

# РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ ОТ ПОДРЫВА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ВНУТРИ БУРОВОЙ ТРУБЫ

В.В. Доценко, Е.Ю. Емельянова, А.Г. Нескин, М.В. Никульшин, Д.В. Петров

M.V.Nikulshin@vniitf.ru

ФГУП „РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина”,  
г.Снежинск

В рамках поиска технологии разрушения буровой трубы с целью последующего ее извлечения из скважины с глубины более 5000 м проводится численное исследование ударно-волнового воздействия на внутреннюю поверхность трубы в результате детонации специального цилиндрического заряда. Рассматриваются два расчетных случая формирования детонации взрывчатого состава (ВС) цилиндрического заряда: детонация с плоским фронтом и режим расходящейся сферической детонации.

Расчетная модель представляет собой слойку, которая включает в себя цилиндрический заряд ВС в медном корпусе, стальную трубу и буровой раствор. Расчет ударно-волнового воздействия на буровую трубу проводится в трехмерной постановке с использованием многокомпонентной эйлеровой формулировки.

По результатам расчетов подтверждена возможность разрушения буровой трубы в области замкового соединения. Показано, что ударно-волновое воздействие в режиме детонации заряда с плоским фронтом по уровню повреждений трубы существенно превосходит воздействие в режиме расходящейся сферической детонации.

По результатам дополнительных исследовательских расчетов определена минимальная длина заряда, достаточная для разрушения буровой трубы.

## 1 Постановка задачи

Для геофизической организации специалистами РФЯЦ-ВНИИТФ проводится поиск технологии разрушения и последующего извлечения из скважины буровой трубы в массиве горных пород плотностью  $\rho = 2.4\text{--}2.7 \text{ г/см}^3$ . Труба выполнена из высокопрочной стали, имеет длину  $\approx 9500$  мм и максимальный диаметр  $\varnothing 168$  мм (рис.1). Гладкая часть трубы наружным диаметром  $\varnothing 127$  мм имеет наименьшую толщину 9 мм, а замковое соединение труб наружным диаметром  $\varnothing 168$  мм характеризуется наибольшей толщиной стенки  $\approx 50$  мм.

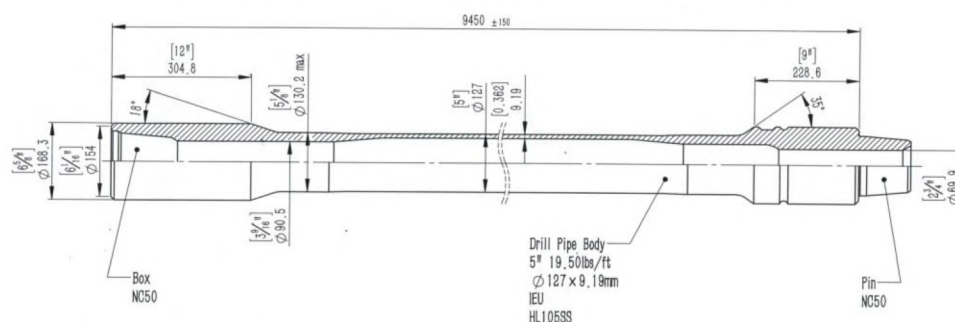


Рис.1. Буровая труба с замковыми соединениями

Разрушение трубы предполагается выполнять на глубине 5400 м. Подобные осложненные геологические условия (давление 64 МПа и температура 170°C) не позволяют применить оборудование и технологии, имеющиеся в распоряжении геофизической организации. Целью выполняемой работы является обоснование возможности разрушения стенки буровой трубы и ее извлечение путем подрыва цилиндрического заряда ВС массой 1.6 кг. Критерием разрушения стенки трубы в условиях воздействия ударной волны (УВ) является откол. Расчет проводится для зоны с наибольшей толщиной стенки 50 мм, расположенной в области замкового соединения.

Моделирование ударно-волнового нагружения буровой трубы проводится численно в многокомпонентной эйлеровой формулировке с применением трехмерной конечно-элементной модели (КЭМ). Для эйлеровой сетки характерно свободное перемещение вещества сквозь границы элементов. Расчетная модель представляет собой слойку, которая состоит из цилиндрического заряда ВС в медном корпусе, размещенном внутри стальной буровой трубы, находящейся в скважине, заполненной буровым раствором. Фрагмент расчетной слойки в указанной области представлен на рис.2.

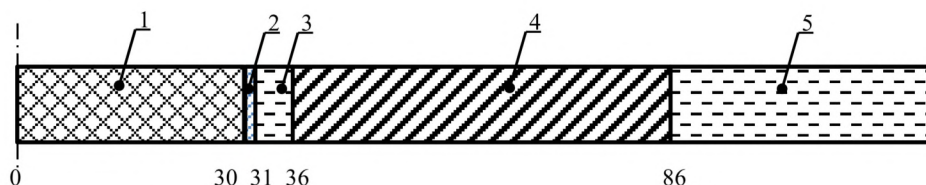
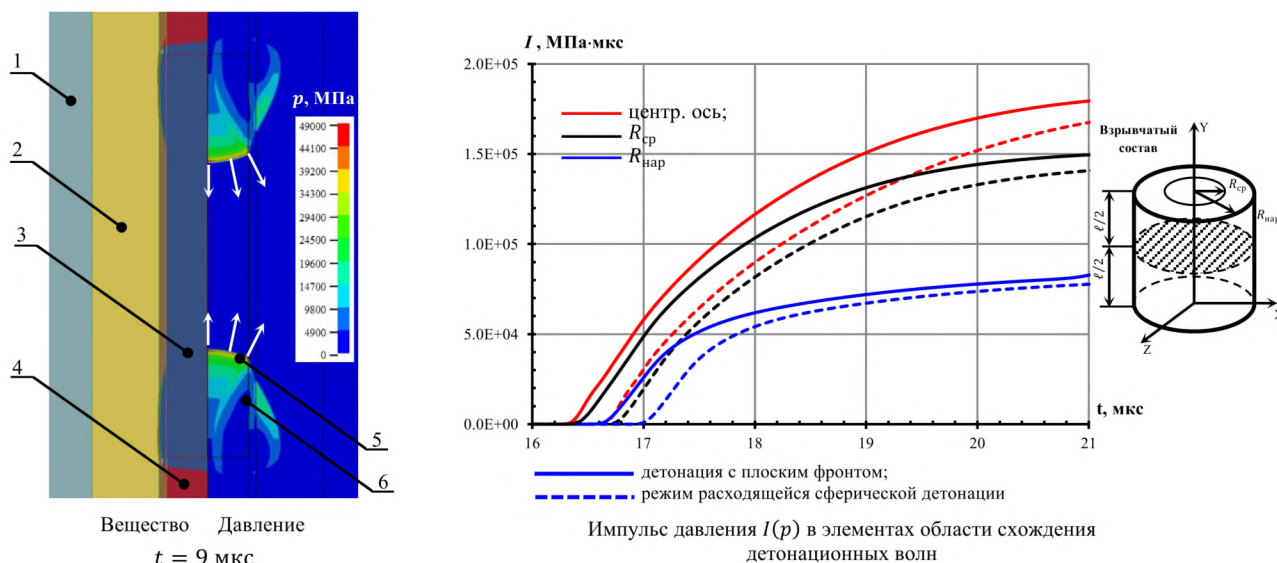


Рис.2. Конструктивная схема фрагмента расчетной слойки

Основными элементами слойки являются:

- 1 – цилиндрический заряд ВС диаметром  $\varnothing 60$  мм и длиной  $\ell = 300$  мм;
- 2 – медный корпус заряда (Cu) толщиной  $h = 1$  мм;
- 3 – влажный песок (буровой раствор) плотностью  $\rho = 1.21-1.27$  г/см<sup>3</sup>, толщиной 5 мм;
- 4 – стальная труба наружным диаметром  $\varnothing 168.3$  мм и толщиной  $h = 50$  мм;
- 5 – влажный песок (буровой раствор) плотностью  $\rho = 1.21-1.27$  г/см<sup>3</sup>, толщиной 50 мм.

Буровая труба выполнена из легированной стали с пределом прочности  $\sigma_B = 850$  МПа. В цилиндрическом заряде ВС рассматривались детонация с плоским фронтом и режим расходящейся сферической детонации. Заряд инициировался с двух противоположных торцов, и волны детонации сходились в плоскости сечения  $\ell/2$ . По результатам численного моделирования получен процесс детонации ВС, образование фронта УВ, характер и уровень разрушения стенки трубы. В целях исследования уровня разрушения трубы от задаваемых параметров проведены дополнительные расчеты, в которых варьировалась длина заряда ВС. Для случая одноточечного инициирования ударно-волновое воздействие на стенку трубы получено менее интенсивное (рис.3). Поэтому в докладе приводятся результаты расчетов детонации с плоским фронтом.



1 – наружный буровой раствор; 2 – стальная труба; 3 – продукты взрыва ВС; 4 – буровой раствор; 5 – фронт ДВ; 6 – контур заряда ВС

Рис.3. Расчетный случай одноточечного инициирования

## 2 Моделирование ударно-волнового нагружения стальной трубы

### 2.1 Конечно-элементная модель

КЭМ построена в виде сектора с центральным углом  $3^\circ$ , как циклически симметричная часть от полномасштабной модели (рис.4). Характерный размер 8-ми узлового конечного элемента эйлеровой сетки равен 0.5 мм. При уменьшении в 2 раза характерного размера сетки изменение давления не превысило 3%, что говорит о достаточной степени дискретизации. КЭМ содержит  $\approx 3 \cdot 10^6$  элементов. Всем узлам продольного сечения КЭМ предписываются условия симметрии. Запрещены перемещения и повороты в плоскости продольного сечения:  $u_z = 0$ ,  $r_x = r_y = 0$ . Для узлов, лежащих на плоскости под углом  $\alpha = 3^\circ$  к продольному сечению КЭМ, задаются аналогичные граничные условия в декартовой локальной системе координат (ЛСК), развернутой на угол  $\alpha = 3^\circ$  относительно центральной оси КЭМ (рис.4). Детонация с плоским фронтом инициируется по точкам торцевой поверхности заряда ВС, режим расходящейся сферической детонации осуществляется посредством детонации из центральной точки торцевой поверхности.

Согласно предварительным оценкам давление 64 МПа столба бурового раствора в скважине на глубине 5400 метров на три порядка меньше амплитуды давления УВ, поэтому в КЭМ начальное давление не учитывается. Тепловое разупрочнение материала буровой трубы в условиях ударно-волнового воздействия не учитывается.

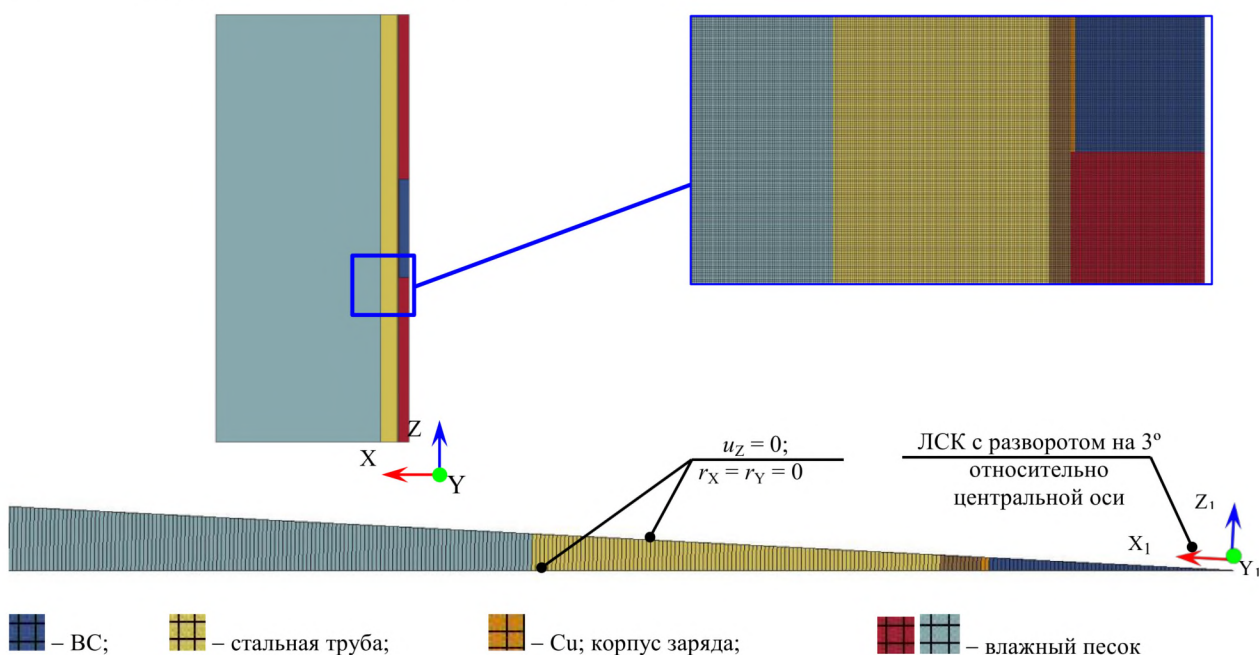


Рис.4. КЭМ ударно-волнового нагружения стальной трубы

### 2.2 Гидродинамические модели

#### 2.2.1 Заряд ВС

Для моделирования детонации заряда используется УРС Джонса-Уилкинса-Ли (JWL), описывающее продукты взрыва [1]:

$$p_{JWL}(V, e) = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) \exp(-R_1 V) + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) \exp(-R_2 V) + \frac{w}{V} e, \quad (1)$$

где  $A, B, R_1, R_2, w$  – параметры ВС.

## 2.2.2 Материал стальной буровой трубы

Легированная сталь описывается гидродинамической моделью материала Джонсона-Кука совместно с УРСом Грюнайзена. Модель Джонсона-Кука предполагает изотропное поведение материала и пластичность по Мизесу. В модели упругие напряжения не рассматриваются. Напряжение текучести определяется следующим выражением [2]:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n][1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*][1 - T^{*m}], \quad (2)$$

где  $A, B, C, n, m$  – параметры материалы.

Таблица 1 – Параметры модели материала Джонсона-Кука [2]

| $\rho$            | Удельная теплоемкость | $T_m$ | Параметры модели |     |      |       |      |
|-------------------|-----------------------|-------|------------------|-----|------|-------|------|
|                   |                       |       | $A$              | $B$ | $n$  | $C$   | $m$  |
| г/см <sup>3</sup> | Дж/(кг · К)           | К     | МПа              | МПа | –    | –     | –    |
| 7.83              | 477                   | 1793  | 792              | 510 | 0.26 | 0.014 | 1.03 |

Параметры модели материала Джонсона-Кука для стали приведены в таблице 1.

Для определения зависимости „давление – удельный объем” рассматривается УРС Ми-Грюнайзена [1]. В случае линейной зависимости скорости ударной волны  $u_{ув}$  от скорости частицы  $u_{ч}$  ( $u_{ув} = C + S_1 u_{ч}$ ,  $S_2 = S_3 = 0$ ) давление для сжатого материала равно:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{[1 - (S - 1)\mu]^2} + (\gamma_0 + a\mu)e. \quad (3)$$

Давление для материала, испытывающего растяжение, составляет

$$p = \rho_0 C^2 \mu + (\gamma_0 + a\mu)e, \quad (4)$$

где  $C, S$  – константы материала;  $\gamma_0$  – начальное значение коэффициента Грюнайзена.

Для стали приняты следующие параметры УРС Ми-Грюнайзена [1]: скорость распространения звука  $C = 4.57$  км/с; параметр линейной зависимости „ $u_{ув} - u_{ч}$ ”  $S_1 = 1.49$ ; коэффициент Грюнайзена  $\gamma_0 = 2.20$ .

В металлах в условиях ударно-волнового нагружения давление разгрузки или откола значительно меньше предельного давления сжатия. Поэтому разрушение трубы происходит, главным образом, в результате „откола”.

Критерием откольного разрушения материала согласно модели Джонсона-Кука [1] является условие превышения главными растягивающими напряжениями допустимого значения  $\sigma_1^{\max} \geq [\sigma]$ , а сжимающие напряжения  $\sigma_3^{\min}$  не ограничиваются. Для металлов величина откольного разрушения превышает временное сопротивление в 4 раза, что для материала буровой трубы составляет  $[\sigma] = 3400$  МПа [1] (стр. 490). В рассматриваемой задаче значение откольного разрушения принято равным  $[\sigma_{расч}] = 10\,000$  МПа.

### 2.2.3 Влажный песок

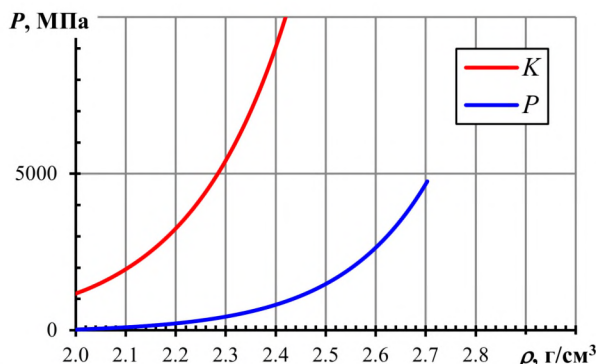


Рис.5. Зависимости  $P$  и  $K$  от  $\rho$  для мокрого песка в условиях ударного сжатия

В основе УРС для влажного песка<sup>1</sup> в условиях ударного сжатия лежит экспериментальная ударная адиабата. При этом разгрузка характеризуется модулем объемного сжатия, который определяется как производная  $K = \frac{\partial P}{\partial \mu}$ , где  $\mu = \frac{\rho_i}{\rho_0} - 1$  (рис.5).

### 3 Результаты расчетов детонации плосковолнового инициирования

В расчетном случае моделируются две плоские волны детонации по торцам цилиндрического заряда ВС, сходящиеся в плоскости сечения  $\ell/2$ . Режим плосковолнового инициирования характеризуется бóльшей интенсивностью ударно-волнового воздействия на буровую трубу по сравнению с режимом расходящейся сферической детонации. Результаты расчетов для слойки представлены в таблице 2 и на рисунках 6–13 в виде давлений (напряжений) на входе и выходе УВ из среды: ВС, медь, буровой раствор, стальная труба.

Таблица 2 – Расчетные давления УВ в слойке в случае детонации двух плоских волн, сходящихся в плоскости сечения  $\ell/2$  заряда ВС

| Элемент слойки                  | Параметр                     | h (R), мм | Вход УВ       |                              | Выход УВ      |        |
|---------------------------------|------------------------------|-----------|---------------|------------------------------|---------------|--------|
|                                 |                              |           | Давление, МПа | t, мкс                       | Давление, МПа | t, мкс |
| Цилиндрический заряд ВС (ДВ)    |                              | 30        | 109250        | 17                           | 109250        | 17     |
| Медь                            |                              | 1         | 44000         | 17.5                         | 44000         | 17.5   |
| Песок влажный (буровой раствор) |                              | 5         | 34000         | 19                           | 34000         | 19     |
| Буровая труба (сталь)           |                              | 50        | 42000         | 19                           | 25400         | 26.5   |
|                                 | $\sigma_3 = -42300$          |           | 19.5          | $\sigma_3 = -25900$          | 26.5          |        |
|                                 | $\sigma_{\text{экв}} = 1200$ |           | 19.5          | $\sigma_{\text{экв}} = 1200$ | 26.5          |        |

В таблице обозначено: ДВ – детонационная волна; h – толщина слоя; R – радиус; t – время; p – давление;  $\sigma_3$  – главное сжимающее напряжение;  $\sigma_{\text{экв}}$  – эквивалентное напряжение.

На рис.6 представлен фрагмент схождения двух плоских детонационных волн в плоскости сечения  $\ell/2$  заряда ВС. Амплитуда на фронте каждой ДВ составляет  $p = 52800$  МПа. Детонация заряда ВС осуществляется в течение 17 мкс, расчетная скорость детонации соответствует справочному значению  $D = 8.8$  км/с. На втором фрагменте рис.6 представлено распределение давления максимальной амплитудой  $p_{\text{max}} = 104310$  МПа сошедшихся двух плоских ДВ в плоскости сечения  $\ell/2$  заряда ВС.

После прохождения двух сходящихся УВ по материалу стенки трубы следует мощная волна разгрузки (ВР). Поскольку в условиях ударно-волнового сжатия металл ведет себя, как квазижидкость, то явления разрушения материала преимущественны в условиях разгрузки. При вхождении УВ со стороны внутренней поверхности трубы амплитуда давления составила  $p_{\text{вх}} = 42\,000$  МПа, что соответствует главному сжимающему напряжению  $\sigma_3 = -42280$  МПа (рис.7). При выходе УВ на наружную поверхность трубы амплитуда давления снижается до  $p_{\text{вых}} = 28\,700$  МПа ( $\sigma_3 = -25860$  МПа).

<sup>1</sup> Начальная плотность  $\rho_0 = 1.95$  г/см<sup>3</sup>.

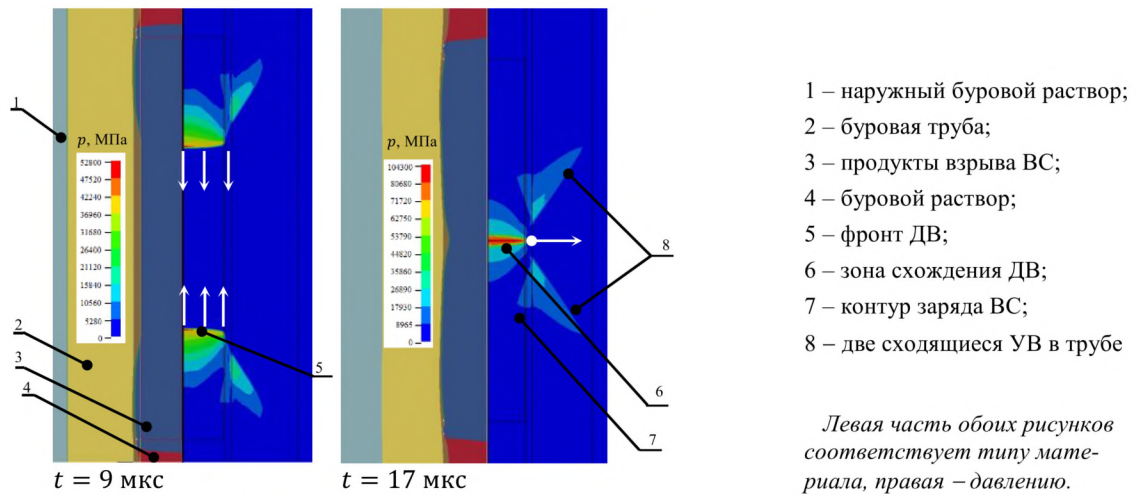


Рис.6. Схождение двух плоских детонационных волн в плоскости сечения  $\ell/2$  заряда ВС

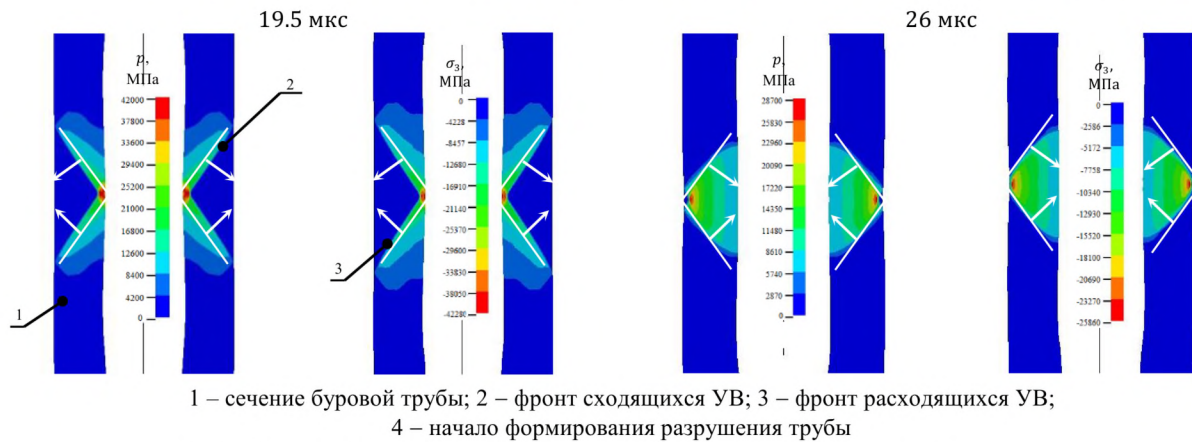


Рис.7. Распределение  $p$  и  $\sigma_3$  по сечению трубы на входе и выходе УВ из среды

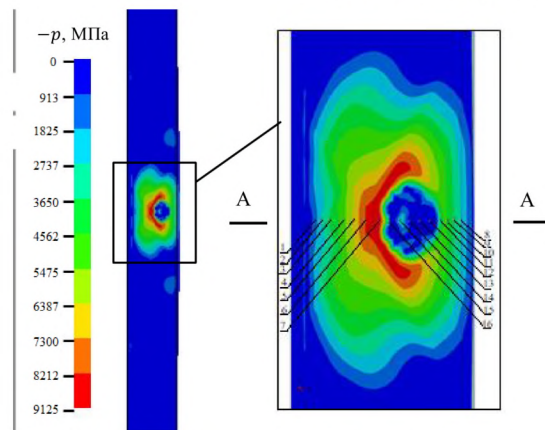


Рис.8. Распределение „растягивающих” давлений ВР по сечению буровой трубы ( $t = 32$  мкс)

В зоне взаимодействия двух сходящихся УВ представлено распределение „растягивающих” давлений<sup>2</sup> по сечению буровой трубы на момент времени  $t = 32$  мкс (рис.8). Для элементов сечения трубы А-А на рис.8 приводятся графики давлений.

Из графика (рис.9) видно, что при ударном сжатии металла на интервале времени от 19 до 26.5 мкс максимальные давления достигли величины  $p_{max} = 46000$  МПа. На этапе разгрузки (интервал времени от 27 до 35 мкс) наименьшие „растягивающие” давления в металле получены, равными  $p_{min} = -9320$  МПа. На рис.10 приведен график изменения главного растягивающего

<sup>2</sup>Так как вектор давления обычно рассматривается, как сжимающее усилие, то термин „растягивающее” давление можно рассматривать как условное название шаровой части тензора напряжений

$$\begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix}.$$

напряжения в элементах сечения А-А трубы. Видно, что после 27 мкс происходит разгрузка, а растягивающие напряжения достигают принятого критерия разрушения  $[\sigma] = 1 \cdot 10^4$  МПа.

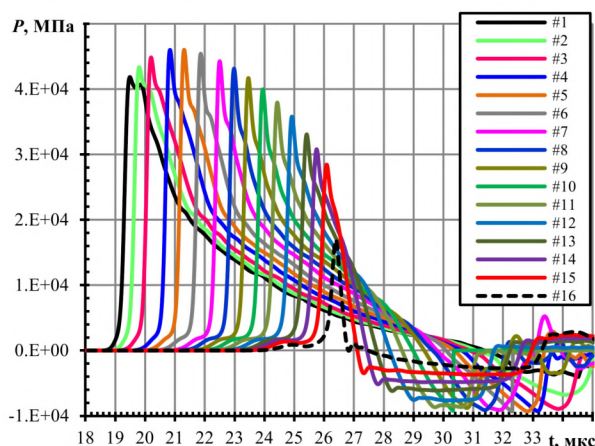


Рис.9. Изменение  $P$  в элементах сечения А-А буровой трубы (рис.7)

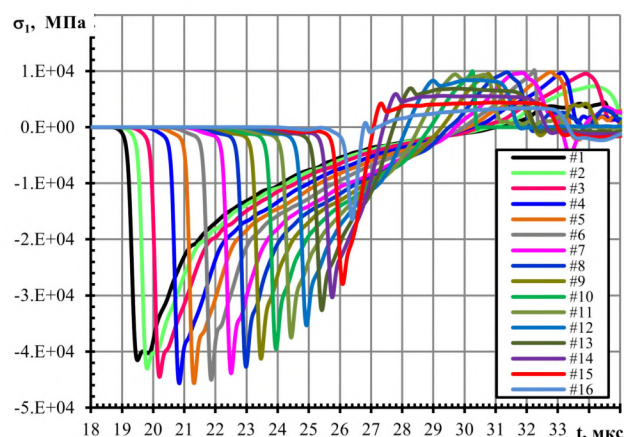


Рис.10. Изменение  $\sigma_1$  в элементах сечения А-А трубы (рис.7)

На рис.11 представлены распределения „растягивающих” давлений по продольному сечению буровой трубы в области расположения заряда на этапе разгрузки для различных моментов времени от 30 до 36 мкс. Направление распространения волны разгрузки с максимальной амплитудой давления  $p_{min} = -9400$  МПа реализуется от наружной стенки трубы к внутренней.

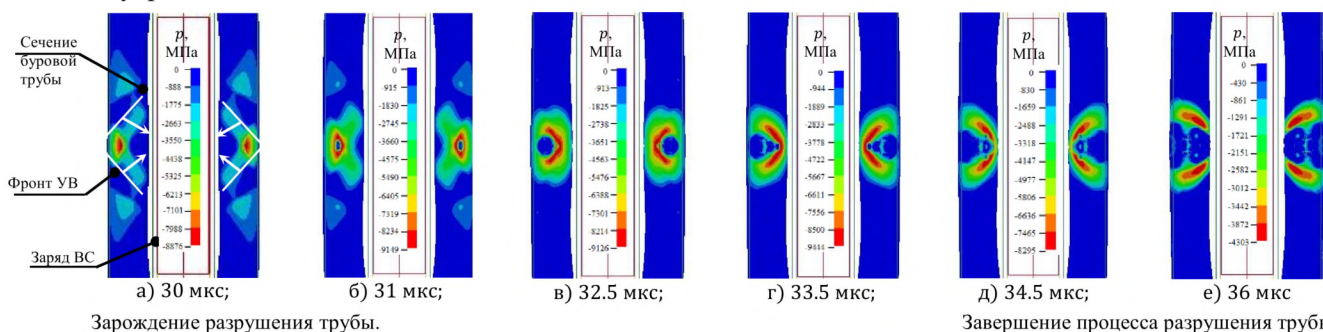


Рис.11. Распределение „растягивающих” давлений по сечению буровой трубы

Опишем прохождение УВ по материалу стенки трубы. После схождения двух ДВ в плоскости схождения на стенку медного корпуса заряда толщиной 1 мм падают две встречных УВ на 19 мкс после начала детонации (рис.12а). Выйдя на наружную стенку медного корпуса заряда, УВ входит в буровой раствор плотностью  $2.3 \text{ г/см}^3$  и толщиной 5 мм. Пройдя буровой раствор, УВ выходит на внутреннюю стенку буровой трубы толщиной 50 мм.

В материале буровой трубы в плоскости схождения двух УВ и последующего их расхождения формируются две разнонаправленных волны разрежения, амплитуда которых равна сумме амплитуд встречных волн. ВР создают растягивающие напряжения в материале трубы в плоскости схождения.

Таким образом, две УВ отразившись от внешней стенки трубы на 26 мкс входят обратно в материал трубы в виде двух ВР (рис.12б). ВР, пробегая от наружной стенки трубы до внутренней, создают растягивающие напряжения в материале трубы, которые превышают ее прочностные параметры, что приводит к разрушению материала трубы в плоскости расхождения ВР (рис.12в). Процесс разрушения (растяжения материала трубы) завершается на 34.5 мкс. Последующее расширение трещины и раздутие трубы происходит под действием давления продуктов взрыва.

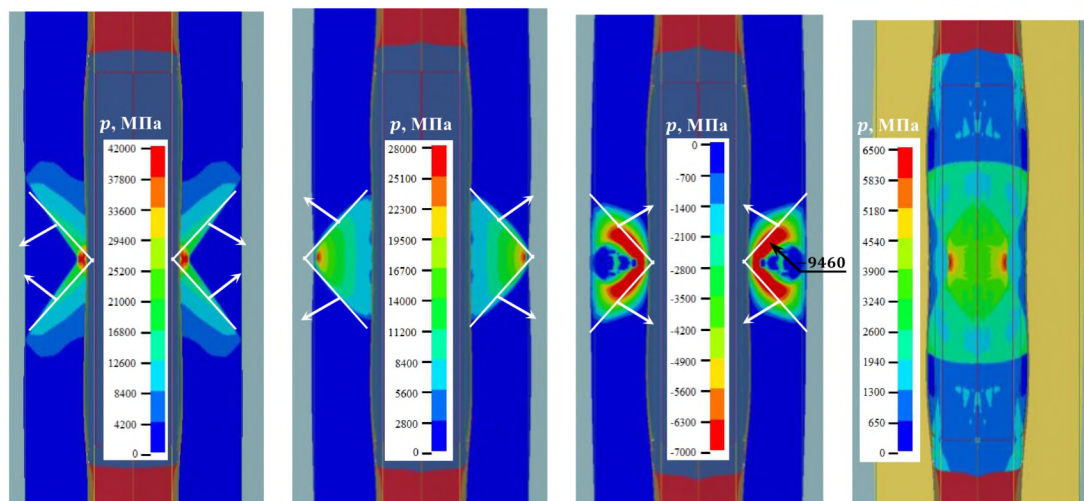


Рис.12. Прохождение ударных волн в плоскости схождения встречных детонационных волн заряда:

- а) выход УВ на внутреннюю стенку буровой трубы;
- б) выход УВ на наружную стенку буровой трубы и зарождение разрушения;
- в) выход ВР на внутреннюю стенку буровой трубы и завершение разрушения трубы

На рис.13 показана динамика истечения продуктов взрыва из буровой трубы, где фрагменты разрушения стенки рассматриваются на фоне распределения плотностей материалов для момента времени 815 мкс. Вертикальный зазор участка разрушения трубы равен  $\Delta = 48$  мм.

- 1 – наружный буровой раствор; 2 – стальная труба; 3 – продукты взрыва ВС;
- 4 – буровой раствор внутри трубы.

*Левая часть фрагмента отображает тип материала, правая – плотность.*

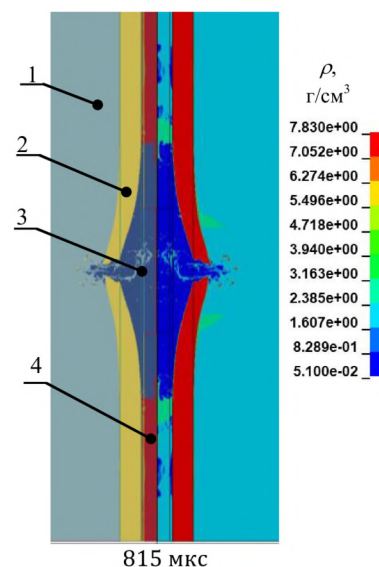


Рис.13. Разрушение стенки буровой трубы

Таким образом, в расчетном случае инициирования детонации с плоским фронтом в цилиндрическом заряде ВС получено расчетное давление  $p_{1,2} = 52800$  МПа. Следует отметить, что в плоскости схождения детонационных волн давление на фронте  $p = 104300$  МПа практически не меняется.

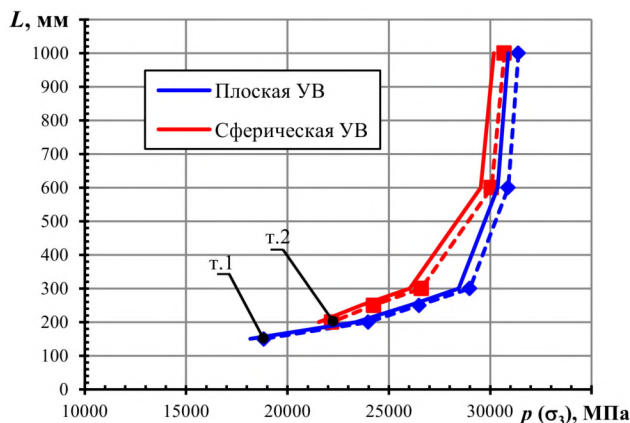
При вхождении двух сходящихся УВ со стороны внутренней поверхности трубы и последующего формирования и схождения двух волн разгрузки происходит разрушение материала в результате превышения критерия откольной прочности. Буровой раствор толщиной 5 мм на пути движения УВ не оказывает заметного влияния на ее параметры.

По результатам расчетов прогнозируется разрушение материала буровой трубы по всей толщине сечения. В расчетах после 815 мкс с начала детонации формируется вертикальный зазор участка разрушения трубы величиной не менее  $\Delta \geq 48$  мм. Данное значение в 6 раз превышает величину разрыва для режима сферической детонации



#### 4 Исследование минимальной длины заряда

Для зарядов ВС диаметром  $\varnothing 60$  мм выполнены расчеты, в которых варьировалась длина  $L$  заряда от 100 до 1000 мм. Полученные расчетные зависимости максимальных значений давлений  $p$  (главных сжимающих напряжений  $\sigma_3$ ) в элементах наружной стенки трубы от длины заряда представлены на рис.14. Рассматривались два варианта детонации: с плоским фронтом и режим расходящейся сферической детонации.



т.1; 2 – труба без разрушения  
Рис.14. Разрушающие давления для наружной стенки трубы в зависимости от длины заряда ВС

Как видно из рис.14, в случае детонации с плоским фронтом разрушение трубы реализуется с минимальной длиной заряда  $\ell = 200$  мм ( $m = 1.1$  кг), в режиме расходящейся сферической детонации –  $\ell = 250$  мм ( $m = 1.3$  кг). Начиная с длины заряда 600 мм, в обоих случаях детонации с плоским фронтом и в режиме расходящейся сферической детонации воздействие заряда на внешнюю среду (трубу) выравнивается.

#### Заключение

В докладе представлено расчетное исследование состояния буровой трубы в результате ударно-волнового воздействия при детонации цилиндрического заряда длиной  $\ell = 300$  мм массой 1.6 кг, расположенного внутри трубы на глубине 5400 м. Инициирование заряда ВС производится в режиме детонации с плоским фронтом.

В результате выполненных расчетов подтверждается возможность разрушения замкового соединения труб толщиной стенки 50 мм посредством применения выбранного заряда ВС. Разрушение стенки буровой трубы получено по всему сечению с величиной разрыва не менее  $\Delta = 48$  мм.

Также определена минимальная длина заряда ВС  $\ell = 200$  мм, при которой реализуется разрушение трубы.

Для обоснования корректности полученных результатов и валидации расчетной модели целесообразно проведение модельных опытов.

#### Литература

- 1 Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, переработанное. – В 2 т. Т. 2 – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 650 с.
- 2 Johnson GR, Cook WH, “Fracture characteristics of three metal subjected to various strain, strain rates, temperature and pressure”. Eng. fracture Mech., 21(1). pp.31–48, 1985 г.
- 3 Dynamic Behavior of Materials. / M. A. Meyers, Wiley-Interscience (1994).