

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

М. З. Симонов

Элементы теории подвижности и уплотняемости
бетонной смеси

1. Постановка задачи

Вода в бетоне играет двоякую роль: среды, обеспечивающей подвижность и удобоукладываемость бетонной смеси и химически активного элемента, обеспечивающего твердение бетона. Расход воды определяется, исходя из первого назначения, поскольку количество ее, входящее в химическое взаимодействие с цементом, относительно невелико.

Предложенные до сих пор способы расчета подвижности бетонной смеси основаны на эмпирических зависимостях с различной степенью точностью и используются в практике [1—7].

Большинство из этих предложений исходит из предпосылки, что водопотребность бетонной смеси в основном зависит от поверхности заполнителя. По способу Боломея [6], например, расход воды на бетонную смесь в основном зависит от так называемой водопотребности заполнителя, подсчитываемой как сумма потребной воды на отдельные фракции.

В отличие от этого, автором [7] был предложен способ расчета консистенции бетонной смеси, основанный на учете пустотности заполнителя.

В числе различных предпосылок, учитываемых при расчете консистенции бетонной смеси, следует еще отметить выдвинутую В. И. Сорокером [3] и др. закономерность о постоянстве расхода воды для получения бетонной смеси заданной консистенции при работе на одних и тех же заполнителях и цементе, если только расход последнего изменяется в пределах от 1 до 1,6 раза.

Наконец, следует отметить более общую закономерность, установленную Н. А. Поповым [8], о том, что существует оптимальная водная добавка, при которой коэффициент выхода бетонной смеси имеет наименьшее, а прочность бетона наибольшее значение и дополнительное количество воды, потребное для получения литой консистенции тем меньше, чем меньше заданный расход цемента. Закономерность эта, имеющая с точки зрения автора важное значение, не получила в дальнейшем объяснения и развития.

Характерно, что применяемые в настоящее время методы измерения подвижности бетонной смеси (ОСТ 90050—39) предусматривают установление характеристик их в уплотненном состоянии, в то время, как для строительного производства наиболее важным является изучение подвижности бетонной смеси до ее уплотнения как с точки зрения оценки трудоемкости процесса уплотнения и достигаемого при этом уменьшения воздушных пор, так и оценки степени его нерасплаиваемости.

В настоящей работе делается попытка выявления основных закономерностей, обуславливающих подвижность и уплотняемость бетонной смеси.

2. Бетонная смесь как дисперсная система

Бетонная смесь, являющаяся в основном трехфазной системой, характеризуется свойствами входящих в нее твердых компонентов, воды и воздуха и их соотношения.

а) Твердые компоненты

Основными физическими свойствами твердых компонентов, являются их дисперсность и компактность упаковки.

Дисперсность (раздробленность) твердых компонентов, входящих в бетонную смесь, выражается содержанием в них частиц, начиная с молекулярной и коллоидной дисперсности до частиц с размерами в несколько см. Наиболее укрупненно дисперсные системы подразделяются на 3 группы:

- грубо-дисперсную—с частицами $>0,1\mu$,
- коллоидную—с частицами от $0,1\mu$ до $0,1\mu$,
- молекулярную—с частицами $<0,1\mu$.

Грубо дисперсная система, в свою очередь, подразделяется на фракции, каждая из которой обладает ей присущими физическими свойствами и способностью к химическим реакциям. Пылевидные частицы заполнителя (фракция от 50 до 10μ) обладают большими капиллярными свойствами, чем песок и обнаруживают в водной среде слабо выраженные пластические свойства. Более дисперсные частицы, помимо указанных свойств, обладают способностью коагуляции, адсорбцией и капиллярным напряжением. Коллоиды являются активной частью бетонной смеси; в их среде энергично протекают все физико-химические процессы.

Компактность упаковки твердых частиц, входящих в бетонную смесь, зависит от содержащихся в них фракций и их соотношений, а также от количества воды в бетонной смеси и наличия в ней электролитов и поверхностно-активных веществ.

Если представить твердые компоненты бетонной смеси как дисперсную систему, состоящую из шаров одного и того же диаметра, то, как принято считать, теоретически пустотность может составить: наибольшее значение (при кубической укладке)—47,6% и наименьшее значение (при ромбоэдрической укладке)—26%.

Однако, как показал Г. К. Михайлов [9], наибольшая пористость не соответствует кубической укладке шаров, и, что при правильном их расположении наибольшая пористость составляет $m=87,6\%$. Таким образом „интервал теоретической пористости“ в действительности составляет $26\% \leq m \leq 87,6\%$.

На основании прямых опытов Д. Д. Баркан [10] установил, что для фракций с размерами частиц $>0,55$ мм значение пустотности мало зависит от размеров частиц и в среднем составляет 46% . Для тонкозернистых фракций $<0,35$ мм значение пустотности возрастает, достигая, например, для цемента— 67% и для глины— 78% . В опытах автора пустотность цемента в рыхло-насыпанном виде также составляла 67% и после уплотнения вибрированием— 62% .

Известно, что пустотность дисперсных систем можно значительно уменьшить, если смешивать фракции, состоящие из частиц разных размеров. Располагая частицы разных размеров так, чтобы малые частицы заполняли поры между крупными и в свою очередь еще более мелкие частицы заполняли вновь образовавшиеся пространства, теоретически можно получить смеси с пустотностью бесконечно близкой к нулю.

Исследования В. В. Охотина [11] показали, что наименьшая пустотность получается тогда, когда заполнитель имеет диаметр в 16 раз меньший диаметра заполняемой фракции и по весу взят в количестве равной $\frac{3}{7}$ от веса этой фракции. Согласно его исследованиям для смеси песка из зерен крупностью 2—4 мм фильтрационная способность снижается при добавлении к ней фракции с зернами 0,1—0,25 мм в количестве 10% —в 2 раза, 20% —в 12 раз и 30% —в 200 раз. Дальнейшее увеличение содержания мелкой фракции приводило к повышению фильтрационной способности.

Геометрические факторы, влияющие на плотность упаковки цемента и заполнителя изучались также А. М. Гинзбургом и В. Д. Сафроновым [12]. Авторы пришли к выводу, что отношение зерен цемента к зернам песка или зерен песка к зернам гравия должно составлять от $\frac{1}{14}$ до $\frac{1}{23}$ их линейной величины и при указанных соотношениях в идеальных случаях можно ожидать, что минимальные средние значения пустот составят:

при смешивании цемента и песка— 18% ,

при смешивании цемента, песка и гравия— 8% .

В опытах автора смесь цемента, песка и гравия имела пустотность:

в рыхлом состоянии— $26—27\%$,

после уплотнения вибрированием— $14—18\%$.

Приведенные данные показывают, что пустотность твердых компонентов бетона как в отдельности, так и в смеси, определяется не только относительными размерами фракций и их соотноше-

ниями между собой, но и от абсолютных размеров частиц и от принятых методов их уплотнения.

б) Вода

Вода вступает в соединение со всеми твердыми компонентами, входящими в бетонную смесь. Однако, характер этих соединений различен по интенсивности связи и по изменению свойств воды. Существует очень много схем классификации форм связи воды с материалом. Наиболее подробной и объемлющей все различные образные формы связи является схема П. А. Ребиндера [13]. По этой схеме, основанной на интенсивности энергии связи влаги с материалом, все формы связи делятся на три группы: химическую (связь стехиометрическая), физико-химическую (связь в различных не строго определенных соотношениях) и механическую (удержание воды в неопределенных количествах).

Поскольку в поставленную в данной работе задачу входит изучение свойств бетонной смеси в начальной стадии ее изготовления и во всяком случае в промежутке времени, когда загустевание бетонной смеси еще не заметно, химическую форму связи воды с твердыми компонентами бетонной смеси (преимущественно с зернами цементного клинкера) оставляем без рассмотрения. С учетом сказанного и для уяснения характера связи воды с твердыми компонентами в бетонной смеси можно ограничиться рассмотрением классификации форм воды, установленной еще в 1918 году проф. А. Ф. Лебедевым [14], для почв и грунтов.

По А. Ф. Лебедеву, можно различить следующие 4 формы воды при температуре выше нуля: водяной пар, гигроскопическая вода, пленочная и гравитационная.

Вода в виде пара движется как газ из места большей упругости в места с меньшей упругостью.

Гигроскопическая вода представляет собой водяной пар, адсорбированный частицами твердых компонентов. Максимальная гигроскопичность достигается, когда вокруг частицы твердого компонента образуется сплошная пленка воды, толщиной в один ряд молекул: при этом абсолютная влажность воздуха в системе равна 100%. Эта категория воды перемещается из одних слоев в другие только переходя в водяной пар.

Пленочная вода находится под влиянием молекулярных сцепления между частицами твердых компонентов и воды.

Электромолекулярные силы притяжения очень велики, но действуют на весьма близких расстояниях, и на расстоянии менее чем 0,5 μ , они становятся ничтожно малыми, не превосходя силы тяжести.

У самой поверхности твердых частиц электромолекулярные силы достигают тысяч и десятков тысяч $\text{кг}/\text{см}^2$. Слои воды, связанные с твердыми частицами такими силами, называются *прочной связанной водой*. Количество прочно связанной воды с твердыми минеральными

разными частицами в зависимости от их крупности может быть определено приведенными в таблице 1 данными А. Ф. Лебедева, установленными им при помощи центрифуги, развивающей силы в 70000 раз превышающие силы тяжести [15].

Таблица 1

Молекулярная влагоемкость (с учетом только прочно связанной воды) для различных фракций, по
А. Ф. Лебедеву

Ф р а к ц и и	Диаметр частиц в мм	Максимальная молекулярная влагоемкость в проц.
Крупный песок	1—0,5	1,57
Средний песок	0,5—0,25	1,60
Мелкий песок	0,25—0,1	2,73
Очень мелкий песок	0,1—0,05	4,75
П и л ь	0,05—0,005	10,18
Г л и н а	0,005—0	44,85

Слой прочно связанной воды, как показали исследования П. А. Ребиндера [16], в свою очередь связывают и ориентируют прилегающие к ним молекулы воды. Последние образуют так называемую *рыхло связанную воду*.

Провести определенную границу между прочно связанной и рыхло связанной водой не удастся.

На основании существующих воззрений, в качестве весьма приближенных величин, толщину прочно связанной воды можно считать 0,15 μ и толщину всей связанной воды (с учетом рыхло связанной)—0,5 μ . Опыты подтверждают, что количество рыхло связанной воды во много раз превышает количество прочно связанной. Согласно исследованиям А. В. Думанского [17], в торфах, например, количество рыхло связанной воды в 50 раз превышает количество прочно связанной.

Плотность связанной воды выше плотности свободной воды. По данным А. Катукова [18], в зависимости от коэффициента гидрофильности материала, плотность связанной воды может достигнуть величины 1,81 г/см³.

Вязкость связанной воды отличается от вязкости свободной воды, причем значение ее увеличивается по мере приближения к слоям наиболее близким к поверхности твердых компонентов.

Такой же характер имеет изменение упругих характеристик связанной воды. По исследованиям Б. В. Дерягина [22] при толщине пленки в 0,15 μ модуль сдвига еще ничтожен, тогда как уже при уменьшении толщины ее до 0,09 μ модуль сдвига повышается до 200 кг/см².

Пленочная вода может передвигаться между частицами твердых компонентов от более толстых пленок в сторону более тон-

ких. Сила тяжести не может оказывать влияния на движение пленочной воды.

Гравитационная вода представляет собой свободную воду, не подверженную действию молекулярных сил притяжения к поверхности твердых частиц; передвижение ее происходит под влиянием силы тяжести.

Следует различать две категории гравитационной воды: капиллярную или „подвешенную“ и собственно-гравитационную или „текучую“, находящуюся в состоянии падения. Если все поры заполнены водой, то ее состояние будет подчиняться законам гидравлики.

В межзерновых пространствах бетонной смеси капиллярные явления приводят к двоякому эффекту:

к образованию капиллярного припоя между двумя частицами в результате образования в узких пространствах между ними водокольцевых контактов,

к движению воды в этих пространствах под влиянием капиллярного давления из водонасыщенной зоны в зоны менее насыщенные водой.

При контакте двух шаровых частиц, для определения сил сцепления на 1 см^2 поверхности при $x=0$ (см. фиг. 1а), в соответствии с работами проф. Г. И. Покровского [19], В. В. Михайлов дает следующее выражение [20]:

$$K = \frac{\pi\sigma}{2r} \left(1 - \frac{3r_1}{2r} \right). \quad (1)$$

С уменьшением влажности силы капиллярного сцепления между частицами будут увеличиваться. При $r_1=0$

$$K_{\max} = \frac{\pi\sigma}{2r} = 0,000126 \frac{1}{r} \text{ кг/см}^2. \quad (2)$$

Пользуясь выражением (2) В. В. Михайлов заключает, что при уменьшении радиуса частиц от $0,1 \text{ см}$ до $0,000001 \text{ см}$ ($0,01 \text{ м}$), силы капиллярного сцепления должны увеличиться от $0,00126 \text{ кг/см}^2$ до 126 кг/см^2 .

По поводу этих величин следует сказать, что в действительности силы капиллярного сцепления между частицами не могут достигнуть особенно больших значений, поскольку, как указывалось выше, промежутки менее $0,5 \text{ м}$ следует считать зоной образования связанной воды. Допуская, что капиллярное давление между двумя частицами может „деформировать“ только слой рыхло связанной воды, можно прийти к выводу, что для образования капиллярных менисков промежутки менее $0,1-0,2 \text{ м}$ следует считать недостижимыми.

Данные В. В. Михайлова показывают, что с увеличением размера частиц силы капиллярного сцепления резко падают, и что уже в крупных фракциях песка силы эти становятся незначительными, достигая в гравии (щебне) нулевого значения.

Приведенные данные позволяют заключить, что капиллярные

силы могут быть значительными только в мелкопесчаных и пылевидных фракциях.

Движение воды в межзерновых пространствах бетонной смеси может быть уподоблено движению капиллярной воды, обусловливаемому кривизной менисков или радиусом капилляра. Как известно, высота поднятия H жидкости в капиллярной трубке может быть определена из выражения

$$H = \frac{2\sigma}{r\gamma g} \quad (3)$$

где σ —поверхностное натяжение, r —радиус капилляра, γ —плотность жидкости, g —ускорение силы тяжести.

Исходя из этой формулы А. И. Лыков [13] приходит к выводу, что в капиллярах с радиусом $r=10^{-6}$ см капиллярное поднятие может достигнуть 1,5 м, т. е. всасывающая сила равна примерно 150 кг/см².

С точки зрения современного состояния изученности сил электромолекулярного взаимодействия минеральных частиц с водой, в классификацию форм воды, предложенную А. Ф. Лебедевым, в настоящее время вносится уточнение, заключающееся в сведении этих форм к трем: связанной воде (гигроскопической и пленочной), свободной воде (капиллярной и гравитационной) и водяному пару [23].

в) Воздух

Следует, наконец, рассмотреть вопрос о влиянии газообразной фазы на капиллярные силы и категории воздуха в смеси. Присутствие воздуха в бетонной смеси обуславливает наличие свободных поверхностей между твердыми частицами, следствием чего и является наличие в бетонной смеси сил поверхностного натяжения или капиллярных сил. При возрастании в бетонной смеси количества воды, поверхности ограничивающие воду между отдельными частицами начнут сливаться друг с другом, в результате чего величина внутренних капиллярных сил упадет до нуля. Из сказанного следует, что внутренние капиллярные силы в бетонной смеси могут исчезнуть в двух случаях:

при полном заполнении всех межзерновых пространств в бетонной смеси водой,

в случае наличия газообразной фазы в смеси, в виде диспергированных пузырьков, расположенных между твердыми частицами.

В свете описанных выше свойств пленочной воды, расположение воздушных пузырьков в бетонной смеси мыслится возможным именно между твердыми частицами, а не вокруг одного или нескольких твердых частиц бетонной смеси.

Воздух в бетонной смеси, сообщаясь с атмосферой, очевидно будет иметь температуру и давление атмосферы, в то время, как воздух защемленный в ней в виде диспергированных воздушных пузырьков может иметь отличные от наружной атмосферы температуру и давление.

При полном обводнении межзерновых пространств бетонной смеси граница раздела воздух—вода переносится на наружную ее поверхность, в результате чего исчезнут внутренние и возникнут внешние капиллярные силы.

По аналогии Н. М. Герсевича, поверхностный слой смеси в таком состоянии уподобляется резиновому мешку с песком, из которого выкачан воздух.

Внешние капиллярные силы (давление) исчезают при нахождении бетонной смеси под слоем воды.

3. Основные закономерности, определяющие подвижность и уплотняемость бетонной смеси

Рассмотрение бетонной смеси как дисперсной системы позволяет наметить основные закономерности, определяющие ее подвижность и уплотняемость.

В общем случае уплотнение бетонной смеси имеет целью повышение процента твердой фазы в смеси.

Так как твердые компоненты и вода в бетонной смеси практически не сжимаемы, то пределом уплотнения ее обычно является доведение в ней до нуля газообразной фазы. Но в некоторых случаях (центрофугирование, вакуумирование) возможно и дальнейшее уплотнение бетонной смеси путем отжатия из смеси некоторой части воды.

Уплотняемость бетонной смеси зависит от трех основных факторов: от внешней нагрузки, стремящейся сблизить твердые частицы между собой; от дисперсности твердых частиц и соотношений фракций, характеризующих компактность упаковки частиц; и от величины действующих между твердыми частицами сил, препятствующих сдвигу их друг относительно друга, характеризующих подвижность бетонной смеси.

а) Факторы уплотнения бетонной смеси

Объем, занимаемый бетонной смесью данного состава, обуславливается соотношением между внешней нагрузкой и сопротивлением сдвигу между частицами твердых компонентов. В бетонных смесях, укладываемых без уплотнения, „внешней“ нагрузкой является собственный вес. При вибрировании бетонной смеси в результате уменьшения числа контактов и тиксотропных явлений (разжижением геля в золь), общее сопротивление сдвигу между твердыми частицами падает и последние под действием силы тяжести располагаются более компактно, занимая новые, более устойчивые положения.

Сила тяжести как фактор уплотнения бетонной смеси может быть увеличена во много раз при ее центрофугировании; сила тяжести мо-

жет быть увеличена также приложением дополнительной нагрузки (трамбование и прессование).

б) Факторы компактности упаковки твердых частиц в бетонной смеси

В соответствии с приведенными выше данными представляется возможным выдвинуть следующие положения: достижение наибольшей компактности упаковки частиц в бетонной смеси зависит не от зернового состава отдельно взятых компонентов, входящих в бетонную смесь, а от зернового состава смеси всех твердых компонентов, входящих в нее, включая и вяжущее; мелкозернистые пески могут дать в бетоне удовлетворительные результаты не только в случае добавления к нему крупнозернистого песка, но и при использовании цемента более тонкого помола; регулирование зернового состава смеси твердых компонентов в части наиболее тонкодисперсных составляющих возможно осуществить путем использования пептизирующих и коагулирующих добавок; при известных соотношениях цементного порошка и заполнителя в сравнимых условиях (при одинаковом расходе цемента и консистенции) растворы по своим прочностным показателям могут не уступать бетонам; поскольку уплотняемость бетонной смеси зависит и от других факторов, критерием для оценки зернового состава твердых ее компонентов не может служить одно только стремление к достижению их наибольшей компактности.

в) Силы сопротивления сдвигу в бетонной смеси

Сопротивление сдвигу частиц в бетонной смеси обуславливается, главным образом, силами трения твердых частиц между собой и молекулярными и капиллярными силами, возникающими между этими частицами при их увлажнении. Очевидно, что на сопротивление сдвигу твердых компонентов будет оказывать влияние также тонкая фракция цемента, образующая с водой истинный гель и обладающая смазочными свойствами.

В зависимости от содержания в смеси воды величина этих сил претерпевает сильные изменения. Поэтому оценка влияния каждой из составляющих сил на общее сопротивление сдвигу может быть сделана только при рассмотрении их в развитии, в интервале влажности бетонной смеси от совершенно сухого состояния до предельного насыщения влагой, соответствующего моменту водоотделения.

В сухой бетонной смеси действуют только силы трения между частицами. Поскольку давление в точках контакта увеличивается с возрастанием веса частиц, то силы трения в сухой бетонной смеси будут тем большими, чем крупнозернистее смесь.

При затворении бетонной смеси весьма незначительным количеством воды, последняя целиком израсходуется на образование пле-

ночных слоев вокруг твердых частиц. Если последовательно осуществлять затворения бетонной смеси с постепенно увеличивающимся количеством воды, то первоначально вода будет расходоваться опять таки на образование пленочных слоев вокруг твердых частиц, причем новые слои воды будут все менее связанными, чем предыдущие и, наконец, станут рыхло связанными слоями. Но процесс образования пленочных слоев воды не может продолжаться до конца. На известном этапе, когда интенсивность связи рыхло связанных слоев станет сопоставимой с капиллярными силами, в узких пространствах контакта между твердыми частицами начнут образовываться водо-кольцевые мениски, стягивающие эти частицы между собой и препятствующие увеличению толщины пленочной воды в контактах до предельного значения. С этими силами будут суммироваться и силы тяжести самих твердых частиц (эффект „продавливания“).

В момент своего возникновения капиллярные силы имеют наибольшие значения. По мере дальнейшего увеличения содержания воды в бетонной смеси, соответственно увеличению радиуса менисков, капиллярные силы будут уменьшаться и по мере постепенного заполнения водой межзерновых пространств силы эти достигают нулевых значений.

С другой стороны, при обводнении межзерновых пространств, твердые частицы, в результате „взвешивающего“ эффекта, будут терять часть своего веса.

Оба указанных обстоятельства приведут к ослаблению „продавливания“ рыхло связанных слоев пленочной воды.

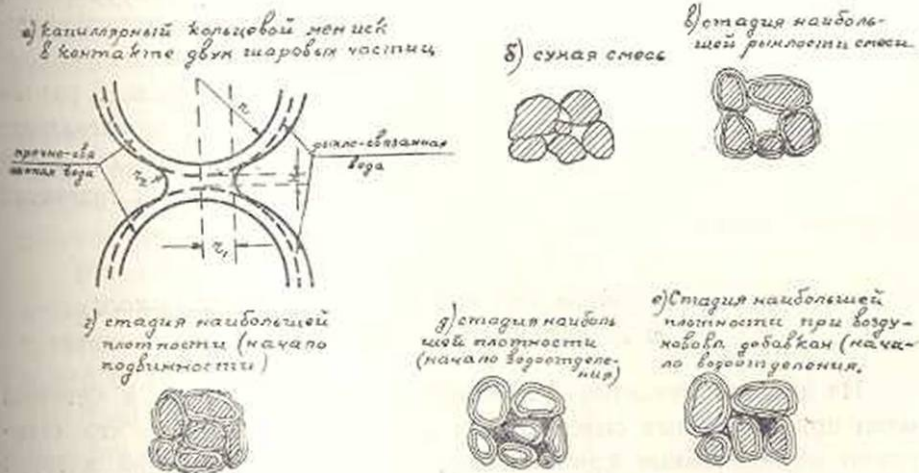
Однако и в полностью обводненной бетонной смеси пленочная вода может иметь различную толщину. Это зависит от следующих обстоятельств: если бетонная смесь затворяется с таким количеством воды, что ее оказывается достаточным для заполнения объема межзерновых пространств твердых частиц только в уплотненном состоянии, в этом случае толщина пленочной воды в контактах будет тем меньше, чем интенсивнее потребовалось при этом уплотнение бетонной смеси. Если же бетонная смесь затворяется с количеством воды, достаточным для заполнения объема межзерновых пространств твердых частиц в неуплотненном состоянии, то такая бетонная смесь, естественно, не будет нуждаться больше в уплотнении, а пленочная вода в контактах будет иметь наибольшую толщину; если, наконец, бетонная смесь затворяется с еще большим количеством воды, то толщина пленочной воды не будет больше увеличиваться и в такой смеси будет иметь место водоотделение.

Что касается силы сопротивления сдвигу, то в начальной стадии образования пленочной воды, по мере увеличения толщины пленки, свободные молекулярные силы будут уменьшаться, а пло-

щадь контактов увеличиваться. Поэтому можно представить себе, что на определенном этапе, увеличение содержания в бетонной смеси воды будет приводить к увеличению суммарного сопротивления сдвигу. Наибольшего значения общее сопротивление сдвигу подвижному достигает в момент образования кольцевых менисков в контактах. Очевидно, что чем больше число контактов, т. е. чем тонко дисперснее смесь, тем больше будет сопротивление бетонной смеси сдвигу. При дальнейшем увеличении содержания воды сопротивление сдвигу будет уменьшаться и достигнет наименьшего значения в полностью обводненной бетонной смеси.

Так как вязкость пленочной воды зависит от толщины ее, то подвижность бетонной смеси обводненной с применением уплотнения будет наименьшей и обводненной без уплотнения — наибольшей.

В последней стадии силы сопротивления сдвигу будут состоять только из сил трения между частицами и внешнего капиллярного давления. Силы трения между твердыми частицами, находящихся в водной среде, будут меньшими, чем в сухом состоянии как в результате «взвешивающего» эффекта, так и смазывающего действия водных оболочек. С другой стороны, внешние капиллярные силы в сравнении с внутренними будут весьма малы. Поэтому общее сопротивление сдвигу бетонной смеси в указанной стадии по величине может быть не только достаточно близким к силам, действующим в совершенно сухой смеси, но и менее последних.



Фиг. 1. Схемы взаимодействия частиц бетонной смеси в зависимости от содержания воды.

На фиг. 1 приведены схемы взаимодействия частиц в бетонных смесях в зависимости от содержания в них воды. На этих схемах, вокруг твердых частиц, пленочная вода условно показана состоящей из двух слоев: прочно связанного и рыхло связанного.

Схема „а“ показывает деталь контакта двух шаровых частиц в момент образования кольцевого мениска. Для этой стадии толщина „рыхло связанной“ воды в зоне контакта принята равной нулю.

Схема „б“ соответствует совершенно сухой смеси.

Схема „в“ соответствует бетонной смеси с весьма незначительным содержанием воды, когда она занимает наиболее „рыхлое“ положение (наименьшая плотность).

Схема „г“ соответствует бетонной смеси уложенной с уплотнением. Твердые частицы раздвинуты только на удвоенную толщину „прочно связанной“ воды.

Схема „д“ соответствует бетонной смеси обводненной без уплотнения. Твердые частицы раздвинуты на удвоенную толщину „прочно связанной“ плюс „рыхло связанной“ воды.

Схема „е“ соответствует бетонной смеси по схеме „д“ с той только разницей, что в данном случае пространство между зернами частично заполнено диспергированными воздушными шариками.

Эта схема поясняет возможность получения бетонных смесей одинаковой подвижности при меньшем расходе воды в случае применения воздухововлекающих добавок. Однако, очевидно, что такая возможность будет иметь место только в том случае, когда воздушные пузырьки располагаются между твердыми частицами, не раздвигая их.

По измерениям В. В. Стольников [21], пузырьки воздуха, создающиеся в бетонной смеси при помощи воздухововлекающих добавок, имеют размеры от 0,04 до 0,25 мм. Для того, чтобы эти пузырьки расположились в межзерновых пространствах необходимо, чтобы диаметры твердых частиц превышали диаметры пузырьков в 16 раз (по В. В. Охотину). Из сказанного следует, что воздухововлекающие добавки могут способствовать уменьшению капиллярных сил в песчаных фракциях и не давать эффекта в цементных и гравийных фракциях бетонной смеси.

г) Характеристики уплотняемости бетонной смеси и ее критические влажности

Из анализа развития сопротивления сдвигу частиц в бетонной смеси при различных содержаниях в ней воды следует, что существуют определенные критические влажности смеси, при которых уплотняемость ее достигает предельных значений.

Непосредственным мерилom уплотняемости бетонной смеси является изменение ее объема по сравнению с каким-нибудь определенным состоянием.

В этом отношении целесообразно учитывать нижеследующие характеристики уплотняемости и плотности бетонной смеси.

Уплотняемость (K_y), определяемая отношением разности между объемом свободно уложенной (рыхлой) бетонной смеси (V_p) и

объемом ее в уплотненном виде (V_y) к объему свободно уложенной бетонной смеси (V_p), выражаемая в процентах:

$$K_y = \frac{V_p - V_y}{V_p} \cdot 100. \quad (4)$$

Изменение объема (K_n), определяемое отношением объема бетонной смеси при данном расходе воды (V_n) к объему ее в сухом состоянии (V_c)

$$K_n = \frac{V_n}{V_c} = \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \left(1 + \frac{B}{100} \right), \quad (5)$$

где γ_c и γ_n — объемные веса бетонных смесей в сухом и влажном состояниях, B — вода в процентах по весу.

Плотность (K_n), определяемая отношением твердой фазы (T) ко всему объему бетонной смеси (V)

$$K_n = \frac{T}{V}, \quad (6)$$

причем

$$T = \frac{z}{\gamma_z} + \frac{ц}{\gamma_n}, \quad (7)$$

где z и $ц$ — заполнитель и цемент по весу в единице объема; γ_z и γ_n — удельные веса заполнителя и цемента.

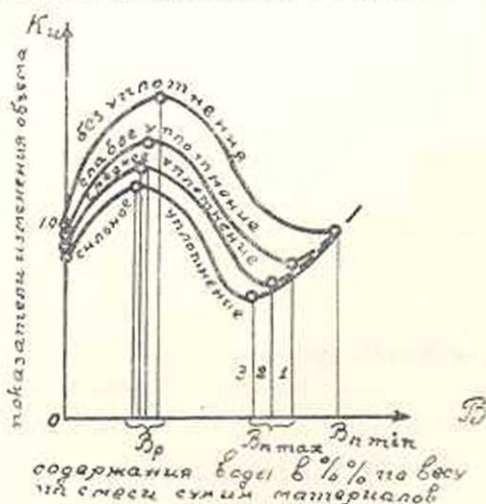
В соответствии с изложенным выше, кривые изменения объема бетонной смеси, в зависимости от содержания воды и степени уплотнения, должны соответствовать схеме, показанной на фиг. 2.

Содержания воды в процентах, при которых K_n достигает предельных значений, следует назвать критическими влажностями бетонной смеси.

В соответствии с приведенными выше схемами (фиг. 2) таких критических влажностей будет четыре:

$B=0$ для сухой смеси, B_p — для смеси с наибольшей рыхлостью, $B_{n \max}$ — для смеси с наибольшей плотностью и $B_{n \min}$ — для смеси в момент водоотделения.

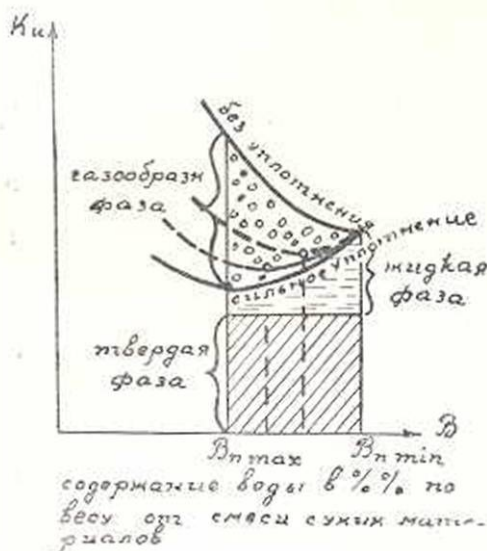
В зависимости от степени уплотнения бетонной смеси K_n и B будут иметь раз-



Фиг. 2. Кривые изменения объема бетонной смеси в зависимости от содержания в ней воды и уплотнения.

личные значения. Чем интенсивнее уплотнение, тем больше будет интервал между $V_{п\max}$ и $V_{п\min}$. Наоборот, в бетонных смесях укладываемых без уплотнения этот интервал весьма мал или равен нулю, как это показано на фиг. 2.

Фазовые соотношения в бетонной смеси в интервале от $V_{п\max}$ до $V_{п\min}$ показаны на фиг. 3.



Фиг. 3. Фазовые соотношения бетонной смеси в интервале от $V_{п\max}$ до $V_{п\min}$.

Из рассмотрения этой фигуры видно, что при расходе воды $V = V_{п\max}$ газообразная фаза будет равна нулю только при наиболее интенсивном методе уплотнения; при менее интенсивном уплотнении в бетонной смеси будут оставаться воздушные поры, а при отсутствии уплотнения газообразная фаза достигает наибольшего значения.

При расходе воды $V = V_{п\min}$ газообразная фаза отсутствует и в неуплотняемой бетонной смеси, что делает бессмысленным уплотнение таких смесей. Как указывалось выше, такую бетонную смесь можно уплотнить только пу-

тем отжатия из нее воды.

Из сказанного следует, что для каждого значения расхода воды существует предельная интенсивность уплотнения, выше которого она не может дать эффекта.

Можно написать, что в зависимости от водосодержания плотность и уплотняемость бетонной смеси будут иметь следующие значения:

при $V = V_{п\max}$

$$K_{пл} = K_{пл\max}$$

$$K_{п} = K_{п\max}$$

при $V = V_{п\min}$

$$K_{пл} = 0$$

$$K_{п} < K_{п\max}$$

д) Характеристики подвижности бетонной смеси

В соответствии с изложенным при $V = V_{п\max}$ бетонная смесь будет иметь наименьшую подвижность и при $V = V_{п\min}$ — наибольшую.

Кроме этого, из предыдущего следует, что если расход воды

для получения бетонной смеси с наибольшей плотностью ($V_{n \max}$) в основном определяется объемом пустот в уплотненной смеси (α), то избыточный расход воды для доведения бетонной смеси до наибольшей подвижности ($V_{n \max} - V_{n \min}$) будет определяться толщиной пленочной воды. Чем больше поверхность твердых компонентов (F), тем больше будет разница между $V_{n \min}$ и $V_{n \max}$. Поэтому с некоторым упрощением можно написать:

$$V_{n \max} = f(\alpha), \quad (8)$$

$$V_{n \min} = f(\alpha, F). \quad (9)$$

По аналогии с характеристиками, принятыми в грунтоведении, целесообразно ввести характеристику подвижности бетонной смеси по разности между указанными критическими влажностями, назвав ее числом подвижности Π :

$$\Pi = V_{n \min} - V_{n \max}. \quad (10)$$

Число подвижности будет зависеть от зернового состава твердых компонентов. С увеличением их дисперсности величина Π будет увеличиваться.

С другой стороны, при недостаточном содержании в бетонной смеси мелкозернистых частиц число подвижности будет уменьшаться.

При $V_{n \min} - V_{n \max} = \Pi = 0$ начало подвижности бетонной смеси и ее водоотделение будут совпадать.

Кроме числа подвижности целесообразно ввести также характеристику степени разжиженности бетонной смеси, назвав ее *показателем консистенции* (P — разжиженность).

$$P = \frac{V - V_{n \max}}{\Pi}, \quad (11)$$

где V — содержание воды в бетонной смеси при данной подвижности,

при $V = V_{n \min}$ — показатель консистенции $P=1$,

и при $V = V_{n \max}$ — показатель консистенции $P=0$.

Бетонная смесь, применяемая на практике, должна удовлетворять условию

$$0 < P < 1. \quad (12)$$

Бетонная смесь с числом подвижности равным или близким нулю будет напоминать сыпучую смесь, лишенную связности.

Такая бетонная смесь не будет обладать необходимой нерасслаиваемостью и удобоукладываемостью. Поэтому критерием при выборе состава твердых компонентов бетонной смеси должны служить как соображения получения минимальной водопотребности ($V_{n \max}$), так и удобоукладываемости (Π).

е) Особенности уплотняемости и подвижности раздельно укладываемой бетонной смеси

При обычном приготовлении бетонной смеси вода вступает в контакт одновременно со всеми твердыми частицами, в то время, как при раздельном методе бетонирования вода вступает в контакт с твердыми частицами послойно, после того как происходит полное обводнение предыдущего слоя. В связи с этим, в данном случае сопротивление сдвигу смеси в целом обуславливается или силами трения между частицами в сухом состоянии, или силами трения между ними в полностью обводненном состоянии.

Высказанные выше соображения позволяют утверждать, что при введении воды в предварительно насыпанную сухую смесь всегда будет иметь место уменьшение ее объема. В этом отношении очень показательны опыт Н. А. Крылова по изучению изменяемости объема весьма мелкозернистого песка, при увлажнении ее без перемешивания, поставленный по предложению Б. В. Дерягина [21]. В цилиндрическую камеру, дно которой представляло собой шоттовский фильтр, соединенный с краном резервуара, насыпался слой кварцевого песка из зерен около 0,01 мм в поперечнике, промытого азотной кислотой и прокаленного. Высота столба составляла около 30 мм. Камера откачивалась в течение 1 часа, после чего столб песка медленно пропитывался водой, подававшейся снизу через фильтр. На этом столбе лежала платформочка из стекла, перемещение которой по вертикали измерялось оптическим методом. Оказалось, что пока пропитка не закончена и следовательно в песке имелись мениски, высота столба не изменялась. Но как только весь столб оказывался под поверхностью пропитавшей его воды, высота столба резко уменьшалась.

Таким образом, расклинивающее действие связанных слоев воды и вслед за этим их смазочное действие смогло проявиться с исчезновением менисков, вызывающих капиллярное давление, прижимавшее частицы кварца друг к другу.

Уменьшение трения между частицами позволило им под влиянием силы тяжести расположиться более компактно.

При раздельном методе бетонирования, предварительно укладываемый в бетонируемое пространство, заполнитель обладает естественной влажностью, а вода (с цементом и песком) подается под напором, при одновременной вибрации всей смеси, что должно привести к большему уменьшению объема смеси, чем в предыдущем случае.

Бетонная смесь раздельной укладки будет иметь следующие характеристики: расход воды близкий к критической влажности $W_{п\max}$, показатель консистенции $P = 0$, коэффициент плотности (K_n) близкий к максимальному для данного состава твердых компонентов.

4. Влияние фазовых соотношений на подвижность и уплотняемость бетонной смеси и ее составляющих

С целью проверки закономерностей, описанных в предыдущей части, были поставлены опыты на бетонной смеси, приготовленной обычным образом и на входящих в нее песке и цементе.

Опыты были начаты на сухих материалах и продолжались на них при постепенно повышающейся влажности (по 1—2% по весу) до полного водонасыщения.

Вода для увлажнения использовалась как в чистом виде, так и с гидрофобной добавкой (абиеиновая смола) в размере 0,05% по весу от воды.

Определение объемного веса производилось в 5 л посуде при свободном насыпании в посуду с высоты 5 см над верхним краем и при заполнении с вибрированием на стандартной виброплощадке.

а) Бетонная смесь

Испытанию была подвергнута смесь из цемента, песка и гравия в весовой пропорции 1:2,5:5. Вода к сухой смеси добавлялась по 1% по весу и была доведена до 11%, соответствующих наибольшей подвижности, близкой к моменту водоотделения. В зависимости от коэффициента изменения объема смеси (K_n) расхода цемента составлял от 177 до 243 кг/м³ для свободно-укладываемых смесей и от 212 до 273 кг/м³ для смесей укладываемых с вибрированием.

На фиг. 4 приведены кривые изменения фазовых соотношений в бетонной смеси, а также кривые изменения объема смеси, уплотняемости и ее подвижности в зависимости от содержания в смеси воды. Кривые эти, как сопряженные, приведены для наглядности друг под другом.

Как видно из рассмотрения фиг. 4 опыты подтверждают наличие в бетонных смесях описанных выше закономерностей и позволяют установить абсолютные значения характеристик уплотняемости и подвижности бетонной смеси данного состава (см. табл. 2).

Начало подвижности бетонной смеси соответствует уменьшению в ней газообразной фазы до величины весьма близкой к нулю. В этой стадии плотность бетонной смеси достигает наибольшей величины $K_n = 0,849$.

При наибольшей подвижности бетонной смеси (осадка конуса 17 см) коэффициент плотности уменьшается, достигая $K_n = 0,792$.

При этом коэффициент уплотняемости смеси приобретает значение близкое к единице ($K_y = 0,98$).

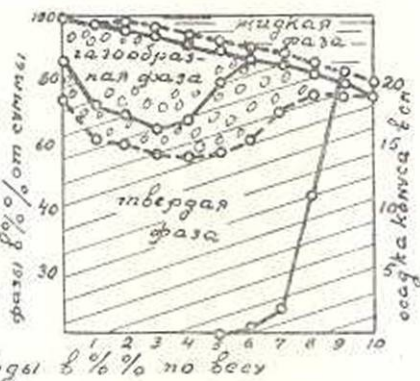
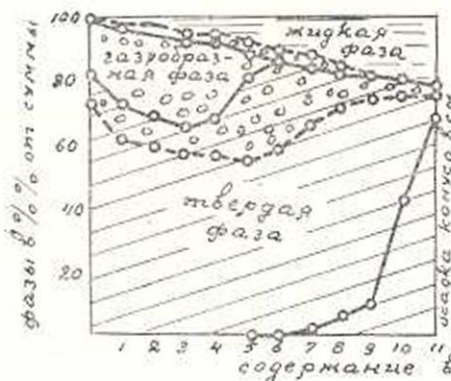
Критические влажности составляют: $W_{n\max} = 6$; $W_{n\min} = 11$. Число подвижности: $P = 5$.

Затворение бетонной смеси на воде с гидрофобной добавкой

Влияние содержания воды на соотношение фаз в бетонной смеси и ее подвижность.

а) вода чистая б) вода с гидрофобной добавкой

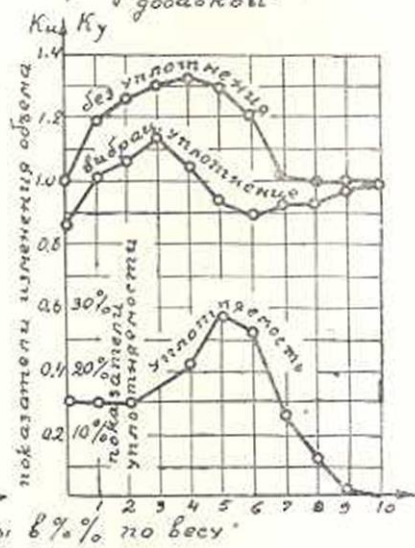
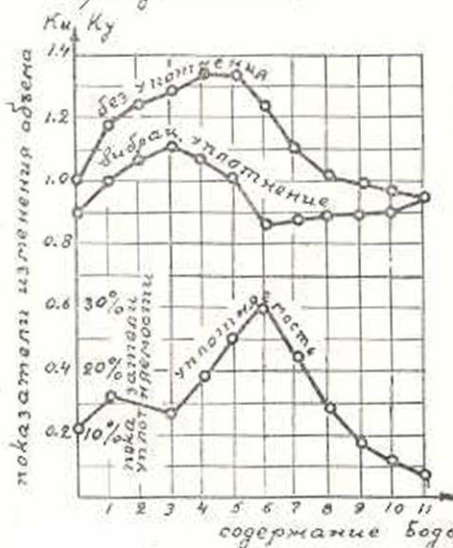
— уплотнение вибрированием
--- без уплотнения



Влияние содержания воды на уплотняемость бетонной смеси.

а) вода чистая

б) вода с гидрофобной добавкой



Фиг. 4. Уплотняемость и подвижность бетонной смеси в зависимости от содержания воды.

позволило достигнуть наибольшей подвижности бетонной смеси (осадка конуса 21 см) при относительно меньшем расходе воды.

Критические влажности составляют: $W_{\text{п max}} = 6$; $W_{\text{п min}} = 10$. Число подвижности: $P = 5$.

Таблица 2

Основные характеристики подвижности и уплотняемости бетонной смеси

Наличие уплотнения	Характеристики		Вода без добавки				Вода с гидрофобной добавкой			
			сухая смесь	наиб. рыхл.	Наиб. плот.		сухая смесь	наиб. рыхл.	Наиб. плот.	
					Вн тах	Вн min			Вн тах	Вн min
Без уплотнения	Крит. влажн. в процентах		8	4	—	11	0	4	—	10
	фазы	твердая	0,729	0,547	—	0,755	0,737	0,559	—	0,756
		жидкая	—	0,060	—	0,227	—	0,061	—	0,205
		газообр.	0,271	0,393	—	0,018	0,263	0,380	—	0,039
	Коеф. изм. объема K_v		1,0	1,33	—	0,965	1,0	1,32	—	0,975
	Коеф. плотн. K_p		0,729	0,547	—	0,755	0,737	0,559	—	0,756
Уплотнение вибрированием	Крит. влажности в процентах		0	3	6	11	0	3	6	10
	фазы	твердая	0,819	0,657	0,849	0,792	0,865	0,650	0,870	0,756
		жидкая	—	0,054	0,140	0,208	—	0,054	0,144	0,205
		газообр.	0,181	0,289	0,011	0,00	0,135	0,296	0,00	0,039
	Коеф. изм. объема K_v		0,89	1,11	0,86	0,92	0,852	1,13	0,89	0,975
	Коеф. плотн. K_p		0,819	0,657	0,849	0,792	0,865	0,650	0,873	0,756
Коеф. уплотн. K_u		11	—	30	4	15	—	26	0,0	
Осадка конуса в см		—	—	0	17	—	—	0,5	21	

б) Цемент

Испытанию был подвергнут цемент, использованный при изучении бетонной смеси. Изучение уплотняемости цементного порошка было проведено по методике, принятой для [бетонной смеси]. Полученные кривые изменения фазовых соотношений и другие кривые, характеризующие уплотняемость цементного порошка, показаны на фиг. 5.

Как видно из фиг. 5, закономерности уплотняемости бетонных смесей могут быть распространены и на цементный порошок, хотя абсолютные значения характеристик уплотняемости последнего и оказались существенно отличными от установленных для бетонной смеси (см. табл. 3).

Характерным для цементного порошка является значительное уменьшение занимаемого им объема при полном обводнении зерен по сравнению с сухим состоянием. В указанной стадии $K_v = 0,66$ в то время, как для бетонной смеси в этом случае коэффициент этот был близок к единице.

Наибольшая уплотняемость цементного порошка соответствует резкому уменьшению в нем газообразной фазы. Плотность в этом случае составляет $K_p = 0,522$.

При дальнейшем повышении содержания в цементном порошке

Таблица 3

Основные характеристики уплотняемости цемента в зависимости от его влажности

Наличие уплотнения	Характеристики	Вода без добавки				Вода с гидроф. добавкой			
		сухой порошок	наиб. рыхл.	Наиб. плот.		сухой порошок	наиб. рыхл.	Наиб. плот.	
Без уплотнения	Крит. влажн. в процентах	0	8	—	32	0	12	—	36
	фазы	твердая	0,336	0,236	—	0,508	0,332	0,229	—
		жидкая	—	0,057	—	0,490	—	0,083	—
		газообр.	0,664	0,707	—	0,002	0,668	0,688	—
	Коеф. изм. объема K_n	1,0	1,42	—	0,661	1,0	1,48	—	0,726
Уплотнение в. брированием	Коеф. плотн. K_n	0,336	0,236	—	0,508	0,332	0,229	—	0,458
	Крит. влажности в процентах	0	6	24	32	0	8	28	36
	фазы	твердая	0,384	0,300	0,522	0,508	0,382	0,295	0,490
		жидкая	—	0,054	0,377	0,490	—	0,071	0,413
		газообр.	0,616	0,645	0,101	0,002	0,618	0,634	0,097
	Коеф. изм. объема K_n	0,875	1,12	0,644	0,661	0,894	1,125	0,678	0,726
	Коеф. плотн. K_n	0,384	0,300	0,522	0,508	0,382	0,295	0,490	0,458
Коеф. уплотн. K_y		13	—	42	0,0	11	—	32	0,0

воды плотность уменьшается, достигая предельного значения $K_n = 0,508$. Критическая влажность составляет: $V_{n \max} = 24$, $V_{n \min} = 32$. Число подвижности: $P = 8$.

Увлажнение цементного порошка водой с гидрофобной добавкой не уменьшает, а даже увеличивает водопотребность.

Оптимальная плотность цемента составляет $K_n = 0,490$, а при наибольшей подвижности— $K_n = 0,458$. Критические влажности составляют: $V_{n \max} = 28$, $V_{n \min} = 36$. Число подвижности: $P = 8$.

Выше рассматривался случай, когда введение гидрофобной добавки в дисперсную систему не будет способствовать уменьшению сил сопротивления частиц сдвигу и соответственно уменьшению значения V . Это относилось к случаям высокой дисперсности твердых частиц, когда диспергированные воздушные пузырьки не могут разместиться в пространствах между этими частицами. Такое объяснение и должен иметь данный случай.

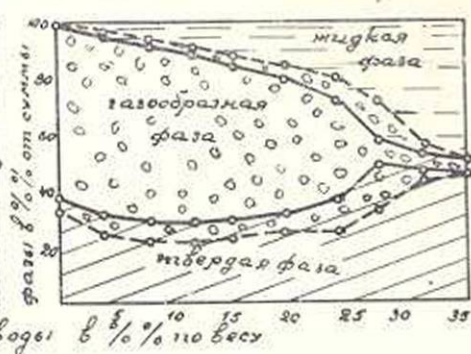
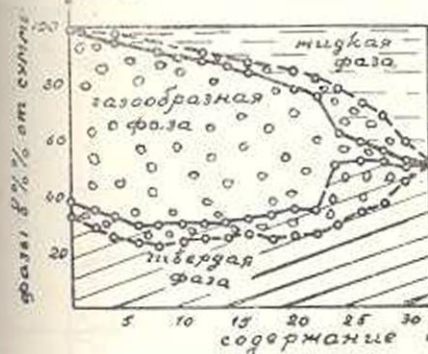
Влияние содержания воды на соотношение фаз в цементе.

— уплотнение вибрированием

--- без уплотнения

а) вода чистая

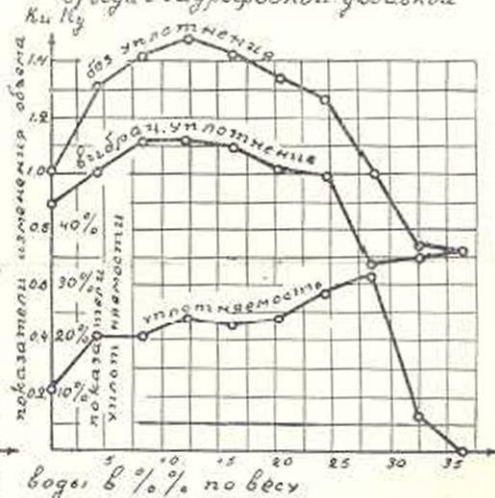
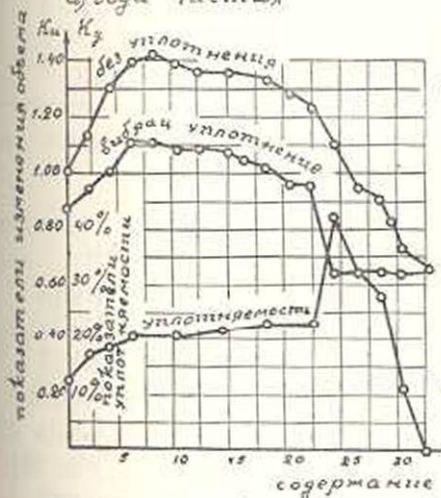
б) вода с гидрофобной добавкой



Влияние содержания воды на уплотняемость цемента

а) вода чистая

б) вода с гидрофобной добавкой



Фиг. 5. Уплотняемость цемента в зависимости от содержания в нем воды.

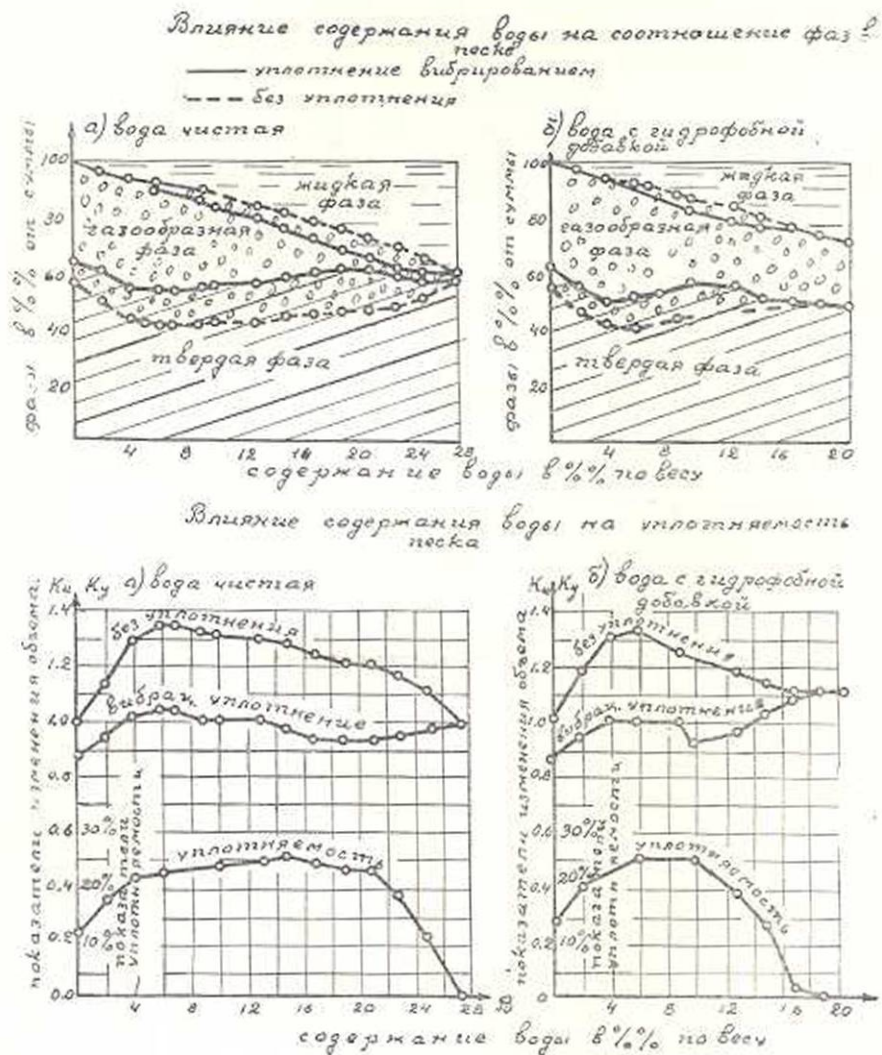
в) Пески

Изучению были подвергнуты как песок, примененный в изученной выше бетонной смеси, так и ряд других песков, отличающихся от него строением зерен.

Песок, использованный в бетонной смеси, был обычным (кварцевым), с объемным весом $\gamma = 1480 \text{ кг/м}^3$ и коэффициентом пустот $\alpha = 0,43$. Методика изучения его уплотняемости полностью соответствовала принятой при изучении бетонной смеси. На основании опытных данных построена фиг. 6.

Основные характеристики уплотняемости песка приведены в табл. 4.

Как показывают приведенные данные, закономерности уплотняемости бетонных смесей могут быть распространены и на песок. Наибольшее значение уплотняемости его соответствует резкому



Фиг. 5. Уплотняемость обычного песка в зависимости от содержания в нем воды.

уменьшению газообразной фазы. Плотность песка в этом случае составляет: $K_n = 0,618$ и в стадии водоотделения уменьшается до $K_n = 0,583$.

Критические влажности составляют: $V_{n \max} = 19,2$, $V_{n \min} = 27,5$. Число подвижности: $\Pi = 8,3$.

Увлажнение песка водой с гидрофобной добавкой существенно

Таблица 4

Основные характеристики уплотняемости обычного песка в зависимости от его влажности

Наличие уплотнения	Характеристики	Вода без добавки				Вода с гидрофобн. добавкой				
		сухой песок	наиб. рыхл.	Наиб. плотн.		сухой песок	наиб. рыхл.	Наиб. плотн.		
				Вп тах	Вп min			Вп тах	Вп min	
Без уплотнения	Крит. влажн. в процентах	0	7,1	—	27,5	0	6,1	—	17,2	
	фазы	твердая	0,574	0,426	—	0,585	0,564	0,422	—	0,510
		жидкая	—	0,080	—	0,410	—	0,070	—	0,225
		газообр.	0,426	0,495	—	0,005	0,436	0,508	—	0,265
	Козф. измен. объема K_v	1,0	1,342	—	0,98	1,0	1,38	—	1,11	
	Козф. плотн. K_p	0,574	0,426	—	0,585	0,564	0,422	—	0,510	
Уплотнение ви- брированием	Крит. влажн. в процентах	0	6,1	19,2	27,5	0	4,1	10,5	17,2	
	фазы	твердая	0,648	0,545	0,618	0,583	0,630	0,513	0,576	0,496
		жидкая	—	0,085	0,305	0,380	—	0,060	0,165	0,230
		газообр.	0,352	0,370	0,077	0,037	0,370	0,427	0,259	0,274
	Козф. измен. объема K_v	0,88	1,04	0,93	0,98	0,86	1,05	0,93	1,09	
	Козф. плотн. K_p	0,648	0,545	0,618	0,583	0,630	0,513	0,576	0,496	
Козф. уплотн. K_u		12	—	25	0,0	14	—	25	2	

улучшает показатели уплотняемости его с точки зрения потребной воды.

Критические влажности при этом составляют: $V_{п\max} = 10,5$, $V_{п\min} = 17,2\%$. Число подвижности: $P = 6,7$.

В виброуплотненном песке с максимальной плотностью жидкая и газообразная фазы составляют: при отсутствии добавки, воды $V = 305 \text{ л/м}^3$, воздуха — 77 л/м^3 ; при гидрофобной добавке, воды $V = 165 \text{ л/м}^3$, воздуха — 259 л/м^3 .

Эти данные показывают, что снижение расхода воды для заполнения межзерновых пространств в песке произошло за счет расположения в этих пространствах диспергированных воздушных шариков.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что в стадии полного обводнения, если песок при чистой воде почти сохраняет тот же объем, что и в сухом состоянии ($K_v = 0,98$), то при воде с гидрофобной добавкой занимаемый им объем значительно больше ($K_v = 1,11$).

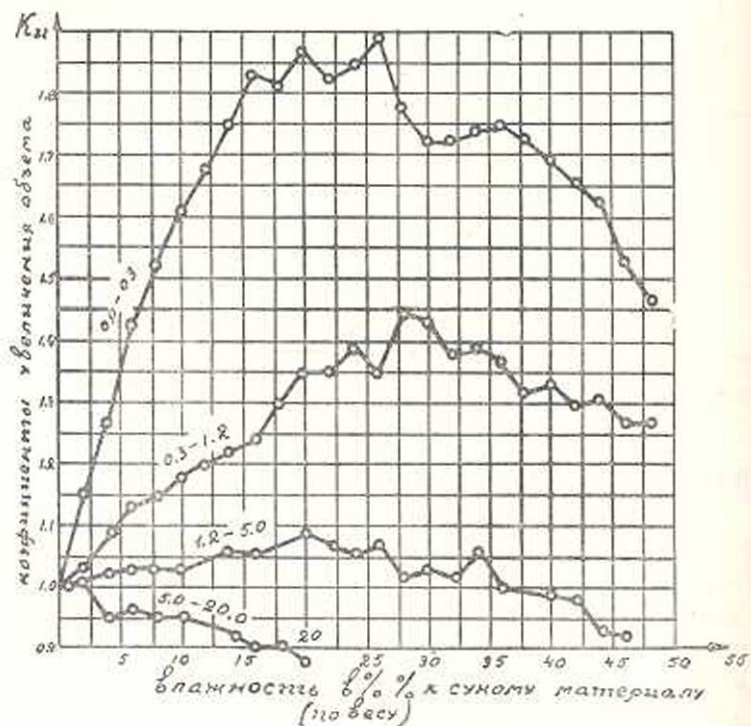
Если характеристики наибольшей уплотняемости песка зависят в основном от объема пустот в нем, то характеристики наибольшей рыхлости будут зависеть в основном от зернового состава его. С увеличением дисперсности и соответственно с увеличением числа

контактов, будет увеличиваться также сопротивление сдвигу этого песка.

На фиг. 7 и 8 приводятся кривые изменения рыхлости при увлажнении различных фракций песков из ангийской пемзы и котельных шлаков, изученных при свободном заполнении формы.

Как и следовало ожидать, наибольшие значения K_n имеют фракции с зернами 0—0,3 мм, достигая величины $K_n = 1,8 \div 1,9$.

Для фракций с более крупными зернами значения K_n уменьшаются, а для фракции с зернами 5—20 мм коэффициенты эти имеют значения даже $K_n < 1$.

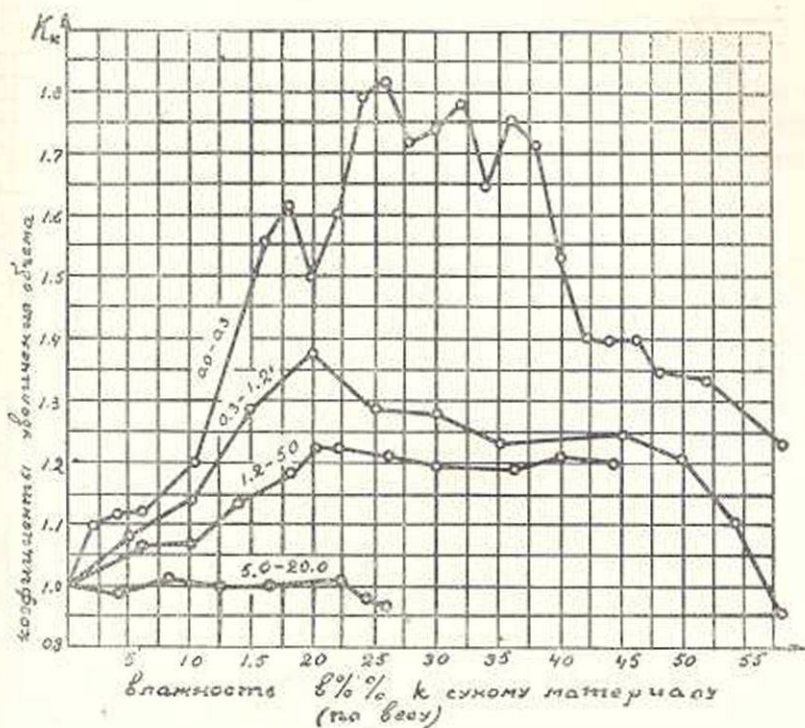


Фиг. 7. Изменения объема пемзовых заполнителей в зависимости от увлажнения.

С точки зрения рассматриваемых здесь вопросов, легкие пески (пески с пористым строением) могут отличаться от обычных только абсолютными значениями характеристик. При изменении влажности их от нуля до момента водоотделения, сопротивление сдвигу в легких песках должна быть относительно большим, поскольку в контактах между твердыми частицами будут действовать еще силы капиллярного всасывания в поры, расположенные в теле заполнителя и, кроме того, коэффициент трения в контактах частиц вследствие повышенной шероховатости будет более высоким.

Для изучения этого вопроса были поставлены опыты на песке из литоидной пемзы по программе, принятой для обычного песка.

Песок из литоидной пемзы был применен с объемным весом



Фиг. 8. Изменение объема шлаковых заполнителей в зависимости от увлажнения.

$= 1020 \text{ кг/м}^3$ и содержанием пылевидных частиц ($< 0,15 \text{ мм}$) в количестве 31% .

Результаты опытов, сопоставленные для наглядности с результатами, полученными для обычного песка, приводятся на фиг. 9.

Как видно из фигуры, характер кривых изменяемости объема для обоих песков остается одинаковым, хотя абсолютные значения показателей и различны.

Обращает внимание незначительный эффект применения гидрофобной добавки для песка из литоидной пемзы. В соответствии с высказанной выше точкой зрения нечувствительность взятого в опытах легкого песка к гидрофобной добавке следует объяснить не природой пористых материалов, а наличием в данном песке большого количества пылевидных частиц, выполняющих ту же функцию, что и диспергированные воздушные шарики.

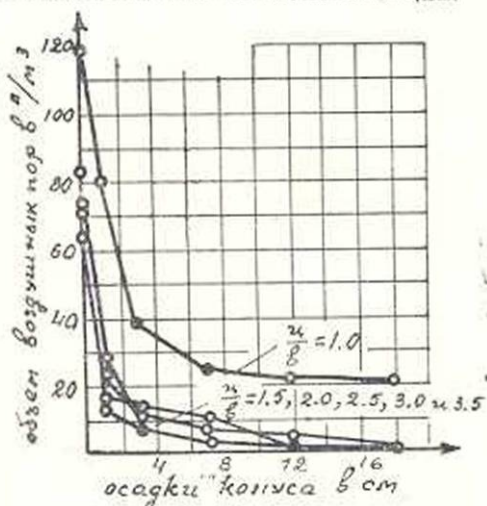
Опыты эти были поставлены до разработки закономерностей, описанных в предыдущей части и поэтому при их проведении не устанавливались значения $V_{п\max}$, $V_{п\min}$, Π и P .

а) Газообразная фаза

На основании результатов этих опытов вычислены объемы воздушных пор в бетонных смесях и построены кривые, иллюстрирующие изменение объема этих пор в зависимости от консистенции.

Как видно из фиг. 10, где приведены эти кривые, газообразная фаза в бетонных смесях действительно претерпевает резкое уменьшение в стадии начальной подвижности ее, характеризуемой осадкой конуса 0—1 см. При консистенции их свыше указанного вплоть до осадки 18 см объем воздушных пор не превышает 10—20 л/м³.

Некоторое отступление от общего правила наблюдается только на бетонных смесях при $q/v = 1,0$, в которых расходы цемента были весьма незначительными ($C = 150 \text{ кг/м}^3$).



Фиг. 10. Объем воздушных пор в бетонных смесях в зависимости от консистенции.

б) Жидкая фаза

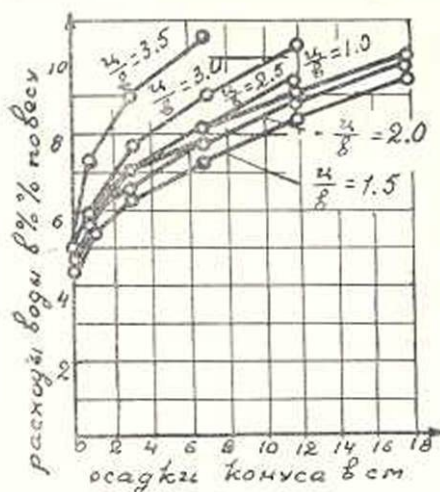
Описанные опыты позволяют также ответить на вопросы о водопотребности бетонных смесей той или иной консистенции и расходах воды для разжижения бетонной смеси от нулевой осадки до требуемой.

Обработка опытов показала, что на водопотребности бетонных смесей изменение отношения гравия к песку в пределах 1,5—3,0 отражается в меньшей степени, чем изменение q/v от 1,0 до 4,5.

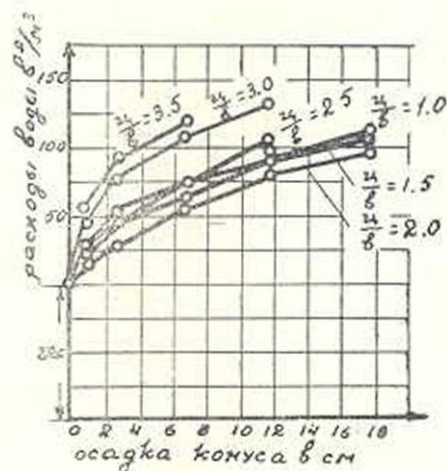
Как видно из фиг. 11 водопотребность бетонных смесей всех изученных консистенций составила от 4,5 до 10,5% по весу от сухих материалов.

Учитывая, что при осадке конуса 0 см расход воды очень близок к критической $V_{п\max}$, существенно отметить тот факт, что при указанной консистенции водопотребность бетонных смесей в зависимости от отношения гравия к песку и цементно-водного отношения изменялась в узких пределах, а именно в пределах 4,5—5% по весу от сухих материалов. При консистенциях же более разжижен-

ных факторы зернового состава всех твердых компонентов и, в частности, расход цемента, оказывают существенное влияние на расход воды. Так, например, для бетонной смеси с осадкой 7 см расход воды составляет от 7,3 до 10,6% в зависимости от цементоводного отношения. Следует отметить, что относительно более высокое содержание воздушных пор в бетонных смесях при $c/v = 1,0$ отмеченное выше, привело к относительно более высокой их водопотребности.



Фиг. 11. Водопотребность бетонных смесей разной консистенции в процентах по весу в зависимости от c/v .



Фиг. 12. Расход воды в $л/м^3$ для разжижения бетонной смеси от нулевой осадки до требуемой.

На фиг. 12 приведены кривые расходов воды в $л/м^3$ для разжижения бетонной смеси от нулевой осадки до требуемой. Как уже указывалось, количество это зависит от зернового состава всех твердых компонентов и от требуемой степени разжижения.

При других заполнителях и цементах абсолютные значения расходов воды будут отличаться от указанных на фиг. 12. Все же фигура 12 может служить хорошей иллюстрацией основной идеи, высказанной в настоящей работе, что начальная подвижность и соответственно наибольшая плотность бетонной смеси достигается при заполнении водой всех пустот между твердыми частицами ($V_{л\max} = V_a$). Что же касается дальнейшего разжижения бетонной смеси, то учитывая, что это зависит от толщины связанной воды и что вязкость связанной воды с увеличением толщины уменьшается нелинейно, дополнительный расход воды для этих целей также будет зависеть от дисперсности смеси и требуемой степени разжижения (P).

В ы в о д ы

1. Изучение строения и показателей подвижности и уплотняемости бетонной смеси с водосодержанием в интервале от нуля до момента водоотделения показывает, что в зависимости от степени обводнения межзерновых пространств силы сопротивления сдвигу, обуславливаемые силами трения и свободными молекулярными и капиллярными силами, претерпевают большие изменения: наибольшей величины эти силы достигают при весьма незначительном содержании воды в момент окончания образования „прочно связанной“ пленочной воды и начала образования в контактах капиллярных менисков; наименьшей величины эти силы достигают в совершенно сухих или полностью обводненных смесях.

2. В соответствии с развитием сил сопротивления сдвигу, плотность бетонной смеси в функции от водосодержания характеризуется кривой изменения объема, имеющей 4 предельных значения: плотность, соответствующая совершенно сухому состоянию твердых компонентов; плотность, соответствующая незначительному увлажнению твердых компонентов; плотность, соответствующая полному обводнению межзерновых пространств, когда толщина пленочной воды в контактах между твердыми частицами имеет минимальное значение при данной интенсивности уплотнения; наконец, плотность, соответствующая полному обводнению межзерновых пространств, когда толщина пленочной воды в контактах между твердыми частицами имеет максимальное значение (с учетом „рыхло связанной“ воды).

Плотность бетонной смеси во втором случае имеет минимальное и в третьем случае максимальное значение.

3. Расход воды, при котором достигается наибольшая плотность бетонной смеси, равен объему пустот в уплотненной бетонной смеси. В соответствии с этим, расход этот зависит от компактности упаковки твердых частиц, от интенсивности их уплотнения и от сопротивления сдвигу этих частиц.

Увеличение расхода воды в бетонной смеси свыше этого значения возможно до раздвижки твердых частиц на удвоенную толщину пленочной воды (с учетом „рыхло связанных“ слоев). Дальнейшее увеличение расхода воды приводит к водоотделению (к внутреннему и наружному).

4. В соответствии с изменением вязкости пленочной воды в зависимости от ее толщины, бетонная смесь с наибольшей плотностью имеет наименьшую подвижность (близкую к нулевой осадке конуса) и в стадии близкой к водоотделению—наибольшую подвижность (близкую к наибольшей осадке конуса).

Расход воды для получения бетонной смеси с наименьшей подвижностью определяется в основном пустотностью смеси твердых компонентов, а дополнительный расход воды для разжижения смеси до требуемой подвижности—в основном, от величины поверхности твердых частиц.

Интервал между началом подвижности и началом водоотделения уменьшается с уменьшением содержания в бетонной смеси тонкодисперсных частиц и уменьшением интенсивности уплотнения: в бетонных смесях, укладываемых без уплотнения, эти моменты могут совпадать.

5. В беспесочных бетонных смесях капиллярные силы, а также свободные молекулярные силы (из-за малого количества контактов) ничтожны. Поэтому в таких бетонных смесях силы сопротивления сдвигу как и в сухих материалах, в основном, определяются силами трения. В соответствии с этим беспесочная бетонная смесь может иметь подвижность и без достижения обводнения всех межзерновых пространств.

6. Расход воды для получения бетонной смеси с наибольшей плотностью может быть приблизительно определен по объему пустот сухой смеси твердых компонентов, уплотненных с той же интенсивностью, что и бетонная смесь.

7. Положение, выдвинутое Н. А. Поповым, об оптимальной водной добавке, соответствующей минимальному выходу бетонной смеси, означает нахождение такого количества воды, которое не более и не менее объема пустот смеси твердых компонентов при заданном методе уплотнения. При меньшем расходе воды в смеси будут оставаться воздушные поры, а при большем расходе возможности уплотнения не будут использованы полностью. При обоих отклонениях прочность бетона будет уменьшаться. Второе утверждение Н. А. Попова о том, что с уменьшением расхода цемента оптимальная водная добавка приближается к таковой для литой консистенции, объясняется тем, что с уменьшением содержания в смеси тонкодисперсных частиц число подвижности Π должно уменьшиться. Правило В. И. Сорокера о постоянстве расхода воды при не очень больших колебаниях расхода цемента объясняется малым изменением при этом пустотности смеси.

8. Оценка зернового состава отдельных компонентов должна производиться с учетом зернового состава смеси всех твердых компонентов, входящих в бетонную смесь. Можно высказать следующие предположения:

а) удовлетворительная компактность упаковки твердых частиц при мелких песках может быть достигнута путем перехода на применение цемента более тонкого помола или при применении добавок, обеспечивающих пептизацию тонкодисперсных частиц и т. д.;

б) недостаток зернового состава твердых компонентов может быть исправлен „заполнением“ пространств между ними диспергированными воздушными шариками при помощи воздухововлекающих добавок; в соответствии с получаемыми размерами диаметров этих шариков применение воздухововлекающих добавок не может дать описываемого эффекта в особенно тонкодисперсных или, наоборот, в особенно грубодисперсных смесях;

в) повышенная водопотребность растворов и относительная низкая прочность их в сравнении с бетонами не может являться общим правилом; в зависимости от расхода вяжущего и содержания пылевидных частиц объемы пустот смеси твердых компонентов, входящих в раствор и бетон, могут сближаться; сближение водопотребностей и прочностей раствора и бетона наиболее вероятным следует считать при высоких расходах цемента.

9. Закономерности уплотнения бетонной смеси могут быть распространены и на входящие в нее материалы, а также на несвязные грунты. В описанных опытах, например, наибольшая уплотняемость песка составила 25% и цемента—42%.

Несмотря на такую большую уплотняемость их, если допустить, что песок и цемент были уплотнены при критической влажности, соответствующей наибольшей их рыхлости (минимальной плотности), а увлажнение их до полного обводнения осуществлялось путем подсоса воды снизу вверх, то будет иметь место еще просадка в раз- мере: для песка—16,5% и для цемента—43,5%.

В свете этих данных становится ясным возможность катастрофических просадок насыпных несвязных грунтов, наблюдающихся на практике, когда укладка и уплотнение их производится без учета зернового состава и критических влажностей этих грунтов.

10. Принятые в настоящее время методы измерения подвижности бетонной смеси дают косвенную ее характеристику, причем только в уплотненном состоянии; вовсе отсутствуют методы, позволяющие характеризовать подвижность бетонной смеси в неуплотненном состоянии для оценки свойств их при транспортировке и для оценки трудоемкости уплотнения бетонной смеси.

В связи с указанным в данной работе, оценка подвижности бетонной смеси производилась по числовым показателям ее уплотняемости.

Рассмотренные здесь вопросы теории подвижности и уплотняемости бетонной смеси требуют дальнейшего изучения и развития. На последующих этапах развития исследований несомненно должны быть сделаны попытки установления упруго-пластичновязких констант бетонной смеси, выражаемых в динах на см² и пузах.

Институт строительных материалов
и сооружений АН Армянской ССР

Поступило 18 XII 1972

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Беляев Н. М. Метод подбора состава бетонов. Изд. 4-е. 1930.
2. Александрия Н. П. Строительный контроль качества бетона. Изд. 4-е, Ленинград. 1945.
3. Сорочер В. И. Производственный расчет составов бетона. Москва, 1933.
4. Михайлов В. В. Теория и практика центробежного напряженно-армированного бетона. Москва, 1939.

5. Миров С. А. Новые способы подбора состава бетонов. ЦНИПС, 1934.
6. Боломей М. Грануляция балласта и ее влияние на характеристику бетона. Журн. Траваух, июнь, 1939.
7. Завазис К. С. и Симонов М. З. Проектирование составов бетона. Тбилиси. Первое издание в 1942 и второе—в 1948.
8. Попов Н. А. Производственные факторы прочности легких бетонов. М—Л., 1933.
9. Михайлов Г. К. К геометрии фиктивного грунта. ПММ, т. XVI, в. 4, 1952.
10. Баркан Д. Д. Динамика оснований и фундаментов, 1948.
11. Охотин В. В. Лабораторные опыты по составлению дорожных грунтовых смесей по принципу наименьшей вористости, 1929.
12. Гинзбург А. М. и Сафронов В. Д. Составление и строение бетонов, Ч—I. Труды Укр. Гипромет., 1930.
13. Лыков А. В. Теория сушки. Москва, 1950.
14. Лебедев А. Ф. Передвижение воды в почвах и грунтах. Известия Донского сельскохозяйственного института, 1918.
15. Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. Изд. АН СССР, Москва, 1936, 4-е изд.
16. Ребиндер П. А. Тридцать лет коллоидной науки в СССР, Коллоидный журнал. Вып. 6, 1947.
17. Думанский А. В. Коллоидно-химические исследования водных свойств торфа. Коллоидный журнал. Вып. 2, 1936.
18. Катков А. О плотности сорбированных и связанных жидкостей. Коллоидный журнал. Вып. 5, 1939.
19. Покровский Г. И. Исследования по физике грунтов, 1937.
20. Михайлов В. В. Элементы теории структуры бетона. Стройиздат, 1941.
21. Стольников В. В. Теоретические основы применения воздухововлекающих добавок для улучшения свойств гидротехнических бетонов. Известия ВНИИГ, 1949.
22. Дерягин Б. В. Поверхностные явления и свойства грунтов и глин. Известия ОТН АН СССР, № 8, 1937.
23. Цытович Н. А. Механика грунтов, М—Л., 1951.

Մ. Ջ. ՍԻՄՈՆՈՎ

ԲԵՏՈՆԱՅԻՆ ԽԱՌՆՈՒՐԴԻ ՇԱՐԺՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԽՏԱՆԱԼՈՒ ՈՒՆԱԿՈՒԹՅԱՆ ՏԵՍՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԲԵՐԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Տվյալ հետազոտության մեջ սահմանված են բետոնային խառնուրդի շարժունությունը և խառնալու ունակությունը որոշող հիմնական օրինաչափությունները, ինչպես նաև ուսումնասիրված է հեղուկ և զազանման ֆազերի ազդեցությունը խառնուրդի վերահիշյալ հատկությունների վրա՝ այդ ֆազերի նարարեակցությունից կախված: Բերված են բետոնի խառնուրդի խոնավության 4 կրիտիկական արժեքներ, որոնց ժամանակ նրա խտությունը հասնում է մինիմալ և մաքսիմալ արժեքների: Տրված հատկություններով բետոնային խառնուրդը նախազգծելու համար առաջադրված են ելակետային նախադրյալներ:

