

УДК 622.831.3:622.241.54

Калугина Н.А., канд. техн. наук., ст. науч. сотр.
(ИФГП НАН Украины),

Сапегин В.Н., канд. техн. наук., науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В МАЛО СЖИМАЕМОМ РАБОЧЕМ АГЕНТЕ ПРИ СБРОСЕ ЕГО ИЗ СКАЖИНЫ

Калугіна Н.О. канд. техн. наук., ст. наук. співроб.
(ИФГП НАН України),

Сапегін В.М., канд. техн. наук., науч. співроб.
(ИГТМ НАН України)

ХАРАКТЕР ЗМІНИ ТИСКУ У МАЛО СТИСНЕННОМУ РОБОЧОМУ АГЕНТІ ПРИ ЙОГО СКІДАННІ ІЗ СВЕРДЛОВИНИ

Kalugina N.A., Ph.D (Tech), Senior Researcher
(IFGP NAS of Ukraine),

Sapegin V. N., Ph.D (Tech), Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

NATURE OF PRESSURE CHANGE IN FEW PRESSURIZED WORKING AGENT AT HIS DUMPING FROM BORE HOLE

Аннотация. Проанализированы возможности использования различных рабочих агентов для инициирования газовой выделения из газоносной среды. Показано, что перспективными рабочими агентами являются однородные вода и газ, в которых большая скорость распространения звука. Газожидкостные смеси и газы с малой скоростью звука в них и большой сжимаемостью малоперспективны, так как создать при сбросе давления из скважин в таких средах большие скорости изменения давления невозможно. Проведенный анализ показал, что универсальных рабочих агентов, эффективных в различных горно-геологических условиях, нет. Показано, что скорость изменения давления в скважине определяется, в основном, скоростью распространения возмущений в рабочем агенте, величиной давления рабочего агента перед его сбросом и длиной скважины. Основным параметром, определяющим величину максимальных растягивающих напряжений в газоносной среде, является время падения давления в рабочем агенте. Получены для мало сжимаемого рабочего агента по методу бегущей волны аналитические зависимости изменения давления от времени и скорости его изменения при сбросе давления из скважины. Из анализа теоретической закономерности изменения радиальных растягивающих напряжений следуют различные варианты управления процессом инициирования разрушением газоносной среды.

Ключевые слова скорость изменения давления, растягивающие напряжения, рабочий агент, скважина, сброс давления.

Для инициирования газовой выделения из угольных пластов используют следующие рабочие агенты: однородную жидкость (воду) или воду с различными добавками, изменяющими ее вязкость (водные растворы полиакриламида с различной вязкостью) [1]; однородный собственный природный газ [1]; однородный газ и однородную воду в отдельной фазе [2]; воздух и газожидкостные

среды (двухфазные), включающие в себя жидкость, содержащую в себе различную концентрацию газа в смеси (пузырьки воздуха или метана) [3]; пену с различным содержанием газа (6-96%) и добавками поверхностно активных веществ; жидкий азот, сжатый воздух, сжатый воздух и комбинированное воздействие сжатого воздуха и воды и другие. Самым распространенным рабочим агентом, который применяется для инициирования газовыделения, является вода.

Характер изменения давления и скорость распространения нестационарных возмущений в вышеперечисленных рабочих агентах во многом определяется их свойствами и в основном скоростью распространения звука (Самойлович Г.С., 1980 г.). Для мало сжимаемых газов и жидкостей скорость звука может быть большой, а сильно сжимаемых – наоборот. Чем выше скорость звука в среде, тем меньше ее сжимаемость и наоборот. Если плотность смеси большая, а упругость смеси определяется упругостью воздуха, то скорость распространения звука в смеси должна быть малой. Быстрее всего будет падать давление в однородных жидкостях (вода), в газах оно падает в 3 – 4 раза медленнее (исключение водород 1300 м/с и гелий 1500 м/с) и еще медленнее оно падает в газожидкостных смесях с большой объемной концентрацией газа в жидкости и наоборот (Самойлович Г.С., 1980).

Таким образом, перспективными с точки зрения инициирования воздействия являются однородная жидкость или жидкость с малым содержанием газа в ней и однородный газ или газ с небольшим содержанием жидкости, когда размер их частиц небольшой и скорость их приближается к скорости течения газа. С точки зрения быстрого изменения давления при сбросе рабочего агента из скважины то, очевидно, это будет однородная жидкость (вода), так как скорость распространения звука в жидкости максимальная.

Вопросу распространения нестационарных волн давления в жидкостях, газах, газожидкостных смесях и в твердых телах посвящено множество работ. Истечение газов из бесконечных каналов и каналов с тупиковой частью изучено в работах (Ландау Л.Д., 1954), (Христианович С.А., 1953), (Станюкович К.П., 1971), (Зауэр, 1969) и др.. В работе Зауэра приведены основы расчета нестационарных течений газов в бесконечно длинной трубе, в трубе с одним тупиком и открытой частью, и в трубе, закрытой с обоих концов. Случай падения давления в газожидкостной смеси, при импульсно-волновом возмущении в скважине, рассмотрен в работе [3].

Основное требование при подаче рабочего агента состоит в том, чтобы величина внутреннего давления в скважинах не превышала давления гидроразрыва для углепородного массива, составляющего величину $(0.7-0.8)\gamma \cdot H$ [1]. Неэффективно подавать давление в скважину в импульсном режиме даже при большой ее амплитуде в течение непродолжительного времени, соизмеримого со скоростью упругой волны в массиве, так как массив не успевает отслеживать быстрое изменение нагрузки. В этом случае скорость изменения давления значительно выше скорости деформирования упругой среды, и величина динамических напряжений будет небольшая. Это подтверждается работами «Крылова

А.Н., 1950 г. и Филиппова А.П., 1978 г.». Если упругое тело конечной формы и время действия давления меньше времени периода собственных колебаний упругого тела необходим учет эффекта динамики. Упругий материал может выдерживать динамические давления, превосходящие статические, если время действия давления меньше времени двойного прохождения упругой волны по массиву, (Огибалов П.М., 1963). Если время действия давления превышает время, в течение, которого упругая волна дважды проходит по телу, необходим учет эффекта отраженной волны. Полное время процесса падения давления в скважине складывается из времени открытия задвижки и времени, в течение которого давление в рабочем агенте упадет до атмосферного или до давления газа в растущих трещинах перед их отрывом от массива [4]. Время открытия задвижки не должно превышать суммарного времени, в течение которого волна понижения давления дойдет до тупика скважины и, отразившись от него, дойдет до открытого ее конца. Если задвижка не успеет открыться, когда отраженная волна придет из тупика скважины к открытому ее концу, то произойдет либо полный, либо неполный гидравлический удар по задвижке. Задвижка будет испытывать значительный динамический напор и одновременно произойдет само погашение волны понижения давления (падающей и отраженной) и, как следствие, это приведет к недостаточной величине скорости изменения давления необходимой для инициирования разрушения упругой среды в прискважинной зоне. Медленное открытие (сброс давления) задвижки создает в скважине режим, близкий к статическому режиму и потому создать большой перепад давления во времени в этом случае просто невозможно. Время открытия и закрытия задвижки учесть теоретически очень сложно, особенно, когда это происходит за малые периоды времени. Для жидкости время открытия задвижки определяется из работы [5].

Рассмотрим процесс изменения давления $p(x,t)$ во времени в скважине, пробуренной по простиранию либо в крест простирания угольного пласта, заполненной однородной жидкостью (водой) при избыточном давлении P_0 и мгновенном открытии задвижки (Зауэр, 1969). Известно, что вода, мало сжимаемая среда и потому скорость распространения звуковой волны \bar{a} в ней практически не зависит от давления p_0 , является величиной постоянной, и представляет собой простую волну понижения давления, распространяющуюся по неподвижной жидкости, (Станюкович К.П., 1971).

Запишем волновое уравнение в случае бесконечного цилиндрического канала скважины для времени $t \in (0, \infty)$ и $x \in (-\infty, +\infty)$, (Зауэр, 1969).

$$\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} = \bar{a}^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{Начальные условия задачи: } p(x,0) = p_0; \quad \frac{\partial p(x,0)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Общее решение уравнения (1) получено Даламбером:

$$p(x,t) = \frac{1}{2} \cdot (p_0(x - \bar{a} \cdot t) + p_0(x + \bar{a} \cdot t)) + \frac{1}{2 \cdot \bar{a}} \int_{x-\bar{a}t}^{x+\bar{a}t} \frac{\partial p(x,0)}{\partial t} \cdot dx . \quad (3)$$

С учетом начальных условий (2) уравнение (3) переписывается как

$$p(x,t) = \frac{1}{2} \cdot (p_0(x - \bar{a} \cdot t) + p_0(x + \bar{a} \cdot t)) . \quad (4)$$

В реальных условиях в скважине длиной L находится жидкость, занимающая определенную ее длину ℓ , в пределах $0 < x < \ell$, в которой создается избыточное давление p_0 . Слева скважина закрыта (тупик), а справа скважина открыта, но перекрыта задвижкой, которая открывается за бесконечно малый промежуток времени, чтобы избежать гидравлического удара по ней за счет отраженной волны идущей из тупика скважины. Граничные условия по давлению, на открытом конце скважины, будут таким $p_0(L,t) = 0$. Для того чтобы обеспечить граничные условия на открытом конце скважины и свести задачу с граничными и начальными условиями к задаче с начальными условиями, при многократном отражении упругих волн в жидкостях и газах, следует для открытого конца скважины нечетным образом продолжить распределение плотности (давления) и четным – распределение скорости, то есть применить известный метод продолжений начальных условий [6]. В рамках данной задачи решение ищется не вдоль всей оси, а в скважине конечной длины L с заданными граничными условиями. В итоге задача опять решается вдоль всей оси, однако, начальные условия при этом следует периодически продлить на бесконечность (в общем случае с периодом $4L$), имитируя тем самым граничные условия в скважине.

Для скважины полностью заполненной жидкостью начальное распределение давления p_0 на оси x в момент времени $t = 0$ представим в виде

$$p(x,t) = \begin{cases} p_0, & 0 < x < \ell \\ 0, & x > \ell \end{cases} .$$

Расчет изменения давления во времени для скважины длиной $L = 10$ м при мгновенном открытии задвижки и без учета гидравлических потерь приведен на рис. 1. Исходные данные для расчета: $p_0 = 30 \cdot 10^5$ Па; $L = 10$ м.

Из рис. 1 видно, что после открытия задвижки упругая волна понижения давления движется по жидкости к закрытому концу скважины и, отразившись от ее тупика, как волна понижения давления, она не меняет своего знака по закону отражения упругих волн и взаимодействует с отраженной волной от открытого конца скважины.

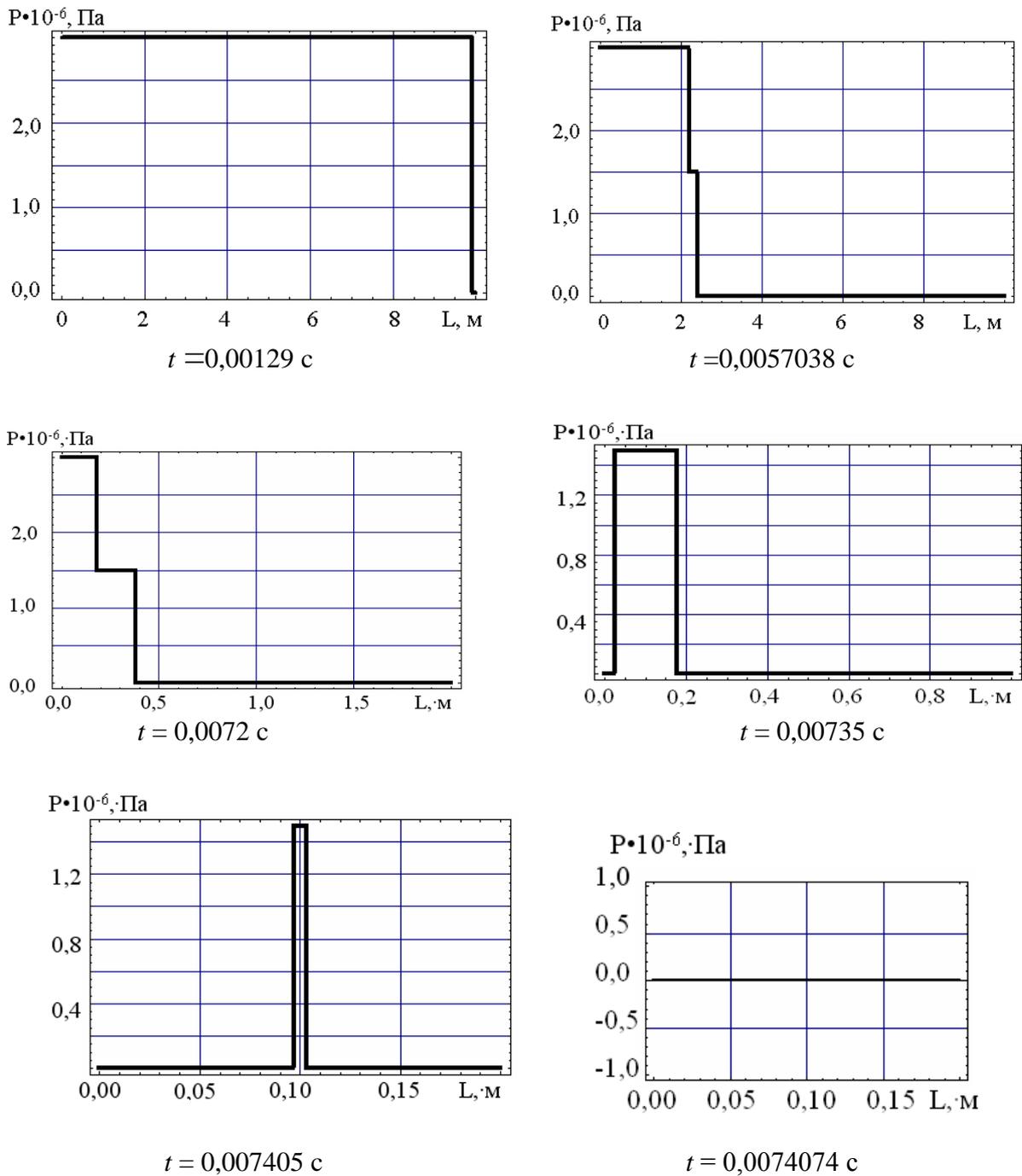


Рисунок 1 – Характер выравнивания давления во времени в воде после сброса давления в скважине длиной 10 м в различные моменты времени

Можно упрощенно решить эту задачу, принимая, что время понижения t_n давления в жидкости определяется по формуле $t_n = L/\bar{a}$ «Станюковича К.П., 1971 г». Результаты расчета при следующих исходных данных: $\bar{a} = 1350 \text{ м/с}$; $L = 10 \text{ м}$ приведены на рис. 2.

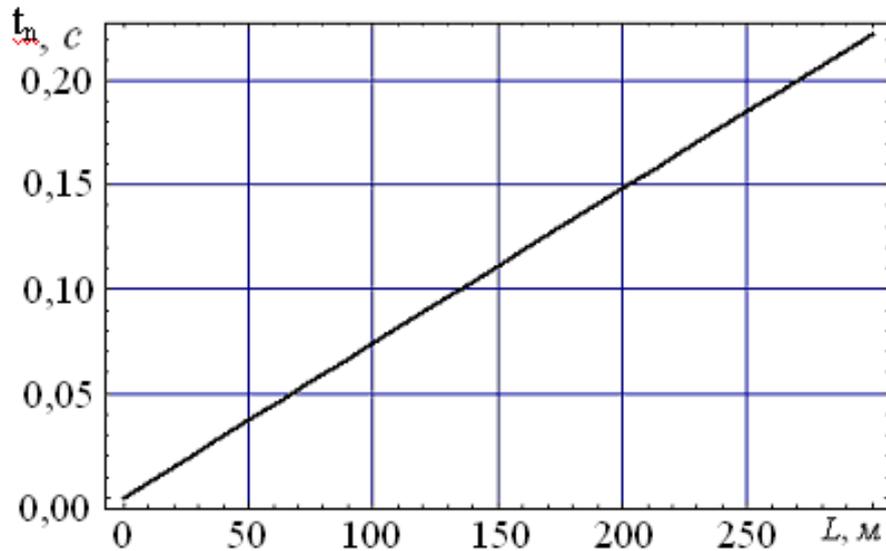


Рисунок 2 – Влияние длины скважины L на время t_n понижения давления при мгновенном сбросе давления $p_0 = 30 \cdot 10^5$ Па в скважинах заполненных жидкостью

Из рис. 2 видно, что с увеличением длины канала L прямо пропорционально растет и время понижения t_n давления в жидкости при мгновенном сбросе давления, которое аппроксимируется линейной зависимостью $t_n = 0,00074068 \cdot L$.

То есть результаты приближенного вычисления от расчетов по линеаризованной модели (4) отличаются незначительно друг от друга (рис. 1, 2).

Можно получить зависимость изменения давления от времени, используя метод бегущей волны, (Огибалов П.М., 1963) и уравнение прямой в отрезках на осях, (Бронштейн И.Н., 1980). В качестве функции y уравнения прямой принимаем давление p , а в качестве аргумента x текущее время t процесса его падения в скважине. Граничные условия для процесса будут такими: в момент

$t = 0, p = p_0$ и при $p = 0, t = t_0$, где $t_0 = L/\bar{a}$. Используя эти условия, окончательно получим формулу в виде

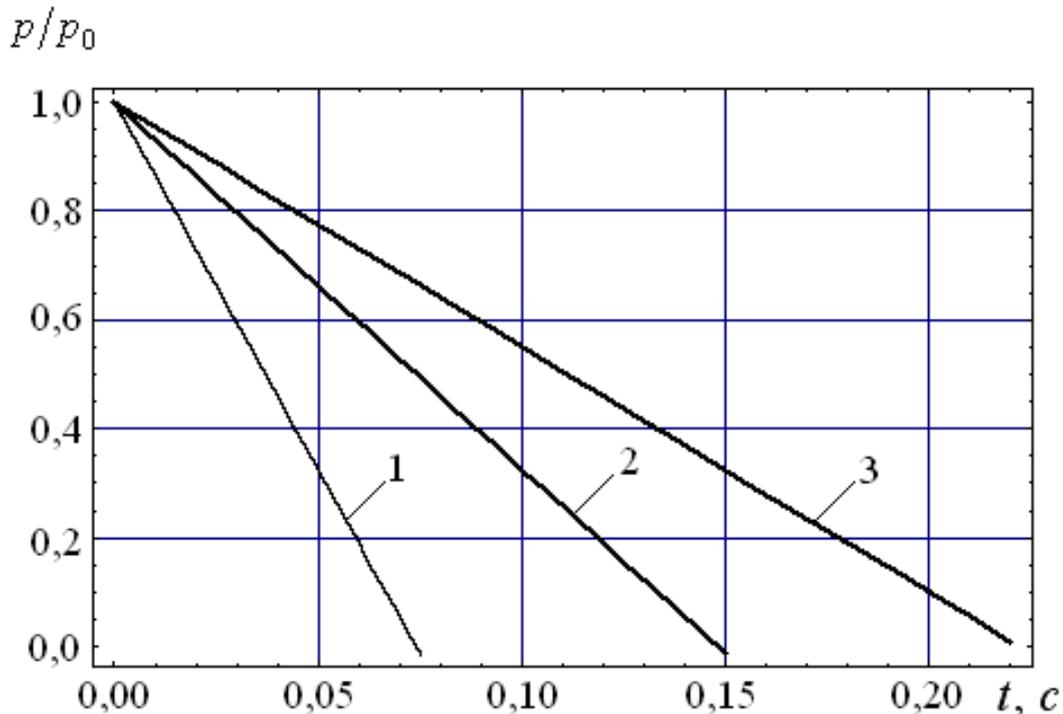
$$p/p_0 + t/t_0 = 1; \quad p/p_0 = 1 - t \cdot \bar{a}/L, \quad \text{для } t \leq L/\bar{a}. \quad (5)$$

Характер изменения давления для воды во времени при его сбросе для скважин различной длины согласно формуле (5) носит линейный характер с постоянной скоростью падения давления и показан на рис. 3.

Скорость падения давления в рабочем агенте dp/dt определим, дифференцируя выражение (5) по времени:

$$dp/dt = -p_0 \cdot \bar{a}/L \quad (6)$$

Из последнего выражения (6) следует, что для мало сжимаемых рабочих агентов скорость падения давления dp/dt прямо пропорциональна давлению p_0 рабочего агента перед сбросом, скорости упругой волны \bar{a} в рабочем агенте и обратно пропорциональна длине L скважины (рис. 4).



1 – $L = 100$ м; 2 – $L = 200$ м; 3 – $L = 300$ м

Рисунок 3 – Зміна тиску p/p_0 в рідині з часом t від довжини скважини L

Из рис. 4 видно, что величина скорости изменения давления будет определяться длиной скважины L и начальной величиной полного давления p_0 в момент времени t равного нулю. Чем меньше длина скважины L и больше величина начального давления p_0 , тем больше скорость изменения давления и больше вероятность успешного начального инициирования разрушения газонасыщенной среды.

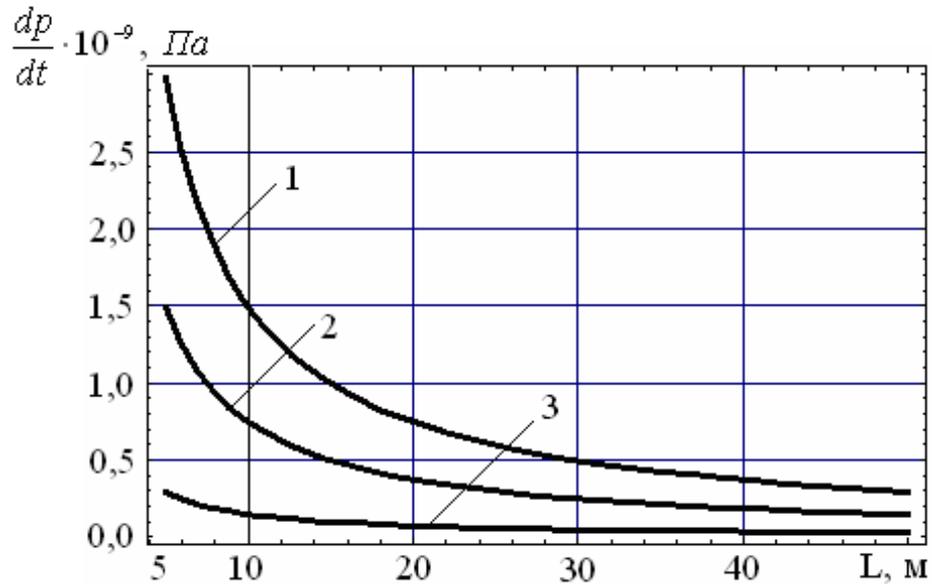
В работе [7] была получена закономерность связывающая давление подачи рабочего агента p_0 в скважине, радиус скважины r_0 , скорость упругой волны v_p в газоносной среде и время падения t_c давления в рабочем агенте.

$$\sigma = 0,9 \cdot \frac{p_0 \cdot r_0}{v_p \cdot t_c} = 0,9 \cdot \frac{p_0 \cdot r_0}{v_p \cdot \frac{L}{a}} = 0,9 \cdot \frac{p_0 \cdot r_0}{\sqrt{\frac{3E \cdot (1 - \nu^2)}{\rho}} \cdot \frac{L}{a}} \quad (7)$$

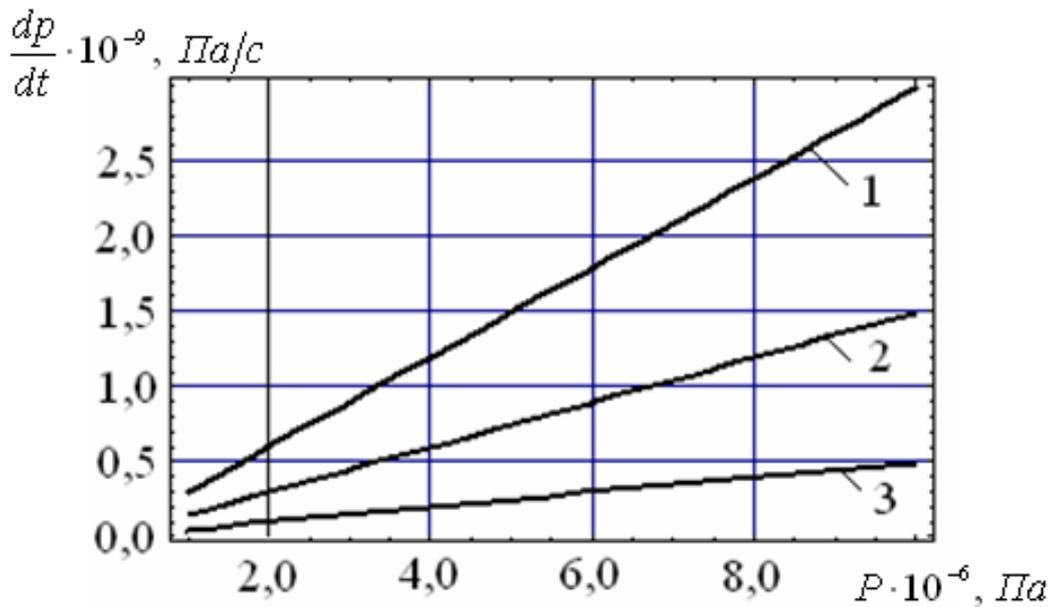
где E – модуль упругости, Па; ρ – плотность упругой газоносной среды; ν – коэффициент Пуассона.

Из формулы (7) следуют различные варианты управления процессом разрушения газоносной среды. Величина максимальных растягивающих напряжений прямо пропорциональна величине давления рабочего агента перед сбросом p_0 ,

радиусу технологической скважины r_0 в массиве, и обратно пропорциональна



a) 1 – $p_0 = 10^7$ Па; 2 – $p_0 = 0,5 \cdot 10^7$ Па; 3 – $p_0 = 0,1 \cdot 10^7$ Па



b) 1 – $L = 5$ м; 2 – $L = 10$ м; 3 – $L = 30$ м

Рисунок 4 – Зависимости скорости изменения давления dp/dt в рабочем агенте от различной длины L скважины (а) и различной величины первоначального давления p_0 рабочего агента (б)

скорости упругой волны в газоносной среде v_p и времени падения давления t_c в рабочем агенте. Однако, увеличение давления подачи ограничено величиной давления гидроразрыва для горных пород. Увеличение радиуса скважины ограничено существующими техническими средствами бурения. Уменьшая искусственным путем модуль упругости, путем газонасыщения пристеночного слоя

скважины, можно увеличить величину максимальных растягивающих напряжений. С ростом длины технологической скважины L_0 величина максимальных растягивающих напряжений уменьшается и потому при помощи длинных скважин сложнее проводить инициирование разрушения газоносной среды. В вышеприведенной формуле (7) отношение величины давления P_0 перед сбросом к времени падения давления t_c в рабочем агенте есть, по сути скорость изменения давления в рабочем агенте. Следовательно, чем выше скорость изменения давления в рабочем агенте, тем больше величина результирующих растягивающих напряжений в газоносной среде.

Выводы. Таким образом, скорость понижения давления в скважине прямо пропорциональна давлению p_0 рабочего агента перед сбросом, скорости упругой волны \bar{a} в рабочем агенте и обратно пропорциональна длине L скважины. Чем больше скорость падения давления, в скважинах, длиной порядка 100 м, время падения давления стремиться к критической величине, равной 0,1с, при котором эффективность инициирования резко уменьшается. На практике более эффективны скважины длиной от 5 до 25 м, так как скорость падения давления в них максимальная. Использование в качестве рабочего агента воды эффективно для восходящих скважин, так как несмотря на высокую скорость падения давления для нисходящих скважин необходимы значительные энергетические затраты на преодоление инерционного подпора столба жидкости в начальный момент инициирования. техническая возможность достижения необходимой величины времени сброса при наличии существующих и используемых рабочих агентов ограничена. Поэтому следует изыскивать новые методы быстрого сброса давления другими способами и средствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Софийский, К.К. Нетрадиционные способы предотвращения выбросов и добычи угля / К.К. Софийский, А.Н. Калфакчян, Е.А. Воробьев – М.: Недра, 1994. – 192 с.
2. Применение пневмогидродинамического воздействия на угленосный массив через поверхностные дегазационные скважины для добычи метана угольных месторождений / П.Е. Филимонов, Б.В. Бокий, В.В. Чередников [и др.] // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 87. – С. 34-41.
3. Зорин, А.Н. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых / А.Н. Зорин, Ю.М. Халимендик, В.Г. Колесников – М.: ТОВ «Недра – Бизнес-центр», 2001. – 413 с.
4. Шевелев, Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа / Г.А. Шевелев. – Киев: Наукова думка, 1989. – 151 с.
5. Потураев, В.Н. Использование вибрационных и волновых эффектов при отработке выбросоопасных пластов / В.Н. Потураев, С.П. Минеев. – К.: Наукова думка, 1992. – 200 с.
6. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. - Издание шестое, 2005. – 799 с.
7. Сапегин, В.Н. К анализу решения задачи о нестационарном деформировании упругой среды / В.Н. Сапегин, Г.И. Ларионов. // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії – 2011. – № 14. – С. 39-45.

REFERENCES

1. Sofiysky, K.K., Kalfakchyan, A.N. and Vorobyov, Ye.A. (1994), *Netraditsionnye sposoby predotvrashcheniya vybrosov i dobychi uglya* [Nonconventional ways of prevention of emissions and coal mining], Nedra, Moscow, RU.
2. Filimonov, P.Ye., Boki, B.V., Cherednikov, V.V. [and others] (2010), «Application of

pneumohydrodynamic impact on the ugleporod-ny massif through superficial vent wells for production of methane of coal fields», *Geo-Technical mechanics*, no. 87, pp. 34-41.

3. Zorin, A.N., Halimendik, Yu.M. and Kolesnikov, V.G. (2001), *Mekhanika razrusheniya gornogo massiva I ispolzovaniye yego energii pri dobyche poleznykh iskopayemykh* [Mechanic of destruction of a massif and use of its energy at mining], TOV "Nedra - Biznes Tsentr, Moscow, RU.

4. Shevelyov, G. A. (1989), *Dinamika vybrosov uglya, porody i gaza* [Dynamics of emissions of coal, breed and gas], Naukova dumka, Kiev, SU.

5. Poturayev, V. N. and Mineev, S.P. (1992), *Ispolzovaniye vibratsionnikh i volnovikh effektov pri otrabotke vybrosoopasnykh plastov* [Use of vibration and wave effects at working off you-brosoopasnykh layers], Naukova dumka, Kiev, UA.

6. Tikhonov, A.N. and Samarsky, A.A. (2005), *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics],. Edition sixth, Moscju, RU.

7. Sapegin, V. N. and Larionov, G.I. (2011), «To the analysis of the solution of a task on non-stationary deformation of elastic medium», *Naukovi visti. Suchasni problemb metalurgiyi*, no. 14, pp. 39-45.

Об авторах

Калугина Надежда Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь, Институт физики горных процессов НАН Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: kalugina_n_a@inbox.ru.

Сапегин Владимир Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, e-mail: v.sapegin@mail.ru

About the authors

Kalugina Nadezhda Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Scientific secretary of the Institute of Physics of mining processes NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: kalugina_n_a@inbox.ru.

Sapegin Vladimir Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Researcher, Department of problems of mining at greater depths, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: v.sapegin@mail.ru

Анотація. Проаналізовано можливості використання різних робочих агентів для ініціювання газовиділення із газоносного середовища. Показано, що перспективними робочими агентами є однорідні вода і газ, в яких велика швидкість поширення звуку. Газорідні суміші і гази з малою швидкістю поширення звуку в них і великою стисливістю малоперспективні, так як створити при скиданні тиску зі свердловин в таких середовищах великі швидкості зміни тиску неможливо. Проведений аналіз показав, що універсальних робочих агентів, ефективних в різних гірничо-геологічних умовах, немає. Показано, що швидкість зміни тиску в свердловині визначається, в основному, швидкістю розповсюдження збурень в робочому агенті, величиною тиску робочого агента перед його скиданням і довжиною свердловини. Основним параметром, що визначає величину максимальних розтягуючих напружень в газоносному середовищі є час падіння тиску в робочому агенті. Отримані аналітичні залежності зміни тиску від часу і швидкості його зміни при скиданні тиску зі свердловини для мало стисливого робочого агента за методом біжучої хвилі. З аналізу теоретичної закономірності зміни радіальних розтягуючих напружень йдуть різні варіанти управління процесом ініціювання руйнуванням газоносного середовища.

Ключові слова: швидкість зміни тиску, розтягуючі напруження, робочий агент, свердловина, скидання тиску.

Abstract. The possibility of using a variety of agents working for the initiation of gas from gas-bearing environment. It is shown that promising agents are working uniform water and gas, in which the high speed of sound. Gases and gas-liquid mixture at a low speed of sound in them, and high compressibility unpromising as to create a pressure relief of the wells in such environments greater rate of pressure change is not possible. The analysis showed that the universal working

agents that are effective in a variety of geological conditions there. It is shown that the rate of change of well pressure determined mainly the speed of propagation of disturbances in the working agent pressure value of working fluid before it is released and a length of the well. The main parameter determining the magnitude of the maximum tensile stress in the gas-bearing medium is the time of the pressure drop in the operating agent. Get one for a little compressed working fluid by the method of traveling wave analyzes pressure changes depending on the time and rate of change of the pressure relief wells. From the analysis of the theoretical patterns of change in the radial tensile stress is followed by a variety of options for managing the process of initiating the destruction of gas-bearing environment.

Keywords: pressure change rate of tensile stress, work agent borehole collapse.

Статья поступила в редакцию 02.11.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Минеевым С.П.