

В. А. ДУХОВНЫЙ

Главголодностепстрой

## ВОПРОСЫ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ С НЕНАРУШЕННОЙ СТРУКТУРОЙ В УСЛОВИЯХ ГОЛОДНОЙ СТЕПИ

Уплотнение грунтов с ненарушенной структурой под действием удара падающего груза, или так называемое ударное уплотнение, является дешевым и эффективным антифильтрационным мероприятием. В последнее время ему уделяют большое внимание как научные работники, так и производственники. Теоретическому обоснованию применения этого метода положили начало работы ГрузНИИГиМа (Г. М. Ломизе, С. Г. Хлебников) и АзНИИГиМа (Дадаев). Ю. М. Абе-лев, Б. В. Швец (НИИОСП), Н. Я. Хархута (ДОРНИИ) предложили этот метод для усиления несущей способности слабых грунтов (про-садочных лессов, лессовидных и всевозможных покровных суглинков) в основании зданий и сооружений.

Специфика и масштабы освоения Голодной степи обуславливают широкие возможности для применения указанного метода. Уже при составлении проектного задания Южного канала в 1957 г. Средаз-гипроводхозом было предложено для уменьшения фильтрации из Южного магистрального канала уплотнить откосы вальцовыми (цилин-дрическими) трамбовками. В рабочих чертежах орошения совхоза № 4 глубокое уплотнение основания распределителей применяется для той же цели. Институтом „Узгипроводхоз“ в проекте верхней зоны машинного орошения из Баяутского канала предусмотрено анти-фильтрационное уплотнение откосов канала М-2 по длине 11 км и выштампование сечения картовых оросителей сегментными трамбов-ками. При этом трамбование откосов М-2 было выполнено на зна-чительном протяжении, а от штампования подушек пришлось отка-заться в основном из-за несовершенства предложенного оборудования.

В связи с тем, что в условиях Голодной степи, да и вообще в Узбекистане, ударное уплотнение внедрялось впервые, Среднеазиат-скому научно-исследовательскому институту ирригации, по договору с Главголодностепстроем, было поручено в 1957 г. провести исследо-вания предложенного способа, выяснить „подводные камни“ и воз-можности его широкого внедрения. Опытные работы были организо-ваны на специально подготовленном участке Южного канала на ПК 181—183.

Испытаниям подвергались три вида трамбуемых устройств (каж-дый вид трамбовки является сменным навесным оборудованием на экскаваторе Э-1004):

- а) цилиндрическая трамбовка для уплотнения откосов канала,
- б) плоская трамбовка для уплотнения дна канала,

в) сегментная трамбовка для выштампования поперечного сечения мелких оросителей.

Грунты исследованного участка отличаются большой пестротой, но в основном представлены супесями легкими, пылеватыми, сильно загипсованными. Плотность скелета  $1,3-1,6 \text{ т/м}^3$ , пористость  $33-53\%$ .

Ударами, производимыми падающими под действием собственного веса трамбовками, достигалось уплотнение грунта. При этом, увеличивая или уменьшая число ударов, вес трамбовки и высоту падения, изменяли величину удельной работы и замеряли соответствующее колебание плотности по сравнению с первоначальной, а также фиксировали величину осадки грунта. Водопроницаемость до и после уплотнения замерялась по методу проф. Болдырева.

Таблица 1

Результаты уплотнения грунтов на ЮГК

| Но-<br>мер<br>шур-<br>фа | Вес<br>трам-<br>бовки,<br>т | Вы-<br>сота<br>пада-<br>ния,<br>м | Число<br>уда-<br>ров | Плотность скелета, кг/см <sup>3</sup> |                                         |                                |                                         | Об-<br>щая<br>рабо-<br>та,<br>тм | Коеффи-<br>циент<br>уплотне-<br>ния | Глубина<br>экрана,<br>м |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
|                          |                             |                                   |                      | до уплотнения                         |                                         | после уплотнения               |                                         |                                  |                                     |                         |
|                          |                             |                                   |                      | сред-<br>няя<br>плот-<br>ность        | коэффи-<br>циент<br>неодно-<br>родности | сред-<br>няя<br>плот-<br>ность | коэффи-<br>циент<br>неодно-<br>родности |                                  |                                     |                         |

Вальцовые трамбовки

|   |     |   |   |       |       |       |       |      |       |      |
|---|-----|---|---|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| 1 | 5,3 | 3 | 3 | 1,444 | 0,051 | 1,648 | 0,028 | 47,7 | 1,120 | 1,80 |
| 2 | 5,3 | 3 | 3 | 1,524 | 0,060 | 1,638 | 0,023 | 47,7 | 1,175 | 1,15 |
| 3 | 5,3 | 3 | 3 | 1,480 | 0,109 | 1,613 | 0,096 | 47,7 | 1,112 | 1,40 |
| 4 | 3,8 | 3 | 3 | 1,490 | 0,206 | 1,551 | 0,046 | 34,2 | 1,137 | 0,70 |
| 5 | 3,8 | 3 | 3 | 1,506 | 0,038 | 1,580 | 0,032 | 34,2 | 1,050 | 1,45 |
| 6 | 3,8 | 3 | 3 | 1,567 | 0,071 | 1,637 | 0,038 | 34,2 | 1,060 | 1,40 |
| 7 | 3,8 | 3 | 3 | 1,621 | 0,022 | 1,655 | 0,011 | 34,2 | 1,015 | 1,40 |

Плоские трамбовки

|   |     |   |   |       |       |       |       |      |       |      |
|---|-----|---|---|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| 1 | 5,2 | 2 | 3 | 1,502 | 0,096 | 1,656 | 0,050 | 31,2 | 1,100 | 1,35 |
| 2 | 5,2 | 3 | 3 | 1,563 | 0,090 | 1,670 | 0,018 | 46,8 | 1,070 | 1,45 |
| 3 | 5,2 | 4 | 3 | 1,539 | 0,136 | 1,716 | 0,032 | 62,4 | 1,110 | 1,70 |
| 4 | 4,2 | 3 | 3 | 1,471 | 0,081 | 1,631 | 0,007 | 37,8 | 1,100 | 1,42 |
| 5 | 4,2 | 4 | 3 | 1,511 | 0,070 | 1,611 | 0,024 | 50,4 | 1,070 | 1,42 |
| 6 | 3,2 | 3 | 3 | 1,514 | 0,066 | 1,582 | 0,021 | 28,8 | 1,050 | 1,20 |

|   |     |   |   |       |       |       |       |   |   |   |
|---|-----|---|---|-------|-------|-------|-------|---|---|---|
| 1 | 5,2 | 5 | 3 | 1,444 | 0,068 | 1,621 | 0,009 | — | — | — |
| 2 | 5,2 | 4 | 4 | 1,444 | 0,068 | 1,621 | 0,014 | — | — | — |
| 3 | 5,2 | 3 | 6 | 1,444 | 0,068 | 1,615 | 0,052 | — | — | — |
| 4 | 5,2 | 3 | 9 | 1,444 | 0,068 | 1,673 | 0,022 | — | — | — |

На основании полученных данных авторы исследований сделали следующие выводы:

1) установлена возможность уплотнения и снижения водопроницаемости легких грунтов под действием ударного трамбования. При этом в качестве основного показателя принимается коэффициент уплотнения, т. е. отношение плотностей скелета до и после уплотнения;

2) коэффициент уплотнения и глубина изменения плотности зависят от веса трамбовки;

3) наиболее эффективная высота падения трамбовки  $3 \text{ м}$ , так как при больших высотах происходит разрыхление грунта;

4) ярко выраженная осадка и нарастание плотности грунта наблюдаются при первых трех ударах трамбовки, дальнейшее увеличение числа ударов дает незначительное приращение этих показателей.

Некоторые из приведенных выводов вызывают возражения.

Во-первых, указанный коэффициент не является характерной величиной при уплотнении резко неоднородных грунтов, так как зависит в значительной мере от первоначальной плотности. Между тем из анализа изменения объемных весов (табл. 1) видно, что при трамбовании происходит выравнивание плотности уплотненного слоя. Так, если до уплотнения цилиндрической трамбовкой весом 5,2 т коэффициент неоднородности составлял в среднем 0,070 при средней плотности 1,516 т/м<sup>3</sup>, то после уплотнения он стал равен 0,049 при средней плотности 1,633 т/м<sup>3</sup>; те же показатели при весе трамбовки 3,8 т соответственно до уплотнения были 0,084 и 1,548 и после уплотнения — 0,032 и 1,606 т/м<sup>3</sup>. Более показательна с этой точки зрения плотность скелета после уплотнения, которая возрастает при увеличении общей работы, затрачиваемой на достижение упругоуплотненного состояния грунта. Эта работа выражается формулой:

$$A = HnQ, \quad (1)$$

где  $Q$  — вес трамбовки,  
 $H$  — высота падения,  
 $n$  — число ударов.

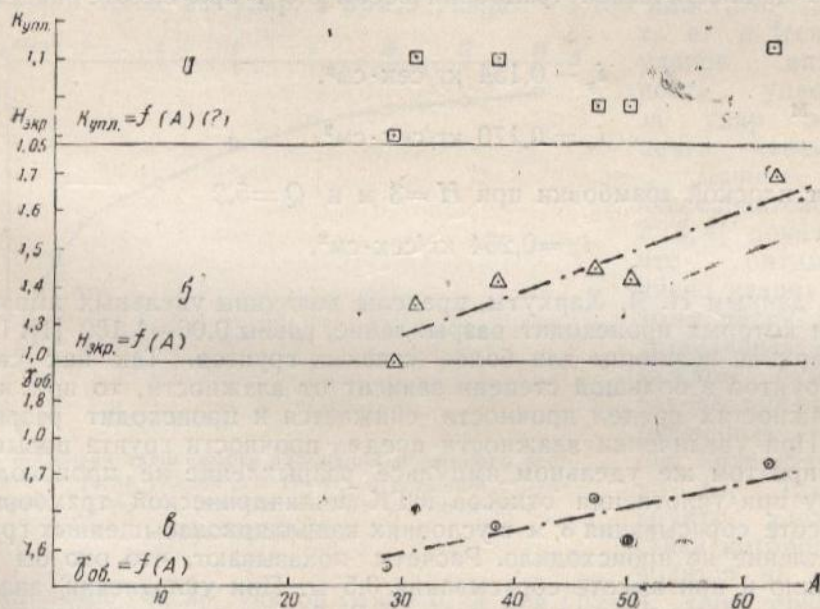


Рис. 1. Плоская трамбовка на канале.

Зависимость между величиной конечной плотности скелета и удельной работой, по данным испытаний плоской трамбовки на канале, показана на рис. 1, а. Из аналогичного графика  $H_{\text{экр}} = f(A)$  (рис. 1, б), где  $H_{\text{экр}}$  — толщина уплотненного экрана, видно, что от величины общей работы (а не только от веса трамбовки) зависит также и глубина уплотнения. В то же время; если принять за основной показатель работы уплотняющих машин коэффициент уплотнения, оказывается (рис. 1, в), что с увеличением общей работы коэффициент уплотнения в определенных пределах уменьшается (?).

Во-вторых, необоснованно утверждение, что максимальной высотой падения трамбовки является 3 м. Исследованиями ДОРНИИ и НИИОСПа установлено, что разрыхление поверхности под действием удара зависит от связности грунта и от удельного импульса удара [1, 2]. Разрыхление наступает, когда удельный импульс превышает предел прочности грунта.

Исследования на Южном канале свидетельствуют о том, что на участке плоской трамбовки верхний слой интенсивно взрыхляется, на участке же вальцовой трамбовки это явление не отмечалось. Наблюдения за работой вальцовой трамбовки в 1958 г. на канале М-2, проходившей при низких влажностях грунта, показали, что верхний слой, до 15 см, взрыхляется.

Определим удельные импульсы обоих видов трамбовок:

$$i_y = \frac{Q \sqrt{2gH}}{g F}, \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести,

$F$  — площадь соприкосновения с грунтом во время удара,

$QH$  — ранее принятые обозначения.

Для цилиндрической трамбовки весом 5,3 т при высоте падения 3 м

$$i_y = 0,154 \text{ кг/сек} \cdot \text{см}^2.$$

при 3,5 м

$$i_y = 0,170 \text{ кг/сек} \cdot \text{см}^2.$$

Для плоской трамбовки при  $H=3$  м и  $Q=5,2$

$$i_y = 0,254 \text{ кг/сек} \cdot \text{см}^2.$$

По данным Н. Я. Хархуты, пределы величины удельных импульсов, при которых происходит разрыхление, равны 0,06—1,180 [1]. При этом верхние величины для более связных грунтов. Так как связность грунтов в большой степени зависит от влажности, то при низких влажностях предел прочности снижается и происходит разрыхление. При увеличении влажности предел прочности грунта повышается и при том же удельном импульсе разрыхление не происходит. Поэтому при уплотнении откосов ЮГК цилиндрической трамбовкой при высоте сбрасывания 3 м в условиях капиллярнонасыщенных грунтов рыхление не происходило. Расчеты показывают, что оно бы произошло и при высоте сбрасывания 3,5 м. При уплотнении аналогичных, но пересушенных откосов М-2 разрыхление отмечалось и при меньших, чем 3 м, высотах падения. В то же время импульс плоской трамбовки настолько велик, что грунт разрыхляется при весе ее 4 т и высоте падения 3 м.

Для уменьшения импульса следует не понижать высоту падения, а увеличивать площадь ударной части. Одновременно необходимо изменить форму плоской трамбовки, сделав ее круглой в плане, так как при прямоугольной трамбовке велика вероятность неравномерных ударов, т. е. ударов не всей плоскостью плиты, что вызывает увеличение удельных импульсов.

Регулирование режима влажности при уплотнении цилиндрической вальцовой может, очевидно, иметь еще одно значение для

уменьшения разрыхления. При увеличении влажности до пределов, близких к границе раскатывания, проявляются свойства пластичности. Поверхность соприкосновения с грунтом, или площадь передачи удара, при этом увеличивается за счет большего вмятия трамбовки в грунт, т. е. фактически уменьшается удельный импульс.

Разрыхленный поверхностный слой грунта слабо связан с плотным слоем, при пуске воды по каналу оплывает и создает заиливание части сечения канала. Поэтому необходимо не допускать разрыхления грунта на откосах каналов. Данному вопросу должно быть уделено серьезное внимание.

Опытами не подтверждено, что наиболее эффективным является уплотнение за 3 удара по одному месту. Согласно данным испытаний плоской трамбовки весом 5,2 т, высоте падения 3 м при 6 ударах на

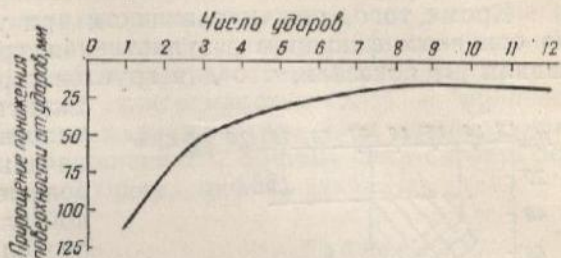


Рис. 2. График зависимости приращения понижения поверхности от количества ударов (данные НИИОС).

целине коэффициент уплотнения равен 1,115 или 1,019 за удар, а при 9 ударах — 1,159 или 1,018 за удар,

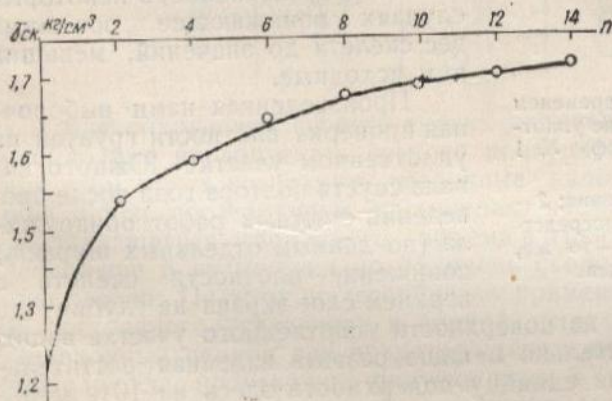


Рис. 3. График зависимости изменения объемного веса скелета от числа ударов для грунта агрегатной структуры,  $\gamma_{сск} = f(n)$  (данные Г. В. Абелишвили Груз-НИИГиМ).

т. е. в течение 9 ударов интенсивность уплотнения за удар остается почти неизменной.

Данные других исследователей [1, 2, 3, 4] показывают, что оптимальное число ударов по одному месту должно устанавливаться в каждом отдельном случае; при этом для различных грунтов оно колеблется от 5 до 10. Так, для грунта, характеристика которого приводится на рис. 2.,

оптимальное число ударов равно 6, а для грунта, характеризующегося рис. 3,—8.

При возрастании числа ударов по одному месту увеличивается толщина уплотненного слоя.

Большим недостатком проведенных исследований является отсутствие наблюдений за влиянием влажности грунта при уплотнении на плотность и водонепроницаемость экрана. Уплотнение производилось при естественной влажности грунтов. Между тем еще работами А. Р. Лебедева, а в дальнейшем различными научными исследованиями установлено, что только при определенной «оптимальной» влажности можно достичь наибольшей плотности и водонепроницаемости грунта.

При работах на ЮГК удалось достичь незначительного уменьшения водопроницаемости — от 1,4 до 63,8 раза, а в среднем для цилиндрической трамбовки — в 30 раз, сегментной — 38, плоской — в 5,7 раза. В аналогичных грунтовых условиях на опытном участке в Курской области при небольших ударных импульсах за счет регулирования влажностью удалось достичь снижения водопроницаемости в 1000 раз [3].

Кроме того, режим влажности при ударном трамбовании является основным фактором разуплотнения грунтов. Работы Г. В. Абелишвили [4] показали, что для грунтов агрегатной структуры (глины и

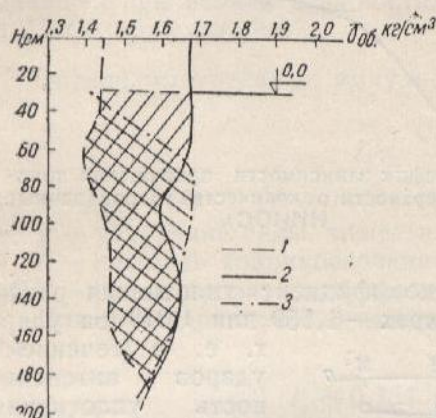


Рис. 4. Изменение со временем плотности скелета по глубине уплотненного слоя (данные шурфа № 1 на ЮГК);

1 — объемный вес до уплотнения; 2 — объемный вес скелета непосредственно после уплотнения; 3 — то же, спустя 1 год и 6 месяцев.

40 см (рис. 4). При этом на поверхности уплотненного участка видны следы набухания и значительно меньше развита наземная растительность — число растений на единицу поверхности здесь на 10% меньше, чем на неуплотненном участке.

Определяющими моментами в решении вопроса применения уплотнения грунтов ненарушенной структуры для предотвращения потерь воды из канала являются срок службы экрана и степень первоначального снижения водопроницаемости. От этих двух факторов зависит экономическая эффективность применения указанного метода.

Срок службы экрана является функцией интенсивности разуплотнения, которое происходит в результате:

- а) упругой деформации частиц грунта,
- б) набухания при насыщении водой вследствие расклинивающего действия молекулярных пленок физически связанной воды,
- в) действия капиллярных сил,
- г) морозного пучения грунтов,
- д) действия землероев и растительности.

При соблюдении оптимальной влажности, близкой к нижнему пределу пластичности, действие первых двух факторов может быть значительно уменьшено. В условиях оптимальной влажности, во-первых, при значительном проявлении пластических свойств уменьшаются

тяжелые суглинки) наименьшее разуплотнение достигается при первоначальной влажности, несколько большей максимальной молекулярной влагоемкости, но меньшей, чем предел раскатывания, а для макропористых грунтов — при влажности, равной максимальной молекулярной влагоемкости. При влажностях, отличных от этих величин, в результате капиллярного и полного насыщения грунтов происходит резкое разуплотнение, в некоторых случаях понижающее объемный вес скелета до значений, меньших чем исходные.

Произведенная нами выборочная проверка плотности грунтов на уплотненном участке Южного канала спустя полтора года после проведения опытных работ обнаружила (по данным отдельных шурфов) понижение плотности скелета в верхнем слое экрана на глубину до

упругие свойства грунта, и, во-вторых, набухание за счет создания адсорбированного слоя связанной воды вокруг мельчайших частиц грунта в основном уже произошло до уплотнения и впоследствии может проявиться только как следствие усиления отталкивающего действия отрицательно заряженных частиц при их сближении. Но вокруг активных частиц грунта слой физически связанной воды уже сформировался, и поэтому удельная поверхностная энергия отрицательно заряженных частиц минимальна и отталкивающее действие их незначительно. Это положение хорошо подтверждается данными Г. В. Абелишвили [4], полученными при уплотнении агрегатного грунта с максимальной молекулярной влагоемкостью 23% и пределом раскатывания 28,5% при различных влажностях. При последующем насыщении разуплотнение по отношению к общему весу скелета после уплотнения выразилось в следующих цифрах (табл. 2).

Таблица 2

| Влажность при уплотнении, % | Объемный вес скелета, кг/см <sup>3</sup> |                  |                 | Разуплотнение, % |
|-----------------------------|------------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|
|                             | до уплотнения                            | после уплотнения | после насыщения |                  |
| 15                          | 1,2                                      | 1,37             | 1,19            | 13,1             |
| 20                          | 1,2                                      | 1,53             | 1,20            | 21,7             |
| 26                          | 1,2                                      | 1,51             | 1,44            | 4,55             |

Для сохранения свойств экрана в течение длительного времени необходимо не допускать резкого понижения его влажности, так как при этом могут возникнуть усадочные явления с образованием трещин и при последующем насыщении набухание возрастет за счет увеличившегося свободного объема в грунте. Периодические циклы иссушения и насыщения могут очень скоро привести к разуплотнению экрана. Поэтому целесообразно применять уплотненные экраны на постоянно действующих в период вегетации каналах, а в неветтационный период для предотвращения иссушения экрана следует периодически производить пуски воды в каналы, заполняя бьефы.

На мелкой оросительной сети могут быть выполнены погребенные экраны (рис. 5), устраиваемые на 50 см ниже дна канала. Поэтому предварительная выемка должна быть сделана на глубине 50 см —  $\Delta S$ , где  $\Delta S$  — ожидаемая осадка при трамбовании. Затем с помощью глубокого трамбования создается экран, над которым возводится качественная насыпь канала. При этом экран предохраняется от иссушения, промерзания и в значительной мере от землероев. Кроме того, нагрузка над экраном препятствует разуплотнению. Единственный недостаток данного метода — некоторое удорожание из-за увеличения объема земляных работ, однако при современном уровне механизации строительства мелкой сети оно незначительно.

С точки зрения степени первоначального понижения водопроницаемости применение уплотнения в тяжелых грунтах редко оказывается экономически целесообразным. Для легких же макропористых лессовых и лессовидных грунтов значительной части Голодной степи ударное уплотнение является наиболее приемлемым способом борьбы с фильтрацией как в связи с возможной просадкой грунтов, так и с их специфическими свойствами.

Из всех возможных видов антифильтрационных мероприятий только уплотненные экраны не разрушаются при посадках, а, наоборот, способствуют их уменьшению. Если подготовленное под уплотнение ложе канала предварительно увлажнить, то произойдет ослабление цементационных связей между частицами и некоторая просадка под действием увлажнения. Затем после 10—15 суток, прекратив подачу воды и доведя влажность грунта до величины, близкой к оптимальной, следует произвести трамбование при ослабленных насыщением водой связях между частицами; при этом грунт значительно уплотняется. Последующая осадка при работе канала уменьшится из-за сокращения толщины подверженного просадке слоя. Кроме того, при трамбовании уменьшается объем пор в пределах уплотненного слоя, а следовательно, и дополнительная нагрузка на нижние слои от веса вышележащего слоя, насыщенного водой.

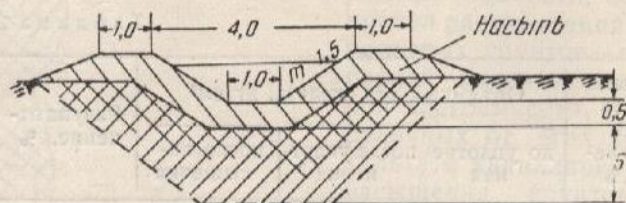


Рис. 5. Погребенные экраны.

Как показывает произведенный для условий северозападной части Голодной степи расчет по методу двух кривых с учетом нагрузки от собственного веса насыщенного водой грунта, просадка при этом уменьшается на 25—35%.

Срок службы уплотненных экранов в лессовидных грунтах значительно выше, чем в грунтах агрегатной структуры, так как благодаря значительно меньшему содержанию глинистых частиц способность их к набуханию меньше, а обратимость уплотнения с предварительным ослаблением цементационных связей увлажнением незначительна.

Очень эффективным может быть применение уплотнения для повышения несущей способности грунтов в основаниях сооружений. Как указывалось выше, при уплотнении трамбованием происходит существенное выравнивание плотности скелета как по высоте уплотненного слоя, так и по площади. Благодаря этому может быть повышено допускаемое напряжение на основание, а следовательно, и уменьшены размеры фундамента. Кроме того, вследствие однородности основания достигается равномерность осадки, а, как известно, именно неравномерность осадки, а не величина ее, является причиной деформаций зданий и сооружений.

Пусть имеем сооружение, фундамент которого шириной 90 см заложен на глубине 1 м. Допускаемое давление на глубине 1 м —  $0,75 \text{ кг/см}^2$ . Грунт основания представлен на большую глубину лессовидным суглинком с удельным весом скелета  $1,35 \text{ кг/см}^3$ . В результате уплотнения трамбуящим устройством плотность основания на глубину 1,5 м под фундаментом доведена до  $1,65 \text{ кг/см}^3$ , а коэффициент пористости — до 0,62. Представим себе условно, что ниже указанного уплотненного слоя грунты имеют естественное строение, хотя в действительности происходит постепенный переход от сильноуплотненного слоя к естественному сложению. Тогда допускаемое давление на верхней границе уплотненного слоя составит  $2 \text{ кг/см}^2$ , а

допускаемое давление на верхней границе слабого слоя

$$R_k = R_1 + \gamma K (H-1). 0,1 = 0,75 + 1,65 \times 1,5 \times (2,5-1) \times 0,1 = 1,05 \text{ кг/см}^2.$$

Как показывает расчет, допускаемое давление на основание может быть повышено до  $2 \text{ кг/см}^2$ ; следовательно в 2 раза уменьшится ширина фундамента и объем бетона.

### ВЫВОДЫ

1. Исследования, проведенные САНИИРИ по уплотнению откосов и дна каналов, не отвечают на все вопросы, поставленные строителями и проектировщиками перед научно-исследовательскими организациями.

2. Применение уплотнения в лессовидных грунтах значительно эффективнее, чем в тяжелых грунтах, поэтому использование трамбования в качестве антифильтрационного мероприятия и способа усиления несущей способности грунтов может дать значительный экономический эффект.

3. Для определения оптимальных условий применения ударного уплотнения научные организации должны ответить на следующие вопросы:

- а) влияние отдельных факторов на разуплотнение лессовидных грунтов,
- б) требование к экрану в период его эксплуатации с точки зрения максимального удлинения его службы,
- в) разработка более совершенных трамбующих механизмов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Хархута Н. Я. Машины для уплотнения грунтов. М., Машгиз, 1953.
2. Швец В. Б. Уплотнение грунтов оснований тяжелыми трамбовками, М., Госстройиздат, 1958.
3. Хлебников С. Г., Абелишвили Г. В., Кервалишвили Д. М. Ударное уплотнение в каналах и водоемах, "Гидротехника и мелиорация", 1955, № 6.
4. Абелишвили Г. В. Некоторые вопросы уплотнения связных структурных грунтов в целях создания противофильтрационных экранов.