

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ГОРЯЧЕЛЮЩЕГОСЯ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ПОЛИЭТИЛЕНОВОМ РУКАВЕ В СКВАЖИНЕ

*В. В. Лотоус, инж. (ОАО «Полтавский ГОК»),  
Д. Д. Юрченко, инж. (Институт технической теплофизики НАНУ)*

*Викладені результати аналізу чисельного моделювання теплового стану розплавленої вибухової речовини при її затвердінні в свердловині. Отримані поля температур і графіки температур при остиганні розплаву вибухової речовини у вигляді функцій часу в точках, розміщених на осі заряду, половині радіуса і на поверхні заряду на фіксованих віддальях від дна свердловини.*

Высокая стоимость и дефицит промышленных индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ) привели к более широкому применению смесевых ВВ местного приготовления, представляющих собой многокомпонентные системы. Одним их технологических процессов при изготовлении таких ВВ является размещение расплава ВВ в полиэтиленовом рукаве в скважине, который в дальнейшем затвердевает.

В работе [1] выполнены физическая и математическая постановки теплофизической задачи затвердевания расплава ВВ и отмечено, что такую математическую задачу можно решить только численными методами.

Целью настоящей работы является математическое моделирование теплового состояния расплава ВВ в рукаве при его остывании в скважине и использование результатов моделирования для определения времени готовности заряда к взрыву.

В водонаполненную скважину радиусом  $r_3$  опускается полиэтиленовый рукав толщиной  $r_4$  с расплавом аммиачной селитры, тротила и воды. Между рукавом и стенкой скважины имеется водяной зазор шириной  $r_5 = r_3 - r_2 - r_4$  (рис. 1). Длина скважины намного больше ее радиуса, и процесс затвердевания компонентов расплава следует рассматривать как осесимметричный процесс.

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, движущегося из расплава через полиэтиленовый рукав в воду скважины, а из нее – в породу. Кристаллизация воды в рукаве не происходит, так как температура воды в скважине  $T_{\text{нв}}$  и температура породы  $T_{\text{нт}}$  выше температуры фазового перехода для воды.

Уравнения теплопроводности, начальные и граничные условия задачи приведены в [1].

Для численного моделирования процессов затвердевания расплава ВВ выбран метод конечных элементов (МКЭ).

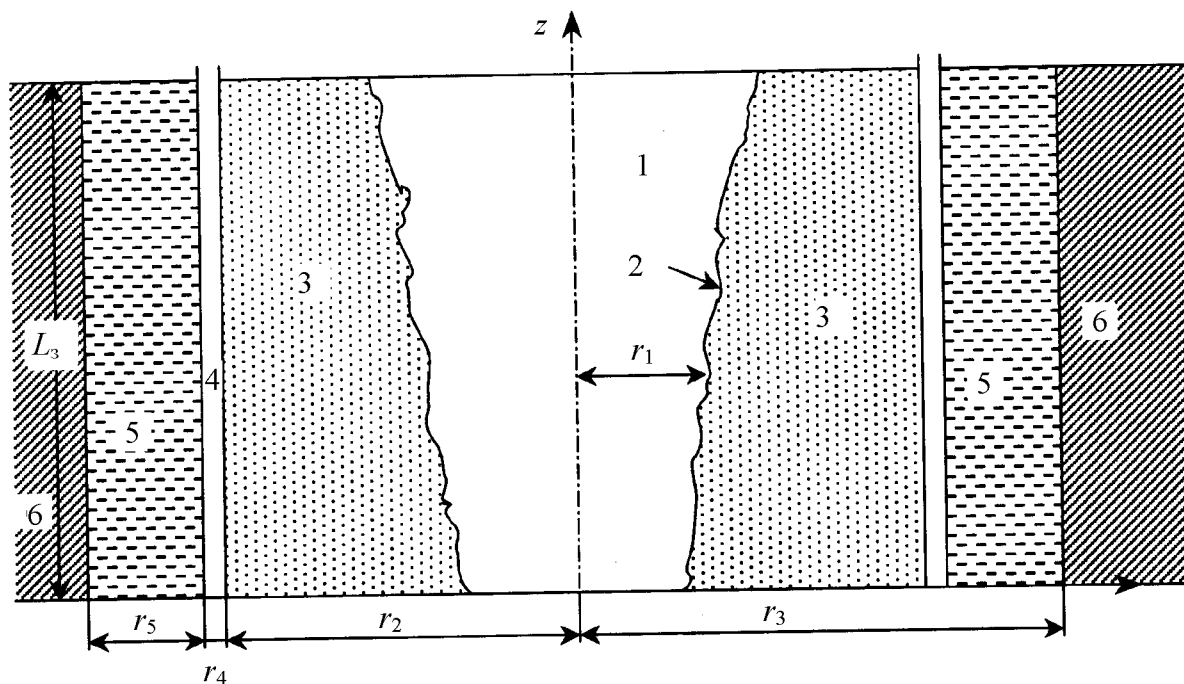


Рис. 1. Схема расположения рукава с расплавом ВВ в скважине: 1 – расплав; 2 – фронт кристаллизации; 3 – твердая фаза; 4 – полиэтиленовый рукав; 5 – вода или воздух в скважине; 6 – порода;  $r_1$  – радиус фронта кристаллизации;  $r_2$  – радиус заряда;  $r_3$  – радиус скважины;  $r_4$  – толщина рукава;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

Метод конечных элементов является наиболее современным и распространенным методом численного решения дифференциальных уравнений, встречающихся в физике и технике. Область применения этого метода простирается от анализа напряжений в конструкциях самолетов и автомобилей до расчета атомных электростанций.

В первых публикациях с помощью МКЭ решались задачи распространения тепла, затем он был применен к задачам гидродинамики. В последующем область применения МКЭ существенно расширилась и, наконец, он из численной процедуры решения задач превратился в общий метод численного решения дифференциального уравнения или системы дифференциальных уравнений.

Метод основан на идее аппроксимации непрерывной функции (температуры, давления, перемещения и т.д.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых элементами. В качестве функции элемента чаще всего применяется полином [2].

Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области. В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна, и нужно определить значение этой величины (например, температуры) в нескольких внутренних точках области. Дискретная модель строится в предположении, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны.

Важными преимуществами МКЭ, позволившими выбрать этот метод для решения данной задачи, являются следующие:

1) свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет применять метод к телам, состоящим из нескольких материалов, то есть можно рассматривать как отдельные материалы расплав акватола ТВ, полиэтиленовый рукав, воду в зазоре скважины и породу;

2) криволинейная область может быть аппроксимирована с помощью прямолинейных элементов или описана точно с помощью криволинейных элементов, то есть осевая симметрия рассматриваемой задачи не представляет никакой трудности при построении дискретной модели;

3) размеры элементов могут быть переменными, что позволяет укрупнять или изменять сеть разбиения области на элементы;

4) с помощью МКЭ можно рассматривать граничные условия с разрывной поверхностной нагрузкой, а также смешанные граничные условия;

5) МКЭ позволяет решать задачи (системы уравнений) с учетом изменения искомых переменных величин во времени.

Исследование процесса затвердевания расплавленного ВВ численным методом осуществлялось для следующей модели.

В скважину высотой 18 м заряжается полиэтиленовый рукав с расплавленным ВВ, состоящим из 72 % аммиачной селитры, 20 % тротила и 8 % воды (по массе). Высота заряда 12 м, высота забойки 6 м, диаметр скважины 0,25 м. Окружающая скважину порода – железистый кварцит с температурой у дна скважины 11 °С, на поверхности породы – 20 °С. Температурный градиент в породе принят в виде линейной зависимости. Забойка представляет собой столб кусков породы (железистого кварцита) с пористостью 0,1.

Теплофизические параметры составных частей модели [3, 4] приведены в таблице.

| Среда                        | Вода | Воздух | Аммиачная селитра | Тротил | Железистый кварцит | Забойка |
|------------------------------|------|--------|-------------------|--------|--------------------|---------|
| Плотность, кг/м <sup>3</sup> | 997  | 1,3    | 1650              | 1660   | 4008               | 3767    |
| Теплоемкость $C$ , дж/К      | 4181 | 6,95   | 416,5             | 247,0  | 232                | 183     |
| Теплопроводность, Вт/м·К     | 0,62 | 0,239  | 1,0467            | 0,134  | 3,8                | 3,45    |

Температура затвердевания тротила 77,5 °С [3].

Теплоемкость расплава ВВ определялась по формуле [3]

$$C_{\text{расп}} = K_{\text{АС}}C_{\text{АС}} + K_{\text{тр}}C_{\text{тр}} + K_{\text{В}}C_{\text{В}}, \quad (1)$$

где  $K_{\text{АС}}$ ,  $K_{\text{тр}}$ ,  $K_{\text{В}}$  – содержание соответственно аммиачной селитры, тротила и воды в расплаве;  $C_{\text{АС}}$ ,  $C_{\text{тр}}$ ,  $C_{\text{В}}$  – их теплоемкости.

Начальная температура рукава принималась равной начальной температуре расплава ВВ. Предварительное моделирование показало, что рукав не оказывал влияния на тепло-массообмен между расплавом и породой. Поэтому в дальнейшем в модели его можно не учитывать.

Численное моделирование процессов затвердевания ВВ осуществлялось для трех вариантов моделей:

заряд заполняет весь объем скважины;

между зарядом и скважиной имеется зазор, заполненный водой;

между зарядом и скважиной имеется зазор, заполненный воздухом.

Моделирование осуществлялось с помощью универсального программного комплекса ANSYS [5]. Это эффективный программный комплекс, включающий параллелизацию алгоритмов решения, основанную на применении методов конечных элементов в сочетании с уникальными методами автоматизированного разбиения областей моделирования задач любой геометрической сложности. Этот пакет позволяет решать контактные задачи – поверхность в поверхность для всех типов элементов первого и второго порядков с реальным представлением кривизны, выполнять тепловой анализ: стационарность, нестационарность, теплопроводность, радиацию, конвекцию, фазовый переход. Одной из областей применения пакета ANSYS является энергетика с ее задачами тепло-массопереноса. ANSYS первым сертифицирован согласно серии стандартов ISO 9000, 9001.

Принято, что окончанием счета задачи моделирования является такое приближение температуры расплава ВВ к начальной температуре породы, при котором различие между ними составит 1..2 °С.

Аммиачная селитра затвердевает при 169 °С, поэтому при температуре расплава ВВ 95 °С она «плавает» в виде отдельных затвердевших частиц. Представляет интерес время, когда температура расплава по оси заряда достигнет температуры затвердения тротила – 77,5 °С. На рис. 2–4 приведены графики изменения температуры расплава ВВ со временем в трех точках по радиусу заряда: на поверхности заряда, половине радиуса и в центре заряда на высоте 2, 6 и 12 м от дна скважины.

Из этих графиков можно определить время, за которое температура расплава снизится до 75 °С, то есть до температуры, когда тротил затвердел. Это время показано для трех моделей в сечениях 2, 6 и 12 м на половине радиуса и на оси заряда (рис. 5).

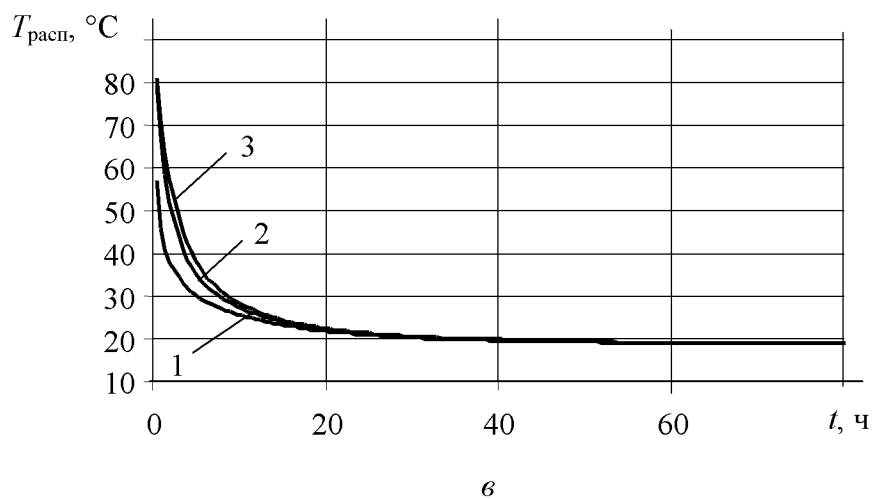
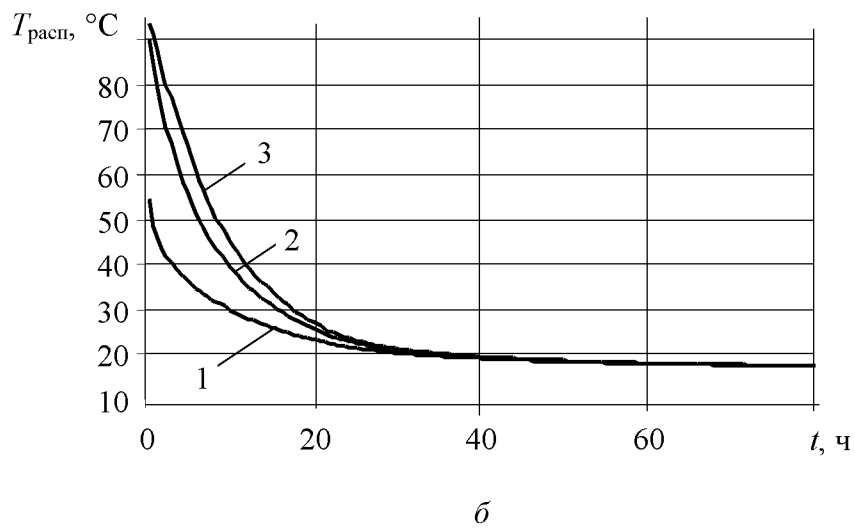
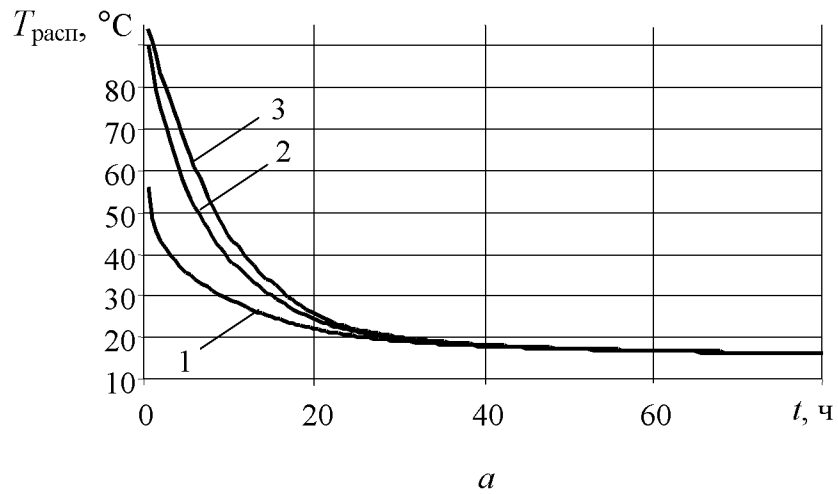
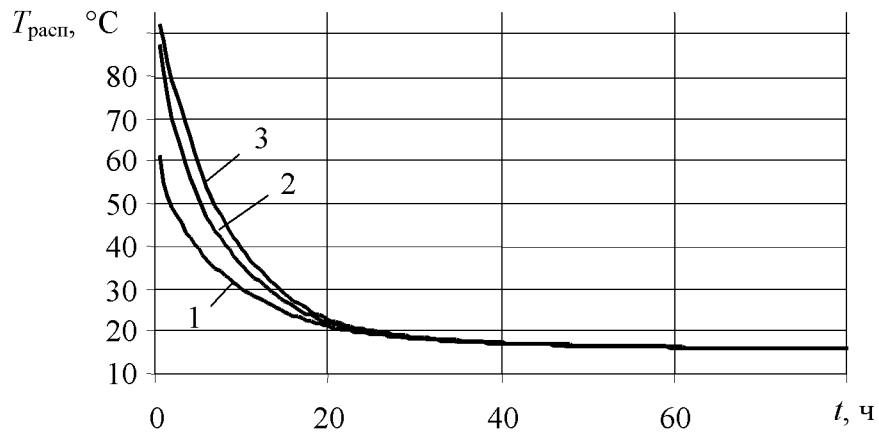
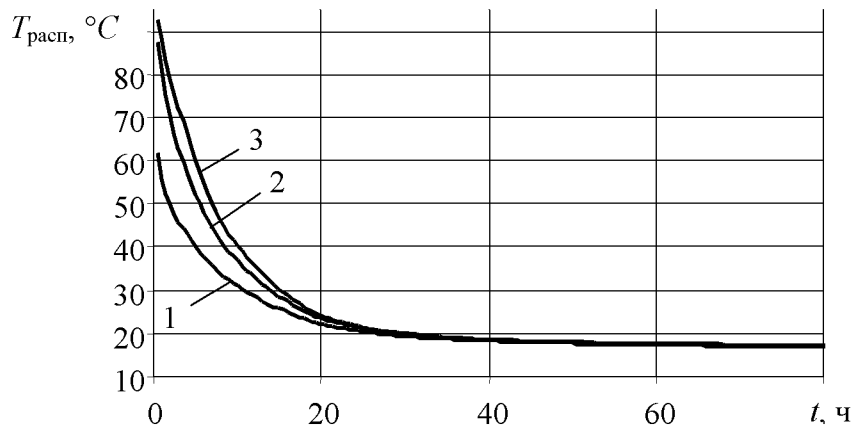


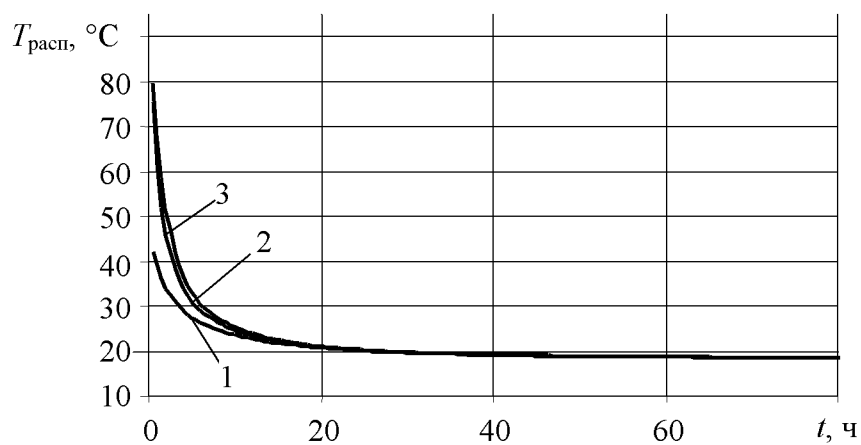
Рис. 2. Зависимость температуры расплава ВВ  $T_{\text{расп}}$  от времени  $t$  при отсутствии зазора между зарядом и породой для точек, размещенных от дна скважины на высоте 2 м (*a*), 6 м (*б*), 12 м (*в*): 1 – на поверхности заряда; 2 – на половине радиуса заряда; 3 – в центре заряда



а



б



в

Рис. 3. Зависимость температуры расплава ВВ  $T_{\text{расп}}$  от времени  $t$  при зазоре между зарядом и породой, заполненной водой, для точек, размещенных от дна скважины на высоте 2 м (а), 6 м (б), 12 м (в): 1 – на поверхности заряда; 2 – на половине радиуса заряда; 3 – в центре заряда

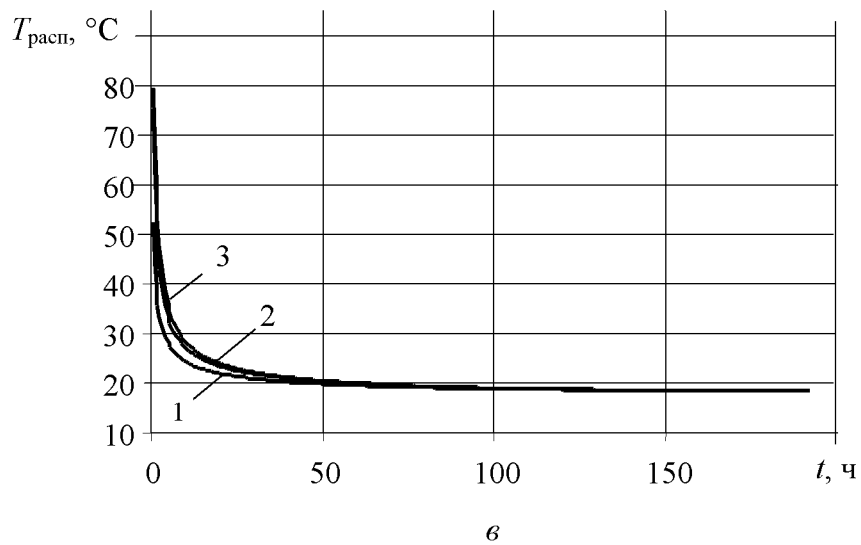
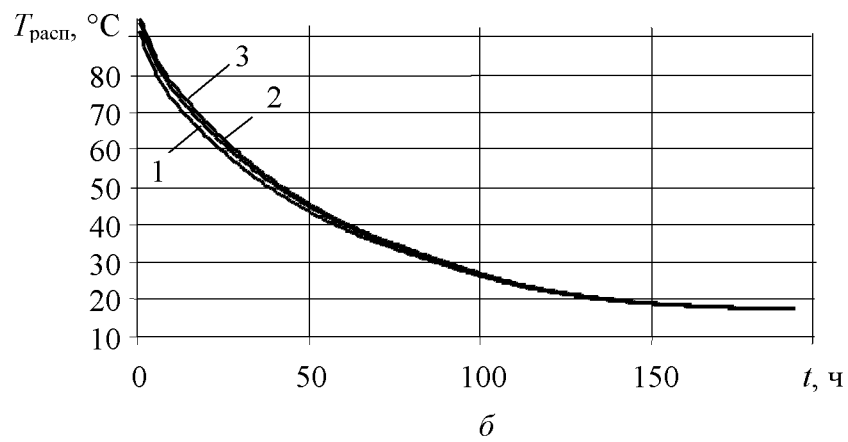
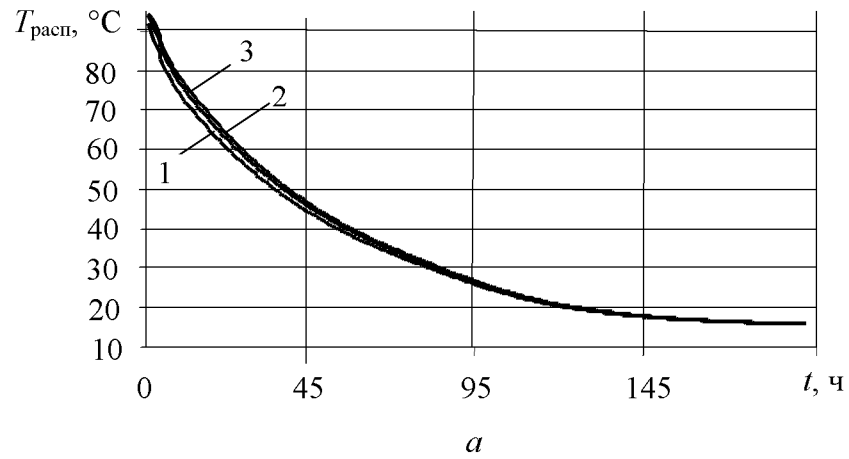


Рис. 4. Зависимость температуры расплава ВВ  $T_{\text{расп}}$  от времени  $t$  при воздушном зазоре между зарядом и породой для точек, размещенных от дна скважины на высоте 2 м (а), 6 м (б), 12 м (в): 1 – на поверхности заряда; 2 – на половине радиуса заряда; 3 – в центре заряда

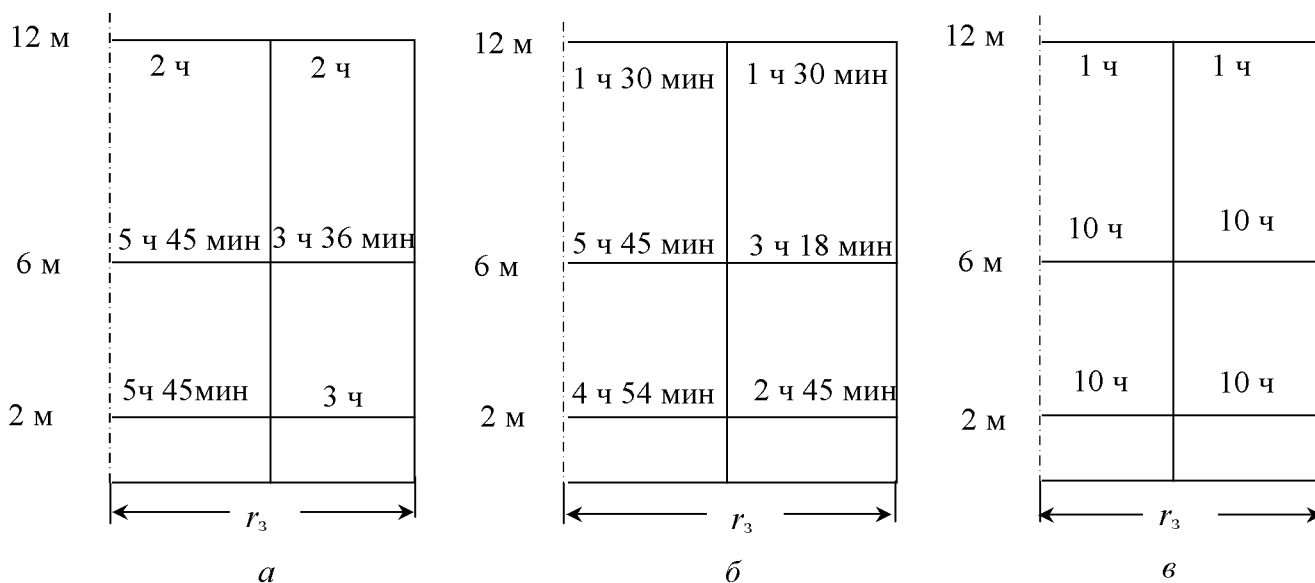


Рис. 5. Время охлаждения расплава ВВ до 75 °С: *а* – между зарядом и породой зазора нет; *б* – в зазоре между зарядом и породой вода; *в* – в зазоре между зарядом и породой воздух;  $r_3$  – радиус заряда

В скважине без зазора и с зазором, заполненным водой (см. рис. 2 и 3), температура на поверхности заряда в течение первого часа опускается до температуры 55...60 °С, то есть кроме частиц селитры появляется затвердевший тротил.

На расстоянии 2 м от дна скважины температура 75 °С в центре заряда в обоих вариантах заряжания достигается за одно и то же время – 5 ч 45 мин. На половине радиуса заряда (на высоте 6 м) температура 75 °С достигается при зазоре, заполненном водой (см. рис. 3), на 1 ч раньше, чем при отсутствии зазора (соответственно за 4 ч 54 мин и 5 ч 40 мин) (см. рис. 2). Следует отметить, что в верхней части заряда при всех вариантах заряжания происходит очень быстрое остывание расплава до 75 °С – на протяжении 1...2 ч.

Из рис 2, 3, 5*а* и *б* следует, что на высоте 2 м остывание расплава до половины радиуса заряда происходит быстрее, чем на высоте 6 м. Это объясняется тем, что охлаждение расплава ВВ происходит как через боковую поверхность скважины, так и через ее дно. Отметим, что нагревание породы в направлении дна скважины значительно меньше, чем в боковом направлении.

Медленнее всего (10 ч) процесс затвердевания протекает при наличии зазора, заполненного воздухом (рис. 5, *в*). Это связано с тем, что в зазоре возникает конвекция, то есть нагретый воздух поднимается вверх к забойке и через нее отдает тепло в окружающую среду, вследствие чего породы нагреваются намного медленнее, чем в случаях, показанных на рис. 5, *а* и *б*.

Время остывания заряда для всех вариантов заряжания примерно одинаково – около 80 часов. Самое быстрое остывание расплава ВВ наблюдается в скважине с зазором, заполненным водой (см. рис. 3), самое медленное – в скважине с зазором, заполненным воздухом (см. рис. 4). Так,



после первого часа остывания расплава по оси заряда с зазором, заполненным водой, температура расплава опускается до 80 °С, в скважине без зазора – до 82,5 °С; в скважине с воздушным зазором – до 84,9 °С.

Из рис. 2–4 следует, что охлаждение расплава ВВ до температуры 15...20 °С для заряда с зазором, заполненным водой, произойдет через 29 ч, для заряда без зазора – через 37 ч, с воздушным зазором – через 90,5 ч; охлаждение расплава ВВ до исходной температуры породы произойдет соответственно через 58, 74,5 и 181 ч. В различные моменты времени температура затвердевания расплава ВВ и температура породы на разных высотах от дна скважины различна. Это обусловлено наличием градиента температуры породы между дном скважины и поверхностью.

Таким образом, метод численного моделирования позволяет определять в любой момент времени температуру остывания и температурные поля расплава ВВ в скважине и время готовности заряда к использованию при различных условиях остывания и различных тепловых свойствах ВВ и породы.

Впервые выполнено численное моделирование процесса затвердевания расплава ВВ в скважине при различных вариантах модели.

Из графиков температур затвердевания расплава для всех вариантов модели можно определить время, на котором возможно прервать процесс затвердевания и осуществить взрыв заряда.

Охлаждение заряда до температуры 75 °С, когда аммиачная селитра и тротил уже затвердели, происходит как в скважине с зазором, заполненным водой, так и в скважине без зазора, в течение ~ 6 часов, что позволяет осуществлять взрывы за одну смену работающих.

1. *Лотоус В. В.* Математическая постановка задач о моделировании процессов формирования и взрыва скважинных зарядов акватола ТВ в рукавах // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Серія “Гірництво”: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2003. – Вип. 9. – С. 8–17.

2. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 382 с.

3. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – 2-е изд. – М.: Наука, 1972. – 349 с.

4. *Таблицы физических величин.* Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

5. *ANSYS Basic Analysis Procedure Guide.* Rel. 54/Ar. Inc., Houston, 1997.