© А.В. Кузина, 2007

УДК 622.222.6

А.В. Кузина

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЗАМОРАЖИВАЮЩИМИ КОЛОНКАМИ, ВЫЗЫВАЮЩЕГО ПОТЕРЮ УСТОЙЧИВОСТИ КОЛОНКИ

При исследовании воздействия взрывных работ на замораживающие колонки вертикальных шахтных стволов, обычно принимают во внимание действие прямой ударной волны взрыва. Конкретно в случае замораживания вертикальных шахтных стволов установлено, что разрушение или повреждение замораживающих колонок прямой ударной волной возможно только в зоне от 0,2 до 0,4 м от взрывной полости. Однако мною установлено, что разрушение замораживающих колонок происходит только в зоне действия ударной волны, где происходят необратимые собственные деформации замороженных пород. В зоне прохождения волны сжатия, не производящей необратимых деформаций замороженного грунта, как правило деформаций разрыва, среза или смятия (потери устойчивости) такой жесткой конструкции, как стальная замораживающая колонка диаметром 100-140 мм при толщине стенки 5-9 мм, произойти не может.

Наиболее часто при проходке шахтных стволов применяется аммонит №6 ЖВ, при взрыве которого характерны следующие параметры: тем-пературы вспышки 280-320 ºС; скорость детонации патрона диаметром 40 мм 3130 м/сек; массовая скорость 1310 м/сек; давление в конце зоны 49,7–50·10³ кгс/см²; начальное давление ударных волн в известняке 99·10³ кгс/см²; в глинистом алевролите 89·10³ кгс/см²,, скорость детонации в этих же породах 4,5 и 4,43 км/сек.

При прохождении ударной волны по любой среде (газ, вода, порода), она образует скачек уплотнения в тонкой переходной области, где резко увеличивается плотность, давление и скорость вещества. Поверхность, которая отделяет сжатую среду от невозмущенной представляет собой фронт ударной волны. Представление об ударном фронте, как тонкой поверхности – математическая идеализация. Физическая толщина ударного фронта бесконечно мала. В газе, например, толщина фронта ударной волны приближается к длине свободного пробега молекул (примерно 10 мкр). В твердых телах толщина фронта ударной волны значительно больше, и зависит от скорости деформирования. В металлах толщина фронта от 1 мм. Именно фронт ударной волны является поверхностью раздела сред, от которой происходит отражение волн растяжения.Следовательно, минимально допустимые расстояния между шпурами и замораживающими колонками в СНиП 111-11-77 (1,1 м для нескальных наносных пород и 1,5 м для скальных пород) определены из

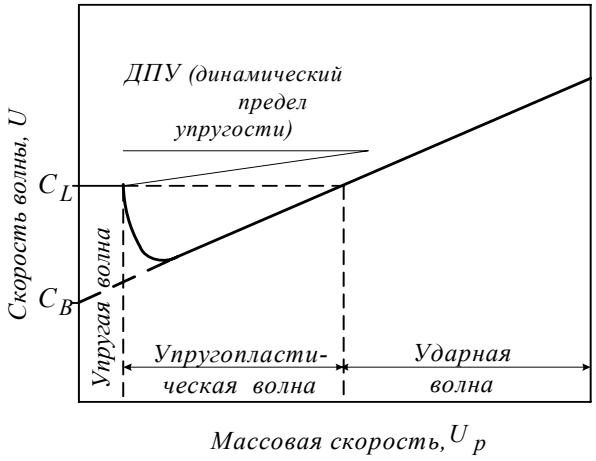

Рис. 1. Соотношение между скоростью ударной волны и массовой скоростью

учета действия прямой ударной волны, что верно только для однородной породы. В однородной породе ударная волна переходит в обычную волну сжатия.

В слоистом массиве, после прохождения ударной волны в каждом из слоев образуется своя продольная волна сжатия, поскольку в каждом слое свой модуль объемного сжатия K_0 и свой модуль сдвига μ. По непосредственным замерам, выполненных П.М.Тютюником на Яковлевском руднике КМА П, в тех породах, на контактах которых зафиксированы разрывы замораживающих колонок, получена скорость продольной волны $C_n^{пес} = 5350$ м/с (для глинистых песков до взрыва), для глин $C_n^{гл} = 3600$ м/с.

Вдоль границы раздела в высокоскоростном материале (замороженном песчанике) фронт продольной упругой волны распространяется быстрее фронта продольной упругой волны низкоскоростного материала (замороженной глины)

Отраженная волна из высокоскоростного материала в низкоскоростном формируется во второй стадии преломления, в виде двух преломленных волн – продольной и поперечной, и эти составляющие качественно отличаются от волн первой стадии.

В низкоскоростном материале упругая продольная волна, пришедшая через границу из высокоскоростного материала претерпевает изменение. Здесь массовая скорость и напряжение в упругой волне увеличивается по мере роста амплитуды начального возмущения. При этом напряжение неизбежно достигает уровня, выше которого начинается пластическая или необратимая деформация среды, которая приводит к изменению как скорости, так и формы волн напряжения.

После преодоления динамичского предела упругости $\sigma_{диу}$ пластические волны распространяются с меньшей скоростью, чем упругие волны.

Так как скорость распространения пластической волны меньше, чем упругой, все возмущение, достаточно сильные, чтобы создать волны, превышающие динамический предел упругости, на самом деле создают две волны – упругий предвестник, распространяющийся со скоростью $C_{пр}$, предельное напряжение в которых равно $\sigma_{диу}$, и более медленную волну $C_{пол}$ пластического течения, имеющую скорость большую, чем $C_в$. Пластические волны по своей природе не линейны, то есть для них не выполняется принцип суперпозиции, справедливый для упругих волн. Поперечные и продольные напряжения различаются на постоянную величину

$\sigma_{пред}$. Если эти две волны одновременно проходят через одну точку (например - распространяясь в противоположных направлениях), то поперечная и продольная компоненты должны были бы удвоиться, так же, как и их разность, если бы их можно было линейно сложить. Это привело бы к разности напряжений $2\sigma_{пред}$, что существенно превышает прочность материала.

Высокое давление на фронте ударной волны приводит к возникновению волн отражения, распространяющихся с той же скоростью, что и ударная, а также волн разрежения, образующихся после отражения сильной ударной волны от ее фронта, имеющих скорость, превышающую скорость ударной волны.

Материал (глина), через который проходит ударная волна, ускоряется под действием градиента давления в ударном фронте и сильно уплотняется. Но тот же уплотненный материал, по которому затем идет отраженная от фронта волна разрежения, ускоряется в направлении, обратном движению ударной волны, под действием менее резкого градиента давления. Полная массовая скорость после прохода волн сжатия и разрежения равна векторной сумме ускорений, проинтегрированных по времени.

Рассмотрим случай взаимодействия ударной волны с замораживающими колонками. Пока ударная волна движется в зоне, вдоль границы раздела разноскоростных материалов, не встречая препятствий, она создает нагрузку на пластичный массив, равную избыточному давлению в ударной волне. При подходе ударной волны к преграде (замороженному буровому раствору диаметром не менее $D_{бур} > 230$ мм и собственно трубе замораживающей колонки), она отражается, образуя давление отражения $\Delta P_{отр}$, происходит торможение масс, при этом избыточное давление повышается. В результате этого, преграда (замораживающая колонка) испытывает удар огромной силы, увеличившейся вследствие давления отражения.

Действие ударной волны на преграду (замораживающую колонку) формирует динамическую нагрузку, которая определяется параметрами ударной волны, формой и размерами преграды. Для того, чтобы выявить все особенности действия ударной волны на преграду, представим ее сначала в виде жесткого куба. После этого будет более понятно, что происходит у свободной поверхности. Процесс взаимодействия ударной волны с жесткой преградой разделяют на две характерные фазы (два периода):

1. Фаза дифракции (начальный период) – от момента соприкосновения фронта волны с жесткой преградой до установления сравнительно стабильного процесса обтекания преграды ударной волны;

2. Фаза квазистационарного обтекания (последующий период) – после окончания фазы дифракции до момента окончания действия положительной фазы волны на жесткую преграду.

В процессе натекания на жесткую преграду ударная волна сначала действует только на лобовую поверхность, затем так же на боковые поверхности, а по мере прохождения за преграду – на тыльную поверхность преграды. В момент соприкосновения ударной волны с лобовой поверхностью преграды, на ней возникает давление отражения и отраженная ударная волна

2, которая распространяется в обратном направлении. При взаимодействии с боковыми гранями преграды образуется

вторичная *3* и дифракционная *4* волны, за фронтом которых формируются волны отражения (разрежения) *5*. Разница давлений на переднюю и тыльную поверхности приводит к возникновению смещающей силы *F*, действующей на преграду в направлении действия ударной волны. После соударения волн, обогнувших преграду с боков, на тыльной поверхности преграды может возникнуть большее давление, чем на лобовой поверхности. В этом случае, смещающая сила *F* меняет знак.

В начальный период на преградах возникают большие давления и большие смещающие силы, однако время их действия сравнительно мало. В основном, оно определяется размерами преграды.

Давление воздушной ударной волны можно рассчитать по формуле:

$$\Delta P_{отр} = 2\Delta p_{ф} + \frac{6\Delta p_{ф}}{\Delta p_{ф} + 7p_{0}}, \qquad (1)$$

где $\Delta P_ф$ – избыточное давление во фронте ударной волны; ΔP_o – атмосферное давление.

Из формулы следует, что избыточное давление отражения увеличивается от 2 до 8 раз. Такие давления преграда испытывает в первоначальный момент. Вслед за этим, ударная волна начинает обтекать преграду, оказывая давления на боковые, а затем - на тыльную поверхность. В результате, преграда сжимается со всех сторон, но наибольшее давление на фронтальной плоскости.

Аналогично вышеизложенному, рассмотрим области действия ударных, отраженных и дифракционных волн на преграду в виде буровой скважины, представляющей свободную поверхность. Качественная картина разрушения грунта в выработанном пространстве буровой скважины при интенсивном воздействии ударной волны представлена на рис. 4.

Как было доказано ранее, граница ударного фронта является поверхностью отражения, за которой скорость волны снижается до обычной значения, соответствующего сейсмической жесткости породы. Эта закономерность объясняет факт разрушения только внутреннего ряда заморажи-вающих колонок при строительстве 3 стволов Яковлевского рудника КМА, при том, что внешний ряд колонок остался не поврежденным. По той же причине были разрушены колонки на стволе Ферде в Германии, несмотря на то, что они были расположены на значительном расстоянии, практически недосягаемом для взрывных волн сжатия.

Прямая ударная, дифракционные и отраженные волны образуют вокруг буровой скважины зону отраженных ударных волн, которые на линии цен-тров окружностей буровых скважин образуют эллипсовидные области раз-рушения пород сдвиговыми напряжениями.

На границе раздела ударной и упругой волн, как от свободной поверхности, действует сумма массовых скоростей в сжимающем и растягивающем импульсах. Полная массовая скорость в течении времени взаимодействия импульсов равна удвоенной массовой скорости ударной волны ($2U_L$). Этот результат известен как «правило удвоения скорости», при котором около свободной поверхности происходит явление, называемое отколом, в результате которого поверхностный слой отрывается от подстилающего.

Скорость движения этого слоя равна приблизительно удвоенной массовой скорости ударной волны.

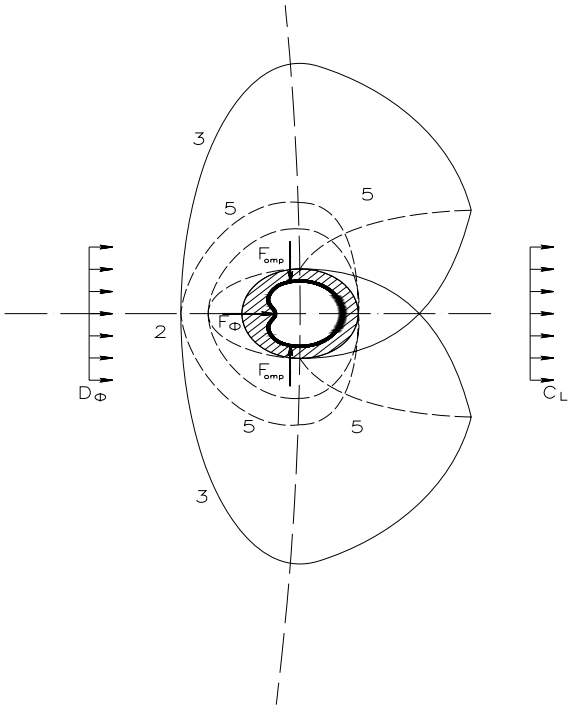

Рис. 4. Схема воздействия ударной волны на замораживающую колонку и процесса потери устойчивости колонки с образованием одной вмятины

Образование эллипсовидных зон разрушения на уровне линии центров замораживающих скважин, равное по толщине диаметру буровых скважин, практически не сказывается на несущей способности ледопородного ограждения.

Концентрация напряжений на контуре скважины определяется характеристиками породного массива, амплитудно- временными параметрами ударной волны и диаметром буровой скважины (размытой или проектных размеров). При действии ударной волны, наиболее напряженными являются точки контура области 1, боковые по отношению движения ударной волны, где, как правило, и начинается разрушение грунта под действием растягивающих отраженных от боковых поверхностей волн. Разрушение породы в области 1 носит сдвиговый характер. В области 1, где порода разрушена сдвигом полностью, резко снижается значение напряжения. Граница зоны разрушения принимает волновую нагрузку на себя, то есть сама становится несущим контуром, причем с меньшим радиусом кривизны, чем изначально. Это приводит к дальнейшей концентрации напряжений в этом районе, и развитию процесса разрушения сдвигом от контура скважины в глубь массива. Кроме того, от областей первоначального разрушения распространяются волны разгрузки, их взаимодействие приводит к возрастанию разрушения в лобовой и, частично, тыльной части скважины. Эти вторичные разрушения под действием отраженной волны, в основном, носят характер отрыва.

Разрушенный грунт (порода) приобретает импульс, направленный в наименее напряженную область пространства, то есть внутрь скважины.

В условиях, когда на скважину действует ударная волна с фронтом, близким к ударному, в окрестности любой точки контура скважины могут развиваться явления откола (область 2), характерные для процесса отражения волны от свободной поверхности или жесткого упругого тела, каковым для волны является сам фронт ударной волны со скачком уплотнения.

Процесс разрушения носит ярко выраженный динамический характер, даже

в условиях, когда взаимодействие ударной волны со скважиной происходит квазистатически.

Таким образом, изменение скорости прохождения упругой волны из высокоскоростного пласта (песка, песчаника) в пластическую волну низкоскоростного пласта, происходит не за счет затухания волны, а за счет отражения избыточной энергии от фронта ударной волны в низкоскоростном породном массиве.

При воздействии на замораживающую колонку ударной волны с высокими параметрами, вызывающей разрушение в околоскважинном пространстве, характер деформирования колонки, ее напряженно-деформи-рованное состояние, изменяются качественно и количественно. В начале процесса динамического воздействия, пока контур скважины устойчив, колонка, в силу инерции, перемещается относительно контура выработки против хода ударной волны, что приводит к обжатию прослойки во фронтальной части и отрыву обделки от прослойки в тыльной части. При этом труба деформируется с уменьшением диаметра вдоль направления распространения волны, и с увеличением диаметра при распространении волны в поперечном направлении. Потеря несущей способности контуром скважины неизбежно сопровождается повышением напряжений в колонке. При большом объеме разрушений, коэффициент концентрации напряжений на ней приближается к единице.

Деформирование колонки путем неравномерного обжатия, носит изгибающий характер, что обуславливает возможность ее разрушения, как путем сдвига, так и трещинообразованием. При низкотемпературном замораживании необходимо учитывать и хладоломкость материала труб, не способных воспринимать динамические воздействия.

Поведение колонок, расположенных в конкретной породе, при определенном режиме, особенно при режиме низкотемпературного замораживания, в условиях действия волновой ударной нагрузки носит разнообразный качественный характер. Для проведения практических расчетов и получения количественных оценок параметров изучаемого процесса, необходимо знать все постоянные величины, характеризующие замороженный породный массив, а также свойства, проявляемые строительными материалами при действии динамической нагрузки. Это является отдельной проблемой, выходящей за рамки данной работы. ГИАБ

Коротко об авторах

Кузина А.В. – кафедра «Строительство подземных сооружений и шахт» (СПСИШ) Московский государственный горный университет.