

УДК 624.151:550.834.015.2

## **УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ГРУНТОВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ**

**Баранов Н.Н.**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

В докладе рассмотрены вопросы повышения устойчивости оснований зданий и сооружений при сейсмических воздействиях. Выводы основаны на анализе содержания процессов в многокомпонентных средах при распространении ударных сферических волн. Автор описывает процесс принудительно нагнетания воздуха в поры песчаного водонасыщенного грунта в глубине толщи с помощью специального устройства. Объемно – вязкое демпфирование гасит импульс и снижает давление на фронте проходящей через эту область сейсмической  $P_w$  – волны.

The article deals with questions increased stability of the bases of buildings and structures under seismic actions. The conclusions are based on an analysis of the content of the processes in multicomponent in the dissemination of spherical of shock waves. The author describes the process of forcibly injecting air into the pores of sand saturated soil deeps in the ground with the help of a special device. Volumetric – viscous damping takes off impulse and reduces the pressure on the front passing through the area of seismic  $P_w$  – wave.

### **1. Нагрузки в многокомпонентных средах**

В природных условиях грунты представляют собой среды с различным сочетанием компонентов:

- однородные (твердые частицы с заполненными воздухом порами);
- двухкомпонентные (минеральные частицы с заполненным гравитационной водой объемом пор);
- трехкомпонентные (минеральные гранулы, вода и заземленный газ в виде пузырьков).

В механической модели грунтовой массы Терцаги-Герсеванова приложенная нагрузка вначале передается на воду. В этой модели жидкость в сосуде моделирует поровую жидкость, отверстия в поршне – капилляры (фильтрационные ходы) грунта, а пружина – его скелет. По мере оттока воды через отверстия в поршне и начинающего сжатия грунта, представленного в виде упругого элемента Гука (пружины), нагрузка перераспределяется между твердой и жидкой компонентами. После приложения нагрузки по мере погружения поршня она начинает восприниматься пружиной. Процесс заканчивается, когда нагрузка полностью передается на пружину и последняя прекратит сжиматься. Таким образом, в грунтах в процессе нагружения функционируют две системы давлений – нейтральное поровой воде и эффективное в скелете грунта. В такой среде при распространении ударных волн доминирует упругое состояние.

В 50–60х XX столетия вышел ряд работ, в которых рассматривалось распространение ударных волн в многокомпонентных средах – водонасыщенных и водогазонасыщенных грунтах. Результаты исследований показали, что наличие в среде компонентов с различной сжимаемостью, равномерно распределенных по всему объему, обуславливает закономерности распространения, отличные от тех, которые имеют место в однородных средах.

Впервые исследования ударных волн в среде вода-воздух были проведены Г. И. Покровским. Опыты показали, что наличие в воде небольшого количества мелких пузырьков воздуха приводит к существенному падению давления на фронте ударной волны [1].

## **2. Плоские волны**

Соотношение параметров динамического воздействия экспериментально изучалось при сбрасывании (ударах) штампа на поверхность рыхлого водонасыщенного песка, заполнявшего металлическую трубу диаметром 1 м и высотой 8 м [2]. В результате удара штампа по

поверхности в грунтовой массе распространялась плоская ударная волна сжатия. Время действия волны изменялось от 2 до 6 миллисекунд, а длительность импульса – от 4 до 14 мс. В импульсе динамическое давление в воде значительно превышало давление в скелете – в опытах фиксировалось превышение до 10 раз. По результатам проведенных опытов установлено:

- после удара штампа в грунтовой массе появлялись и распространялись две волны сжатия  $-P_w$  в воде и  $P_z$  в скелете;
- ударная волна имеет характер одиночного импульса длительностью несколько м/с;
- при ударе по поверхности грунтовой массы большая часть нагрузки передавалась на грунтовую воду;
- для давления в скелете грунта характерно отставание его максимума во времени от максимума давления в воде.

### 3. Сферические волны

Первые экспериментальные исследования, позволившие установить основные закономерности распространения взрывных волн в водонасыщенных песчаных грунтах примерно с одинаковым гранулометрическим составом и плотностью скелета но с различным содержанием защемленного воздуха (трехкомпонентная среда), были выполнены под руководством Г. М. Ляхова [1]. Давление взрывной волны в среде измерялось пьезодатчиками с записью на осциллографах. Экспериментально было установлено:

- при подходе волны давление скачком возрастает, а затем убывает по закону, близкому к экспоненциальному;
- нормальное и боковое давление практически одинаковы, т.е. водогазонасыщенный грунт ведет себя как идеальная жидкость
- время действия ударной волны мало – от долей до нескольких миллисекунд;
- при относительном объемном газосодержании порядка 0,01–0,04 давление на фронте ударной волны убывает во много раз по сравнению с двухкомпонентной средой;
- параметры волн мало меняются при изменении гранулометрического состава и пористости грунта в пределах, встречающихся в реальных условиях.

Упруго-вязкая модель грунтовой среды по Г. М. Ляхову может быть представлена упругими элементами Гука и вязкими элементами (демпферами) Ньютона. Если сжатие и разгрузка каждой из пружин одинаковы, то в вязко-упругой среде остаточные деформации не образуются (рис. 1).

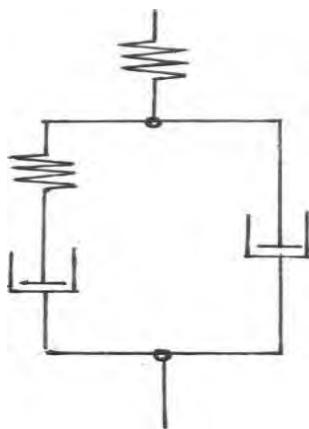


Рис. 1. Упруго-вязкая модель грунта

#### 4. Сейсмические волны

Земная кора (литосфера, наружный каменный слой) в области континентов образует твердую гранитовую оболочку. Основанием литосферы служит вещество верхней мантии – перегретые массы каменных расплавов (магма). Покровное вещество верхней мантии вследствие неравномерности разогрева испытывает сложные внутренние перемещения (т.н. астеносферные движения). Таким образом, мантия является податливым основанием перемещающихся жестких литосферных плит, вследствие чего в отдельных участках твердой оболочки происходят разрывные движения.

Постоянно накапливающиеся в литосфере упругие напряжения (потенциальная энергия) после достижения предела прочности пород разрушают их с образованием более или менее протяженного разрыва (разлом, смеситель). Выделившаяся при этом энергия распространяется от места разрыва в форме упругих колебаний, которые носят ударный (импульсный) характер. Существует два основных вида сейсмических волн – объемные и поверхностные. Объем-

ные волны распространяются через толщу Земли и причиняют наибольший ущерб. Землетрясение генерирует два типа объемных сферических волн – продольные  $P$  и поперечные  $S$ . Продольная  $P$  – это волна типа звуковой. При ее прохождении каждая частица породы перемещается вперед и назад (сжатие и растяжение) вдоль направления движения волны. Поперечные волны являются результатом реакции среды на изменение формы вещества при его сжатии.

При подземном ударе в грунтовой среде распространяются сферические волны. Продольная волна вызывает объемную деформацию скелета и твердых минеральных частиц. Если поры грунта заполнены гравитационной гидравлически непрерывной водой, то нагрузка будет передаваться на твердую и жидкую компоненты. В связи с перераспределением нагрузки в грунтовом основании возникают две продольные сейсмические волны:  $P_w$  в воде и  $P_z$  в скелете. Они распространяются в двухкомпонентной среде раздельно: впереди  $P_w$  и за ней  $P_z$ . Так как объемные деформации двухкомпонентной среды пренебрежимо малы, то энергия удара переносится волнами без заметных диссипативных потерь.

## 5. Физическое состояние грунтовой среды

Из рассмотрения грунтовых сред как естественных деформируемых образований следует, что их поведение при распространении ударных волн в общем случае определяется различными сочетаниями упругих и вязких свойств. При сейсмических воздействиях в упругих двухкомпонентных средах волны  $P_w$  и  $P_z$  распространяются со скоростью  $c \approx 1500$  м/с с малозаметными потерями энергии. Поэтому обводненность оснований повышает интенсивность сотрясений ориентировочно до одного и более балла, а до двух и более – в отложениях, подстилаемых скалой.

Однако упругое поведение двухкомпонентной грунтовой среды, когда поры скелета заполнены только жидкостью, можно скорректировать в направлении увеличения количественной меры внутреннего трения и, соответственно, энтропии (рассеяния, диссипации) энергии на фронте пробегающей в гидравлически непрерывной свободной воде  $P_w$  – волны. Это изменение может быть достигнуто за счет принудительного добавления в грунтовую массу объемов заземленного газа. В грунтовой воде могут находиться пузырьки газа с размерами в диапазоне от долей до нескольких миллиметров.

Однако наличие пузырьков в реальных условиях может иметь место только до глубины не более нескольких метров ниже уровня грунтовых вод, т.е. в непосредственной близости от дневной поверхности. На больших глубинах, измеряемых десятками метров, в отличие от верхней части, в поровой воде может присутствовать только растворенный в воде газ без заземленных пузырьков.

В трехкомпонентной среде присутствие газообразной составляющей в виде рассеянных в объемах пор газовых пузырьков при прохождении фронта  $P_w$  – волны обеспечивает эффект Ньютонова тела (вязкого элемента). Опыты свидетельствуют, что водогазонасыщенный грунт при этом ведет себя как идеальная жидкость. Нормальные и боковые напряжения в трехкомпонентной среде на фронте сферической волны одинаковы. Часть энергии деформации – в данной ситуации сокращение на фронте  $P_w$ – волны объема трехкомпонентной среды вследствие быстрого сжатия и растворения пузырьков заземленного газа – преобразуется в тепло. Мгновенно выделившееся количество тепла сразу же, после ухода  $P_w$ – волны, расходуется на восстановительный процесс – обратный переход газа из растворенного состояния в свободное в виде заземленных пузырьков. За мгновенный промежуток времени, измеряемый тысячными, сотыми или десятками долями секунды, выделившееся тепло не успевает рассеиваться в окружающие объемы среды. Такой взаимобратимый процесс растворения – выделения газа вследствие пренебрежимо малого оттока тепла в окружающую среду за мгновенный промежуток времени можно с достаточной для практики точностью считать адиабатическим.

Потери энергии и уменьшение давления на фронте ударной волны физически объясняется тем, что часть кинетической энергии теплового движения молекул газа в пузырьках, соответствующей движению частиц в направлении распространения  $P_w$ – волны, переходит в энергию беспорядочного теплового движения. Эта часть энергии теряется волной, что обуславливает ее ослабление.

Таким образом, имеющиеся изменения физического состояния в объемах газонасыщенной грунтовой массы в направлении от упругого к вязкому при распространении сферической сейсмической  $P_w$  – волны обуславливают на ее фронте количественные потери энергии в цикле «выделение тепла – его поглощение», т.е. реализацию внутреннего трения, сопровождающегося энтропийными потерями.

Наличие на пути распространения  $P_w$  – волны насыщенных защемленным газом областей ослабляет избыточное давление на ее фронте.

## 6. Глубинное нагнетание газа

Для газонасыщения объемов водонасыщенных песчаных и крупноблочных грунтов 1 удобно использовать манжетные трубки 3 монтируемые в предварительно пробуренные скважины под защитой обсадных труб 2 (рис. 2). Расположенные на внешней стороне резиновые манжеты (клапаны) 7 перекрывают выходные отверстия 8 в стенках трубки 3 и ограждаются от бокового давления грунта 4 фильтровой сеткой 5, закрепляемой на привариваемом выпуклом каркасе. Наличие такой защитной сетки позволяет создать вокруг резинового клапана 7 ограниченную полость 6. После установки манжетной трубки 3 в эту полость просочится вода, а при нагнетании она заполнится сжатым газом, который и будет продавливаться в окружающий грунт.

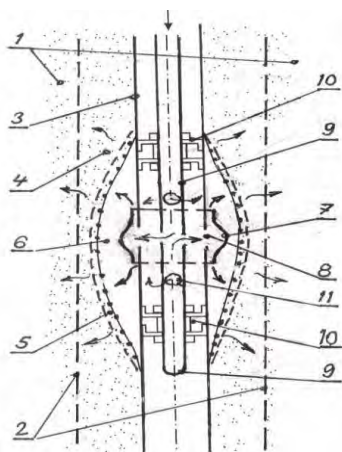


Рис. 2 Устройство для нагнетания газа:

- 1 – водонасыщенный грунт; 2 – расположение обсадной трубы;
- 3 – манжетная трубка, монтируемая после разработки скважины;
- 4 – местный грунт после извлечения обсадной трубы; 5 – защитная фильтровая сетка на приваренном к трубке каркасе; 6 – свободная полость;
- 7 – резиновая манжета; 8 – выходные отверстия в стенке манжетной трубки;
- 9 – внутренняя воздухоподводящая трубка с глухим нижним концом (обтюратор); 10 – верхний и нижний уплотнители (тампоны);
- 11 – выходные отверстия

Передаваемый компрессором сжатый воздух попадает в обтюратор 9. Выходящий через отверстие 8 газ отгибает обратный клапан 7, выдавливает свободную воду и заполняет полость 6. После заполнения полости начинается процесс миграции газа по капиллярам (фильтрационным ходам, порам) в скелете грунта в прилегающие объемы за фильтровой сеткой 5. Манжеты 7 выполняют роль выпускных клапанов нагнетаемого через обтюратор 9 сжатого газа. Обратное истечение газа в манжетную трубку 3 невозможно, так как при снижении давления в обтюраторе 9 внешнее давление в полости равномерно и плотно прижимает манжету 7 к стенке трубки 3.

Находящийся в полости 6 сжатый газ оказывает выдавливающее действие на вогнутые мениски воды в капиллярах радиусом  $r_k$ , преодолевая наряду с гидростатическим давлением  $P_{\sigma w}$  силы поверхностного натяжения воды

$$P_{\sigma w} = \frac{2 * \sigma_r * \cos\gamma}{r_k},$$

где  $\sigma_r$  – коэффициент поверхностного натяжения воды:  $\sigma = 7,5 * 10^{-5}$  Кн/м;  $\gamma$  – угол смачивания поверхности минеральных частиц скелета (для кварца и полевых шпатов ориентировочно  $\gamma \approx 45^\circ$ ).

При решении вышеперечисленной зависимости для радиусов капилляров  $r_k = 0,1-2$  мм давление поверхностного натяжения  $P_{\sigma w}$  изменяется ориентировочно от 10 кПа до 0,5 кПа.

В реальных водонасыщенных грунтах радиусы менисков и их сопротивление выдавливанию  $P_{\sigma w}$  различны. Формирующееся из вогнутых менисков очертание газонасыщенной области будет ограничено казуальными (случайными, не четко выраженными) границами. Поэтому газонасыщенный объем можно условно представить в виде среды со сформированной сетью произвольно пересекающихся взаимосвязанных частично заполнившихся газом разрозненных каналцев. Сплошность в такой среде может сохраняться только за счет не выдавленной оставшейся гидравлически связанной воды в порах меньших размеров. При распространении в такой газонасыщенной области с дискретной сплошностью давление на фронте  $P_w$  – волны существенно снижается вследствие затрат энергии на мгновенное сжатие и растворение объемов заземленных пузырьков газа.



Заполненные оставшейся водой поровые каналы представляют систему сообщающихся сосудов. Находящиеся в окружении жидкости объемы газа в порах подвержены действию Архимедовых сил взвешивания и будут испытывать выталкивание вверх. Но в грунтовой массе эти объемы заземлены и могут перемещаться только принудительно. В процессе нагнетания газ течет по каналам разных размеров, в итоге проникает на различные расстояния от источника избыточного давления. По мере удаления от газовой полости величина избыточного давления уменьшается. После его выравнивания с гидростатическим на данной глубине закаченный газ оказывается рассеянным в порах скелета, образуя водогазонасыщенную трехкомпонентную среду с казуальными границами.

В качестве источника нагнетания через манжетные трубки с обтюратором воздуха в поры скелета можно использовать поршневые компрессоры (максимальное рабочее давление  $p_{\sigma k} = 0,8$  МПа). Значение действующего на вогнутые мениски напора  $H_{\sigma}$  может быть определено по формуле

$$H_{\sigma} = \frac{p_{\sigma} - p_0}{\gamma_w},$$

где  $p_0$  – атмосферное давление, кПа;  $z \cdot \gamma_w$  – гидростатическое давление на рассматриваемой глубине  $z$ , кПа;  $p_M$  – сопротивление гибкой манжеты отжиманию при нагнетании, кПа;  $\gamma_w$  – удельный вес воды, кН/м<sup>3</sup>;

## 7. Демпфирование сейсмических волн

Физическое состояние грунтовой среды, в которой распространяются сферические сейсмические волны, определяет условия проявления ее упругих или вязких свойств. Автором предложен способ повышения устойчивости водонасыщенных оснований от сейсмических воздействий принудительным нагнетанием в глубинные области газообразной компоненты [3]. В условиях, когда осадочная толща пород района строительства сложена водонасыщенными крупнообломочными или песчаными грунтами, либо в разрезе прослеживаются их отдельные пласты, можно обеспечить рассеяние (диссипацию) энергии на фронте  $P_w$  – волны (рис. 3). С этой целью

в заполненные гравитационной водой поры скелета на глубинах в десятки метров выполняется принудительное нагнетание воздуха. Вследствие этого упругая среда (твердые минеральные частицы + вода) трансформируется в упруго-вязкую (трехкомпонентную). Рассеянные в газонасыщенной области пузырьки защемленного воздуха обладают объемной упругостью, т.е. способностью сопротивляться сокращению их объема при распространении  $P_w$ -волны.

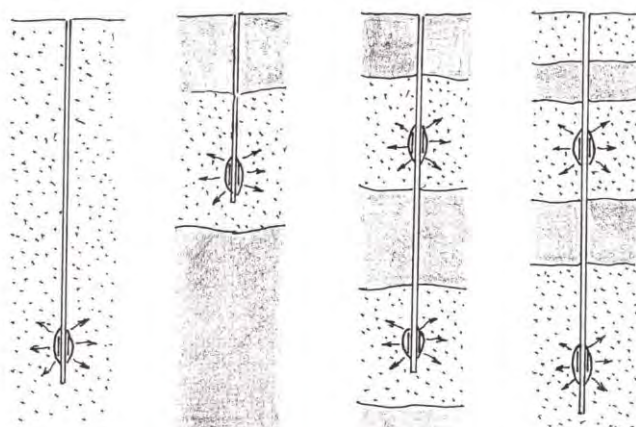


Рис. 3. Расположение песчаных и глинистых пород в геологическом разрезе верхней толщи осадочных отложений

Устройство для нагнетания газа представлено на рис. 2. Расположение газонасыщенных областей объемно-вязкого демпфирования в основании зданий и сооружений выбирается для конкретных условий района строительства. При этом следует учитывать:

- вероятное расположение мест разрыва (смеситель) в коренных породах;
- расположение в разрезе верхней толщи осадочных пород пластов песчаных и крупнообломочных грунтов;
- характер подземного ударного импульса (интенсивность по исходной балльности, плотность пород, скорость и особенности распространения  $P$ -волн и  $P_w$ -волн);
- газонасыщенные области (ловушки  $P_w$ -волны) целесообразно формировать в различных уровнях по схемам:

горизонтальных пластов,  
вертикальных завес,  
локализованных с боков и низа «сейсмических островов»,  
комбинации областей в нескольких пластах.

### **Выводы**

1. В многофазных грунтовых средах (водо- и водогазонасыщенные песчаные грунты) объемная ударная  $P$  – волна распространяется в твердой  $P_z$  и жидкой  $P_w$  компонентах.

2. Поведение (распространение) ударной  $P_w$  – волны в значительной степени диктуется физическим состоянием среды.

3. Газообразная компонента при пробегании фронта  $P_w$  – волны трансформирует упругое состояние в упруго-вязкое в процессах ее мгновенного сжатия и растворения с выделением тепла.

4. Последующий переход газа из растворенного состояния в свободное после ухода волны сопровождается поглощением ранее выделенного тепла.

5. Процесс мгновенного растворения – выделение газа является адиабатическим и обеспечивает количественные потери энергии на фронте  $P_w$  – волны.

### **Литература**

1. Ляхов, Г.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах / Г.М. Ляхов. – М. : Наука, 1982, – 286 с.

2. Лобастова, Н.Г. Некоторые результаты исследования механизма разрушения скелета водонасыщенных песков при воздействии плоской волны сжатия / Н. Г. Лобастова, П.А. Эйслер // Труды координац. совещ. по гидротехнике «Сейсмостойкость гидротехнических сооружений». – Вып. 47. – Л. : Энергия, 1969 . – С. 412–420.

3. Баранов, Н.Н. Способ защиты оснований, сложенных водонасыщенными грунтами, от сейсмических воздействий / Н.Н. Баранов // АС № 1786226, кл. E02D 27/34. Бюлл. изобрет. № 1. –1993.