

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ВЗРЫВА СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ АКВАТОЛА ТВ В РУКАВАХ

В. В. Лотоус, инж. (ОАО «Полтавский ГОК»)

Наведено математичні постановки задач про формування та дію вибуху в твердих гірських породах свердловинних зарядів водовмісної вибухової речовини місцевого приготування акватола ТВ у рукавах.

Буровзрывные работы являются одним из основных технологических процессов открытых горных работ при добыче твердых полезных ископаемых. К настоящему времени в Украине имеется много различных взрывчатых веществ (ВВ), технологий их изготовления и применения, которые используются в каждом регионе в зависимости от наличия материально-технической базы, финансового положения предприятий и других факторов.

В частности [1], массовое применение на карьерах водосодержащего ВВ акватола Т-20Г сокращает до минимума потребление дорогостоящих промышленных ВВ – гранулолита и граммонита 79/21. Выход горной массы с одного метра пробуренной скважины возрастает в 1,5...1,8 раза и на отдельных блоках, обуренных только котловыми скважинами, составляет 60...70 м³ на метр длины скважины. Однако в силу различных причин это ВВ нестабильно и для кардинального решения задачи повышения стабильности зарядов акваторов необходимо использовать другие загустители, устойчивые к температуре до 110...115 °С, а также добавки, придающие этим ВВ высокую водоустойчивость. Поэтому при использовании акватола Т-20Г наблюдается ухудшение качества взрывов (летом в меньшей степени, зимой – в большей). Из-за расслоения нижняя часть заряда высотой 2...3 м перенасыщена тротилом (40...80 %), а верхняя часть высотой 3...5 м, наоборот, состоит приблизительно из 40...80 % окислителя, 5...13 % тротила и 10...15 % воды. Кроме того, в скважинных зарядах, сформированных из горячельющихся акваторов (Т-20Г, ГЛТ-20М, ГЛТ-20В и др.), в процессе твердения образуется осевая полость в форме удлиненного конуса с вершиной в нижней части заряда. Эта полость обычно заполнена раствором окислителя с содержанием 60...62 % селитры, что соответствует температуре его насыщения при 10...12 °С (температура окружающих заряд горных пород).

С целью устранения недостатков, присущих акватору Т-20Г, ЗАО «Техновзрыв» совместно с ОАО «Полтавский ГОК» разработал новые ВВ акваторы ТВ – горячельющиеся промышленные ВВ, отличающиеся от акваторов Т-20Г пониженным содержанием тротила и применением в составе горючего набухающего компонента (ГНК). Эти ВВ предназначены для ведения

взрывных работ скважинными зарядами в сухих и обводненных скважинах диаметром не менее 110 мм в породах различной крепости в любых климатических условиях при механизированном зарядании их в полимерные рукава с применением устройств подачи рукава по ТУ У 25274773.001-98. Акватола ТВ представляет собой горячельющую смесь водного раствора аммиачной селитры, тротила, загустителя, структурирующего агента и горючего набухающего компонента ГНК-2 (ГНК-2 – смесь жидкого нефтепродукта, кислоты олеиновой, порошков органического и неорганического происхождения, изготавливается по ТУ У 25274773.007-2001).

Массовая доля компонентов в акваталах ТВ должна соответствовать нормам, указанным в табл. 1. Физико-химические и взрывчатые показатели акватола ТВ должны соответствовать нормам, указанным в табл. 2.

Как показали модельные эксперименты, в результате отверждения акватала в полиэтиленовом рукаве образуется цилиндрический заряд с осевой полостью в виде цилиндра (рис. 1).

Таблица 1. Рецептурный состав акватола ТВ

Марка ВВ	Массовая доля компонентов, %					
	Селитра аммиачная	Тротил (грануло-тол)	Вода	ГНК-2	Загуститель (сверх 100 %)	Структурирующий агент (сверх 100 %)
ТВ-10	77,0	10	8	5,0	0-0,3	0,01
ТВ-7,5	78,5	7,5	8	6,0	0-0,3	0,01
ТВ-5	79,5	5,0	8	7,5	0-0,3	0,01

Таблица 2. Физико-химические и взрывчатые характеристики акватола ТВ

Наименование показателя	Норма для марок		
	ТВ-10	ТВ-7,5	ТВ-5
Внешний вид	вязкая, твердеющая при охлаждении однородная масса		
Плотность отвердевшего акватала ТВ, г/см ³ , не менее	1,4	1,37	1,34
Полнота детонации заряда диаметром 200 мм	полная		
Кислородный баланс, %	-0,6	-0,1	-0,5
Теплота взрыва, ккал/кг	830	820	790
Скорость детонации открытого заряда диаметром 200 мм, км/с, не менее	5,2	4,5	4,2
Критический диаметр детонации в бумажной оболочке, мм	80	100	110
Чувствительность к удару по ГОСТ 4545: нижний предел в приборе 2, мм	> 500	> 500	> 500
- частота взрывов в приборе 1, %	4	0	0
Чувствительность к трению в приборе К-44-3, кгс/см ²	>3000	>3000	>3000



Рис 1. Общий вид зарядов, сформированных из акватола

Для установления работоспособности и эффективности рецептур акватолов ТВ в условиях карьера ОАО «Полтавский ГОК» 19.09.2003 были проведены экспериментальные взрывы скважинных зарядов акватолов ТВ в рукавах. Параметры скважинных зарядов: диаметр скважины – 250 мм, глубина – 2,5 м. ВВ заряжались в полиэтиленовые рукава диаметром 200 мм. Масса ВВ в заряде составляла 60 кг, высота заряда – 1,4...1,5 м. Инициирование заряда производилось промежуточным боевиком из трех тротильных шашек Т-400 (1,2 кг), которые устанавливались на высоте 0,3 м от дна скважины. В качестве забойки применялся отсев мелких фракций породы.

По результатам взрыва зарядов оценивалась работоспособность A , определяемая по ее относительной величине с помощью метода воронкообразования:

$$A = V_{\text{в}}/V'_{\text{в}},$$

где $V_{\text{в}}$ и $V'_{\text{в}}$ – объем воронки выброса от взрыва зарядов акватола ТВ и акватола Т-20Г ($V'_{\text{в}} = 11,9 \text{ м}^3$).

Рецептуры испытываемых ВВ и результаты взрывов приведены в табл. 3.

Как следует из табл. 3, лучшие результаты работоспособности акватолов ТВ обеспечиваются в зарядах, содержащих в составе ГНК масло промышленное и резину.

Таблица 3. Результаты экспериментальных взрывов промышленных ВВ типа акватор

№ заряда	Массовое содержание компонентов, %									Размер воронки взрыва (глубина × диаметр), м	Объем воронки взрыва, м ³	Относительная работоспособность
	селитра аммиачная	тротил	загуститель	вода	компонент горючий набухающий (5%), содержащий в том числе компоненты:							
					масло промышленное	глицерин	ферросилиций	уротропин	резина			
Акватор Т-20Г	71,7	20	0,3	8	–	–	–	–	–	1,4 × 5,7	11,9	1
2	76,7	10	0,3	8	0,5	–	–	1	–	1,15 × 7,5	16,9	1,42
3	76,7	10	0,3	8	–	0,5	–	1	–	отказ		
4	76,7	10	0,3	8	0,5	–	–	–	1	1,4 × 6,5	15,5	1,3
5	76,7	10	0,3	8	–	0,5	–	–	1	0,5 × 5	3,3	0,28
6	76,7	10	0,3	8	0,3	–	–	2	–	0,9 × 6,5	10,0	0,84
7	76,7	10	0,3	8	0,5	–	1,8	–	–	1,0 × 7,0	12,8	1,08
8	76,7	10	0,3	8	0,3	–	–	–	2	1,5 × 6,7	17,6	1,48
9	76,7	10	0,3	8	–	0,3	–	–	2	0,9 × 5,5	7,1	0,6

Несмотря на полученные положительные экспериментальные результаты очевидно, что на повестке дня перед нами стоят задачи более глубокого теоретического и экспериментального исследования вопросов формирования скважинных зарядов акваторов ТВ (установление размеров зон отвердевших компонентов, радиуса внутренней цилиндрической полости и др.), а также изучения механического действия взрыва зарядов такой формы и состава с целью определения оптимальных параметров зарядов при получении заданных размеров зон разрушения и качества горной массы с учетом наличия в скважине водного или воздушного кольцевого зазора вдоль стенки скважины.

В данной работе выполнены постановки двух задач:

- 1) теплофизической, состоящей в определении размеров зон затвердевших (закристаллизовавшихся) компонентов акваторов ТВ (селитры, тротила);
- 2) исследование воздействия на породу продуктов детонации (ПД) кольцевого цилиндрического заряда, сформированного в соответствии с выводами задачи 1.

Математическая постановка задачи 1 состоит в следующем.

В водонаполненную скважину радиуса r_3 опускается полиэтиленовый рукав толщиной r_4 с расплавом АС, тротила и воды, смешанных с ГНК-2. Между рукавом и стенкой скважины имеется водяной зазор шириной $r_5 = r_3 - r_2 - r_4$ (рис. 2). В такой постановке математическая модель будет очень сложной из-за необходимости учета функций распределения компонентов ГНК-2 в расплаве. Поэтому целесообразно рассмотреть упрощенную модель – расплав состоит из селитры, тротила и воды. Длина скважины много больше ее радиуса и решение задачи затвердевания компонентов расплава следует рассматривать как осесимметричный процесс.

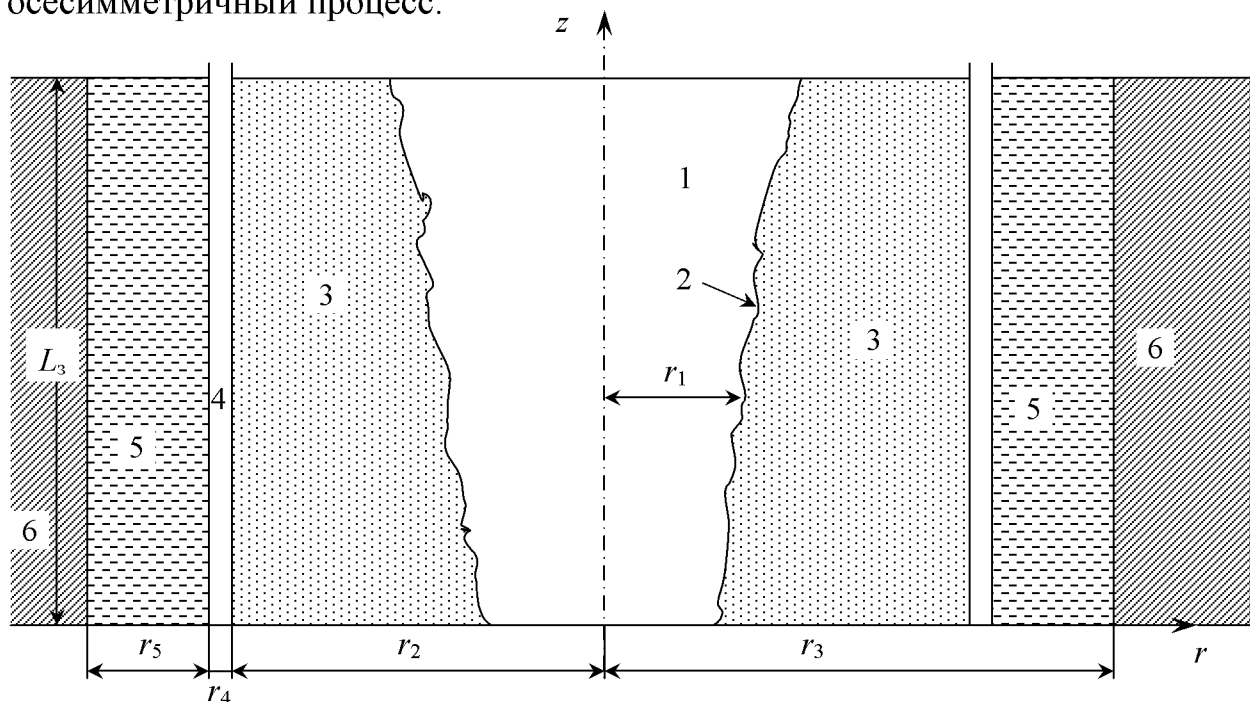


Рис. 2. Схема расположения рукава с расплавом ВВ в скважине: 1 – расплав; 2 – фронт кристаллизации; 3 – твердая фаза; 4 – полиэтиленовый рукав; 5 – вода или воздух в скважине; 6 – порода; r_1 – радиус фронта кристаллизации; r_2 – радиус заряда; r_3 – радиус скважины; r_4 – толщина рукава; r_5 – ширина водного или воздушного зазора

В начальный момент времени температура породы $T_{\text{нт}}$ и воды в скважине $T_{\text{нв}}$ одинакова: $T_{\text{нт}} = T_{\text{нв}}$. Температура расплава $T_{\text{расп}}$ в это время намного больше температуры воды и породы $T_{\text{расп}} \gg T_{\text{нв}} = T_{\text{нт}}$. Разность температур расплава и воды приводит к возникновению теплового потока из расплава через полиэтиленовый рукав в воду скважины, а из нее в породу.

Теплопередача из расплава через рукав в воду скважины и затем в породу описывается уравнениями теплопроводности [2]:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} = \frac{1}{a_i} \frac{\partial T_i}{\partial t}, \quad (1)$$

где i соответствует индексу среды; тс – затвердевшая селитра; тт – затвердевший тротил; 4, 5, 6 – рукав, вода в скважине, порода; a_i – коэффициент температуропроводности соответствующей среды ($a_i = \lambda_i / c_i \gamma_i$, λ_i – коэффициент теплопроводности, γ_i – плотность, c_i – теплоемкость); t – время; r , θ , z – координаты в цилиндрической системе координат.

Система уравнений (1) при $i = 4, 5, 6$ с учетом начальных условий позволяет определить нестационарное поле температур в средах при отсутствии твердой фазы (кристаллизации). Начальными условиями являются температуры расплава $T_{\text{расп}}$, рукава $T_{\text{нр}}$, воды в скважине $T_{\text{нв}}$ и породы $T_{\text{нт}}$ в момент времени $t=0$.

Когда на контакте рукав–расплав температура расплава снизится до температуры фазового перехода тротила, последний начнет кристаллизоваться. Температура фазового перехода тротила выше аналогичной температуры селитры, поэтому тротил будет кристаллизоваться раньше.

На движущемся фронте фазового перехода выделяется скрытая теплота превращения, которая вместе с теплом перегрева отводится через образованную твердую фазу. Теперь система трех уравнений (1) ($i = 4, 5, 6$) пополнится четвертым уравнением с $i = \text{тт}$. При охлаждении расплава до температуры фазового перехода селитры последняя также будет кристаллизоваться, а к системе (1) надо добавить пятое уравнение с $i = \text{тс}$. Одновременно с началом процесса кристаллизации к системе уравнений (1) необходимо добавить уравнения перемещения фронтов кристаллизации (уравнения процессов кристаллизации) сначала для тротила (2), а затем для селитры (3).

$$\lambda_{\text{т}} \left(\cos \theta \frac{\partial T_{\text{тт}}}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial T_{\text{тт}}}{\partial \theta} \right) = Q_{\text{с}} \gamma_{\text{с}} \frac{dr'(t)}{dt} + \lambda_{\text{р}} \left(\cos \theta \frac{\partial T_{\text{расп}}}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial T_{\text{расп}}}{\partial \theta} \right), \quad r = r'_2(t); \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{с}} \left(\cos \theta \frac{\partial T_{\text{тс}}}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial T_{\text{тс}}}{\partial \theta} \right) = Q_{\text{с}} \gamma_{\text{с}} \frac{dr(t)}{dt} + \lambda_{\text{р}} \left(\cos \theta \frac{\partial T_{\text{расп}}}{\partial r} - \frac{\sin \theta}{r} \frac{\partial T_{\text{расп}}}{\partial \theta} \right), \quad r = r(t), \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ и $\lambda_{\text{т}}$, $Q_{\text{с}}$ и $Q_{\text{т}}$, $\gamma_{\text{с}}$ и $\gamma_{\text{т}}$, $T_{\text{тс}}$ и $T_{\text{тт}}$ – коэффициенты теплопроводности, скрытая теплота кристаллизации на единицу массы, плотность, температура твердых фаз селитры и тротила соответственно; $r(t)$ и $r'(t)$ – перемещения фронтов

кристаллизации селитры и тротила. Температура $T_{\text{расп}}$ в уравнениях (2) и (3) предварительно должна определяться из системы уравнений (1) в каждый момент времени.

Поскольку тепловой контакт на поверхности раздела фаз принято считать идеальным [2], на фронтах кристаллизации справедливо выражение

$$T_{\text{тс}} [r(t), t] = T_{\text{расп}} [r(t), t]; \quad T_{\text{тт}} [r'(t), t] = T_{\text{расп}} [r_1'(t), t]. \quad (4)$$

Кроме того, необходимо учитывать еще одно условие: внутри породы вдали от скважины сохраняется начальная температура $T_{\text{нп}}$:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} T_{\text{п}}(r, t) = T_{\text{нп}}. \quad (5)$$

Таким образом, с появлением фронта кристаллизации необходимо решать нестационарную сопряженную задачу (1) с граничными условиями (2) и (3) и начальными условиями. Уравнения (2) и (3) – уравнения теплового баланса на фронте кристаллизации – позволяют определить $r(t)$ и $r'(t)$. Решение всей нестационарной сопряженной задачи дает возможность определить $T_{\text{тс}}$, $T_{\text{тт}}$, $T_{\text{рук}}$, $T_{\text{вс}}$, $T_{\text{вр}}$, $T_{\text{п}}$, $r(t)$ и $r'(t)$ ($T_{\text{рук}}$, $T_{\text{вс}}$, $T_{\text{вр}}$ – температуры рукава, воды в скважине, воды в расплаве).

Кристаллизация воды в рукаве не происходит, так как температура воды в скважине $T_{\text{нв}}$ и температура породы $T_{\text{нп}}$ выше температуры фазового перехода для воды. Такую математическую задачу можно решить численными методами.

Математическая постановка задачи 2) состоит в следующем. Пусть в горном массиве расположен вертикальный кольцевой цилиндрический заряд с внутренним радиусом r_1 , внешним r_2 в водонаполненной или заполненной воздухом скважине радиусом r_3 . Полость радиусом r_1 заполнена раствором окислителя.

Полагается, что заряд детонирует мгновенно. При этом во всем его объеме устанавливается давление продуктов детонации (ПД) P_n и плотность их $\rho_n = \rho_{\text{вв}}$.

Уравнения движения в переменных Эйлера в цилиндрической системе координат (r, z, θ) для продуктов детонации, воды и горной породы имеют вид

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}, \quad u = \frac{\partial r}{\partial t}. \quad (6)$$

Закон сохранения массы среды

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho u)}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

где $\sigma_r = S_r - p$, $\sigma_\theta = S_\theta - p$, $\sigma_z = S_z - p$. (8)

Уравнение энергии в дифференциальной форме имеет вид

$$\dot{E} - \bar{V}(S_r \dot{\epsilon}_r + S_z \dot{\epsilon}_z + p \dot{\bar{V}}) = 0, \quad \bar{V} = \frac{V}{V_0}. \quad (9)$$

Здесь использованы следующие обозначения: ρ – плотность среды; t – время; S_r, S_θ, S_z и $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ – компоненты тензора и девиатора тензора напряжений; E – внутренняя энергия среды; p – среднее давление; V и V_0 – текущий и начальный удельный объемы. Для компонентов скоростей деформации выполняются соотношения

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\partial u}{\partial r}; \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{u}{r}; \quad \dot{\epsilon}_z = 0. \quad (10)$$

Продукты детонации расширяются в соответствии с двучленной изэнтропой [3]

$$p = A\rho^{n_0} + B\rho^{\gamma_{n+1}}. \quad (11)$$

Константы A, B, n_0, γ_0 , входящие в это уравнение, определяются из системы уравнений, состоящей из уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} k_n = n_0 + \frac{B\rho_n^{\gamma_0}}{\rho_n}(\gamma_0 - n_0 + 1), \quad \gamma_0 = k_0 - 1; \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \frac{p_n}{\rho_n(n_0 - 1)} + \frac{B\rho_n^{\gamma_0-1}(n_0 - \gamma_0 - 1)}{(\gamma_0 - 1)(n_0 - 1)} \end{array} \right. \quad (13)$$

и уравнения (11) при детонационных характеристиках ВВ в точке Чепмена–Жуге $p_n, \rho_n; Q$ – теплота взрывчатого превращения; k_n – показатель политропы.

Вода моделируется экспериментально полученным уравнением Тэта

$$p = \frac{\rho_{01} C_0^2}{\beta} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\beta - 1 \right], \quad (14)$$

где ρ_{01} и C_0 – начальная плотность и скорость звука при атмосферном давлении p_0 ; β – экспериментальная константа.

Уравнение состояния для воздуха принято в виде энергетического уравнения для идеального газа

$$E = \frac{P}{(\chi - 1)\rho} \rightarrow \rho = \frac{P}{(\chi - 1)E}, \quad (15)$$

где $\chi = \text{const}$, для воздуха $\chi = 1,4$.

Горная порода моделируется упругопластической дилатансионной моделью С. М. Капустянского и В. Н. Николаевского [4, 5], по которой полагается, что в зоне упругих деформаций изменение напряжений связано со скоростями закона Гука в конвективной форме:

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} + u \frac{\partial \tau}{\partial r} = 2G \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right); \quad (16)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} = -K \left(\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right), \quad (17)$$

где $\tau = \sigma_r - \sigma_\theta$; G – модуль сдвига; K – коэффициент объемного сжатия.

Необратимые деформации возникают при выполнении закона сухого трения в форме Треска

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = \sigma_s, \quad (18)$$

где σ_s – предел прочности при сжатии, и связаны с напряжением зависимостью

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \Lambda \left| \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} \right|, \quad (19)$$

где скорость дилатансии Λ имеет вид

$$\Lambda = \begin{cases} \Lambda_0 \exp(-a_0 \text{sign}(R) \sqrt{|R|}) & \text{при } R \geq b, \tau < \sigma_s; \\ \Lambda_1 \exp(-a_1 \text{sign}(R) \sqrt{|R|}) & \text{при } R < b, \tau \geq \sigma_s, \end{cases} \quad (20)$$

где $R = (p - \tau)/3$; b , a_0 , Λ_0 , Λ_1 – экспериментальные коэффициенты, $a_1 = a_0 + \ln(\Lambda_1/\Lambda_0 \sqrt{b})$.

Начальными условиями задачи являются следующие:

$$\begin{aligned} u = 0, \quad p = p_n & \text{ при } r_1 \leq r < r_2; \\ u = 0, \quad p = 0, \quad \rho = \rho_{0_1} & \text{ при } 0 \leq r < r_1; \\ u = 0, \quad p = 0, \quad \rho = \rho_{0_2} & \text{ при } r_2 \leq r < r_3; \\ u = 0, \quad p = 0, \quad \rho = \rho_{0_3} & \text{ при } r \geq r_3; \end{aligned} \quad (21)$$

где ρ_{0_1} – плотность раствора окислителя в цилиндрической полости радиуса r_1 ; ρ_{0_2} – плотность воздуха или воды в кольцевом зазоре вдоль стенки скважины; ρ_{0_3} – начальная плотность горной породы.

Граничные условия следующие:

- 1) внутренняя поверхность заряда свободна: $u = 0$, $p = 0$ при $r = r_1$;
- 2) на оси симметрии при $r = 0$ выполняется условие $u = 0$;
- 3) на контактных границах между зарядом и внутренней полостью ($r = r_1$), между зарядом и водным (воздушным) зазором ($r = r_2$) и зазором и породой ($r = r_3$) скорость и нормальные радиальные напряжения непрерывны.

Заметим, что если внутри кольцевого цилиндрического заряда находится раствор окислителя, то задача усложняется в связи с необходимостью учитывать четвертую взаимодействующую среду, для которой примем уравнение состояния в виде уравнения Тэта (14) со своей начальной плотностью ρ_{01} . Движение этой жидкости также подчиняется законам (6)–(10).

Численное решение поставленной математической задачи позволяет получить основные закономерности возникающих нестационарных волновых процессов при взрывах таких зарядов и оптимизировать величину зазоров для получения зоны разрушения необходимых размеров.

1. *Кутузов Б. Н., Абсатаров С. Х., Гончаров А. Г.* Опыт применения водосодержащих ВВ местного изготовления // Горный журнал. – № 2. – 1996. – С. 22–25.

2. *Лыков А. В.* Теория теплопередачи. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

3. *Физика взрыва* / Под ред. Л. П. Орленко. – 3-е изд., перераб. – М.: Физматгиз, 2002. – Т. 1. – 832 с.

4. *Капустянский С. М., Николаевский В. Н.* Количественная формулировка упругопластической дилатансионной модели (на примере песчаника) // Изв. АН СССР. МТТ. – 1984. – № 4. – С. 113–124.

5. *Капустянский С. М., Николаевский В. Н.* Параметры упругопластической дилатансионной модели для геоматериалов // ПМТФ. – 1985. – № 6. – С. 145–150.