// контур питания
b[k]:=Pk;
end;

for i:=2 to Col_r-1 do
begin
j:=1;
k:=(i-1)*Col_z+j;
a[k,2]:=Coof_a[i-1,j]/(exp(2*Coor_u[i])*sqr(Hr));
a[k,mx-1]:=Coof_a[i,j]/(exp(2*Coor_u[i])*sqr(Hr));
a[k,mlx-1]:= 0;
a[k,mlx+1]:=2*Coof_b[i,j]/sqr(Hz);
a[k,mlx]:=-a[k,2]-a[k,mx-1]-a[k,mlx-1]-a[k,mlx+1]-poris/tn;
b[k]:=-poris*presn[i,j]/tn;
end;

for i:=2 to Col_r-1 do
begin
j:=Col_z;
```

```
k:=(i-1)*Col_z+j;
a[k,2]:=Coof_a[i-1,j]/(exp(2*Coor_u[i])*sqr(Hr));
a[k,mx-1]:=Coof_a[i,j]/(exp(2*Coor_u[i])*sqr(Hr));
a[k,mlx-1]:= 2*Coof_b[i,j-1]/sqr(Hz);
a[k,mlx+1]:=0;
a[k,mlx]:=-a[k,2]-a[k,mx-1]-a[k,mlx-1]-a[k,mlx+1]-poris/tn;
b[k]:=-poris*presn[i,j]/tn;
end;
Sollns();

k:=0;
for i:=1 to Col_r do
begin
for j:=1 to Col_z do pres[i,j]:=b[k+j];
k:=k+Col_z;
end;
end;

Procedure Sollns();
var
 u,u1: double;
 i,j,l,k,mlx0,mlx1,j1,k1 : integer;
 begin
 mlx0:=mlx-1;
 mlx1:=mlx+1;
 for k:=1 to nx do
 begin
 u:=a[k,mlx];
 if abs(u) <= 1.e-15 then
 begin
 writeln('DIAGONAL ELEMENT sistem = 0','a(',k:4,',',mlx:4,')=',u:5:3);
 halt;
 end;
 u:=1/u;
 u1:=b[k]*u;
 b[k]:=u1;
 for j:=mlx1 to mx do a[k,j]:=a[k,j]*u;
 for l:=1 to mlx0 do
 begin
 i:=k+l;
 if i>nx then continue;
 u:=a[i,mlx-l];
 for j:=mlx1 to mx do
 begin
```

```
  j1:=j-l;
  a[i,j1]:=a[i,j1]-u*a[k,j];
  end;
  b[i]:=b[i]-u*u1;
  end;
  end;
  for k:=nx downto 1 do
  begin
  u:=b[k];
  k1:=k+mlx;
  for j:=mlx1 to mx do
  begin
  i:=k1-j;
  if i<1 then break;
  b[i]:=b[i]-u*a[i,j];

  end;
  end;
  end;

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
i,j:integer;
begin
 if SaveDialog1.Execute then
   begin
   AssignFile(F, SaveDialog1.FileName);
   Rewrite(F);
   for i:=1 to Col_r do
   for j:=1 to Col_z do writeln(F,
                                Coor_r[i]:12:5,
                                j:5,
                                (Pres[i,j]/10):12:5);

CloseFile(F)     ;
end;
end;
end.
```