

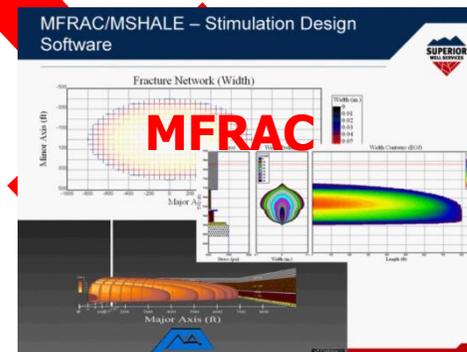
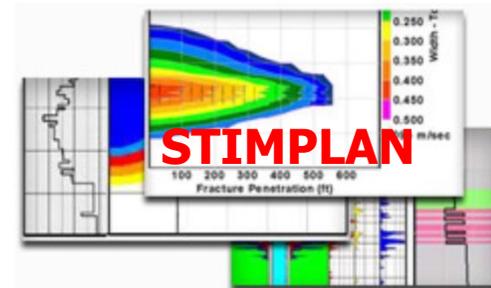
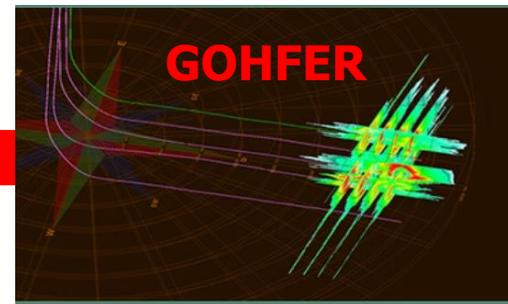
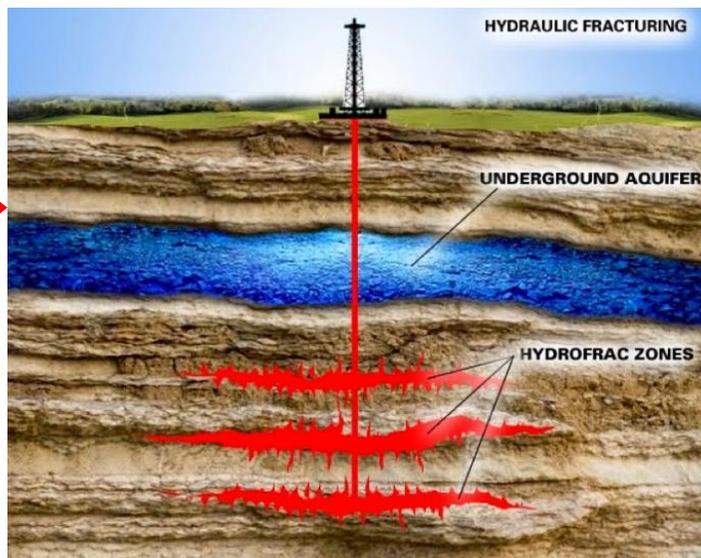
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ПРОПАНТА В РАСКРЫВАЮЩЕЙСЯ ТРЕЩИНЕ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Алексей Шляпкин,
ведущий специалист

ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ



для внутреннего пользования



ВОЗМОЖНОСТИ СИМУЛЯТОРОВ ГРП



А МЕЖДУ ТЕМ ВЕДУТСЯ РАБОТЫ



На ПО для замены Schlumberger в российской нефтянке дадут полмиллиарда

Бизнес Тендеры Интеграция ИТ в госсекторе

Основная версия

10.07.2017, ПН, 09:40, Мск, Текст: Денис Воейков

Совокупность правительственного гранта и частных инвестиций в разработку импортозамещающего софта для проектирования процессов в нефтегазодобыче составит 500 млн руб. Созданием ПО по итогам конкурса займется консорциум во главе со «Сколтехом» и МФТИ.



Полмиллиарда — на ГРП-симулятор

Бюджет на разработку первого российского ПО для проектирования процессов нефтегазодобычи достигнет 500 млн. руб. Примерно половину этой суммы составит грант Правительства, остальное — частные инвестиции. Об этом сообщил Сколковский институт науки и технологий («Сколтех»).

Право на получение гранта было разыграно в рамках сколтеховского конкурса «Кибер ГРП» по выбору проектного консорциума для разработки софта, с помощью которого можно будет проектировать гидроразрыв пласта недр Земли (ГРП). Отбор проектов, поддержанный Минпромторгом, Минэнерго и Минкомсвязи, завершился в конце июня 2017 г. Победу одержал консорциум во главе с МФТИ и «Сколтехом». Конкуренцию ему безуспешно пытались составить конгломераты под эгидой Проектного консорциума Республики Башкортостан и Лаборатории геологии и моделирования осадочных бассейнов.



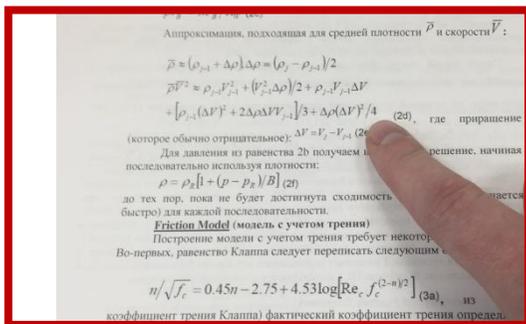
... консорциума-победителя, среди которых сама GTI и еще три организации. Кроме того, рассматривается вариант привлечения сторонних инвесторов.



Консорциум, победивший в конкурсе на получение правительственного гранта, разработает отечественное ПО моделирования процессов нефтегазодобычи

Выход первой версии готового продукта запланирован на конец 2018 г., хотя на полную разработку решения уйдет 3,5 года

А ЧТО ТАМ ВНУТРИ? ИЛИ ВСЁ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ



геометрия трещины

P, Q, t, ...



ПАСПОРТ СПЕЦИАЛЬНОСТИ 05.13.18

Шифр специальности:

05.13.18 Математическое моделирование, численные комплексы программ

Формула специальности:

Содержанием специальности является разработка фундаментальных основ и применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических фундаментальных и прикладных проблем. Важным содержанием специальности является то, что в работах, выполняемых в этой области, должны присутствовать оригинальные результаты исследования. Основные области: математического моделирования, численных методов, компьютерных технологий.

Области исследований:

1. Разработка новых математических методов и явлений.
2. Развитие качественных и приближенных методов исследования математических моделей.
3. Разработка, обоснование и тестирование вычислительных методов с применением компьютерных технологий.
4. Реализация эффективных численных методов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.
5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.
6. Разработка новых математических методов и комплексов программ для проведения вычислительного эксперимента.
7. Разработка новых математических методов и комплексов программ для интерпретации натурального эксперимента с применением математической модели.
8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Шифр специальности:

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ...

...

2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей.

...

4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

...

8. Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования

...

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение влияния примеси частиц в смеси на динамику раскрытия трещины и ее геометрию

1

Предложить математическую модель подачи вязкой жидкости с примесью частиц в трещину ГРП

2

Изучить процесс осаждения частиц за счет протекания жидкости ГРП в грунт

3

Исследовать полученную полную систему дифференциальных уравнений численно

4

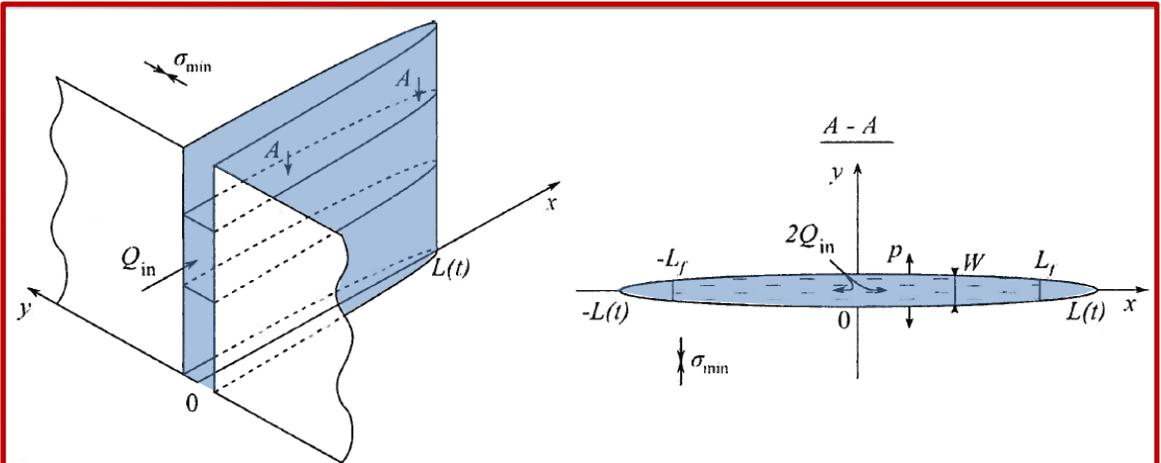
Создать программно-вычислительный продукт на основе предложенной математической модели

5

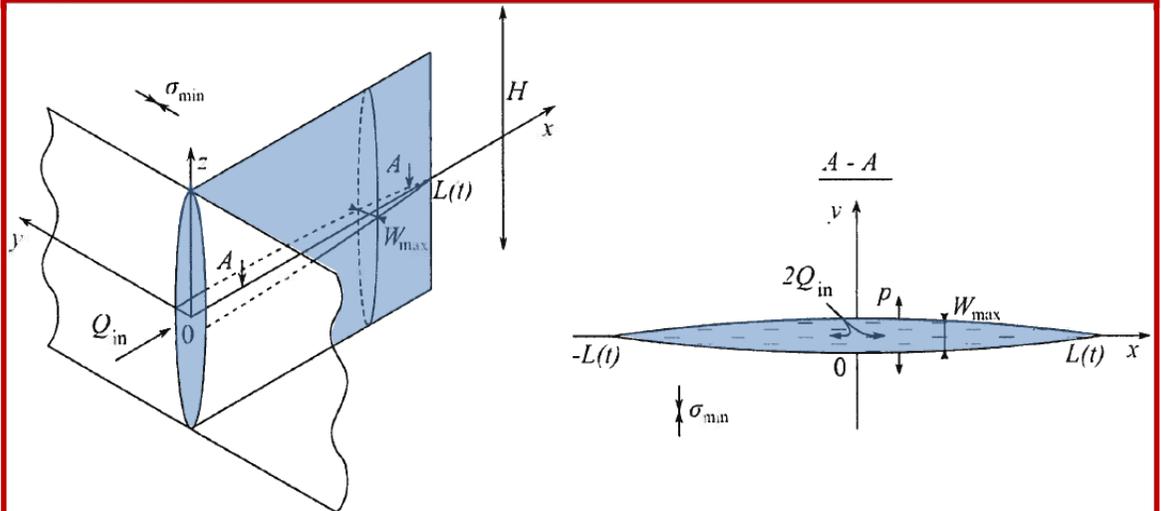
Произвести численный эксперимент для «калибровки» полученного программно-вычислительного продукта

ОСНОВНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА

Схематическое представление процесса гидроразрыва пласта*



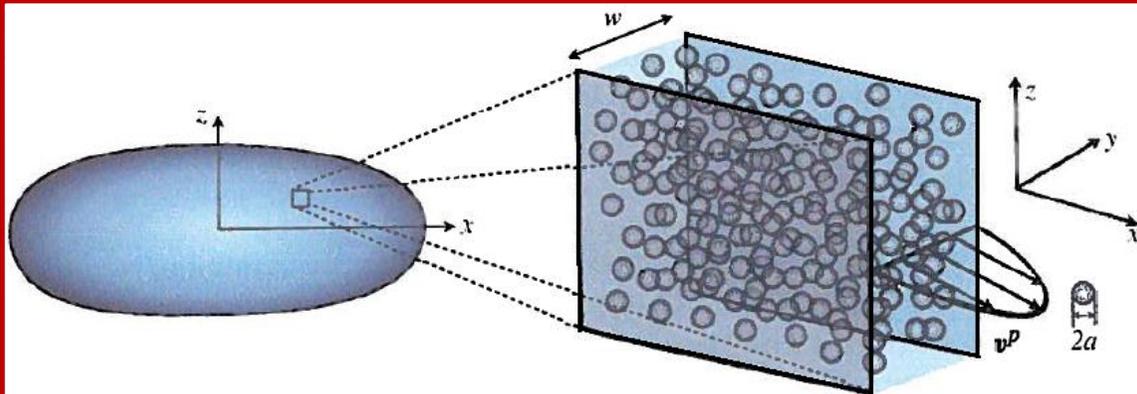
Модель Христиановича-Гиртсма-де Клерка*



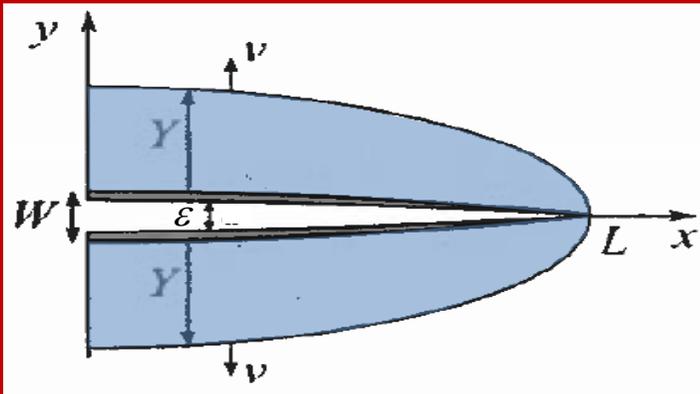
Модель Перкинса-Керна-Нордгрена*

- иллюстрации заимствованы из монографии Черный С.Г., Лапин В.Н.
- Методы моделирования зарождения и распространения трещин

ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНЫ С ФИЛЬТРАЦИОННЫМИ УТЕЧКАМИ ЖИДКОСТИ ГИДРОРАЗРЫВА



Схематическое пространственное представление трещины, заполненной проппантом



Зона проникновения жидкости гидроразрыва в породу

Система уравнений движения в

безразмерной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \delta}{\partial t} + 2 \frac{\partial q}{\partial x} = -v, \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + 2 \frac{\partial q}{\partial x} = -\frac{1}{1-\alpha} v, \\ \frac{\partial(\alpha \varepsilon)}{\partial t} + 2 \frac{\partial(\alpha q)}{\partial x} = -\frac{\alpha}{1-\alpha} v, \\ q = -(1-\alpha)^m \varepsilon \delta^2 \frac{\partial \delta}{\partial x}, \\ \frac{\partial Y}{\partial t} = v, \end{array} \right. \quad \text{где } q = \varepsilon u, \quad v = \begin{cases} \delta/Y, & \varepsilon > 0 \\ 0, & \varepsilon = 0 \end{cases}$$

Условные обозначения:

- u - средняя скорость потока смеси;
- δ - средняя ширина трещины
- ε - ширина свободной области;
- v - скорость движения смеси;
- α - отношение объемной доли жидкости гидроразрыва к объемному содержанию дисперсной фазы в оседшем слое;
- Y - глубина зоны пропитки.

СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ



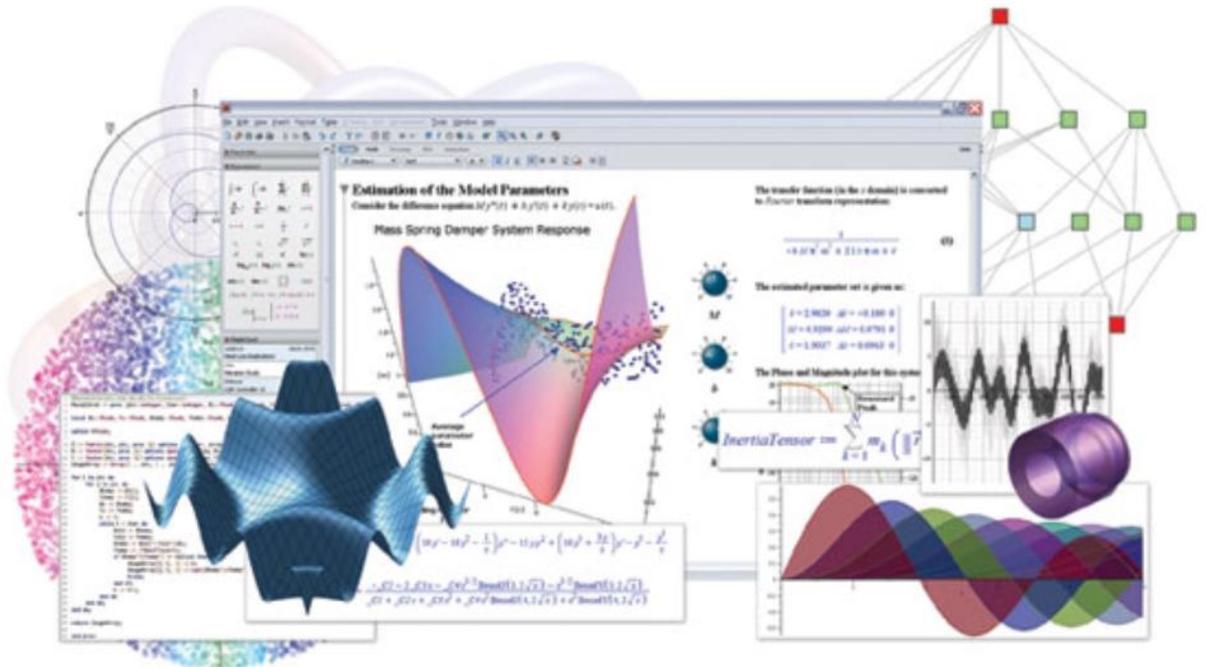
MATLAB®



Maplesoft
Mathematics • Modeling • Simulation

Maple 16

Wolfram
Mathematica®



ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

C:\Program Files\Maple 2017\data\Start.mw* - [Server 1] - Maple 2017

File Edit View Insert Format Table Drawing Plot Tools Window Help

Palettes Workbook

Text Math Drawing Plot Animation Hide

```
DD:=1:A:=0.2:
t1:=0.3:t2:=3:

> B:=G/(G-1):eps:=0.01:
> nt:=10000:nx:=50:Kx:=0.0025:
dx:=1/nx:dt:=Kx*dx:nnx:=1000:c1:=1:
e0:=0:d0:=0.01*eps:y0:=eps:q0:=0:a0:=0:
> ex05:=[]:dx05:=[]:yx05:=[]:qx05:=[]:hx05:=[]:vx05:=[]:ax
ex1:=[]:dx1:=[]:yx1:=[]:qx1:=[]:hx1:=[]:vx1:=[]:ax1:=[]:
ex2:=[]:dx2:=[]:yx2:=[]:qx2:=[]:hx2:=[]:vx2:=[]:ax2:=[]:
ex3:=[]:dx3:=[]:yx3:=[]:qx3:=[]:hx3:=[]:vx3:=[]:ax3:=[]:
ex4:=[]:dx4:=[]:yx4:=[]:qx4:=[]:hx4:=[]:vx4:=[]:ax4:=[]:
ex5:=[]:dx5:=[]:yx5:=[]:qx5:=[]:hx5:=[]:vx5:=[]:ax5:=[]:
ex6:=[]:dx6:=[]:yx6:=[]:qx6:=[]:hx6:=[]:vx6:=[]:ax6:=[]:
ex7:=[]:dx7:=[]:yx7:=[]:qx7:=[]:hx7:=[]:vx7:=[]:ax7:=[]:
ex8:=[]:dx8:=[]:yx8:=[]:qx8:=[]:hx8:=[]:vx8:=[]:ax8:=[]:
ex9:=[]:dx9:=[]:yx9:=[]:qx9:=[]:hx9:=[]:vx9:=[]:ax9:=[]:
ex10:=[]:dx10:=[]:yx10:=[]:qx10:=[]:hx10:=[]:vx10:=[]:ax10
> for i to nnx do
e[i]:=e0:d[i]:=d0:y[i]:=y0:q[i]:=q0:a[i]:=a0:
od:
> for j to nt do
es:=e[1]:ds:=d[1]:ys:=y[1]:
t:=j*dt:
if (t<t1) then a[1]:=0:fi:
if (t>t1) then a[1]:=A:fi:
if (t<t2) then d[1]:=DD:fi:
if (t>t2) then
d[1]:=d[2]-e[2]:ds:=d[1]:
e[1]:=0:es:=e[1]:fi:
for il to (nx-2) do
i:=il+1:
vr:=d[i]/y[i]:
if (e[i]<=0 and d[i]>0) then vr:=0:c1:=0:fi:
en:=e[i]-G*dt*(q[i+1]-q[i])/dx-G/B/(1-a[i])*vr*dt:
if (en<=0 and d[i]>0) then en:=0:c1:=0:fi:
yyn:=y[i]^2+2*dt*d[i]*c1:yn:=abs(yyn)^(1/2):

aq1:=a[i-1]*q[i]:aq2:=a[i]*q[i+1]:
ae:=a[i]*e[i]:as:=a[i]:
aen:=ae-G*dt*(aq2-aq1)/dx-G/B*as/(1-as)*vr*dt:
if (en>eps) then an:=aen/en:fi:
if (en<eps) then an:=as:fi:
dn:=d[i]+(en-e[i])+as/(1-as)*G/B*(yn-y[i]):
od:fi:

if (j=1000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex1:=op(ex1),[lx,e[i]]:
dx1:=op(dx1),[lx,d[i]]:
yx1:=op(yx1),[lx,y[i]]:
qx1:=op(qx1),[lx,q[i+1]]:
hx1:=op(hx1),[lx,h[i]]:
#vx1:=op(vx1),[lx,q[i]/e[i]]:
ax1:=op(ax1),[lx,a[i]]:
od:fi:

if (j=2000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex2:=op(ex2),[lx,e[i]]:
dx2:=op(dx2),[lx,d[i]]:
ax2:=op(ax2),[lx,y[i]]:
```

1

2

Чтобы активировать Windows

ЛИСТИНГ ПРОГРАММЫ. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

C:\Program Files\Maple 2017\data\Start.mw* - [Server 1] - Maple 2017

File Edit View Insert Format Table Drawing Plot Tools Window Help

Palettes Workbook

Text Math Drawing Plot Animation Hide

```
>
qx2:=[op(qx2), [lx, q[i+1]]]:
hx2:=[op(hx2), [lx, h[i]]]:
#vx2:=[op(vx2), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax2:=[op(ax2), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=30000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex3:=[op(ex3), [lx, e[i]]]:
dx3:=[op(dx3), [lx, d[i]]]:
yx3:=[op(yx3), [lx, y[i]]]:
qx3:=[op(qx3), [lx, q[i+1]]]:
hx3:=[op(hx3), [lx, h[i]]]:
#vx3:=[op(vx3), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax3:=[op(ax3), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=40000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex4:=[op(ex4), [lx, e[i]]]:
dx4:=[op(dx4), [lx, d[i]]]:
yx4:=[op(yx4), [lx, y[i]]]:
qx4:=[op(qx4), [lx, q[i+1]]]:
hx4:=[op(hx4), [lx, h[i]]]:
#vx4:=[op(vx4), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax4:=[op(ax4), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=50000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex5:=[op(ex5), [lx, e[i]]]:
dx5:=[op(dx5), [lx, d[i]]]:
yx5:=[op(yx5), [lx, y[i]]]:
qx5:=[op(qx5), [lx, q[i+1]]]:
hx5:=[op(hx5), [lx, h[i]]]:
#vx5:=[op(vx5), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax5:=[op(ax5), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=60000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex6:=[op(ex6), [lx, e[i]]]:
dx6:=[op(dx6), [lx, d[i]]]:
yx6:=[op(yx6), [lx, y[i]]]:
qx6:=[op(qx6), [lx, q[i+1]]]:

hx6:=[op(hx6), [lx, h[i]]]:
#vx6:=[op(vx6), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax6:=[op(ax6), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=70000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex7:=[op(ex7), [lx, e[i]]]:
dx7:=[op(dx7), [lx, d[i]]]:
yx7:=[op(yx7), [lx, y[i]]]:
qx7:=[op(qx7), [lx, q[i+1]]]:
hx7:=[op(hx7), [lx, h[i]]]:
#vx7:=[op(vx7), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax7:=[op(ax7), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=80000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex8:=[op(ex8), [lx, e[i]]]:
dx8:=[op(dx8), [lx, d[i]]]:
yx8:=[op(yx8), [lx, y[i]]]:
qx8:=[op(qx8), [lx, q[i+1]]]:
hx8:=[op(hx8), [lx, h[i]]]:
#vx8:=[op(vx8), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax8:=[op(ax8), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=90000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex9:=[op(ex9), [lx, e[i]]]:
dx9:=[op(dx9), [lx, d[i]]]:
yx9:=[op(yx9), [lx, y[i]]]:
qx9:=[op(qx9), [lx, q[i+1]]]:
hx9:=[op(hx9), [lx, h[i]]]:
#vx9:=[op(vx9), [lx, q[i]/e[i]]]:
ax9:=[op(ax9), [lx, a[i]]]:
od:fi:

if (j=100000) then tim:=j*dt:print(tim):
for i to (nx-3) do
lx:=(i-1)*dx:
ex10:=[op(ex10), [lx, e[i]]]:
dx10:=[op(dx10), [lx, d[i]]]:
yx10:=[op(yx10), [lx, y[i]]]:
qx10:=[op(qx10), [lx, q[i+1]]]:
hx10:=[op(hx10), [lx, h[i]]]:
```

3

4

Чтобы активировать Windows

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ

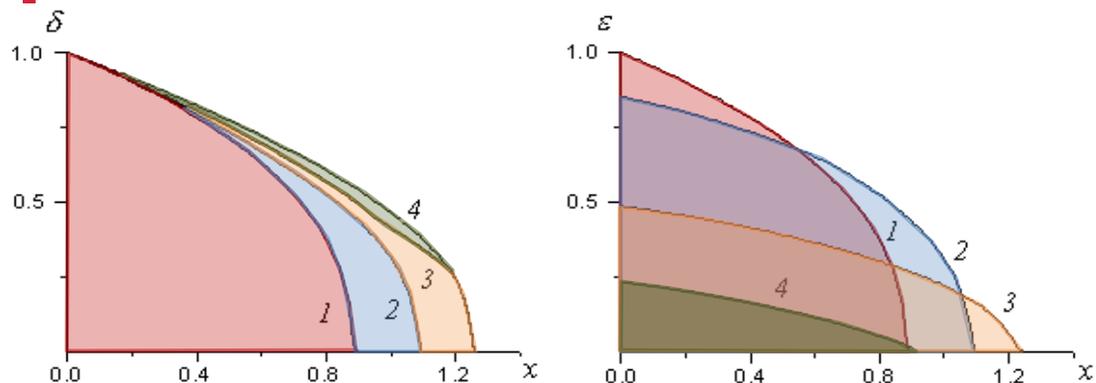


Рис.1 Распределение безразмерных величин по длине трещины в различные моменты времени

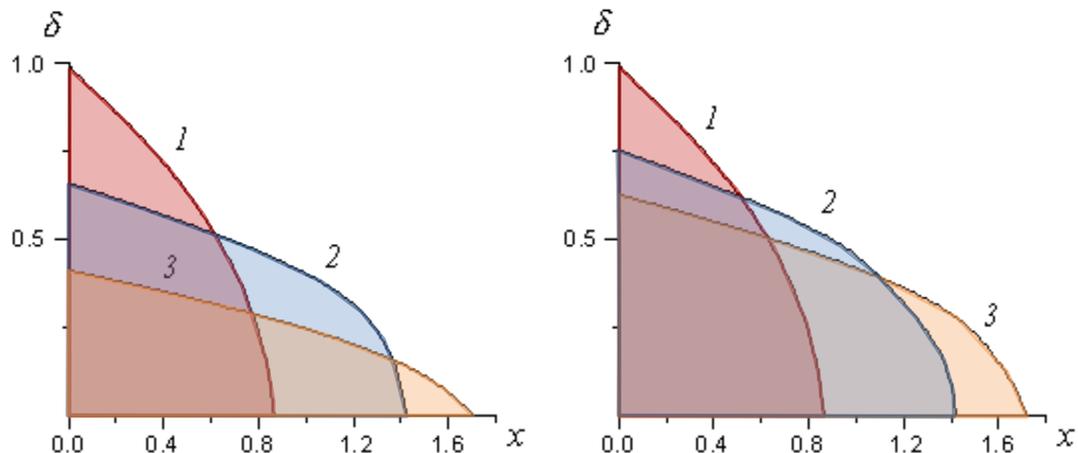


Рис.2 Окончательная форма трещины с остановкой подачи проппанта

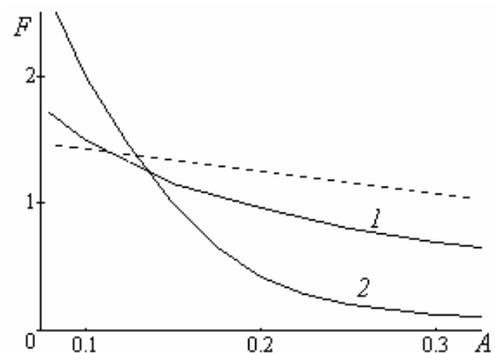


Рис.3 Зависимость предельной длины трещины, времени подачи смеси и момента остановки роста от длительности закачивания оторочки

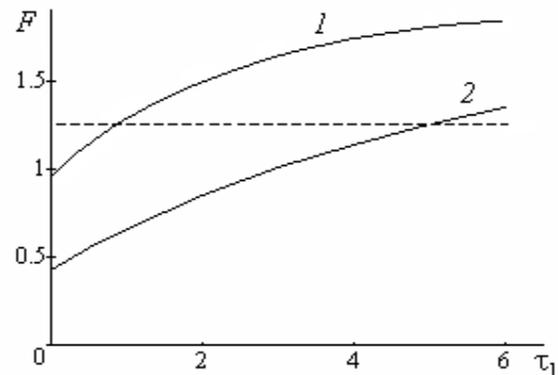
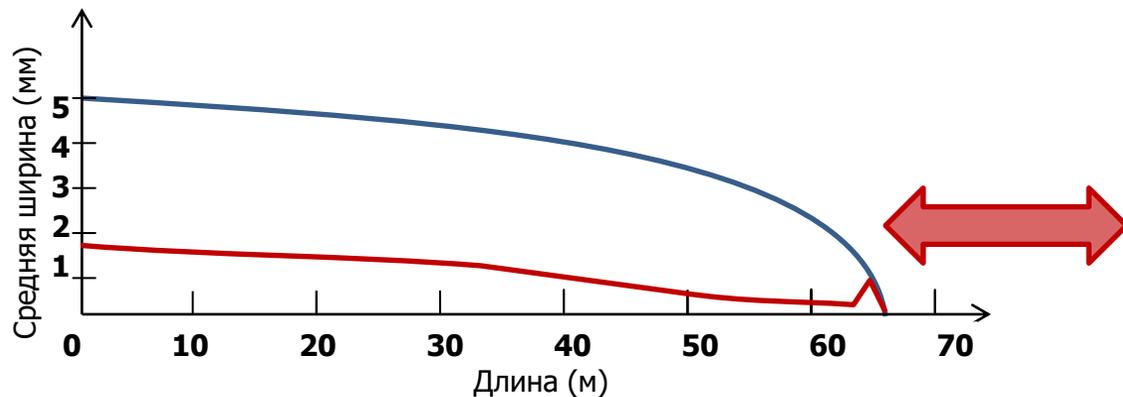


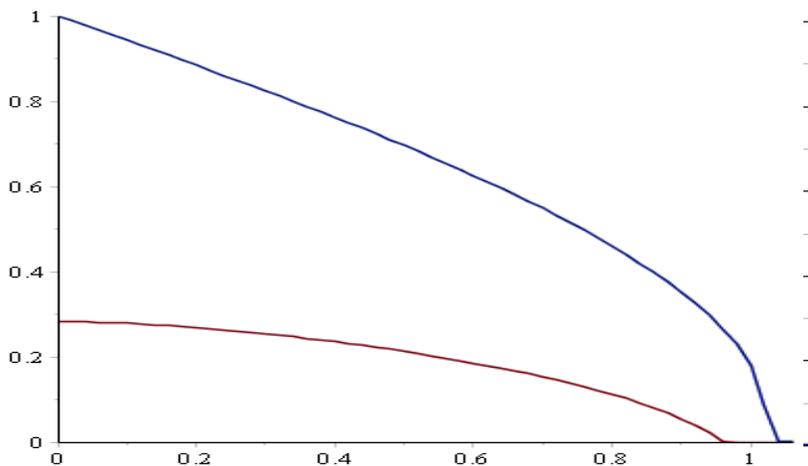
Рис.4 Зависимость предельной длины трещины, времени подачи смеси и момента остановки роста от объемного содержания частиц

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ РЕШЕНИЯ

Расчет реальной геометрии трещины в Maple



Эволюция трещины в Maple



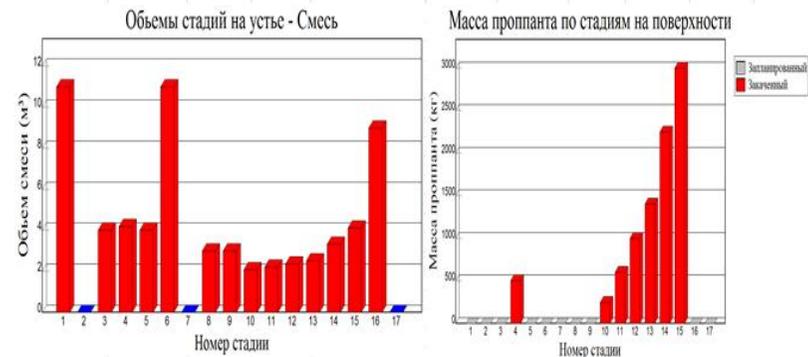
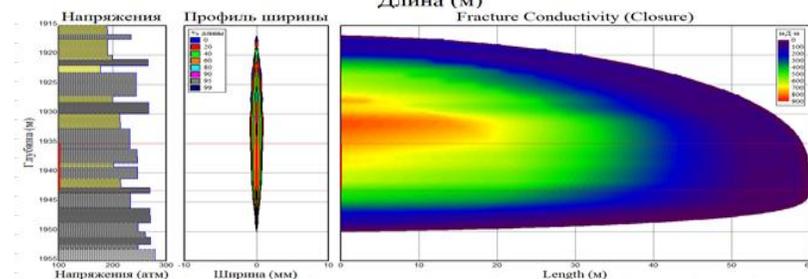
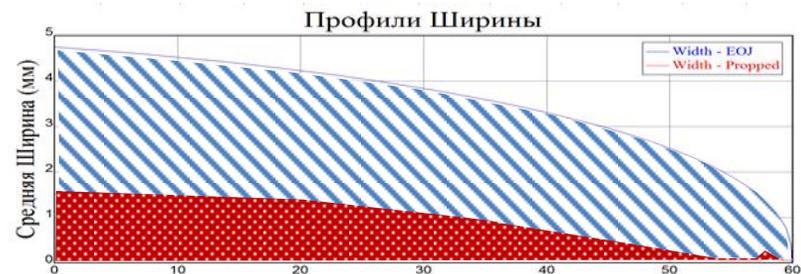
MFract

Программа трехмерного моделирования гидравлического разрыва

© Корпорация Meyer & Associates, Inc., 1985-2008

2130 Freeport Rd, Suite C, Natrona Heights, PA 15065 USA

MFract, версия 5.40.2945



ВЫВОДЫ

- 1** Создана и исследована численно математическая модель
- 2** Показано, что присутствие частиц в жидкости гидроразрыва оказывает существенное влияние на характер процесса формирования трещины
- 3** Показано, что уменьшение концентрации частиц в закачиваемой смеси приводит к замедлению выпадения осадка и продолжительному росту трещины
- 4** Установлена зависимость предельной длины трещины, времени подачи смеси и момента остановки роста от объемного содержания частиц
- 5** Создан программно-вычислительный продукт, позволяющий рассчитывать геометрию и воспроизводить процесс закрепления трещины
- 6** Адекватность программного продукта проверена сравнением с аналитическими решениями и результатами моделирования на зарубежном аналоге

На перспективу:

Рассмотрение различных типов моделей гидроразрыва, в том числе и 3-мерных.
Доработка, калибровка, сертификация программного продукта.



Всегда в движении!