

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВСКРЫТИЯ ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

**Б. П. Рыбакин^{1,2}, Н. Н. Смирнов^{1,2}, В. Д. Горячев³,
М. Н. Кравченко⁴, Л. И. Стамов^{1,2}**

¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*

² *Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук*

³ *Тверской государственный технический университет*

⁴ *РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, г. Москва*

*rybakin@vip.niisi.ru, ebifsun1@mech.math.msu.su, gdv.vdg@yandex.ru,
dep.ngipg@yandex.ru, lyubenstamov@mail.ru*

Работа посвящена анализу лабораторных экспериментов и численному моделированию процесса образования перфорационного канала в комбинированной преграде под действием кумулятивной струи, возникающей при детонации взрывчатого вещества. Данный процесс характерен для вторичного и последующего вскрытия пласта путем применения кумулятивных перфораторов, где создание качественной гидродинамической связи «скважина – пласт» способствует сохранению стабильного притока нефти и газа к скважине.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, пиропатроны, детонация, высокопроизводительные вычисления.

COMPUTER SIMULATION OF FORMATION EXPOSING PROCESS USING CUMULATIVE SHAPED CHARGES

**B. P. Rybakin^{1,2}, N. N. Smirnov^{1,2}, V. D. Goryachev³,
M. N. Kravchenko⁴, L. I. Stamov^{1,2}**

¹ *Lomonosov Moscow State University*

² *System Research Institute, Russian Academy of Sciences*

³ *Tver State Technical University*

⁴ *Gubkin University, Moscow*

*rybakin@vip.niisi.ru, ebifsun1@mech.math.msu.su, gdv.vdg@yandex.ru,
dep.ngipg@yandex.ru, lyubenstamov@mail.ru*

The work is devoted to the laboratory experiment analysis and numerical modeling of perforation tunnel formation in a combined barrier under the action of a cumulative jet, which occurs during the detonation of an explosive (explosive substances). This process is typical for secondary and subsequent formation exposing process by using jet perforator, where the creation of high-quality hydrodynamic connection “well – reservoir” helps maintain a stable flow of oil and gas to the well.

Keywords: computer simulation, explosive charges, detonation, high-performance computing.

Эффективность процесса нефтедобычи во многом определяется качеством вскрытия пласта. Создание связи с пластом осуществляется в большей части проектов путем перфорирования обсадной колонны, цементного камня и создания зоны повышенной проницаемости вокруг скважины. Способ вскрытия пласта, выбор метода перфорирования и перфорационных инструментов зависит от фильтрационно-емкостных свойств пласта (пористости, проницаемости, состава минерального скелета, упругости и прочности пористой матрицы пласта, особенностей строения и типа анизотропии коллектора, наличия и направления имеющихся тре-

щин, сбросов и т. п.). Качество гидродинамической связи скважины с пластом тем эффективней, чем большую длину имеют сами перфорационные каналы и чем шире система трещин, возникающих вокруг перфорационных отверстий, за счет чего повышается пористость и проницаемость призабойной зоны, загрязненной в результате проведения буровых работ. Поэтому создание эффективных перфорационных систем с наибольшей глубиной вскрытия и повышенной дренажной системой трещин в области интервала перфорации продуктивного пласта остается актуальной задачей нефтегазового инжиниринга. Для вскрытия пласта используются различные способы: гидropескоструйная перфорация, химическая перфорация, сверлильные, пулевые, торпедные и аккумуляционные системы перфорации.

При гидropескоструйном перфорировании в скважине, обсадной колонне и цементном камне образуются крупные отверстия, а в скелете породы широкие каверны, форма и размер которых зависят от прочности горной породы и скорости струи, при этом сама возникающая каверна заполняется песком [1]. При химическом методе перфорации вскрытие пласта происходит за счет кислотного воздействия: обсадная колонна еще на поверхности просверливается и отверстия закупориваются пробками, которые на забое разрушаются при обработке кислотой. Существуют и модифицированные методы – кумулятивно-химические, сочетающие закачку активных химических агентов и использование энергии зарядов *взрывчатых веществ* (ВВ) [2]. Механические типы воздействия основаны на использовании сверлильных, пулевых и снарядных инструментов. При использовании сверлильных перфораторов размеры полученных отверстий ограничены выходом сверла и его диаметром [3]. Положительным фактором является отсутствие уплотнения породы вокруг перфорационного канала.

Пулевые, торпедные и коммуляционные методы считаются наиболее эффективными и относятся к группе взрывных методов перфорации: используется энергия разложения ВВ, запускается процесс с помощью детонатора [4–5]. При пулевой перфорации происходит пробой обсадной колонны, цементного камня и образуется в породе перфорационный канал длиной до 200 мм и диаметром около 12 мм. При торпедной перфорации используются разрывные снаряды диаметром 32 или 22 мм, снаряд заходит в горную породу на глубину около 160 мм, где взрывается с образованием системы трещин.

При кумулятивной перфорации образование канала происходит за счет энергии газовой струи, сфокусированной благодаря специальной форме металлического корпуса снаряда. При подрыве ВВ с помощью детонатора образуется высокоскоростная и высокотемпературная газометаллическая струя, которая пробивает металл обсадной колонны, цементный камень вокруг трубы и создает протяженный канал (до 750 мм). Отрицательный момент заключается в образовании «корки спекания» вокруг канала, частично разрушить которую и создать систему трещин можно за счет интерференции струй при использовании нескольких снарядов [6].

Во многом интенсивность притока к скважине на начальном этапе разработки месторождения определяется именно качеством установленной связи с продуктивным пластом за счет создания протяженных перфорационных каналов с сеткой трещин. При этом наиболее эффективными признаны методы вскрытия пласта с использованием энергии ВВ. Энергия разложения ВВ используется и на последующих этапах разработки для стимуляции притока. Эффективность первичного и вторичного вскрытия существенно зависит от геологических особенностей строения месторождения, фильтрационно-емкостных свойств пласта-коллектора, минерального фракционного (гранулометрического) состава, упругости и прочности минеральной матрицы коллектора, а также от самой технологической схемы первичной разработки. Качество вскрытия существенно зависит от выбора способа перфорирования, устройства перфоратора, формы оболочки снаряда, компоновки снарядов, типа ВВ [7].

Для анализа лабораторных и промысловых экспериментов авторами созданы несколько типов математических моделей. Первая дает возможность рассчитать параметры кумулятивной струи, создающей перфорационный канал в бетонном кольце вокруг скважины и породе, а также сетку трещин в пористом скелете [8]. Вторая фильтрационная модель используется для расчета более позднего этапа стимулирования притока с использованием энергии ВВ [9].

Интерес к созданию симуляторов процесса перфорирования связан с тем, что численное моделирование позволяет оптимизировать процесс вскрытия пласта-коллектора путем подбора типа ВВ, конструкции перфоратора с учетом геометрии расположения зарядов, оценить влияние динамической депрессии с целью повышения качества процесса перфорирования и улучшения гидродинамической связи между продуктивным пластом и скважиной. Моделирование использования водных растворов ВВ (метод термогазохимического воздействия на пласт) на более поздних этапах разработки дает возможность оптимизировать технологию добычи и повысить коэффициент извлечения нефти [10–12].

В работе рассмотрен процесс инициирования разложения ВВ в оболочке кумулятивного заряда с последующей деформацией и разрушением корпуса заряда, возникновением кумулятивной струи, проникающей через слои нескольких металлических поверхностей (элемента поверхности корпуса перфоратора и стенки обсадной колонны скважины), с образованием перфорационного канала в бетонном кольце вокруг скважины и в пластовой породе. Под действием кумулятивной струи в призабойной зоне возникает несколько зон различной проницаемости, в том числе свободный канал, уплотненная узкая зона вокруг основного канала и область дополнительной трещиноватости на периферии канала. Длина перфорационного канала, его диаметр и размер зоны трещиноватости меняются в зависимости от типа и физических характеристик породы, параметров кумулятивного заряда, а также типа перфоратора и геометрии расположения зарядов [13].

На начальном этапе проводилось детальное изучение лабораторных испытаний одиночных и спаренных кумулятивных зарядов [7–8] и анализ результатов по исследованию зоны повреждения, размеров перфорационного канала, заполнения перфорационных каналов продуктами взрыва и твердыми частицами (за счет разрушения оболочки заряда, цементного камня и породы). Испытательный стенд представлял из себя коммулятивный снаряд в сборе (или два снаряда), установленный на многослойную мишень из нескольких металлических стальных пластин и бетонной преграды, имитирующей корпус перфоратора, стенку обсадной колонны и горную породу.

Анализ рентгеновских (томографических) снимков бетонной мишени показал, во-первых, наличие узкой уплотненной области сниженной проницаемости («корки спекания»), прилегающей к «конусу» перфорационного канала, толщина которой уменьшается к носику канала, во-вторых, наличие сетки трещин на периферии вокруг перфорационного канала. Эксперимент также показал, что использование пары близкорасположенных зарядов частично разрушает область уплотнения за счет интерференции ударных волн в зоне взаимодействия зарядов и способствует образованию дополнительной сетки трещин между перфорационными каналами, что приводит к улучшению фильтрационных характеристик в интервале перфорации [8].

Математическое моделирование процесса активации заряда ВВ, возникновения высокотемпературной газовой струи с последующим прониканием кумулятивной струи в комбинированную преграду позволяет оптимизировать форму пиропатрона, геометрию расположения нескольких зарядов, конструкцию самого перфоратора, оценить влияние динамической депрессии, что в конечном итоге дает возможность улучшить качество перфорирования и повысить гидродинамическую связь между продуктивным пластом и скважиной. Математическая модель представляет из себя систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных [14], описывающих нестационарный процесс разложения твердого ВВ, образования газовой струи и динамического нагружения конструкций с учетом влияния различных факторов (геологических и гидромеханических) [15–16].

В последние годы решение широкого класса задач нестационарной динамики упруго-пластических сред в значительной мере определяется достигнутыми результатами в области компьютерного моделирования различных процессов и физических явлений [8, 17–18]. Известно, что при высокоскоростном нагружении многие материалы проявляют как упругие, так

и пластические свойства. При математическом моделировании высокоскоростного нагружения такого рода материалов целесообразно применять модель повреждаемой упругопластической среды. Для разработки методики численного решения двумерных нестационарных задач динамического нагружения конструкций была выбрана двумерная конечно-разностная схема сквозного счета. Эта схема основана на модифицированной схеме Уилкинса, имеет 2-й порядок точности по пространству и по времени [14]. Исходная система уравнений представлена таким образом, что описывает с единых позиций упругую, упругопластическую и гидродинамическую стадии движения среды [19–20].

Основные уравнения. Будем рассматривать пласт, латеральная плоскость (направление напластования) которого перпендикулярна к оси скважины, пласт считаем изотропным. Напряженное состояние пласта в прискважинной зоне определяется естественным горным давлением и гидродинамическим пластовым давлением. Внутри скважины находится стандартный кумуляционный перфоратор с помещенными в него пиропатронами (рис. 1), расположенными радиально. В реальности корпус перфоратора помещается в скважину, заполненную буровой жидкостью. В данном расчете, моделирующем лабораторный эксперимент, полагаем, что ось пиропатрона перпендикулярна к стенке скважины. Целью исследования является моделирование процесса преобразования твердого ВВ (рис. 1) в продукты детонации, развитее детонации, образование высокотемпературной газовой струи, пробивание слоя металла и образование канала в цементном камне.

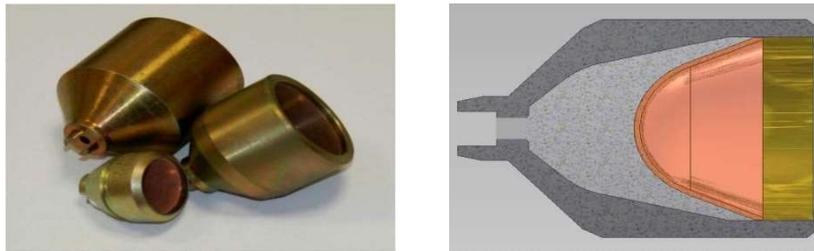


Рис. 1. Схематическое изображение пиропатрона (слева), фотография оболочек зарядов(справа)

В работе приняты следующие допущения:

- массовыми силами пренебрегается;
- параметры задачи не зависят от пространственной координаты, нормальной к плоскости пласта;
- предполагается плоская деформация пласта,
- задача решается в двумерной постановке;
- пласт моделируется повреждаемой термоупруго-пластической средой;
- процесс деформирования считается адиабатическим.

Систему определяющих уравнений, с учетом принятых допущений можно записать в двумерной цилиндрической системе координат в виде законов сохранения массы (1), количества движения (2)–(3) и энергии (4):

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial w}{\partial z} + \alpha \frac{u}{r} \right], \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial S_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \alpha \frac{S_{rr} - S_{\theta\theta}}{r} - \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial S_{zz}}{\partial z} + \alpha \frac{S_{rz}}{r} - \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{P}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \left[S_{rr} \frac{\partial u}{\partial r} + S_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + \alpha S_{\theta\theta} \frac{u}{r} + S_{rz} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right) \right], \quad (4)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = u, \frac{\partial S_{rr}}{\partial t} = 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right),$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = w, \frac{\partial S_{zz}}{\partial t} = 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right),$$

$$\frac{\partial S_{\theta\theta}}{\partial t} = 2\mu \left(\alpha \frac{u}{r} + \frac{1}{3\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right), \frac{\partial S_{rz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \right),$$

здесь ρ – плотность среды, u, w – компоненты вектора скорости, t – время, E – удельная внутренняя энергия, S – компоненты девиатора тензора напряжений. Тензор напряжения представлен в виде:

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}, (i = 1,2, j = 1,2)$$

$$P = \frac{1}{3} \sum_1^3 \sigma_{ii}.$$

Параметр $\alpha = 0$ соответствует плоскому деформированному состоянию, $\alpha = 1$ – осесимметричному.

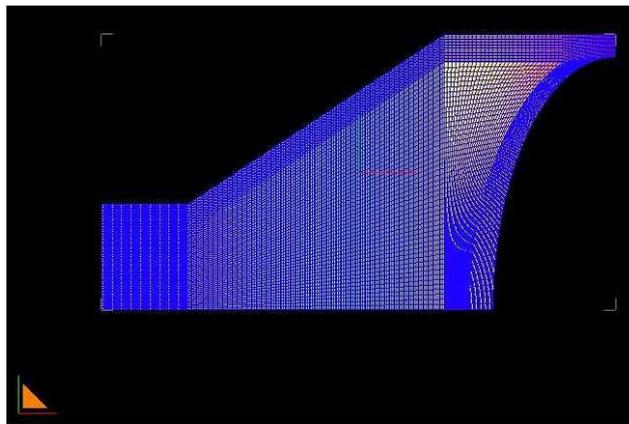


Рис. 2. Расчетная сетка 1, построенная с учетом критериев качества

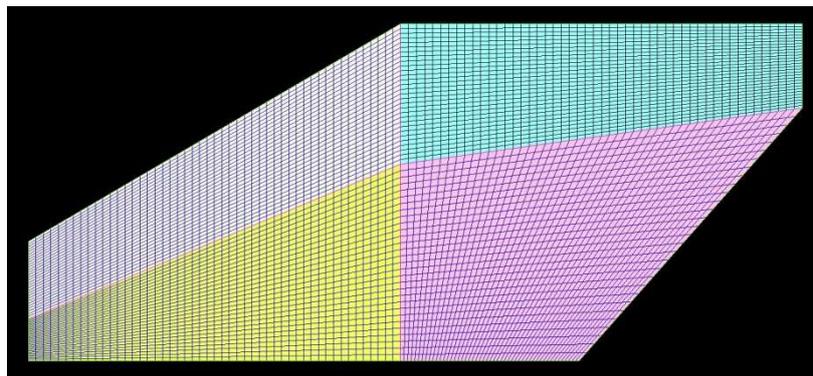


Рис. 3. Расчетная сетка 2, построенная с учетом критериев качества

В расчетах используется модель пластического течения Мизеса, т. е. второй инвариант девиатора тензора напряжений в области пластичности удовлетворяет условию текучести Мизеса [14]:

$$S_{rr}^2 + S_{zz}^2 + S_{\theta\theta}^2 + S_{rz}^2 \leq \frac{2}{3} Y_0^2 \quad (5)$$

В работе используется несколько разных уравнений состояния для давления в форме ударной адиабаты, Ми-Грюнайзена и т. д. для различных материалов. Один из типов уравнения состояния приведен в уравнении:

$$P = a_1(\eta - 1) + a_2(\eta - 1)^2 + a_3(\eta - 1)^3 + a_4\eta E, \quad (6)$$

здесь $\eta = \rho/\rho_0$, ρ_0 – начальная плотность.

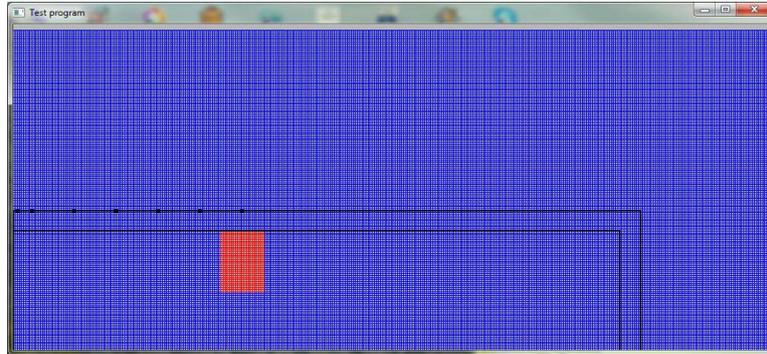


Рис. 4. Красным цветом показана начальная форма заряда ВВ

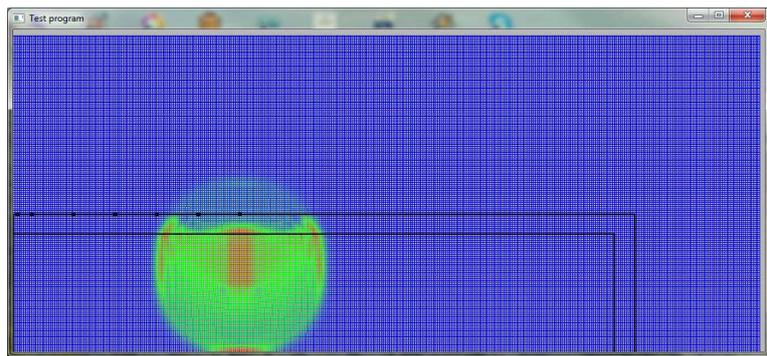


Рис. 5. Распространение ударной волны в буровом растворе и в стальной стенке скважины в момент времени $t = 5,29$ мс

Построение сетки. Для решения задач математического моделирования большую роль играет оптимальное распределение узлов вычислительной сетки. Кроме того, известно, что распределение граничных и внутренних узлов сетки зачастую влияет на ее сходимость [21]. Таким образом, построение хороших расчетных сеток является актуальной задачей. В данной работе используется программа построения четырехугольной лагранжевой сетки [16]. Качество расчетной сетки определяется с помощью нескольких параметров. Для четырехугольной сетки будем оценивать отношение минимального значения определителя матрицы Якоби, вычисленного для каждого элемента, к максимальному элементу [22]. Кроме того, будем оценивать меру скошенности – отклонения от идеального угла:

$$q_e = \max[(\alpha_{max} - \alpha_n)/\alpha_n, (\alpha_n - \alpha_{min}/\alpha_n)],$$

где $\alpha_{max}, \alpha_{min}$ – максимальный и минимальный углы ячейки ($n = 1$ для треугольной и $n = 2$ для четырехугольной ячеек, соответственно $\alpha_1 = 60, \alpha_1 = 90$). Меры гладкости, характеризующей изменение размеров соседних ячеек, вычисляются по формуле:

$$q_e = \max_i \frac{S}{S_i}$$

где S – площадь ячейки; S_i – площади соседних ячеек.

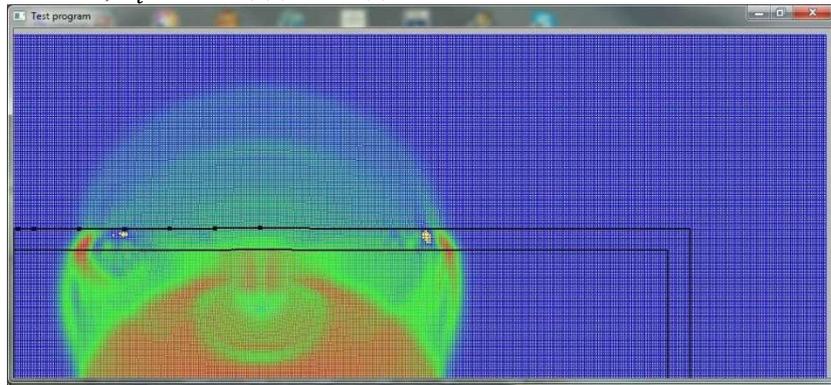


Рис. 6. Распространение ударной волны в буровом растворе и в стальной стенке скважины в момент времени $t = 20,21$ мс

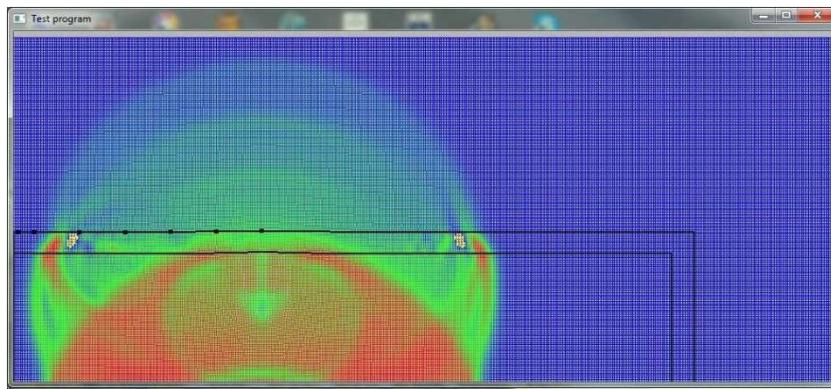


Рис. 7. Распространение ударной волны в буровом растворе и в стальной стенке скважины в момент времени $t = 30,5$ мс

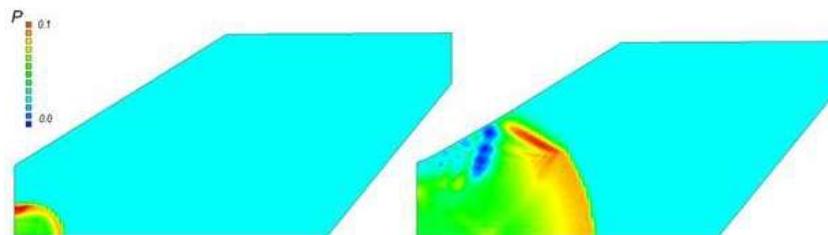


Рис. 8. Распространение детонационной волны в моменты времени $t = 5,87$ и $t = 50,29$ мс

Были проведены исследования отношения длин максимального и минимального ребра ячеек. Считается, что сетки хорошего качества должны иметь ячейки с мерой скошенности равной 0,25–0,5. Мера гладкости должна быть не больше 30. На рис. 2, 3 приведены две такие сетки.

Численный метод решения. Рассматриваемая задача решается численно методом типа Уилкинса [14]. Моделирование макроразрушения пласта осуществляется путем расщепления лагранжевой расчетной сетки. В качестве критерия начала макроразрушения используется энтропийный критерий разрушения: среда теряет сплошность тогда, когда удельная диссипация D достигла предельной величины D^* . В точке среды, в которой выполнен критерий разрушения, осуществляется явное построение берегов разрыва. Для этого производится разделение узлов расчетной сетки по границам ячеек – внутренние узлы и соответствующие им ребра ячеек становятся граничными, на которых задаются условия свободной поверхности, определенное давление или контактные условия в зависимости от

ситуации.

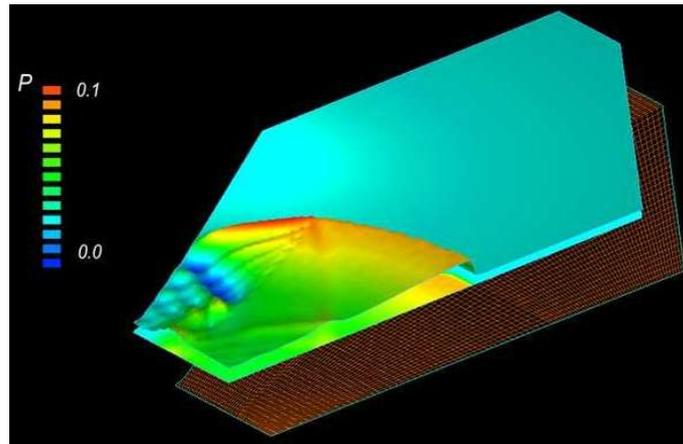


Рис. 9. Горельеф распределения давления P в момент времени $t = 50,29$ мс

Основные результаты. Ниже приведены результаты математического моделирования воздействия детонационного направленного взрыва на стенку скважины. Стенка скважины выполнена из стали, с наружной стороны стенки – трехкомпонентная среда, состоящая из пористого скелета, жидкости и воздуха. На рис. 3–6 приведены результаты моделирования взрыва безоболочечного заряда ВВ около стенки скважины в различные моменты времени. Внутри скважины ударная волна распространяется по буровому раствору. По материалу стальной трубы тоже распространяется фронт ударной волны, происходит деформация стенки скважины. Это приводит к распространению в нефтеносном слое сферической волны нагрузки. На первом этапе расчетов полагаем, что фильтрационного течения в самом насыщенном пласте нет, и рассматриваем собственно процесс деформации стенки скважины.

На рис. 8 показан процесс начала распространения детонационной волны в пиропатроне конструкции рис. 3. Этот же процесс представлен в виде горельефа давления на момент времени $t = 50,29$ мс (рис. 9). По ВВ внутри пиропатрона распространяется фронт детонационной волны. Он инициализирует фронт волны сильной нагрузки, которая с меньшей скоростью движется в стальной оболочке. На рис. 9 виден излом фронта волны, который соответствует границе раздела двух сред. В оболочке из стали наблюдаются волны разгрузки, которые формируются на ее свободной поверхности.

В расчетах использовались следующие значения определяющих констант для материала конструкции из стали:

$$\rho_0 = 7,85 \text{ г/см}^3, \mu_0 = 0,77 \text{ Мбар}, Y_0 = 0,0034 \text{ Мбар}, Y_{max} = 0,025 \text{ Мбар}^{-1}, T_{m0} = 2380 \text{ К}, \\ \beta = 4,3, b = 0,26 \text{ Мбар}^{-1}, n = 0,35, h = 0,45, k_1 = 1,648, k_2 = 3,124, k_3 = 5,649, \gamma_0 = 2,17.$$

Для взрывчатого вещества были приняты следующие значения констант:

$$\text{TNT: } \rho_0 = 1,72 \text{ г/см}^3, C = 0,19, \gamma = 3,0, A = 0,033, \gamma = 3,27, A_1 = 0,0291, B = 0,021, \gamma_1 = 0,327, \\ \eta = 1,25$$

Данная работа была выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований №18-07-01303 А.

Литература

1. Крысин Н. И., Рябоконт Е. П., Турбаков М. С., Чернышов С. Е., Щербаков А. А. Совершенствование устройств щелевой гидрорескоструйной перфорации в нефтяных скважинах // Нефт. хоз-во. 2016. № 8. С. 129–131.
2. Гайдар С. М., Жигарев В. Д., Алимов В. В., Посунько И. А. Расчет термодинамических характеристик процесса разрушения нефтеносных пластов при кумулятивно-химическом

вскрытии // Технологии нефти и газа. 2017. № 3 (110). С. 45–51.

3. Галухин А. С., Шальская С. В. Обоснование вскрытия продуктивного пласта путем гидropескоструйной перфорации на новодавыдовском месторождении // Наука. Техника. Технологии: политех. вестн. 2018. № 1. С. 86–100.

4. Гайворонский И. Н., Костицын В. И., Савич А. Д., Черных И. А., Шумилов А. В. Повышение эффективности вторичного вскрытия продуктивных пластов // Нефт. хоз-во. 2016. № 10. С. 62–65.

5. Железников И. С., Снарев А. И. Кумулятивно-торпедный перфоратор // Нефтегазовый комплекс: проблемы и инновации : тез. науч.-практич. конф. с междунар. участием ; под ред. В. К. Тян. Самара : Изд-во СГУ, 2016. С. 113.

6. Способ вскрытия пласта кумулятивными зарядами : пат. 2493357 РФ Е21В 43/117; заявл. 04.12.2012 ; опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26.3. 3 с.

7. Василенко И. Р., Зинченко О. Д., Исаев В. И., Шепель К. Ю. Экспериментальная оценка воздействия кумулятивной перфорации на армированную модель крепи скважины // Оборудование и технологии для нефтегаз. комплекса. 2015. № 2. С. 44–52.

8. Рыбакин Б. П., Смирнов Н. Н., Тычинин П. Н., Кравченко М. Н. Шепель К. Ю., Исаев В. И. Моделирование вскрытия пласта с использованием кумулятивных зарядов // Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе : тез. докл. Междунар. конф. 16–20 мая 2016 г. Сургут : ИЦ СурГУ, 2016. С. 97–98.

9. Кравченко М. Н., Мурадов А. В., Диева Н. Н., Перехожев Ф. А. Сравнительный анализ применения методов ВПГ и ТГХВ на пластах баженовской свиты на базе математического моделирования // Neftegaz.ru. : деловой журн. 2018. № 3. С. 62–69.

10. Кушнир Д. Ю., Бочаров О. Б. Сравнение продуктивности различных систем перфорационных каналов на основе математического моделирования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 12. С. 44–50.

11. Вольпин С. Г., Сайтгареев А. Р., Корнаева Д. А., Смирнов Н. Н., Кравченко М. Н., Диева Н. Н. Перспективы применения волновой технологии термогазохимического воздействия для повышения нефтеотдачи пластов // Нефт. хоз-во. 2014. № 1. С. 62–66.

12. Кравченко М. Н., Дмитриев Н. М., Мурадов А. В., Диева Н. Н., Герасимов В. В. Инновационные методы разработки керогеносодержащих коллекторов, стимулирующие нефтегенерационный потенциал // Георесурсы. 2016. Т. 18. № 4. С. 330–336.

13. Ликотов А. Р., Шепель К. Ю. Перспективное оборудование для вскрытия нефтегазового пласта // Каротажник. 2016. № 266 (8). С. 79–84.

14. Wilkins M. L. Computer Simulation of Dynamic Phenomena. Springer, 1999. 264 p.

15. Lugovoi P. Z., Meish V. F., Rybakin B. P., Sekrieru G. V. Dynamics of reinforced compound shells under nonstationary loads // International Applied Mechanics. Springer. 2006. V. 42. №. 4. P. 455–460.

16. Lugovoi P. Z., Meish V. F., Rybakin B. P., Sekrieru G. V. Numerical simulation of the dynamics of a reinforced shell subject to nonstationary load // International Applied Mechanics. Springer. 2008. V. 44. №. 7. P. 788–793.

17. Исаев В. И., Ликотов А. Р., Василенко И. Р., Шепель К. Ю. Способ вскрытия пласта и испытания моделей крепи скважины // Вестн. Ассоц. буровых подрядчиков. 2015. № 2. С. 7–12.

18. Кушнир Д. Ю., Бочаров О. Б. Анализ схем перфорации слоистого пласта на основе математического моделирования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 7. С. 16–21.

19. Rybakin B. Mathematical simulation of high speed loading high-strength gradient materials // Gas and Wave Dynamics : Subsection. Lomonosov readings. Book of abstracts of scientific conference, April, 2014. Moscow : Publishing House of the Moscow University, 2014. P. 36–37.

20. Rybakin B., Bogatencov P., Secrieru G., Gutuleac E. Application of HPC technologies for mathematical modeling of seismic impact on underground structures // The Third Conference of

Mathematical Society of the Republic of Moldova. August, 19–23, 2014. Chisinau : Institute of Mathematics and Computer Science, Academy of Sciences of Moldova, 2014. P. 406–409.

21. Коротков А. А., Первичко В. А., Плотникова И. Г., Чуданов В. В. Метод построения ортогональных сеток на плоскости, на гладкой трехмерной поверхности : препринт / Ин-т проблем безопасности развития атом. энергетики РАН. М. : ИБРАЭ РАН, 2006. 47 с.

22. Молчанов А. М., Щербаков М. А., Янышев Д. С., Куприков М. Ю., Быков Л. В. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники : учеб. пособие. М. : МАИ, 2013. 260 с.