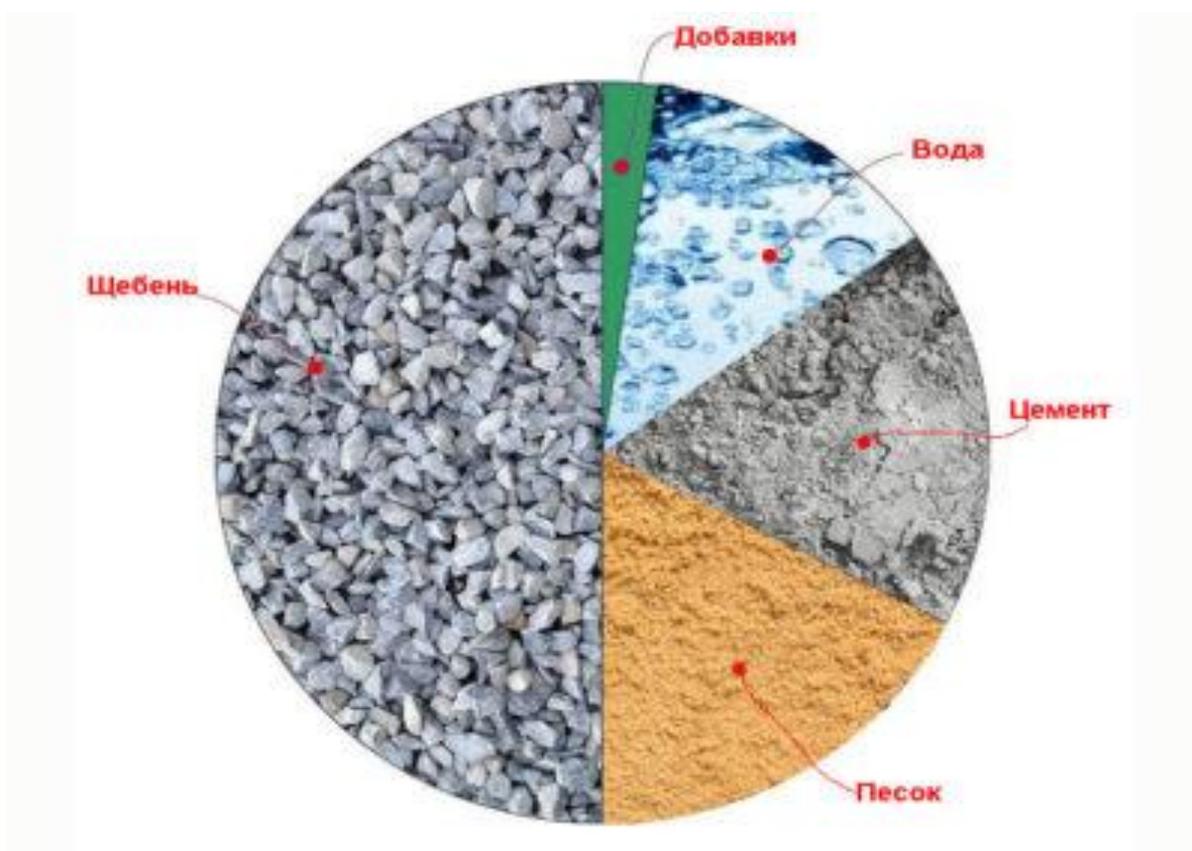


ХАСАНОВ Б.Б., КАДИРОВ И.А., РАДЖАБОВ М.З., УМАРОВ И.И.

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ
БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА**



ТОШКЕНТ-2022

УДК: 666.9.031.

Хасанов Б.Б. Кадиров.И.А., Раджабов.М.З., Умаров.И.И.

Ресурсосберегающие технологии модифицирования бетонной смеси и бетона: монография / Хасанов Б.Б. – Тошкент : «ТИИИМСХ» НИУ, 2022-127с.

В монографии изложены теоретические основы структурообразования цементного камня и результаты многолетних комплексных исследований по новой технологии формования высокопрочных неармированных труб водохозяйственного строительства виброудвно-перистальтическим гиперуплотнением с одновременной модификацией бетонной смеси и бетона. Приведены закономерности возникновения в столбе уплотняемой смеси попеременно изменяющихся во времени зон высокоинтенсивного сжатия и растяжения, а также размещения и конфигурации фильтрационных полей опадубочной формы с учетом формы и диаметра отверстий, предотвращающих их закупорку в процессе формования. Дана технико-экономическая оценка новой технологии.

Рассчитана на научных и инженерно-технических работников, занимающихся вопросами совершенствования технологии и свойств бетонов, специалистов предприятий строительной индустрии, студентов технических вузов специализированного профиля.

УДК: 666.9.031.

Рецензенты: д.т.н., проф. Е.В. Щипачева

к.т.н., доц. Н.Р.Рахматов

Печатается по решению Учёного совета НИУ «ТИИИМСХ», протокол №4/3.14. от 26.11.2022 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МОДИФИКАЦИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА	
1.1. Физико-химические основы модифицирования бетонной смеси и бетона.....	6
1.2. Вакуумирование – аналог физической модификации бетонной смеси.....	25
2. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ	
2.1. Высокоинтенсивные методы уплотнения бетонной смеси.....	31
2.2. Современные ресурсосберегающие технологии модифицирования бетонной смеси и бетона.....	43
2.3. Теоретические основы структурообразования цементного камня и бетона.....	48
3. ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА В ПРОЦЕССЕ УДАРНО - ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКОГО ГИПЕРУПЛОТНЕНИЯ	
3.1. Общие положения.....	63
3.2. Модификация бетонной смеси в процессе прессования.....	77
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА	
4.1. Исследование прочностных свойств модифицированного бетона при растяжении	88
4.2. Изменение прочностных свойств модифицированных бетонов во времени	94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	102
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	104

ВВЕДЕНИЕ

Развитие водохозяйственного и дорожного строительства в Узбекистане и Центральной Азии связано с увеличением потребности в мало напорных и безнапорных трубах, а также дорожных кольцах. В настоящее время широко применяются стальные и, особенно, железобетонные трубы, причем, в таких коммуникациях, где могут быть использованы менее ресурсоемкие - неметаллические мало напорные и безнапорные трубы.

В настоящее время широко применяются стальные и, особенно, железобетонные трубы, причем, в таких коммуникациях, где могут быть использованы менее ресурсоемкие – неметаллические малонапорные и безнапорные трубы.

Из всех видов неметаллических труб, самыми экономичными могут быть бетонные, отличающиеся от асбестоцементных экологической чистотой, а по сравнению с железобетонными, большей долговечностью, как за счет отсутствия подверженной коррозии арматуры, так и за счет более плотной упаковки структурных единиц бетонной смеси при уплотнении.

Ограниченное количество производимых и применяемых бетонных труб объясняется тем, что сопротивление бетона растягивающим напряжениям незначительно и составляет лишь 5...10 % от прочности бетона при сжатии. Вопросам повышения прочности бетона, при растяжении уделялось небольшое внимание. Решение этой проблемы наталкивается на основное противоречие технологии бетона:

- для повышения прочности бетона при растяжении необходимо всемерное снижение В/Ц вплоть до значений, близких к нормальной густоте цементного теста, при одновременном ограничении расхода цемента;
- для повышения удобоукладываемости бетонной смеси необходимо противоположное условие - повышение В/Ц, увеличение расхода воды, а следовательно, расхода цемента.

Разработка научных основ технологии высокопрочного бетона

пригодного для неармированных труб, возможна путём комплексного решения перечисленных противоречий. Для решения этого необходимо было принять следующие исходные положения разрабатываемой технологии высокопрочного бетона в формуемых изделиях:

1. Свойства бетонной смеси должны определяться технологическими условиями формования изделий.

2. Состав бетона определяется заданными проектными свойствами материала в изделии и при необходимости может отличаться от начального состава бетонной смеси.

3. Процесс гиперуплотнения бетона, формуемого изделия должен обеспечивать получение предельно плотной структуры материала, особенно в поверхностных слоях изделия.

Анализ существующих методов модификации и уплотнения бетонной смеси при изготовлении труб, а также многолетние исследования показали, что наиболее эффективным является перистальтический принцип виброударного гиперуплотнения, обеспечивающий также глубокую модификацию бетонной смеси за счет отжима избыточной воды затворения.

1. МОДИФИКАЦИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА

1.1. Физико-химические основы модифицирования бетонной смеси и бетона

Получение высокоэффективных строительных конгломератов возможно путем модифицирования структуры цементного камня и бетона. Следовательно, модифицирование структуры бетона в данном направлении призвано улучшить технологические свойства материала. Путем модифицирования возможно изменение кинетики нарастания физических свойств и конечных значений прочности бетона.

Основным методом модифицирования структуры бетонной смеси и бетона является использование химических добавок, например, различных ПАВ, олигомеров и электролитов. Для улучшения технологических свойств бетонной смеси и бетона применяют термопласты (латексы, поливинилацетатная дисперсия и др.), реактопласты (фенольные, фуриловые, эпоксидные, карбомидные смолы) и кремнийорганические соединения. В качестве пластифицирующих добавок применялись СДБ, ССБ, СНВ, СПД, ВРП и др. Широко применялись также комплексные добавки с полифункциональным действием. В настоящее время широкое применение нашли суперпластификаторы, механизм действия которых состоит в том, что этот пластификатор, вступая во взаимодействие со свободными ионами на поверхности цементных частиц - Ca^{2+} , образует гелеобразное соединение, устраняющее трение между частицами и дающее пластифицирующий эффект.

Не рассматривая физико-аналитический механизм модифицирования структурообразования бетона, отметим, что он, прежде всего, направлен на снижение количества воды - затворителя в единице объема материала. Однако различными исследованиями доказано, что в начальный период структурообразование цементного камня развивается в оптимальном

направлении лишь при определенном объемном содержании воды. Предельное снижение водосодержания затрудняет процесс гидратации вяжущего, ограничивая конечные прочностные свойства материала. В то же время конечные прочностные свойства материала улучшаются при всемерном снижении объемного водосодержания смеси. Во всех случаях модификация бетона предполагает его состав неизменным от затворения смеси до конечной стадии формирования структуры бетона.

В настоящее время известны лишь отдельные попытки физической модификации бетона, например, при его вакуумировании. В этом случае в бетонную смесь вводится оптимальное количество воды затворения, обеспечивающее оптимальное протекание реакции гидратации вяжущего. Последующий отсос воды, изменяя начальный состав бетона, приводит к глубокому модифицированию его структурообразования. В частности, резко повышается плотность материала и его прочностные свойства. Следует отметить, что физическое модифицирование бетона приводит к изменению характера фиксации частиц вяжущего.

Как известно, в зависимости от фиксации частиц взаимодействующих веществ, могут образоваться два типа связей - слабые (вторичные) и прочные (первичные). Согласно определению [1] частицы образуют агрегат, если их взаимная потенциальная энергия $\Pi=f(r)$ отрицательна.

Следовательно, можно заключить, что любые методы ресурсосбережения и модификации бетонной смеси и бетона (вакуумирование, прессование, центрифугирование и др.) будут положительны (рис 1), если они направлены на сжатие или сближение взаимодействующих элементов материала [2].

При сближении двух частиц твердой фазы происходит уменьшение поверхностной энергии [3] на величину

$$\Delta\delta = 2 \cdot \delta - \delta_{гр} \quad (1.1)$$

где $\delta_{гр}$ - поверхностная энергия границы, образовавшейся между частицами;

δ - поверхностная энергия частицы,
сила притяжения этих частиц друг к другу будет F_k , и в зоне контакта частиц
будут возникать напряжения

$$P_k \simeq \frac{F_k}{\pi x^2} = \frac{2\Gamma\Delta\delta}{x^2} \quad (1.2)$$

где x - радиус контакта площадки, а

$$F_k = \frac{\pi x^2 \Delta\delta}{h}, \quad (1.3)$$

$$h = \frac{x^2}{2\Gamma} \quad (1.4)$$

Хотя выражения (1.3) и (1.4) получены автором [3] из допущения об аналогии между слипанием частиц твердой фазы и слиянием двух капель, они выражают качественное направление структурообразования.

Возможность образования и сохранения устойчивых контактов между частицами зависит, в первую очередь, от свойств поверхностей этих частиц, природы сил и, особенно, их дальнего действия. При оптимальном сближении частиц сила сцепления в контактах между ними будет достаточно высокой, что исключает седиментацию частиц под действием силы гравитационного поля и разрушение структурной сетки в результате участия частиц в тепловом броуновском движении [4].

В соответствии с теорией конденсированных фаз [5] формула для определения силы сцепления между частицами сферической формы имеет вид:

$$F_C = 2\pi \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \cdot (2\delta_{13} - \delta_{11}) \quad (1.5)$$

где r_1 и r_2 - радиусы контактирующих частиц;

δ_{13} - поверхностное натяжение на границе раздела твердая частица -

дисперсионная среда;

δ_{11} - энергия Гиббса на границе контактирующих частиц (если они одинаковой природы).

Если $r_1 = r_2$, то

$$F_C = \pi r(2\delta_{13} - \delta_{11}) = \pi r \Delta \delta \quad (1.6)$$

Полученное выражение (1.6) схоже с (1.3), полученным автором [3] путем аналогии поведения капель и частиц твердых фаз. F_C для сферических частиц можно рассчитать, зная энергию межмолекулярного взаимодействия конденсированных систем [6]:

$$E = \frac{-Ar}{12H}; \vec{F}_C = \frac{Ar}{12H^2} \quad (1.7)$$

где A - константа молекулярного взаимодействия частиц конденсированных тел;

r - радиус частиц;

H - расстояние между ними.

Согласно [7] доказано, что на малых расстояниях молекулярное притяжение $F_C \approx \frac{B}{H^2}$. Последнее соотношение хорошо согласуется с данными [8], учитывающими электромагнитное запаздывание дисперсионных сил для сферических частиц:

$$E = \frac{-\pi Br}{12H^2}; \quad F_C = \frac{\frac{2}{3}\pi Br}{H^3} \quad (1.8)$$

где B - константа молекулярного взаимодействия с учетом электромагнитного запаздывания, если $r_1 \neq r_2$, то

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Согласно [9] электромагнитное запаздывание действия дисперсионных сил дает существенный вклад в E и F_c на расстояниях $H > 10^{-9}$ м [10], превосходящих длины волн поглощения атомов и молекул контактирующих тел. Тогда при атомном (непосредственном) контакте частиц $F_c \approx 10^{-7} \dots 10^{-9}$ Н [11], в то время как без учета запаздывания $F_c \approx 10^{-9} \dots 10^{-12}$ Н. По данным [12] величина $H_{\min} \approx 10^{-9}$ м. Вероятность фиксации частиц на расстоянии ближней коагуляции растет с увеличением давления сближения и концентрации частиц из-за уменьшения потенциального барьера, для крупных же частиц более вероятна фиксация в дальней потенциальной яме [13]. Количественной мерой этого процесса может служить величина кинетической энергии или давления сжатия, необходимых для преодоления энергетического барьера, сообщаемой частицам внешним силовым полем. Согласно [12] для фиксации в положении ближней коагуляции

$$E_{\max} \leq \frac{mv_0^2}{2} = 3\pi r \eta v_0 (H_3 - H_1) \quad (1.9)$$

Где v_0 - начальная скорость, сообщаемая частице радиуса r ;

m - масса частицы;

η - вязкость дисперсионной среды (порошок - воздух).

Поскольку в реальных системах взаимодействия между частицами носят коллективный характер, то сами дисперсные системы будут подчиняться статическим закономерностям и для них будет справедлив целый спектр вышерассмотренных состояний частиц [14]. Границей перехода “грубодисперсная - микрогетерогенная система” служит величина δ_c , определяемая формулой:

$$\delta_c \approx \left(\frac{2F_c}{\rho g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.10)$$

формула (1.10) получена автором работы [15] с учетом того, что на одну

частицу приходится минимум два контакта с соседними частицами, необходимыми для образования пространственных структур с непосредственными атомными контактами.

Энергия взаимодействия элементарных объемов двух сферических частиц, содержащих в единице объема n молекул, равна:

$$E = - \int_{V_1} dV_1 \int_{V_2} \left(\frac{h^2 \lambda_{ij}}{H^6} \right) \cdot dV_2 \quad (1.11)$$

где V_1 и V_2 - общие объемы сферических частиц.

Считая, что взаимодействие одной молекулы будет возникать со всеми молекулами, находящимися в объеме соседней частицы, после интегрирования выражения (1.11) имеем для сферических частиц

$$E = \frac{A \cdot r}{12H^3}; \quad \text{тогда } F = \frac{\partial E}{\partial H} = \frac{A \cdot r}{12H^2} \quad (1.12)$$

где A - константа молекулярного взаимодействия частиц.

$$A = \pi^2 \sum_i \sum_j n_i n_j \lambda_{ij} \quad (1.13)$$

Здесь n_i и n_j - числа молекул видов i и j в единице объема. В случае сферической частицы и плоскости:

$$E = \frac{A \cdot r}{6H^3}; \quad F = \frac{A \cdot r}{6H^2} \quad (1.14)$$

Так как теория Лондона не учитывает электромагнитного запаздывания взаимодействий, то С.М.Лифшицем [8] была разработана на основе квантовой электродинамики теория молекулярного взаимодействия частиц с учетом этого запаздывания. Его выводы совпадают с опытными данными, полученными в [9] для сферических частиц (1.8), а также для сферической частицы и плоской (1.15):

$$E = \frac{2}{3} \pi \left(\frac{Br}{H^2} \right), \quad F = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{Br}{H^3} \right) \quad (1.15)$$

Константа В для двух молекул определяется как:

$$B = \frac{\pi}{10} n^2 \mu \quad (1.16)$$

а для частиц и конденсированных тел как:

$$B = \left(\frac{\pi}{10}\right) \sum_i \sum_j n_i n_j \mu_{ij} \quad (1.16a)$$

Где μ_{ij} - константа, характеризующая ориентационное, индукционное и дисперсионное взаимодействия с учетом запаздывания.

Если контактирующие поверхности, как в нашем случае, способны испытывать деформации, то энергия их адгезионного взаимодействия [16] вычисляется как:

$$E = \sum_i F_i = \frac{A}{12} \left(1 + \frac{H+Z'}{H} + \frac{(H+Z')^2}{H^2} \right) - \frac{4\sqrt{2}r}{15K_i} * (H + Z') \quad (1.17)$$

где r - размер частиц;

H - расстояние между частицами;

K_i - характеризует упругие свойства поверхности частиц;

Z' - отражает деформацию контактирующих частиц (уменьшение высоты частицы, глубину углубления в деформируемую поверхность), причем, $K_i =$

$$\frac{1 - \alpha_i^2}{E_i^{10}}$$

где α_i - коэффициент Пуассона;

E_i^{10} - Модуль Юнга.

Для исследования влияния электрических сил на взаимодействие частиц попытаемся оценить величину этих сил. Из данных авторов работ [10] следует, что с уменьшением размеров частиц растут их электрические заряды, а, следовательно, и электрическая компонента силы сцепления частиц. Согласно работы [17]

$$F_{\text{э}} = \frac{q^2}{8\pi K^0 r x} \cdot \frac{\ln\left(1 + \frac{r}{H}\right)}{\left(0,557 + 0,5 \cdot \ln\left(\frac{r}{H}\right)\right) * \left(0,557 + 0,5 \ln\left(\frac{r}{H+x}\right)\right)} \quad (1.18)$$

где q_2 - эффективный заряд частицы, составляющий 20...30% от общего заряда;

K° - константа, равная $8,86 \cdot 10^{-4}$ Ф/м;

x - глубина проникновения поверхностного заряда.

Изменяя электрическую составляющую, в принципе можно изменить силу адгезии частиц с помощью уменьшения плотности заряда b_s :

$$b_s = e(N_e - N_a) \quad (1.19)$$

N_e и N_a - концентрации соответственно донорных и акцепторных центров на поверхности частиц.

Таким образом, для исключения электрического компонента необходимо сблизить взаимодействующие поверхности до оптимально возможного расстояния.

Увеличение силы сцепления за счет кулоновских сил наблюдается для частиц, обладающих некомпенсированным зарядом. Сила сцепления в этом случае рассчитывается методом зеркального взаимодействия зарядов частицы и индуцированного заряда у плоскости [18]:

$$F_{\text{э}} = K \frac{q^2}{l^2} \quad (1.20)$$

где q - заряд частиц;

l - расстояние между центрами зарядов;

K - константа.

Составляющая силы сцепления (1.20) играет важную роль именно для цемента, так как согласно исследованиям авторов [19,20,21], у частиц цемента существует некомпенсированный электрический заряд, обусловленный суммарным отрицательным зарядом силикатов кальция и положительными зарядами алюминатов кальция, сульфалюминатов и

алюмоферритов кальция.

Как отмечается в работе [22], наличие поверхностного заряда на частицах цемента приводит к появлению обратного по знаку и равного по величине заряда в приповерхностной области. Существует прямая связь между параметрами реакционной способности цементных систем и электронными характеристиками минералов у поверхностной зоны цементных минералов.

В качестве составляющей сил сцепления необходимо учесть также капиллярную, которая оказывает наибольшее влияние на адгезию гидрофильноповерхностных частиц и минимальное - для гидрофобноповерхностных частиц. В воздушной среде, если влажность ее превышает 65%, капиллярная составляющая сил сцепления частиц преобладает над другими составляющими, при меньшей влажности она не будет столь существенной.

Сила взаимодействия двух сферических частиц радиуса r за счет капиллярных сил равна:

$$F_k = 2\pi\delta r \quad (1.21)$$

а сферической частицы и плоской

$$F_k = 4\pi\delta r \quad (1.22)$$

С учетом неполного смачивания, вводя краевой угол θ , уравнения (1.21) и (1.20) переходят в (1.23) и (1.24):

$$F_k = 2\pi\delta r \cdot \cos\theta \quad (1.23)$$

$$F_k = 4\pi\delta r \cdot \cos\theta \quad (1.24)$$

И в случае непосредственного контакта частиц, а также через жидкостную прослойку, силы сцепления будут падать с уменьшением лиофильных свойств поверхности частиц, то есть с увеличением угла θ [10].

В общем случае силы сцепления между частицами зависят от размеров частиц, свойств поверхностей их, внешних, условий - температуры, примесей и времени контакта частиц и, особенно, давления [10].

Определение вклада всех четырех составляющих в величину силы адгезии или аутогезии - задача в настоящее время еще полностью не решенная. Поэтому, в каждом конкретном случае, необходимо оценивать вклад каждой составляющей и пытаться искать результирующую силу:

$$\vec{F}_c = \sum \vec{F}_1$$

$$\sum \vec{F}_1 = \vec{F}_m + \vec{F}_g + \vec{F}_z + \vec{F}_k \quad (1.25)$$

В жидкости (в воде) природа сил адгезии изменяется, капиллярные и электрические силы не проявляются, и на первое место выступают молекулярные силы сцепления. Вообще, сила сцепления частиц в жидкой среде уменьшается, причем интенсивность молекулярного взаимодействия определяется толщиной жидкой прослойки между частицами. Расчеты, приведенные в работе [23] показывают, что в водных растворах электролитов молекулярное взаимодействие между частицами полностью экранировано при $H = 10^{-6}$ м. При $H = 10^{-7}$ м $F_m = 0,5F_{max}$. Для меньших расстояний молекулярная составляющая силы сцепления частиц увеличивается и стремится к F_{max} .

Необходимо учесть еще одну важную особенность взаимодействия частиц в жидких средах - наличие силы отталкивания, связанной со свойствами поверхностных слоев на границе частиц и жидкости [24], так как при малой толщине зазора между частицами появляется еще и расклинивающее давление кроме молекулярных сил притяжения. Силы отталкивания обуславливают существование потенциального силового барьера (F_{max}) препятствующего сближению частиц. Силовой барьер проявляется на расстояниях, сравнимых с эффективной толщиной ионных

атмосфер [10]. Силы взаимодействия между частицами зависят не только от свойств этих частиц и разделяющей их прослойки, но и от внешней прижимающей силы. Если эта сила меньше или равна высоте силового барьера (рис. 1), то сила сцепления равна F''_{\min} , если прижимающая сила больше F_{\max} , то сила сцепления равна F'_{\min} .

Оценить F''_{\min} можно, используя [25] для броуновского движения выражение

$$\Delta x^2 = \frac{k \cdot T}{3\pi\eta r} \cdot t \quad (1.26)$$

Зависимость силы взаимодействия между
частицами от расстояния при различных
внешних прижимающих силах

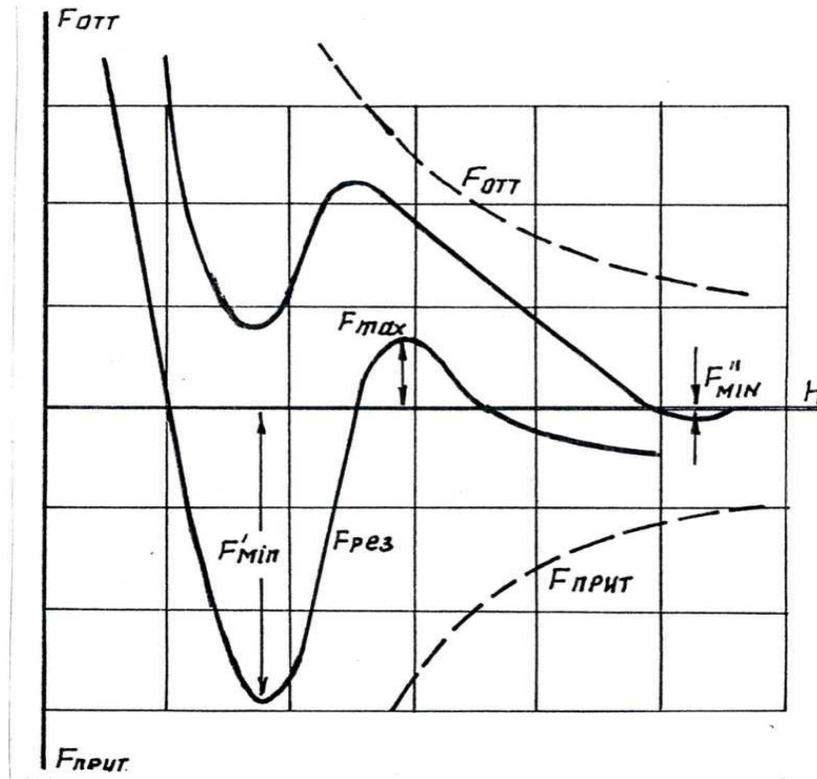


Рис.1.1.

где η - вязкость жидкой среды;

r - радиус частицы.

Энергию взаимодействия частиц на расстоянии H от плоской поверхности можно представить как [26]

$$E = \frac{\lambda \cdot A}{\pi k t} \cdot \left(0,04083 \left(\frac{10r}{H(H+2r)} + \frac{4H+7r}{(H+2r)^2} - \frac{4H+r}{H^2} \right) \dots \right), \quad (1.27)$$

где λ - длина волны электрических колебаний атома. Значение энергии

взаимодействия в случае силы F_{min} должно быть $\geq kT$, то есть сила сцепления должна препятствовать свободному движению частиц.

Молекулярным силам притяжения частиц препятствует раскливающее давление $p(H) = -\Delta\mu$; причем $\Delta\mu$ - избыток химического потенциала, отнесенного к единице объема. Согласно [5] суммарный расклинивающий эффект равен:

$$F_{\text{раскл}} = 2\pi r \int_{H_{\text{min}}}^{\infty} P(H) \cdot dH \quad (1.28)$$

а по [8] $P(H) = A H^n$

где A - константа, определяемая экспериментально для $n = 2 \dots 3$ каждого вещества.

Тогда можно рассчитать действующие на частицу силы, обусловленные раскливающим давлением [10]:

$$F_{\text{раскл}} = \frac{2\pi r}{n-1} * (P_{\text{min}}(H)H_{\text{min}} - P_{\text{max}}(H)H_{\text{max}}), \quad (1.29)$$

где $P_{\text{min}}(H)$ и $P_{\text{max}}(H)$ - величины раскливающего давления, соответствующего минимальной и максимальной толщине слоя жидкости между сферической частицей и поверхностью.

Раскливающее давление обусловлено несколькими факторами: молекулярным (Ван-дер-Ваальсовым) воздействием твердой фазы на граничный слой жидкости и образование двойного электрического слоя на границе раздела фаз (электрическая компонента). Эта электрическая компонента включает ионную и диффузную:

$$P_3(H) = P_{\text{и}}(H) + P_{\text{д}}(H) \quad (1.30)$$

А полное раскливающее давление

$$P(H) = P_{\text{и}}(H) + P_{\text{д}}(H) + P_{\text{м}}(H) \quad (1.31)$$

Электрическую компоненту можно представить как совокупность пондеромоторных сил и осмотического давления в слое и объеме электролита [27]:

$$P_{\text{э}}(H) = P_{\text{п}} + P_{\text{о}} \quad (1.32)$$

Пондермоторные силы обусловлены флуктуацией электрического поля в направлении, перпендикулярном к поверхности контактирующих частиц и для единицы поверхности:

$$F_{\text{п}} = \frac{\varepsilon * E_{\text{э}}^2}{8\pi}, \quad E_{\text{э}} = \frac{\partial \varphi}{\partial H} \quad (1.33)$$

где E - напряженность поля;

ε - диэлектрическая проницаемость среды;

φ - потенциал поверхности;

H - расстояние между ними.

Осмотическое давление связано с неравномерностью распределения ионов вблизи границ поверхностей частиц:

$$P_{\text{о}} = kT \cdot \sum n_{\text{и}} \quad (1.34)$$

где $n_{\text{и}}$ - число ионов в единице объема жидкости.

Тогда

$$P(H) = \frac{\varepsilon * E_{\text{э}}^2}{8\pi} + kT \cdot \sum n_{\text{и}} \quad (1.35)$$

Для поверхностей с небольшим по величине зарядом

$$P_{\text{и}} = \frac{\varepsilon}{8\pi} * \frac{\varphi^2}{h_{\text{и}}^2 * C * h^{\frac{H * n_{\text{и}}}{2}}} \quad (1.36)$$

и толщина ионной атмосферы

$$h_{\text{и}} = \sqrt{\frac{\varepsilon kT}{4\pi e^2 \sum Z_{\text{и}} n_{\text{и}}}} \quad (1.37)$$

где e - заряд электрона;

$Z_{\text{и}}$ - электроотрицательность иона;

C - концентрация электролита.

При малых концентрациях электролита в зазоре и значительных толщинах ионной атмосферы по теории Дерягина-Ландау [28] общее расклинивающее давление:

$$P(H) = 64 \cdot \pi \cdot k \cdot B_0^2 \cdot \exp\left(-\frac{H}{n_i}\right) \quad (1.38)$$

$$B_0 = \frac{\exp\left(\frac{e}{2kT} \cdot \varphi_0\right) - 1}{\exp\left(\frac{e}{2kT} \cdot \varphi_0\right) + 1} \quad (1.39)$$

где φ_0 - потенциал диффузного электрического слоя.

Если концентрация электролита достаточно высока, то

$$P(H) = \frac{-A}{H^3} \quad (1.40)$$

При средних значениях концентраций электролита, когда величины $P_z(H)$ и $P_m(H)$ одного порядка, расчет общего $P(H)$ затруднителен.

Изменяя концентрацию электролита, можно добиться исчезновения силового барьера, благодаря чему происходит сцепление частиц, то есть создаются условия, выгодные для кластерообразования.

Концентрацию электролита, при превышении которой появляется силовой барьер (пороговую концентрацию), можно определить согласно [9]

$$Cn = C \cdot \left(\frac{\varepsilon^2 (kT)^5}{A^2 \cdot e^{\delta} \cdot Z^{\delta}}\right) f(B) \quad (1.41)$$

где C - константа;

$f(B)$ - функция, зависящая от асимметрии электролита, то есть отношения зарядов катионов и анионов;

A - константа межмолекулярного взаимодействия.

Кроме вышеизложенных причин, расклинивающее давление может быть также вызвано присутствием сольватных слоев, гидратацией ионов, влиянием ориентированного на поверхности адсорбированного монослоя

жидкости [29]. Наличие электролитов в растворе, как показывают авторы работ [10,29,30], влияет на сцепление частиц, а, следовательно, и на кластерообразование их, так как сила сцепления уменьшается с уменьшением концентрации электролита и зависит от валентности катионов. Для концентрированных растворов сцепление частиц уменьшается с увеличением валентности катионов, а для разбавленных - увеличивается.

Иногда изменение силы сцепления между частицами в растворах электролитов связывается с изменением электрокинетического потенциала, который, однако, является функцией толщины диффузного слоя адсорбированных ионов и только косвенным образом может характеризовать изменение сил сцепления [31]. Штерн предложил теорию, согласно которой двойной электрический слой состоит из адсорбционного и диффузного, и на распределение ионов в нем влияет природа противоионов электролита. Если противоионы имеют разную валентность, то толщина диффузного слоя и число противоионов в адсорбционном слое зависят от валентности ионов и обуславливаются электростатическими силами. Чем больше валентность противоионов, тем тоньше диффузный слой и ниже ε - потенциал. Если ионы в электролите имеют одинаковую валентность, то толщина двойного электрического слоя и число противоионов в диффузном слое зависят от поляризуемости и гидратационной способности ионов: чем поляризуемость больше и гидратация меньше, тем меньше эта толщина [32,33]. Заряд адсорбционного слоя по Штерну [31]:

$$q_{адс} = Fz \cdot (\Gamma(+)) - \Gamma(-) = Fz \cdot \Gamma \max \left(\frac{1}{1 + 1/C^\infty \cdot \exp((\theta_{(+)} + Fz \cdot \varphi \cdot \delta) / RT)} - \left(\frac{1}{1 + 1/C^\infty \cdot \exp((\theta_{(-)} + Fz \cdot \varphi \cdot \delta) / RT)} \right) \right) \quad (1.42)$$

где Γ - число адсорбированных единиц поверхности молей
ионов различного знака;

θ - специфический адсорбционный потенциал для (+) и (-) ионов;

F - число Фарадея;

Z - валентность;

C_∞ - концентрация электролита на бесконечном расстоянии от твердой фазы;

$F_z \cdot \varphi \cdot \delta$ - электрический адсорбционный потенциал.

Заряд диффузного слоя:

$$Q_{\text{диф}} = \sqrt{\frac{\delta RT}{2\pi}} C_\infty \left(\exp\left(\frac{F_z \cdot \varphi \cdot \delta}{2RT}\right) - \exp\left(\frac{-F_z \cdot \varphi \cdot \delta}{2RT}\right) \right) \quad (1.43)$$

Заряд же на твердой поверхности: $q = q_{\text{адс}} + q_{\text{диф}}$.

Деформация двойного электрического слоя может происходить не только под действием внешнего электрического поля, но и при действии конвективных потоков электролита, гравитационного поля, поля различных механических воздействий. При деформации двойного электрического слоя происходит поляризация ионных слоев, приводящая к появлению дальнедействующих сил притяжения между индуцированными диполями, что играет существенную роль при структурообразовании.

Исходя из изложенного выше, необходимо учитывать следующие аспекты влияния на изменение энергии цементных систем:

взаимодействие частиц на молекулярном уровне с результирующей силой Γ_m ;

электрическое взаимодействие частиц, в том числе за счет зеркального эффекта с силами F_ε и F_a ;

взаимодействие частиц с учетом капиллярных сил $R_{\text{кап}}$;

число частиц в единице объема, то есть их концентрацию;

природу дисперсионной среды;

наличие внешнего силового поля.

1.2. Вакуумирование – аналог физической модификации бетонной смеси

Вакуумирование является технологическим процессом, предназначенным для повышения плотности бетонной смеси и увеличения прочности бетона.

Вакуумирование основано на отсосе воздуха и воды из виброуплотненной бетонной смеси при помощи вакуум-камеры, входящей в состав стенки наружной формы или сердечника, и конструктивно выполняемой как фильтр, под которым находится замкнутое воздушное пространство, сообщаемое при помощи шлангов с вакуумнасосом.

Вакуумирование, как способ формования бетонных изделий, известно с 1899 г. Фирма Рейнке предложила аппарат для изготовления искусственных камней, свободных от внутренних пустот [34]. Данная работа была запатентована в России, патент N 3153, 1903 г.

Следующим формовочным устройством была вибрационная машина в совокупности с вакуумформой для производства плотных изделий из бетона. Это устройство было апробировано в Германии в 1921 г., патент N 36994, Peter Gagger, London [35].

В 1925 г. в Англии фирмой Модерн Сонкрет Девелопмент, С' был запатентован метод вакуумного перемешивания бетонной смеси, основанный на применении, с частично измененной конструкцией, герметической вакуум-мешалки, по германскому методу, патент N 582481 [35].

Следующим шагом в этом направлении была вакуумбетонмешалка, разработанная фирмой Крупп в 1935 году. Результаты испытаний образцов из бетонной смеси, приготовленной в вакуумбетонмешалке,

опубликованы О. Манфредом [35].

В 1935 году американский инженер К. Биллинер предложил вакуумирование бетонной смеси, получил патент N 89131 на способ отливки бетонных изделий с применением разрежения [34].

Практическое применение вакуумного формования осуществлено в США лабораторией Late Uneversity. Разработки вышеуказанной лаборатории послужили основанием для создания специального стройтреста Vakuuum Concrete Corporation [34,35].

Разработка К.Биллинера нашла поддержку и привлекла внимание исследователей разных стран мира.

Большой вклад в разработку и развитие метода вакуумирования внесли труды ученых П.И. Глушко, О.А. Гершберга, С.С. Гардина, Д.Е. Итина, Б.Г. Скрамтаева, А.Е. Десова, С.В. Шес- топерова, С.Н. Зубовича, С.Г. Скворцова, А.И. Конопленко, Н.А. Сторожука и др. [36,37,38,39,40, 41-46, 47-51]

В 1936 г. инженер П.И. Глугже (а.с.М 49142), предложил вакуумировать бетонную смесь при помощи воздушного колокола, перегороденного внутри мелкой металлической сеткой. Для облегчения удаления воздуха из бетонной смеси и одновременного ее уплотнения к колоколу прикреплен вибратор.

В том же году Б.Г. Скрамтаев и А.Е. Десов предложили совместить вакуумирование с поверхностным вибрированием при помощи разработанного ими поверхностного вакуум-вибратора (а. с. N 50336), за основу которого взят поверхностный площадочный вибратор.К нижней части стенки прикреплялась вакуум-камера, обтянутая по низу техническим фильтровальным полотном и соединенная гибким шлангом с вакуум-насосом.

Исследования свойств вакуумбетона впервые проводились в

научно-исследовательских организациях (ЦНИИПС, ЦНИПИЛ, ВНИОС, ДОРНИИ и др.). Установлено, что показатели вакуумированного бетона значительно выше, чем вибрированного. Исследования [52,53,54,55] показывают, что прочность вакуумбетона превосходит прочность вибрированного: в трехдневном возрасте - на 60%; в пятидневном - на 40...50%; а в возрасте 28 суток на 25 %. Это способствует быстрому твердению и набору прочности, что позволяет производить распалубку конструкции через 3...4 дня. Водопоглощение вакуум-бетона [56,57] уменьшается на 15...30 %, что способствует увеличению его морозостойкости. Вакуумбетон характеризуется, также малой усадкой и повышенной сопротивляемостью истиранию по сравнению с вибрированным бетоном [58,59].

Большой вклад в изучение физического процесса вакуумирования внес С. С. Гордон [48]. Им изучены влияние степени разрежения, толщины обрабатываемого слоя, продолжительности вакуумирования при воздухопроницаемой и непроницаемой опалубке и повторной вибрации на количество извлекаемой воды из бетонной смеси, на степень уплотнения и, соответственно, на прочность вакуум-бетона.

Вакуумирование бетона в массивных гидротехнических сооружениях производилось при помощи крупнощитовой и криволинейной мелкощитовой вакуум-опалубки, а также с применением переносных вакуум-щитков [34]. Здесь отмечено, что вакуумирование значительно повысило оборачиваемость опалубки, способствовало более ускоренному твердению бетона со стороны отвакуумированной поверхности, что позволило увеличивать темпы строительства. Отвакуумированный бетон имел плотную и гладкую поверхность и повышенные физико-технические качества, увеличивающие долговечность сооружения.

Врух Г. в своих трудах [60-62] приводит описание, технологические

данные и область применения вакуумоборудования, используемого при возведении различных конструкций на строительных объектах Европы: гибкие вакуум маты (вакуумные ковры), используемые для обработки криволинейных и ровных поверхностей, подвергающихся воздействию интенсивных нагрузок; малоразмерные вакуум щиты для обработки небольших горизонтальных поверхностей (днища резервуаров, междуэтажные перекрытия, дорожные плиты, площадки с искусственным льдом, гребни плотин); крупноразмерные вакуум щиты для обработки больших и регулируемых по размеру плоскостей (полы промышленных зданий); вакуумные опалубки для возведения наклонных и вертикальных конструкций с вакуумной обработкой, выполняемой снизу вверх, одной или нескольких поверхностей вертикальных строительных конструкций (колон, стен, опор, труб, трубопроводов); вакуумная подъемно-переставная опалубка для строительства стен большой высоты, колонн, опор, мостов, опускных колодцев и др.; средства внутреннего вакуумирования (вакуумные иглы, вакуум- трубки).

В этих работах указано, что глубина эффективного воздействия вакуума достигает 35 см, а продолжительность вакуумирования сокращается при одновременной обработке нескольких поверхностей.

В Италии [78,197] вакуумная обработка бетонных смесей применялась в производстве железобетонных труб диаметром 5 м и толщиной стенок 30 см, при этом свежеотформованная труба распалубливалась через 30 минут после вакуумирования.

Столь значительный технологический эффект особо обращает внимание, учитывая прирост конечной прочности бетона на 30% и более. Структура вакуумированного бетона отличалась глубокой модификацией, и, в частности, изменением физико-механических свойств.

Гирштейн Г.Б. в своих исследованиях [64,65] разделил процесс

вакуумирования на два этапа: компрессионный, за время работы которого происходит уменьшение объема смеси, и фильтрационный, характеризующийся незначительным изменением объема смеси при продолжающемся удалении воды. По его данным, вакуумная обработка с периодическими вибродействиями позволяет снизить расход цемента на 30%, ускорить набор прочности на 15...20%, сократить на 20...25% цикл тепловой обработки.

Способу изготовления железобетонных изделий с использованием гидромеханического прессования и вакуумирования посвящены работы, выполненные в Минском институте строительства и архитектуры под руководством Н.П. Блещика [66]. Преимуществом указанного метода является возможность немедленной распалубки изделий и получение после формования бетона с низким водоцементным отношением, что достигается применением прессования с избыточным давлением 0,5 МПа при нагнетании бетонной смеси в кассетную полость и последующего вакуумирования в течение 10 минут при разрежении 0,06 МПа.

Результаты исследования использованы при разработке опытно-промышленных установок для формования шахт лифтов, сооружения опускных колодцев, при создании автоматизированной кассетно-конвейерной линии по производству панелей внутренних стен крупнопанельных жилых зданий.

Большой вклад в развитие и совершенствование вакуумной и вибровакуумной технологии, начиная с 70-х годов и по настоящее время, внесли работы, выполненные в Днепропетровском инженерно-строительном институте [9-11,41,71, 47-49,68,69]. А.И. Конопленко и Н.А. Сторожук [43,44] установили, что оптимальные для вакуумирования бетонные смеси отличаются от смесей, предназначенных для виброуплотнения, повышенным на 150...200 кг/м³ содержанием мелкого

заполнителя. Разработан расчетно-экспериментальный способ определения состава вакуумбетона [41].

В работах Н.А. Сторожука [47-49,68,69] опубликованы результаты теоретических и экспериментальных исследований уплотнения бетонных смесей односторонним вибровакуумированием: рассмотрена закономерность распределения разрежения в бетонной смеси; влияние режима периодического вибрирования в процессе вакуумирования и величина разрежения в вакуум полости и в бетонной смеси до и во время периодического вибрирования. Установлено, что оптимальным режимом вибровакуумирования является режим, в котором вакуумная обработка производится при практически возможно большем разрежении, а вибрирование выполняется периодически, продолжительностью 5...20 с, при разрежении в вакуум полости 0,02...0.03 МПа, с интервалом, равным времени распространения разрежения на всю толщину формируемого изделия; время между отключением вакуума и периодическом вибрированием должно быть не больше времени распространения фронта воздуха на всю толщину уплотняемого слоя бетона; установлено, что увеличение высоты образца и расхода цемента в два раза привело к увеличению времени распространения вакуума и оптимальной продолжительности перерывов или периодическом вибрировании в три раза [48]. Важно, что проф. Н.А. Сторожуком доказано сочетание оптимальных составов бетонной смеси с рациональным режимом вибровакуумирования, обеспечивающее повышение прочности бетона на 50...60% по сравнению с вибрированным бетоном [10].

Результаты выполненных исследований внедрены при изготовлении объемных элементов (блок-комнат) на вибровакуумной формовочной машине МОБ-УВ-2, разработанной в содружестве с НИИСК Госстроя СССР [9-11], эксплуатируемой на комбинате объемно-панельного

домостроения в г. Кременчуге.

Комбинатом Крымспецстрой Минпромстроя Украины и ДИСИ внедрен метод вакуумирования при возведении курортно-санаторных комплексов из монолитного бетона [72]. Вакуумная обработка бетонной смеси в монолитных перекрытиях с помощью разработанного Н.А. Сторожуком вакуум щита с гибкой вакуум полостью сократила сроки выдержки бетона в опалубке в 2 раза и позволила сразу же после вакуумирования выполнять на перекрытии различные работы: складировать арматурную сталь, монтировать щиты опалубки и арматурные каркасы. Вакуум полость такого щита изготовлена из эластичной резины с выступами-шинами. В качестве фильтра предложена перфорированная полиэтиленовая пленка или резина толщиной 1 мм. При возведении монолитных стен применено устройство, состоящее из вертикальной вакуум- трубки с фильтром из полиэтиленовой пленки и горизонтальной вакуум трубки, к которой присоединяется нижний конец вертикальной трубки и коллектор вакуум установки. После сборки опалубки и установки вакуум трубок с фильтром из полиэтиленовой пленки укладывают бетонную смесь и кратковременно вибрируют ее. Затем через коллектор подключают вакуум трубки и производят вакуумирование.

Учеными ПГАСА разработана также технология вакуумирования стен и колонн в монолитных сооружениях при помощи специальных горизонтальных вакуум трубок с вертикальными объемными фильтрами из жесткого мелкозернистого пористого бетона, которые по окончании вакуумирования остаются в бетоне [70]. Для этого монтируются щиты опалубки с одной стороны возводимой стены, устанавливаются арматурные каркасы, закладные детали и проемообразователи. Затем на нижней вакуум трубке закрепляют объемные фильтры сечением 8х8см, монтируют противостоящие щиты опалубки. После укладки бетонную

смесь кратковременно вибрируют и вакуумируют в течение 40...60 мин.

А.И. Конопленко и И.Г.Ильченко исследовали возможности ускорения процесса твердения вакуум бетона путем оптимизации момента начала вакуумной обработки и последующей тепловлажностной обработки, продолжительность которой в 1,5...2 раза меньше, чем у вибрированного бетона [71]. А.И. Конопленко и В.И. Панасюк предложили использовать песчаный фильтр при вакуумировании строительных изделий снизу [72].

Представляют интерес исследования вакуумирования бетонной смеси с использованием металлических фильтров, приведенные в работе [73]. В ней обоснована экономическая эффективность заводской технологии вакуумирования бетонных смесей при использовании металлических фильтров с отверстиями правильной формы, размер которых превышает размер частиц мелкого заполнителя [74]. Разработан метод оптимизации режима вибровоздействием при вакуумировании снизу с использованием металлических фильтров, основанный на измерении давлений в бетонной смеси. Очевидно, в этих работах использованы данные нашего изобретения (а.с. N 1357239, "Бюллетень изобретений", 1987, N 45)

Вакуумирование бетона при устройстве полов в помещениях с интенсивными агрессивными воздействиями или значительными нагрузками применялось в Великобритании, ФРГ и Франции [75,76,77,78]. В Англии при устройстве бетонных полов применяют технологию, разработанную фирмой "Metrix Engineering" [78].

В настоящее время шведские фирмы "Trimix AB" и "Dunipak" занимают ведущее место на мировой арене в поставке оборудования для вакуумирования. Фирма "Trimix AB" применяла метод вакуумного обезвоживания поверхностей железобетонных конструкций при

строительстве железобетонного моста в Дании [79].

Вышеизложенное, доказывая высокую эффективность вакуумирования в результате модификации бетонной смеси, не решает вопросы кардинального повышения прочности бетона. Очевидно, что модификация структуры бетона путем понижения водосодержания должна дополняться высокоинтенсивным методом уплотнения бетонной смеси.

Представляется целесообразным рассмотреть современные способы высокоинтенсивного уплотнения бетонной смеси, как например, вибропрессования, центрифугирования, виброударного прессования, виброгидропрессования, радиального прессования и др.

2. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

2.1. Высокоинтенсивные методы уплотнения бетонной смеси

Основными производительными операциями бетонных и железобетонных изделий являются укладка, формование и уплотнение бетонной смеси.

Наиболее сложный процесс - уплотнение смеси до необходимой плотности, который производится трамбованием, вибрированием, прессованием, вакуумированием, центрифугированием и комбинированными способами.

Уплотнение жестких бетонных смесей в сооружениях производилось ручным трамбованием. Позднее, с 1860 года, вошло в употребление механическое трамбование [80]. В процессе требования бетонной смеси многократно повторяющимися ударами трамбовки частицы сообщаются кинетическая энергия, под действием которой зерна крупного заполнителя перемещаются в направлении действия сил, внедряются в

основную массу бетонной смеси и наиболее плотно укладываются в ней.

Трамбование, как способ уплотнения смеси при изготовлении труб, применяют, в основном, такие зарубежные фирмы, как "Фрей и К" (Швейцария), "Куин", "Универсул", "Ротофарш" (США). В трамбовальных машинах бетонная смесь уплотняется в результате возвратно-поступательного движения трамбовок. Трамбуют обычно при 150-400 ударах в минуту, в зависимости от конструкции установки. Изготавливают трубы диаметром от 300 до 1500 мм при длине до 2 м. При изготовлении труб трамбованием используют формы жесткой конструкции, состоящие из сердечника и обечаек.

К числу преимуществ трамбованного бетона Н.А. Житкевич относит; экономию цемента (до 25 %), повышение прочности (о 30 %), увеличение плотности, водонепроницаемости и морозостойкости бетона по сравнению с ручной укладкой [80].

Недостатками способа трамбования являются: уплотнение передается недостаточно равномерно по высоте изделия, при трамбовании особо жестких смесей с повышенным содержанием крупного заполнителя возможно их заклинивание в период, когда уплотнение смеси еще полностью не завершено, а также ограниченность использования.

Практические применения вибрирования относятся к 1890г., когда были использованы виброплощадки [81]. В 1899 г. в России был заявлен патент на аппарат для изготовления свободных от внутренних пустот искусственных камней. В этом патенте предложено три способа уплотнения искусственных камней и бетонной смеси. Первый способ - уплотнение при помощи пневматического вибратора, второй - уплотнение при помощи "храповиковой" виброплощадки и третий - уплотнение при помощи механизма, состоящего из системы рычагов, соединенных с эксцентриком (предложение это не было реализовано).

В последующее время вибрирование применялось эпизодически. В 1906 г. в США применяли пневматические вибраторы, но неудачно, и до 1915 г. были начаты исследования вибрированного бетона и бетона ручной укладки [100].

С 1925 г. начинает широко применяться способ уплотнения бетонной смеси вибрацией. В 1928 - 1929 г.г. вибрирование применялось на заводе "Баррикады" в г. Ленинграде. В 1933 г. был начат серийный выпуск механизмов для укладки бетона, вибраторы были широко применены для строительства Днепростроя, Свирь-II и Свирь-III, где был уложен бетонный блок объемом 9000 м³ [83,84].

Вибрирование сводится к разрушению сложившейся первоначальной структуры бетонной смеси и переводу ее в состояние пластично-вязкого течения, при котором смесь подчиняется действию силы тяжести, свободно растекается, хорошо заполняет пространство между концентрическими формующими поверхностями рабочего органа, самоуплотняется и приобретает устойчивую, более плотную структуру. При этом зерна заполнителя размещаются более компактно, в результате достигается плотное заполнение межзернового пространства цементным тестом и раствором с одновременным вытеснением части свободной воды на поверхность уплотняемой смеси [84,85].

В строительной промышленности вибрационные процессы применялись не только для уплотнения бетонной смеси, но и для уплотнения грунта и сыпучих материалов, балласта, для погружения свай и шпунта, для транспортирования и дозировки сыпучих тел, сепарирования порошков, для подземной проходки траншей, для чистки ковшей экскаваторов [86-103]. Это далеко не полный перечень областей техники, где с большим или меньшим успехом применяют вибрационно-колебательные процессы. Несмотря на кажущееся различие, в основе этих

процессов лежит один и тот же принцип - существенного уменьшения внутреннего трения при колебаниях [104,105].

Наряду с вибрационной технологией производства изделий из сборного железобетона определенное развитие, особенно при получении архитектурного бетона, получила так называемая ударная технология. Впервые ударные столы появились в 30-х годах в Голландии. Эта технология основывается на применении ударных шок-столов. Подъем рабочего стола осуществлялся кулачками специальной формы. Ударные импульсы создаются в результате соударений с частотой до 8 Гц. При этом амплитуда перемещения стола составляла 3...5 мм. При эксплуатации ударных столов возможно уплотнение умеренно жестких бетонных смесей с хорошим качеством лицевых поверхностей. В технологическом отношении опыт внедрения ударных столов оказался чрезвычайно плодотворным. Прежде всего, была поставлена под сомнение широко распространенная идея о преобладающем влиянии частот на процесс уплотнения бетонной смеси. Во-вторых, была установлена целесообразность применения вибрации при вертикальных воздействиях режимов с осесимметричными колебаниями рабочих органов.

Две разные технологии (вибрационная и ударная), имеющие различные достоинства и недостатки, побудили исследователей искать новые технологические решения, которые удачно сочетали бы преимущества каждой из них. Именно это и привело к идее создания ударно-вибрационной технологии уплотнения бетонных- смесей [106].

В ЛИСИ предложен виброударный метод уплотнения бетонов, позволяющий формировать изделия, в том числе и пространственные конструкции, без перерасхода цемента по сравнению с тяжелыми бетонами при стандартном уплотнении [107,108].

Производственная ударная установка с частотой 1000 кол/мин и

амплитудой 4 мм позволяет формировать вентиляционные блоки из бетона со средней прочностью 20 МПа при расходе цемента марки 400 - 280 кг/м³ [108].

Виброударное уплотнение применялось также при изготовлении фундаментных блоков, колодцев, плит перекрытий, свай и др. Здесь применяются виброплощадки с частотой 24 Гц. Расход цемента марки 400 для получения средней прочности бетона более 30 МПа составляет 340 кг/м³ [109,106].

Для формирования жестких бетонных смесей применяется также виброударная виброплощадка частотой 20 Гц с нижним ускорением 2...3 и верхним ускорением 5...8 ч. Уплотнение с пригрузом 0,0015 МПа позволяет экономить, 7...12% цемента [110].

К положительным сторонам метода вибрирования следует отнести возможность применения несложного стандартного оборудования и изготовления изделий различной конфигурации.

Недостатком является то, что уплотнение бетонной смеси происходит лишь под действием собственной массы, при которой снижается степень уплотнения, прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона.

Прессование, как способ уплотнения пластических дисперсных материалов при изготовлении строительных изделий (кирпича, плит, камней и др.) применяется с незапамятных времен. Со времени появления цементно-песчаного бетона прессование используют при производстве тонкостенных изделий из мелкозернистых композиций. В конце 20-х годов было предложено использовать прессование комбинированием с другими способами уплотнения бетонных смесей, в частности с вибрированием.

Прессованный и вибропрессованный бетоны становятся предметом исследований отечественных и зарубежных ученых, из которых, в первую

очередь, следует упомянуть А.В. Саталкина [111-114], А.Е. Десова [115-124], И.Н. Ахвердова [128-130], Г.З. Лохвицкого, Е. Фрейсине [131], Боломея, Лермита и др. Их исследования позволили выявить основные закономерности принципа прессования бетонной смеси и установить физико-механические показатели прессованного бетона.

В современном представлении прессование - это способ формирования из пластичных материалов изделий и деталей, когда на материал воздействует однократно приложенное давление, повышающееся от нуля до заданного значения. По характеру передачи давления на материал прессование является статическим процессом. Оно может быть непрерывным и ступенчатым. В производстве строительных изделий исходные материалы прессуют как в сухом состоянии с последующим увлажнением, так и, наиболее часто, предварительно увлажненными. В последнем случае предусматривается возможность выхода отжимаемой воды через специальное устройство типа фильтров, поскольку при прессовании необходимо не только достичь плотной упаковки твердых фракций в обрабатываемом материале, но и обезводить его [132].

Прессование, в зависимости от направления сообщаемого давления, может быть объемным, двусторонним и односторонним. Для различных материалов закономерности процесса прессования неодинаковы и имеют свои особенности.

Положительной стороной метода прессования- вибропрессования является возможность формирования изделий из жестких бетонных смесей.

Недостаток этого метода - невозможность обеспечения равномерного уплотнения бетонной смеси при большой высоте (толщине) изделия. В массе бетона остается некоторое количество заземленного воздуха, который удаляется только из поверхностного слоя.

Роликовая технология возникла в 1970... 1975 годы. Первые

роликовые установки были созданы для формования труб методом радиального прессования. За рубежом такие станки выпускают фирмы "Mo Cracken", "Hydrotile", США; "Pfeiffer", ФРГ; "Bonna" Франция, и итальянская фирма "Siome". Технология радиального прессования получила в этих странах широкое распространение [133,134,135,136].

В нашей стране формовочные машины радиального прессования разработаны институтом Гипростройматериалы [138,139,140], им же созданы и технологические линии. На станках СЖ-194, СЖ- 542 формуют и раструбные трубы [139,141,142].

Способ радиального уплотнения постепенно совершенствуется Гипростроймашем, НИИЖБом и КИСИ [143,144,145,146]. Радиальное прессование обеспечивает уплотнение бетонной смеси в стенках трубы за счет радиального давления, возникающего и передаваемого на бетон в результате вращения прессуемой головки, имеющей лопасти или ролики. Под влиянием возникающих центробежных сил поступающая в форму бетонная смесь, откладывается по направлению к внутренней поверхности формы, образуя стенку трубы заданной толщины. В головке цилиндрическое основание выполняет роль уплотняющего устройства, а лопасти - заглаживающего элемента. Скорость вращения головок 80...300 об/мин. При такой скорости вращения уплотнение бетонной смеси достигается за счет воздействия на нее радиально направленных усилий прессования с последующим заглаживанием внутренней поверхности трубы. Уплотнение раструба производится с помощью вибраторов, укрепленных на форме.

В стенках, работающих по принципу радиального уплотнения, можно изготавливать как бетонные - диаметром от 100 до 500 мм, длиной до 2,4 м, так и железобетонные трубы диаметром от 600 до 2400 мм, длиной до 3,6 м.

Сущность роликового прессования состоит в том, что под вращающим роликом при многократной подсыпке под него бетонной смеси образуется предельно плотный объем смеси - "уплотненное ядро". При поступлении под ролик новых порций бетонной смеси уплотненные слои выдавливаются в стороны и вверх, размещаясь по концентрическим окружностям.

Скорость непрерывного формования бетонных и железобетонных безнапорных труб этим методом составляет 0,5...1,2 м/мин.

При формовании труб способом осевого послойного прессования уплотнение бетонной смеси в стенку трубы производится криволинейными лопатками, укрепленными на вращающемся цилиндре, в пространстве между вертикально стоящей формой и вращающимся сердечником. Методом прессования формируется цилиндрическая часть трубы; при изготовлении раструбных труб, как и при радиальном способе, раструбная часть уплотняется с помощью вибрации. Этим способом изготавливаются бетонные трубы диаметром от 100 до 1000 мм, длиной до 2,0 м [133-136,145,146].

Достоинствами метода радиального прессования являются: совмещение в одном формирующем узле процессов укладки, уплотнения и модификации бетонной смеси и бетона, а также заглаживание внутренней цилиндрической поверхности изделия; немедленная распалубка изделий, делающая технологию металлосберегающей.

Существенным недостатком радиального способа формования изделий является необходимость строгой синхронизации количества подаваемой смеси со скоростью подъема формируемой головки, которая, вращаясь, принудительно поднимается вверх. Задержка в подаче бетонной смеси вызывает появление в теле бетонной трубы недоуплотненных участков и даже раковин.

Наиболее современным по принципу работы можно считать формование бетонных и железобетонных напорных и безнапорных труб способом виброгидропрессования, при котором бетонная смесь подвергается одновременному или последовательному воздействию вибрации и прессования.

Промышленное изготовление труб виброгидропрессованием было впервые, по предложению Е. Фрейсине, организовано в 1942 г. во Франкфурте-на-Майне фирмой "Вайте унд Фрайтог". Выпускали трубы диаметром 800 мм, длиной 6 м. На этом предприятии использовали формы с неразъемными наружными обечайками, позволяющие осуществить двустороннее прессование стенок труб. Конструкция наружной обечайки формы обеспечивала, во-первых, расширение прессуемого железобетонного цилиндра и, во-вторых, выход фильтрующейся воды из бетона. Трубы прессовали со стороны сердечника давлением 5 МПа, со стороны наружной обечайки 2 МПа. Изготавливали трубы без раструбов, отдельные звенья соединяли между собой при помощи стыков типа "Жибо". В дальнейшем предприятия, работающие на этой технологии были, построены в Алжире и Тунисе, но развитие производства труб сдерживалось сложностью и дороговизной форм [132,137].

В последующие годы были предложены способы, позволившие упростить конструкцию форм. В частности, шведская фирма "Сентаб" предложила изготавливать виброгидропрессованные трубы в формах, состоящих из стального перфорированного вибросердечника, на который надет резиновый чехол наружной обечайки, состоящей, в зависимости от диаметра трубы, из двух или из четырех элементов, скрепляемых болтами с пружинами.

В бывшем СССР производство виброгидропрессованных труб регламентировалось документами, содержащими подробные данные о

последовательности и режимах отдельных технологических переделов, а также испытания и приемки продукции.

Современная технология производства виброгидропрессованных труб состоит из следующих процессов: резка проволоки; штампование разделительной полости; высадка анкерных головок; изготовление спирального каркаса; установка арматуры в форму; натяжение продольных стержней; комплектация формы; укладка бетонной смеси; гидропрессование и тепловлажностная обработка трубы; снятие формы и трубы с сердечника; распалубка трубы; шлифование раструба; гидравлическое испытание труб; вывод труб на склад готовой продукции.

До середины шестидесятых годов виброгидропрессованные трубы выпускали во всех странах с максимальным диаметром 1200 мм. Затем фирма "Вианини" организовала выпуск труб диаметром до 2200 мм, сохранив технологию труб средних диаметров, но изменив конструкцию машин.

Положительной стороной метода виброгидропрессования является наличие процесса обжатия свежеизготовленной трубы посредством нагнетания воды в резиновый чехол. В результате такого обжатия стенок можно изготавливать высоконапорные трубы с предварительно напряженной спиралью и продольной арматурой. Недостаток метода - в потребности сложного дорогостоящего оборудования, в большом количестве ручного труда и больших капитальных вложениях для организации производства.

Вакуумирование - это технологический прием, предназначенный для дополнительного уплотнения свежеуложенной бетонной смеси, основанный на создании разности между атмосферным и пониженным давлением в сообщающихся порах и капиллярах бетона. Пониженное давление порядка 75...85% от полного вакуума создается разрежением в

поровом пространстве слоев бетона, примыкающих к вакуум-приборам.

В результате создающегося градиента давления влага, водяной пар, воздух или паровоздушная смесь устремляются из зон с атмосферным давлением к вакуум-источнику и удаляются из бетона. Количество воды, отжатой таким образом, составляет от 10 до 20% воды затворения. Под действием этого же градиента давления как механической силы, а также под действием возникающих сил капиллярного обжатия бетона (по мере удаления воды из капилляров) происходит его уплотнение с замещением освободившихся пространств мелкими частицами твердых компонентов смеси.

Удаление избыточного количества свободной воды из поровых пространств бетона без соответствующего его уплотнения, без уменьшения общего объема, занимаемого сформованным изделием, не дает какого-либо технического эффекта. В этом отношении весьма полезно периодическое сочетание вакуумирования с вибрированием, т.е. вибровакуумирование. Вибрирование осуществляется для укладки и уплотнения бетонной смеси, и далее, уже в процессе вакуумирования отформованного изделия, вибрация включается на весьма короткий срок, с тем, чтобы, ликвидируя временно трение между частицами смеси, способствовать лучшему заполнению порового пространства частицами твердых ее компонентов. Вместе с тем, в результате вибрирования избыточная вода из нижележащих слоев бетона, находящихся вне зоны вакуумирования, поднимается вверх, достигая этой зоны и при продолжающемся вакуумировании извлекается из бетона. Таким образом, вибровакуумная обработка бетона способствует не только повышению его плотности, но и увеличению количества воды, отжимаемой из бетона [147-150,45].

Достоинство вибровакуумирования - это обеспечение не только

уплотнения бетонной смеси, но и увеличение отсоса вовлеченного воздуха, свободной воды затворения из смеси, что повышает прочность, водонепроницаемость и морозостойкость бетона.

Отрицательная сторона способа вакуумирования состоит в необходимости создания весьма сложного оборудования.

Центрифугирование как способ уплотнения бетонной смеси, основано на отжатии из нее воды затворения, когда смесь, загружаемая в форму, вращается вместе с последней и под влиянием центробежных сил распределяется на внутренней поверхности формы. В результате формируются изделия, представляющие собой в сечении тела вращения с внутренней цилиндрической полостью, а это позволяет осуществлять формование труб и полых трубчатых конструкций без применения сложных двойных форм с внутренним сердечником. Внешнее очертание поперечного сечения формируемых изделий может быть различным: круглым, многоугольным, квадратным и др. Размеры изделий, формируемых центробежным способом, могут быть достаточно большими по длине (несущие колонны, осветительные мачты, опоры линий передач связи длиной до 15 м и более) и в поперечном сечении (трубы диаметром 3...2,5 м и более, длиной 5...7 м) [151-153].

Начиная с 1932 года в бывшем СССР для производства центрифугированных железобетонных изделий были построены цеха в Ленинграде, Москве, Одессе, Горьком, Баку и других городах [151-155].

За рубежом в США, Франции, Израиле, Алжире, Англии, Австралии, Голландии, Германии и Швеции также широко применяется способ формования изделий центрифугированием [151,195].

Имеются два способа центрифугирования: отстойный и фильтрационный. При первом способе центрифугирование происходит в

формах со сплошными стенками; при втором - в дырчатых (перфорированных) формах, выстилаемых фильтром из хлопчатобумажной ткани.

Преимуществом способа центрифугирования является возможность осуществления высокой степени механизации технологического процесса изготовления осесимметричных изделий; получение бетона высокого качества вследствие использования больших центробежных силовых воздействий при его уплотнении.

К недостаткам следует отнести: возможность изготовления лишь осесимметричных изделий; наличие большого числа агрегатов; низкую оборачиваемость форм; большую трудоемкость.

2.2. Современные ресурсосберегающие технологии модифицирования бетонной смеси и бетона

Литературный анализ выполненных исследований и патентный поиск по описаниям изобретений индустриально развитых стран показал, что в настоящее время проводятся глубокие исследования и широкие разработки новых ресурсосберегающих технологий. Наибольшее количество исследований, журнальных публикаций и изобретений зарегистрировано на имя авторов Японии, США, Западноевропейских стран, а также России.

М.Ш. Файнером выполнены обобщения и систематизация проведенных исследований, что позволило составить общую классификацию различных методов ресурсосбережения [157]

К основным методам ресурсосбережения относятся, в первую очередь, рецептурно-технологические, включающие:

- направленное структурообразование;
- оптимизацию и регулирование составов бетона;
- регулирование режимов приготовления, транспортирования, укладки и

уплотнения бетонной смеси;

- оптимизации режимов твердения.

Механические, включающие:

- гомогенизацию;
- измельчение;
- виброобработку;
- вакуумно-компрессионную обработку.

Химические, включающие:

- модификацию вяжущих и заполнителей;
- модификацию структуры бетона добавками;
- аппретирование и пропитку бетона.

Физические, включающие:

- термические;
- лучевые;

акустические;

- магнитные.

И комплексные, включающие комбинированную физико-механическую и физико-химическую модификацию бетона.

Классификация основных методов ресурсосбережения приведена на рис. 1.2 [157]

Изучения приведенных методов ресурсосбережения показывают, что в настоящее время отсутствуют высокоэффективные и надежные методы модификации бетонной смеси и бетона. Если часть приведенных методов, как например, лазерные, ультразвуковые, струйные и т.д., чрезмерно усложняют технологию, то другие отличаются малой эффективностью.

0 нашей точки зрения, повышение прочности бетона, особенно его прочности при растяжении, возможно путем создания нового направления модификации бетонной смеси и бетона. В качестве аналога

высокоэффективной модификации бетона возможно выбрать комбинацию вакуумирования и обработки бетонной смеси давлением (рис. 1.2). В этом случае целесообразна разработка высокоэффективной модифицирующей технологии, позволяющей получать особопрочные бетоны на рядовых цементах и местных заполнителях [158,159].

Эффективность повышения прочности бетона подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Так, например, по данным [169,170] применение высокопрочных бетонов для строительства многоэтажных зданий позволяет снизить расход металла на 15...20%, трудозатраты на 30...60% и издержки производства на 20...30%. При этом наибольший эффект достигается при использовании бетонов о пределом прочности при сжатии до 80 МПа для изготовления колонн кольцевого сечения, тяжело нагруженных колонн металлургических цехов и многоэтажных зданий. По сравнению с бетонами классов В20...В25 достигается снижение расхода материалов на 10...50 %, в том числе стали на 80...240 кг/м³ [162-164]. Используя высокопрочные бетоны при изготовлении ферм, решетных

Основные направления ресурсосбережения в технологии бетона

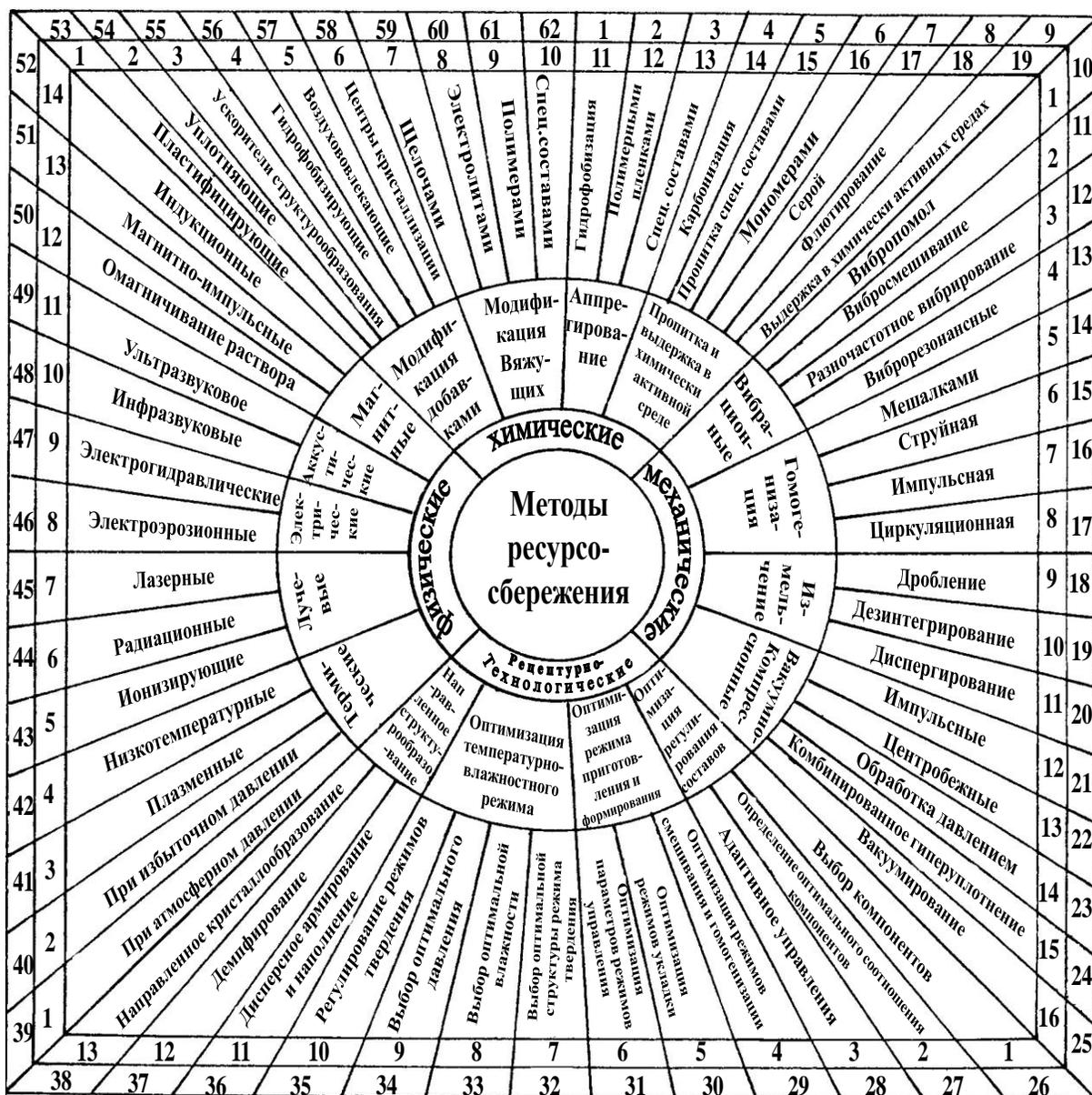


Рис. 1

15/24 – новое направление ресурсосбережения

балок, коробчатых настилов, достигается снижение расхода бетона на 10...30% и арматурной стали на 5...13% [162,163]. Применение высокопрочных бетонов для изготовления конструкций крепления угольных шахт глубокого заложения позволяет снизить расход бетона на 40...60% и

стали на 30...50 % [165]. Существенный эффект достигается при использовании бетонов повышенной прочности для изготовления труб, резервуаров [166,167], в мостостроении [168, 145, 170]. Так, по данным [145, 169], при строительстве железнодорожных мостов пролетом 50 м повышение прочности бетона при сжатии с 40 до 80 МПа снижает расход бетона на 34%, а при пролете мостов 80 м на 42%. Использование же бетонов с пределом прочности при сжатии 120 МПа позволяет снизить материалоемкость на 45...55%.

Применение в строительстве эффективных конструкций не ограничивается использованием высокопрочных тяжелых цементных бетонов. Все большее применение получают высокопрочные бетоны на легких пористых заполнителях [170], шлакощелочные [181-174], полимерные и полимерцементные бетоны [175,140], бетонополимеры [176,177] и кремнебетоны [178]. Широкие возможности ресурсосбережения открывает применение дисперсно-армированных бетонов [179-191]

Комбинация различных методов уплотнения бетонной смеси позволяет резко увеличить прочность бетона. Например, с пределом прочности при сжатии до 80 МПа с улучшенными деформативными характеристиками [182].

Изложенное позволяет предположить возможность разработки комбинированной технологии для получения особовысокопрочных бетонов. Очевидно, что вибропрессующие методы необходимо дополнить модификацией бетонной смеси за счет удаления избыточной воды затворения и, особенно, газовой фазы формируемого материала. При этом необходим всесторонний анализ современных методов вакуумирования бетона. Сочетание плодотворной идеи оптимального обезвоживания бетона с высокоинтенсивными методами его уплотнения является перспективным, научнообоснованным направлением бетоноведения.

2.3. Теоретические основы структурообразования цементного камня и бетона

Управление процессами твердения сложных дисперсных структур, какими являются цементный камень и бетон, возможно на основе глубокого понимания физико-механической и химико-технологической природы их взаимодействия. Этому вопросу посвящено значительное число исследований по кинетике гидратации вяжущих веществ и технологическому анализу процессов твердения [183-193]. Несмотря на большое число выполненных исследований еще отсутствует общая количественная теория твердения и структурообразования композитов на основе вяжущих веществ. Общепринято, что вяжущее вещество, реагируя с водой, превращается в новые химические соединения, коренным образом отличающиеся от исходного вещества. Исходное вещество имеет большую растворимость, чем продукты гидратации и образующиеся растворы насыщены по отношению к гидрату.

В. Михазлис [194] считает, что молекулы воды проникают в поверхностные слои частиц вяжущего вещества, приводят к одновременной гидролитической диссоциации безводных силикатов кальция, в связи с этим образуется коллоидная масса из мельчайших частиц гидрата.

По А. А. Байкову [195] вскоре после затворения вяжущего водой, оно растворяется, как и у Ле Шателье [196]. Но в момент достижения концентрации насыщения процесс растворения исходного вещества должен прекратиться, однако не может прекратиться химическое превращение его в гидрат. Отсюда А.А.Байков, основываясь на топахимических представлениях, делает вывод, что продукты гидратации должны выделяться в виде мелкодисперсной системы из-за прямого присоединения воды, к зернам вяжущего. Стержнем, объединяющим эти теории, является то, что после соприкосновения вяжущих веществ с водой образуются гидраты в виде

мельчайших частиц, обладающих свойствами коллоидов и находящихся в равновесии с окружающей средой. Независимо от того, образуются ли эти частицы в результате выпадения из растворов, или при реакции топомхимической гидратации, или из-за диспергирования зерен цемента, гидратные частицы обладают всеми свойствами коллоидных образований.

Ле Шателье и А.А. Байков считают, что развитие и рост кристаллогидратов идет через раствор. Михазлис объясняет твердение цементных паст из вяжущих веществ возникновением коагуляционной структуры между частицами гидратов коллоидных размеров.

И.Н.Ахвердов [183] рассматривает механизм процесса гидратационного твердения с точки зрения растворного механизма частиц цемента с последующей кристаллизацией новообразований из пересыщенного раствора и ростом кристаллов с образованием в итоге камневидной структуры.

А.Ф.Полак [186] рассуждает следующим образом. При соприкосновении с водой вяжущее вещество растворяется и образуется пересыщенный по отношению к гидрату раствор, из которого выпадают зародыши. Растущие кристаллики гидрата сближаются и соединяются, образуя камневидную структуру. При этом является обоснованным разделение сложного процесса твердения на элементарные стадии:

растворение исходного вяжущего;

образование зародышей новой фазы - гидрата;

рост кристаллов гидрата;

образование коллоидной и кристаллизационной структур.

В.Б.Ратинов [188] склоняется в пользу протекания процессов гидратационного твердения по кристаллизационному механизму, в котором растворение играет важную роль. Кристаллизация новообразований также рассматривается как сложный процесс образования и роста

кристаллогидратов из пересыщенных растворов. П.А. Ребиндер и Е.Е. Сегалова [197] придерживаются теории кристаллизационного структурообразования, по которой прочность структуры вызвана срастанием отдельных кристалликов с образованием объемного каркаса.

В работах [198-201] предусматривается одновременность процесса растворения вяжущего и рост кристалликов новообразований. Причем, зародыши гидрата кальция возникают только в индукционном периоде, а вид этих зародышей зависит от межфазной энергии и является функцией коэффициента физико-химической неоднородности.

Рассмотрим, какие процессы происходят при затворении цемента водой, при этом необходимо учесть важную роль воды, ее плотности и вязкости. Так как именно изменение ее свойств определяет скорость растворения частиц цемента и кинетику дальнейших процессов гидролиза минералов цемента.

При смешивании порошка цемента с водой затворения образуется дисперсная система, в которой свойства цемента и воды меняются в зависимости от их количественного соотношения, температуры, давления и прочих характеристик [202,203]. Сразу после затворения происходят сугубо физические процессы, заключающиеся в распределении и адсорбции воды по поверхностям частиц цемента, их седиментации в микрообъемах. Одновременно осуществляется растворение отдельных клинкерных минералов и начальных продуктов гидратации. Происходит изменение химического состава цементных частиц, что играет немаловажную роль в формировании дальнейшей структуры. Можно представить цементный порошок как полидисперсную некомпенсированную систему, в которой мелкие частицы образуют между собой агрегаты, характеризующиеся более низким поверхностным потенциалом и более низкой активностью [183].

Схватывание и твердение затворенного водой цемента с химической и физико-химической точек зрения характеризуется процессами растворения, гидролиза, полимеризации и гидратации [183, 112, 188,54].

Вода, заключенная между частицами цемента и потерявшая подвижность, поляризуется за счет диффузных явлений, дипольной структуры частиц и индукционного влияния поляризованной пленочной воды [204]. Ориентация полярных молекул воды максимально проявляется в адсорбционном слое вблизи поверхности раздела.

В процессе образования сольватных оболочек на поверхности частиц гипса (в присутствии гипса) происходит их взаимодействие под влиянием Ван-дер-Ваальсовых сил. При сближении сольватированных цементных частиц до радиуса действия молекулярных сил притяжения они сцепляются. При этом между взаимодействующими поверхностями по-прежнему есть тонкие адсорбционные слои, препятствующие дальнейшему укрупнению частиц. Такие системы являются устойчивыми и образуют коагуляционные структуры - компактного, группового замкнутого разобщенного вида [183].

При затворении цемента водой в процессе перемешивания образуется цементный гель - неоднородная дисперсная система, состоящая из микроагентов и отдельных частиц, связанных Ван-дер-Ваальсовыми силами, что в, конечном итоге, приводит к образованию коагуляционной структуры; формирование коагуляционной структуры цементного геля происходит с момента затворения цемента водой и завершается, в основном, при окончании индукционного периода, находящегося в промежутке времени между началом и концом схватывания. Этот период характеризуется адсорбцией воды на частицах твердой фазы и постепенным насыщением ее продуктами гидролиза цемента [16,18,201].

Существует несколько точек зрения на механизм связывания воды поверхностью частиц, но все они признают доминирующую

роль силового приповерхностного поля притяжения. Специфические свойства адсорбированной воды оказывают влияние на процессы формирования физико-механических свойств цементного геля и его превращение в твердое тело [184].

Частица цемента, взаимодействующая с раствором, является сложным комплексом, в котором твердая фаза связана с окружающей средой через стабилизирующий двойной электрический слой ионов, а в некоторых случаях - через сольватную оболочку [183].

Степень устойчивости первоначально сложившейся структуры определяется, в основном, силами взаимодействия между частицами.

Развитие процесса коагуляции цементного геля зависит от минералогического состава и дисперсности цемента, а также наличия в нем добавок-электролитов, образующих двойной электрический слой одного знака у поверхности цементных частиц и препятствующих их сцеплению. Если двойной электрический слой одного знака отсутствует, тогда наступает ближняя коагуляция, и цементный гель быстро загустевает, превращаясь в камневидное тело.

При затворении цемента водой возникают силы, обеспечивающие формирование коагуляционной структуры цементного геля, который обладает реологическими свойствами, способностью к тиксотропным превращениям, уплотнению и упрочнению по мере возникновения ионных связей в моменты, соответствующие образованию центров кристаллизации. Областями максимальной вероятности образования новой фазы будут сольватные слои.

Адсорбционная способность цемента, предопределяющая свойства коагуляционной структуры, резко меняется в зависимости от физической активности силового поля, давления, температуры и др. Адсорбционная способность цемента в цементном геле усиливается различными силовыми

полями и способствует взаимодействию дипольных молекул воды с силами притяжения, сосредоточенными на поверхности твердой фазы.

Упрочнение коагуляционной структуры цементного геля сопровождается перераспределением и частичным связыванием воды - сближением частиц твердой фазы, то есть контракцией объема системы "цемент + вода". В результате этого возникает объемное сжатие цементного геля с выделением жидкой фазы, чему особенно должно способствовать силовое поле. Отражением этих физико-химических процессов формирования коагуляционной структуры цементного геля является сокращение сроков схватывания вяжущего, поскольку происходит трансформация его из пластично-вязкого состояния в твердое.

Конец схватывания по своему физическому смыслу близок к моменту времени, при котором наступает индукционный период формирования кристаллогидратной структуры.

Дальнейшее упрочнение коагуляционной структуры обуславливается возникновением и развитием кристаллизационного процесса, при котором преобладают ион-дипольные и ион-ионные связи, способствующие потере цементным гелем пластических свойств [192].

Хотя механизм образования гидратов при твердении, например портландцемента, еще недостаточно ясен, можно заключить следующее. Проникновение молекул воды в частицу вяжущего при топохимической реакции гидратации может происходить путем поверхностной диффузии по дефектам (поверхностная гидратация) или путем объемной диффузии воды. Равновероятным является и растворный механизм [198].

В основе формирования кристаллогидратной структуры цементного камня лежат обменные процессы электронно-ионного характера между продуктами диссоциации минералов цемента и дипольными молекулами воды.

Продукты взаимодействия цемента и воды превращаются из молекул и ионов с размерами частиц $r < 10 \text{ \AA}$ в частицы коллоидных размеров ($r=10...1000\text{\AA}$) и хорошо оформленные кристаллообразования ($r > 1000 \text{ \AA}$) [125].

Процесс гидратации можно разделить на основные стадии [202]. В первой - на зернах вяжущего имеются незначительные оболочки коллоидной дисперсности, достаточно рыхлые и неустойчивые. Вторая стадия охватывает дальнейшую гидратацию цемента и характеризуется образованием плотных, устойчивых оболочек на зернах цемента и малыми скоростями диффузии воды и обратной диффузии гидратированных ионов в раствор. Диффузионные явления при этом протекают как в области внешней массообработки в жидкой фазе за пределами зерен исходных компонентов, окруженных оболочками тонкодисперсных новообразований, так и в области внутренней массообработки, то есть через аморфизированные оболочки цементных частиц.

Микроскопическая скорость гетерогенного процесса гидратации может быть выражена полуэмпирическим уравнением

$$\frac{dc}{d\tau} = -K \cdot C \quad (2.1)$$

Где τ - время;

C – содержание негидратированного цемента;

K – параметр, характеризующий минералогию исходно вещества.

Эти гидраты, возникающие в виде пленки на частицах цемента, имеют в своей структуре полярные группы и обладают высокой удельной поверхностью, что позволяет им связывать определенное количество воды, превращая ее в пленочную. При ограничении количества воды затворения быстро создаются условия для образования контактов между частицами для

дальнейшего их взаимодействия, в основном, с силами электростатической и электромагнитной природы,

В работах [128,129] механизм гидратации портландцемента представляется следующим образом. Вначале создается раствор, пересыщенный ионами Ca^{++} , затем на поверхности твердых частиц цемента образуются полупроницаемые оболочки. Потом образуются кристаллогидраты под этой оболочкой и на определенной стадии они разрушают первичную оболочку, и это означает начало основного периода гидратации. Образование кристаллогидратных оболочек вокруг частиц цемента определяет специфику структуры цементного камня.

Согласно [205], структурообразование в цементном геле происходит в две стадии. На первой - происходит образование первичной структуры (ГСА-каркас) за счет кристаллизационных контактов, а на второй - вторичной гидросиликатной структуры. В работе [206] высказано мнение, что первичная структура основана, главным образом, на межагрегатных контактах электростатической и электромагнитной природы, аналогично [202], а вторичная - на контактах валентной природы в местах перекрытия гелевых оболочек.

Согласно современной теории твердения портландцемента [206,186,188,189] процесс гидратации обусловлен растворением клинкерных минералов цемента в определенном объеме воды - растворителя, а затем выкристаллизовыванием из пересыщенных растворов термодинамически устойчивых соединений. Следовательно, при растворении необходим повышенный объем воды, а при кристаллизации - всемерное снижение ее количества. Вначале процесса гидратации рост кристаллов гидрата вяжущего вещества протекает при высокой степени пересыщения раствора в кинетической области.

С уменьшением плотности и вязкости воды и при росте внутреннего давления в системе "вяжущее + вода" возрастает растворяющая способность воды и ускоряются процессы, способствующие превращению цементного геля в твердое тело. Согласно уравнению Фольмера [216] должна возрасти растворимость клинкерных минералов L и образование зародышей новой фазы по зависимости:

$$L = A \exp \left(\frac{-B \cdot \delta^3 \cdot V_k^2}{(RT)^3 \cdot \ln^2(C/C_0)} \right) \quad (2.2)$$

где δ - удельная межфазовая энергия;

V_k - молекулярный объем новой фазы, равный относительной молекулярной массе M , отнесенный к ее плотности;

T - абсолютная температура;

C/C_0 - степень пересыщения;

A - преаэкспоненциальный множитель;

B - постоянный гипсовый коэффициент.

Возникновение твердой фазы из пересыщенного раствора на поверхности подложки более вероятно, чем в объеме раствора.

Вероятность их возникновения определяется формулой, согласно [208].

$$W_{jI} = W_{0ji} \exp \left(-\frac{A_{ji}}{kT} \right) \quad (2.3)$$

где T – абсолютная температура;

A_{ji} – работа образования твердой фазы на подложке.

Работу образования твердой фазы (j) на подложке (i) можно найти из формулы:

$$A_{ij} = \frac{2(\varphi_j/kT)^3}{(\mu - \mu_j)^2} H_{ji} \quad (2.4)$$

где φ_j - энергия связи между молекулами новообразования фазы (j) ;

μ и μ_j - химические потенциалы раствора и фазы (j);

H_{ji} - коэффициент физико-химической неоднородности.

$$H_{ji} = \frac{\delta_j - \delta_i + \delta_{ji}}{\delta_j} \quad (2.5)$$

где δ_j , δ_i , δ_{ji} - соответственно свободная поверхностная энергия новообразования (j), подложки (i) и значение межфазовой энергии, локализованной в местах возникновения фазы (j), на поверхности фазы (i).

Аналогичная формула приведена и в [188]. Согласно ей, вероятность возникновения зародышей новой фазы зависит от высоты энергетического барьера ΔF_{max} и описывается формулой:

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{\Delta F_{max}}{RT}\right) \quad (2.6)$$

где A - предэкспоненциальный множитель, учитывающий энергию активации процесса U :

$$A = A' \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \quad (2.7)$$

Анализ этой формулы показывает, что скоростью образования зародышей можно управлять путем изменения внутреннего давления, температуры пересыщения и изменением относительного соотношения (Ц/В), которые можно регулировать различными технологическими приемами.

С уменьшением степени пересыщения раствора рост кристаллов в результате возникновения двумерных зародышей становится энергетически невыгодным, и вступает в силу дислокационный механизм, предложенный Бартоном, Кабрерой и Франком [209,210]. Согласно ему поверхность реального кристалла содержит ступеньки, уступы, свободные вакансии. Рост

кристалла будет являться результатом обменных процессов между молекулами ступени, адсорбированного слоя и пара, а также диффузии адсорбированных молекул в направлении ступеней. Очевидно, зародышем кристалла может быть как мельчайшая частица кристаллизующегося вещества, так и любая другая твердая частица, обладающая свойствами адсорбировать на своей поверхности ионы или молекулы кристаллизующейся соли [129].

Возникновение и развитие центров кристаллизации связано с различными силовыми полями и с концентрацией раствора. Образование зародышей и их рост в последующем есть две последовательные ступени процесса формирования новой фазы.

Кристаллизационная теория не рассматривает природу сил, которые позволяли бы сблизиться кристаллам для их дальнейшего срастания. До сих пор природа сил, приводящих к макрокристаллизации, не рассматривалась в схемах твердения. Здесь определенную роль играют водородные связи, Ван-дер-Ваальсово взаимодействие, ионные взаимодействия различных видов, обусловленные наличием некомпенсированных электрических зарядов [77].

Проблема разработки модели кристаллизации и твердения, учитывающая целый ряд физико-химических явлений, связанных модификацией структуры бетона, весьма актуальна.

Силы взаимодействия между коллоидными частицами, проявляющиеся при уточнении разделяющих их пленок жидкости, могут как ускорять коагуляцию, так и тормозить ее.

Силы притяжения [220] между двумя соседними молекулами (атомами) изменяются в зависимости от расстояния по закону:

$$F_{\text{прит}} = - \frac{A}{r^7} \quad (2.8)$$

Где A - константа, а сила отталкивания определяется как

$$F_{\text{отт}} = \frac{-B}{r^m} \quad (2.9)$$

где $m \geq 9$; B - константа.

Результирующая сил притяжения и отталкивания равна

$$F_{\text{реа}} = -A/r^7 + B/r^m \quad (2.10)$$

Электромагнитная природа сил взаимодействия была предсказана еще Лебедевым, а Лифшиц [212] разработал теорию этих сил, согласно которой взаимодействие между молекулами осуществляется за счет существования флуктуирующего в пространстве и времени электромагнитного поля.

Силы притяжения между частицами той же природы, что и межмолекулярные силы. От этих сил зависит адсорбция воды частицами минералов цемента, при этом на поверхности твердой фазы появляется двойной электрический слой Гельмгольца, за ним диффузный слой Штерна, толщина которого зависит от физико-химических свойств среды.

Силы отталкивания - электрические силы, возникают в результате избирательной адсорбции межфазной поверхностью одного из ионов электролита, присутствующего в системе. Поскольку все частицы дисперсной фазы одинаковы по своей природе и адсорбируют всегда определенный ион, все они приобретают заряд одинакового знака и это препятствует сближению их на расстояние действия контракционных сил (сил сцепления). Согласно нашим представлениям и работам А.Е. Шейкина [213], все частицы цемента в воде имеют одинаковый заряд. С другой стороны сближению частиц коллоидных размеров препятствует образование на их поверхности сольватной оболочки из молекул среды или молекул иного

компонента системы. С физической точки зрения конденсированные твердые системы образуются при создании условий для сближения частиц до радиуса действия, обеспечивающего структуру твердения. Важную роль при этом играет также структурообразование воды, что влечет уменьшение диэлектрической проницаемости ее и вызывает ориентацию воды у поверхности. Данные по механизму адсорбции воды на поверхности гидратов нами не найдены.

В образовании структуры твердения играют роль и адгезионные контакты электрической природы. По электрической теории адгезии сила, необходимая для разрушения адгезионного соединения, равна:

$$F = 2\pi \cdot \delta / \varepsilon \quad (2.11)$$

Где δ - поверхностная плотность заряда;

ε - диэлектрическая проницаемость среды.

К моменту структурообразования частицы цемента (дисперсная фаза) превращаются в трехслойные, где ядро (внутренний слой) - зерно цемента, средний аморфизированный слой - пленка гидрата, и внешний - пленка структурированной воды.

В процессе превращения цементного теста в твердое тело кинетика кристаллизации новообразований, размеры кристаллов и прочность контактов срастания зависят от состава жидкой фазы и значения ее относительно новых гидратных фаз, что в конце концов обеспечивает структурную прочность. Любые воздействия, способствующие росту и соединению кристаллогидратов благоприятствуют образованию высокопрочной камневидной структуры.

В результате процессов коллоидации, кристаллизации, уплотнения гидратных новообразований и карбонизации образуется прочный цементный камень [214]. Основным условием, обеспечивающим затвердение дисперсных систем будет следующее: вяжущие свойства в таких системах

проявляются в том случае, если новообразования содержат полярные группы и среда также полярна, и созданы оптимальные условия структурообразования. Поверхность кристаллов покрыта подвижным адсорбционным слоем. Внутреннее давление способствует сближению до расстояний, при которых появляются возможности возникновения устойчивых зародышей между ними и появления молекулярных связей между подвижными молекулами из противоположных адсорбционных слоев, это создает кристаллические мостики между отдельными кристалликами. В итоге образуется кристаллическая камневидная структура.

Структура цементного камня может трактоваться как "микробетон" в котором заполнителями служат негидратированные остатки цементных частиц - ядра, а вяжущим веществом являются оболочки новообразований [129]. Упрочнение цементного камня сопровождается изменением его плотности и пористости. Кинетику упрочнения цементного камня можно представить в виде непрерывного процесса роста количества субмикрочастиц и их сближения при одновременном утончении жидкой прослойки между ними и возрастании сил ионных связей.

И.Н. Ахвердов [129] предлагает следующую взаимосвязь между фазами структурообразования цементного камня.

1	3	4
гель ↓ 2 ↓ → ЗОЛЬ	схватывание и зарождение кристаллогидратов, → индукционный период	формирование и упрочнение кристаллогидратной структуры

где 1-2-3 - коагуляционное структурообразование цементного геля;

3-4 - коагуляционно-кристаллизационное структурообразование цементного камня.

Структура цементного камня занимает промежуточное положение между системами со слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами и телами с мощными межкристаллитными связями. Очевидно, прочность и другие свойства "клинкерного" камня объясняются ион-ионными взаимодействиями между кристаллогидратными образованиями.

Анализ структурообразования приводит к выводу о возможности целенаправленного управления этим процессом с помощью простых технологических приемов. Сюда, прежде всего, следует отнести:

- а) регулирование количественного соотношения или концентрации вяжущего в единице объема водной среды;
- б) изменение и развитие силового поля (давления) в процессе образования гидратных новообразований;
- в) снижение объемного водосодержания системы "цемент + вода" в процессе формирования изделия (модификация материала).

Одновременное выполнение этих условий представляет значительные технологические трудности, однако в принципе вполне осуществимо. Особенно это относится к развитию структурообразования цементного камня непосредственно в бетоне.

3. Основы физической модификации бетонной смеси и бетона в процессе ударно-перистальтического гиперуплотнения

3.1. Общие положения

Многочисленными исследованиями установлено, что физико-механические свойства бетона, кроме активности цемента, вида

заполнителей и др. определяются величиной В/Ц бетонной смеси [129,215-227]. Зависимость прочности и водонепроницаемости бетона от В/Ц вытекает из физической сущности формирования структуры бетона. Изучение процесса гидратации цемента показало, что цемент, в зависимости от качества и срока твердения, связывает всего 15...25% воды от своей массы [228-231]. В течение первого месяца связывается не менее 20% воды от массы цемента. Вместе с тем, для придания бетонной смеси пластичности, улучшения условий гидратации вяжущего, вводится значительно большее количество воды, так как при $(В/Ц)_{нач} = 0,20$ бетонная смесь остается практически сухой и ее невозможно качественно уложить, отформовать и уплотнить. Избыточная вода, не вступая в химические реакции с цементом, остается в бетоне в виде водяных пор и капилляров или испаряется, оставляя воздушные поры. Несомненно это является основной причиной снижения прочности и водонепроницаемости бетона.

Для образования смеси заданной удобоукладываемости и оптимальных условий гидратации вяжущего необходимо применение бетонных смесей с повышенным влажосодержанием. Используя положения работы [232] можно заключить, что образование оптимальной бетонной смеси возможно на основе применения цементного теста разжиженного водой, относительно теста нормальной густоты.

Величина разжижения Z определяется из зависимости:

=

1

$\frac{В/Ц}{(В/Ц)_{нач}}$ – водоцементный фактор цементного теста нормальной густоты;

$(В/Ц)_{нач}$ – начальное водоцементное отношение данного цементного теста или бетонной смеси.

В этом случае создаются благоприятные условия гидратации вяжущего, оптимизируется структурообразование и, в частности снижается объем воздушных пор.

Однако, для оптимизации свойств бетона, получения предельной прочности необходимо удалить избыточную воду затворения. Физико-механические показатели бетона при этом будут находиться в прямой зависимости от количества остаточной воды затворения [233,129]. Если бетонная смесь будет уплотняться за счет отжатия определенного количества свободной воды, то прочность бетона будет находиться в обратной функциональной зависимости от остаточного В/Ц, так как именно оно определяет пористость цементного камня и бетона. Поэтому, с целью получения бетона предельно высокой прочности и плотности, предварительно уложенная смесь должна дополнительно уплотняться в условиях максимального обезвоживания бетона.

Для предварительного выявления факторов, влияющих на обезвоживание, рассмотрим процесс уплотнения бетонной смеси, уложенной в форму, представляющую цилиндр со сплошной стенкой. Предположим, что смесь подвергается сжатию нормальным давлением, приложенным к поршню. Если объем цементного раствора ($V_{ц.р.}$), имеющегося в бетонной смеси, окажется меньше объема пор ($V_{пор}$) между зернами крупного заполнителя, то нормальное давление будет воспринято только крупным заполнителем, а цементный раствор не воспримет в этом случае никакого давления. Влияние виброударно-перистальтического прессования в этих случаях, вероятно, будет отрицательным, так как под действием нормальной силы возможны случаи раздробления отдельных зерен крупной фракции, который приводит к снижению прочности бетона.

Е

с

л

и

виброударно-перистальтического прессования будет иметь неустойчивый характер.

Если $V_{ц.р.}$ будет на определенную величину больше $V_{пор}$, то нормальное давление будет воспринято только цементным раствором, и эффект виброударно-перистальтического прессования будет зависеть от способности цементно-песчаного раствора деформироваться. Раствор будет деформироваться, если количество цементного теста будет больше объема пор мелкого заполнителя. В этих условиях вся нагрузка должна быть воспринята цементным тестом. При избыточном количестве воды в цементном тесте вся нагрузка будет воспринята водой.

Таким образом, для повышения эффективности уплотнения виброударно-перистальтическим прессованием необходимо, чтобы цементное тесто являлось средой, в которой располагались бы зерна крупного и мелкого заполнителей.

При полной герметичности формы смесь уплотняется только за счет некоторого уменьшения объема вовлеченного воздуха, т. е. эффект виброударно-перистальтического прессования будет незначительным. Этот эффект будет увеличиваться с увеличением водопроницаемой способности стенок формы, т.к. при наличии фильтрационных отверстий свободная вода под действием разности напора внутри формы и за его пределами начнет перемещаться в сторону фильтрационных отверстий.

Итак, в процессе удаления избыточной воды и вовлеченного воздуха частицы цемента начнут сближаться между собой, что, в свою очередь, приведет к сближению зерен крупного и мелкого заполнителей. Нормальное давление, передающееся на воду и вызывающее ее удаление, будет способствовать сближению частиц до тех пор, пока внешнее давление полностью воспримется дисперсной фазой.

Продолжительность виброударно-перистальтического прессования бетонной смеси до требуемой плотности, при переменной величине нормального давления, вероятно, будет зависеть от количества и водопроницаемой способности фильтрационных отверстий, с увеличением которых продолжительность уплотнения смеси будет снижаться [234].

Вышеизложенные доводы позволяют предположить, что наиболее эффективное уплотнение бетонной смеси виброударно-перистальтическим прессованием будет достигнуто при следующих условиях:

а) абсолютный объем раствора в бетонной смеси должен превышать объем пор межзернового пространства крупного заполнителя в среднем на 20...30% [218]. Это будет способствовать устранению образования несжимаемого жесткого крупнозернистого скелета;

б) объем цементного теста в бетонной смеси должен превышать объем пор межзернового пространства мелкого заполнителя на 30...40%, что исключает передачу нагрузки от одних зерен песка непосредственно на другие;

в) фильтрационная способность стенок Форм, внутри которых бетонная смесь уплотняется виброударно-перистальтическим прессованием, должна отвечать требованиям максимального обезвоживания за сравнительно короткий срок уплотнения.

В соответствии с изложенным, эффективность уплотнения бетонной смеси виброударно-перистальтическим прессованием зависит от ее состава, от фильтрационной способности стенок форм, внутри которых осуществляется уплотнение, а также уровня и режима гиперуплотнения.

В результате анализа современных технологий установлено, что физическая модификация возможна путем удаления излишка воды затворения, добавляемой в бетонную смесь для придания ей необходимой текучести и удобоукладываемости.

Как показано выше, удаление свободной воды в процессе уплотнения смеси увеличивает использование потенциальных свойств цемента для повышения

плотности, водонепроницаемости и прочности бетона. В настоящее время в технологии сложных элементов известно несколько способов обезвоживания бетонной смеси: центрифугирование, прессование, вакуумирование, вибропрессование и др. Одним из наиболее эффективных следует считать способ виброударно-перистальтического прессования, так как при этом могут быть созданы необходимые условия для максимального обезвоживания бетонной смеси.

Исходя из изложенного можно предположить, что высокопрочный бетон, применяемый, в частности, для изготовления малонапорных и безнапорных труб может быть получен за счет уплотнения смеси виброударным прессованием с интенсивным обезвоживанием.

В производстве труб выдавливание свободной воды затворения из бетонной смеси осуществлялось через перфорированную поверхность наружной формы, покрытую специальной фильтровальной тканью [235,236],

Основной недостаток использования таких фильтров - высокий расход ручного труда. Поэтому задача настоящих исследований состоит в изыскании таких фильтров, которые бы имели простую, легкодоступную в производственных условиях конструкцию, и отжимали из бетонной смеси свободную воду за сравнительно небольшой отрезок времени. Для этой цели нами были исследованы сквозные конические отверстия, устроенные на поверхностях используемых форм сравнения их работоспособности, т.е. максимально пропускать свободную воду при низкой потере цементного теста. Геометрия, плотность и форма отверстий требуют специального исследования.

Процесс отжима жидкой и газообразной фазы из формуемого материала является основным процессом структурообразования и модификации свойств бетона. Причиной удаления жидкости и газа из бетона является перепад давления по толщине стенки формуемой трубы по направлению к перфорированной поверхности опалубочной формы. Удаление жидкой и газообразной сред бетонной

смеси является процессом эксфильтрации, т.е. удаления жидких и газообразных флюидов из материала в окружающую среду [237].

Основную роль в формировании особоплотной структуры бетона играет процесс обезвоживания бетона. Отжим излишней воды затворения из бетонной смеси под действием приложенного нормального давления является фильтрационным процессом [129,238,239]. Большую роль в нем играют разность химических потенциалов взаимодействующих фаз и различные градиенты, возникающие в системе в зависимости от вида источника энергии, под влиянием которой перемещается свободная вода. Перемещение свободной воды под действием градиента влажности происходит в сторону менее увлажненных пор до полного выравнивания влажности.

Следовательно, для удаления свободной воды затворения из бетонной смеси под действием давления необходимо совершить работу (расход энергии) на преодоление сил связи воды с частицами цемента и на перемещение ее в системе. Естественно, что основная задача исследования переноса излишней воды затворения из бетонной смеси заключается в определении зависимости параметров виброударно-перистальтического воздействия и скорости фильтрации от различных технологических параметров и величины нормального давления.

Из гидродинамики жидкости известно, что в движущемся потоке падение давления прямо пропорционально его скорости. Очевидно, что при фильтрации излишней воды затворения из бетонной смеси, в ней давление также должно снижаться под действием внешней нормальной нагрузки, и надо полагать, что при движении излишней воды в пространстве между сольватированными частицами цемента в пограничных диффузных слоях будет создаваться разность давлений.

Молекулы воды в диффузных слоях испытывают действие сил, направленных к поверхности твердой фазы, которые убывают с увеличением расстояния от поверхности частиц. При определенной скорости фильтрации в

потоке может возникнуть отрицательное давление такой величины, когда равнодействующая сил, одна из которых притягивает молекулы воды к твердой поверхности, а другая втягивает ее в движущую струю, окажется направленной от твердой поверхности. В этом случае ориентированные молекулы воды в диффузном слое выйдут из сферы влияния сил притяжения и будут вовлечены в движущийся поток.

При восприятии внешней сжимаемой нагрузки системой нейтральных давлений в воде, заполняющей поры бетонной смеси, возникает гидростатическое давление, которое сразу же передается на прилегающие зерна заполнителя и по мере сжатия смеси у стенки конусного сердечника распространяется на следующие слои смеси. В связи с этим гидростатическое давление в смеси уменьшается на величину соответственно той части полного давления, которое испытывают зерна заполнителя, расположенные на определенной глубине от поверхности конусной части вибросердечника.

При виброударном действии перистальтических волн на бетонную смесь в ней возбуждаются собственные колебания зерен заполнителей, которые, в свою очередь, приводят к определенному разжижению цементного теста и перераспределению в нем жидкости. В вязкопластичном цементном тесте смеси возникает турбулентный гидродинамический процесс, который под влиянием перистальтического волнового давления сопровождается отжатием воды из ближе расположенных к сердечнику слоев смеси, что приводит к уплотнению бетона. В этих случаях образуются направленные к наружной форме фильтрационные каналы, по которым под действием перистальтического прессования фильтруется излишняя вода. Наружная форма, в свою очередь, имеет многочисленные специально устроенные фильтрующие конусные отверстия [16]. Весь процесс начального виброуплотнения, отжим воды и водовоздушной фазы, а также последующего гиперуплотнения бетона можно представить как комплексный

трехступенчатый процесс. Этот процесс носит сложный характер и состоит из трех различных по механизму действия стадий:

Стадия переукладки составляющих (первая стадия уплотнения) . Она заключается в разрушении и перестройке под влиянием вибрирования неустойчивой структуры скелета заполнителей бетонной смеси. Образующие ее зерна в момент разрушения структуры под влиянием собственной массы стремятся занять наиболее низкое положение, меняют взаимную ориентацию и образуют новую устойчивую структуру. В ней зерна заполнителей размещены уже не случайно, а наиболее выгодно по условию получения минимума объема скелета. Одновременно с перестройкой скелета удаляется основная масса воздуха, в основном, через фильтрационные отверстия перфорированной формы. После окончания первой стадии воздуха остается не более 3...4% от общего объема бетонной смеси,

Рассматривая особенности поведения бетонной смеси на первой стадии виброуплотнения, можно заметить, что переукладка составляющих интенсивно протекает лишь при отсутствии значительных статических нагрузок на смесь. Это создает условия оптимальной переукладки составляющих бетонной смеси. Как показывают опыты, время, необходимое для завершения первой стадии уплотнения в активных ("виброкипящих") слоях бетонной смеси, относительно невелика и даже для жестких смесей не превышает 20...30 с.

Стадия сближения составляющих (вторая стадия уплотнения). Она начинается тогда, когда перестройка структуры бетонной смеси закончилась и после этого изменения в ней порядка расположения зерен заполнителей обычными средствами практически неосуществимо. В проведенных опытах сближения, раздвижки относительные сдвиги частиц заполнителей происходят в результате перераспределения по объему растворной составляющей и цементного теста из-за удаления остаточной части воздуха, а также избыточной воды затворения через фильтрационные отверстия перфорированной наружной формы. В отличие от

первой, вторая стадия уплотнения интенсивно протекает в предельно стесненных условиях, под действием приложенного комбинированного виброударно-перистальтических воздействий.

Для завершения второй стадии необходимо более длительное время, чем для первой. Продолжительность этой стадии зависит от жесткости бетонной смеси, толщины стенки бетонируемой конструкции, режима виброударно-перистальтического прессования, фильтрационной способности формы и начального значения В/Ц. Например, при изготовлении неармированных бетонных труб (диаметром 1000 мм, длиной 1500 мм и толщиной стенки 150 мм) из умеренно жестких смесей стадия сближения составляющих продолжалась 3...5 мин., т.е. почти на два порядка больше первой стадии. Завершение второй стадии четко определяется окончанием значительных деформаций бетонной смеси, после чего структура свежего бетона может считаться сложившейся. Дальнейшее вибрирование практически не повышает плотности и прочности бетона, а также не улучшает качество его поверхности.

Стадия комплексного уплотнения бетонной смеси (третья стадия уплотнения). Опыты показывают, что после окончания второй стадии уплотнения еще можно достигнуть некоторого дополнительного (компрессионного) обжатия путем сочетания интенсивного перистальтического давления со сдвиговым возвратно-поступательным перемещением наружной перфорированной формы относительно вибросердечника. Так как эта мера осуществляется без прекращения виброударного воздействия, то полезный эффект в виде повышения прочности и плотности бетона достигается за сравнительно короткое время (до 1...3 мин.). Рассматриваемый эффект достигается в результате отжатия остаточной части избыточной воды затворения с растворенным в ней воздухом, а также гиперуплотнения контактов между зернами заполнителей.

Из изложенного видно, что процесс уплотнения бетонной смеси на разных стадиях подчиняется различным закономерностям. На первой стадии бетонная

смесь ведет себя как вязко-сыпучая среда, подвергаемая вибрационным перемещениям. На второй стадии, сопротивляясь сплочению составляющих и отжиму водовоздушной фазы, смесь реагирует на внешнее уплотняющее воздействие, как вязко-упруго-пластичное тело, характеризуемое определенным модулем деформации. На третьей стадии решающее значение приобретает оптимальное сочетание фильтрационных свойств бетонной смеси и перфорированной формы. В этом случае свежесформованная смесь деформируется по законам динамики многокомпонентных сред.

Следует обратить внимание на качественное различие виброуплотнения бетонной смеси и гиперуплотнения бетона в рассматриваемом случае. Обычное одностадийное уплотнение заменяется высокоинтенсивным трехстадийным гиперуплотнением, в результате которого коэффициент уплотнения K_u приближается к теоретически возможному значению, равному единице. Трехстадийное гиперуплотнение будет особенно эффективным при получении бетонной смеси оптимальной вибровязкости, упругости и способности поглощать энергию в процессе виброударных колебаний. Этот важный вывод определяет необходимость разработки надежного метода назначения составов бетона, отвечающих заданным условиям. При этом, используя исследования О.А. Савинова и Е.В. Лавриновича [240] бетонную смесь можно представить как вязкую жидкость с постоянным коэффициентом вязкости.

Кроме определения оптимального состава бетона необходимо определить также физико-механические свойства бетонной смеси и бетона. Наиболее просто определяется интегральная характеристика деформативности бетона или эффективный модуль деформации бетонной смеси. Для этого рассмотрим описанную выше первую стадию уплотнения бетонной смеси.

Рассмотрим осевую деформацию столба бетонной смеси, содержащей пузырьки воздуха и находящейся в первой стадии уплотнения (рис. 1). Будем исходить из условия, что при заполнении формы бетонной смесью вовлекается (на

единицу высоты) объем воздуха V_0 . Указанному выше характеру распределения пор в изделии это условие не противоречит. В таком случае на первой стадии уплотнения смеси содержание воздуха изменяется по высоте, и на некотором расстоянии x от поверхности составит :

$$Vx=1(1+\rho \cdot x P_{атм}) \quad (3.2)$$

где $P_{атм}$ - атмосферное давление; ρ - плотность смеси.

Вспомогательный график для определения эффективного модуля упругости E_3 ,

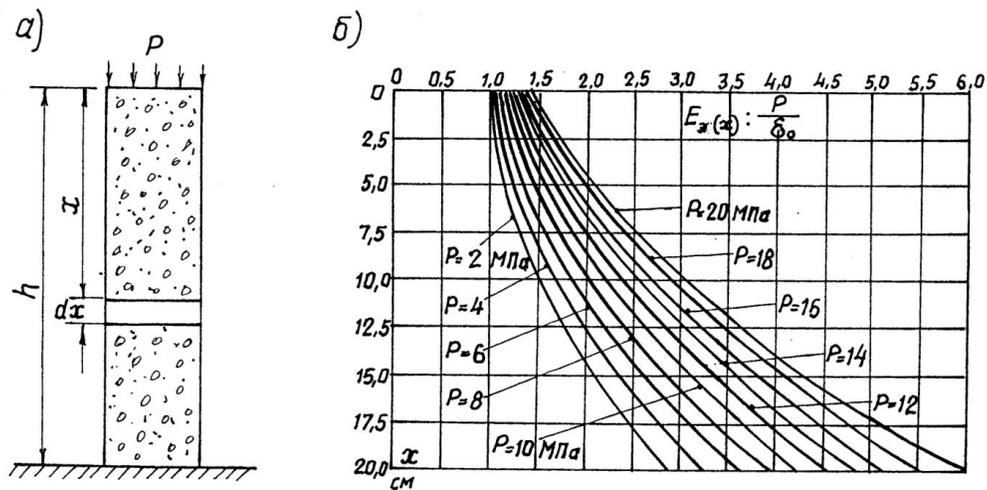


Рис. 3.1.

а) - исходная расчетная схема; б) - кривые зависимости $E_3(x) : P/\epsilon_0$ от x .

Приложив к поверхности столба бетонной смеси некоторое дополнительное давление P , тогда, на основании физического закона Бойля-Мариотта, принимаем:

$$\begin{aligned} (\rho \cdot x + P_{атм}) \cdot V_0 / (1 + \rho \cdot x / P_{атм}) = \\ (\rho \cdot x + P_{атм} + P) \cdot V_0 \cdot 1 / (1 + \rho \cdot x / P_{атм} - V) \end{aligned} \quad (3.3)$$

где V - величина, на которую уменьшается объем воздушных включений при приложении давления P .

Из (3) нетрудно получить зависимость между P и V :

$$V = \frac{P \cdot V_0}{(\rho \cdot x + P_{\text{атм}} + P)} \frac{1}{(1 + \rho \cdot x / P_{\text{атм}})} \quad (3.4)$$

При $P \ll \rho \cdot x + P_{\text{атм}}$ выражение (4) можно заменить приближенной зависимостью:

$$V \sim P \cdot V_0 / P_{\text{атм}} \cdot 1 / (1 + \rho \cdot x / P_{\text{атм}})^2 \quad (3.5)$$

Таким образом, при загрузке столба бетонной смеси, находящейся в условиях одномерной деформации, например, уложенной в форму постоянного сечения, и равномерно распределенной осевой нагрузке можно рассматривать смесь как квазиупругое тело с некоторым эффективным модулем нормальной упругости $E_{\text{э}(x)}$. Сравнивая (5) с известной формулой для определения изменения упругого стержня под влиянием осевой нагрузки (т.е. закон Гука $E = \delta / \varepsilon$), получим формулу для определения эффективного модуля упругости $E_{\text{э}(x)}$ бетонной смеси на расстоянии x от верха столба:

$$E_{\text{э}(x)} = \frac{P_{\text{атм}}(1 + \rho \cdot x)^2}{\varepsilon_0}, \quad (3.6)$$

Г

Д

Е

$\varepsilon_0 = V_0 / V_c$ - отношение начального объема воздуха, вовлеченного при укладке бетонной смеси, к полному объему V_c вибрируемого изделия.

е

з

$$V = \frac{1}{h} \int_0^h E_{\text{э}}(x) \cdot dx = \frac{P_{\text{атм}}}{h \cdot \varepsilon_0} \cdot \int_0^h (1 + \rho \cdot x/H_{\text{атм}})^2 dx = v \cdot \frac{P_{\text{атм}}}{\varepsilon_0} \quad (3.7)$$

где

$$v = 1 + \rho \cdot h/P_{\text{атм}} + 1/3 (\rho \cdot h/P_{\text{атм}})^2 \quad (3.8)$$

Для вычисления коэффициента v можно использовать выражение

$$v_p = (1 + \rho/P_{\text{атм}})^2 + (1 + P/P_{\text{атм}}) \cdot \rho \cdot h/P_{\text{атм}} + 1/3 (\rho \cdot h/P_{\text{атм}})^2 \quad (3.9)$$

График определения коэффициента v , входящего в выражение (3.7) представлен на рис. 3.2.

В таблице 1 приведены опытные данные деформативности различных типов бетонной смеси и величина эффективного модуля нормальной упругости E_3^* . Из приведенных данных видна тенденция к росту модуля упругости с увеличением крупности заполнителя, что объясняется различной способностью смесей вовлекать и удерживать воздух.

График для определения коэффициента v

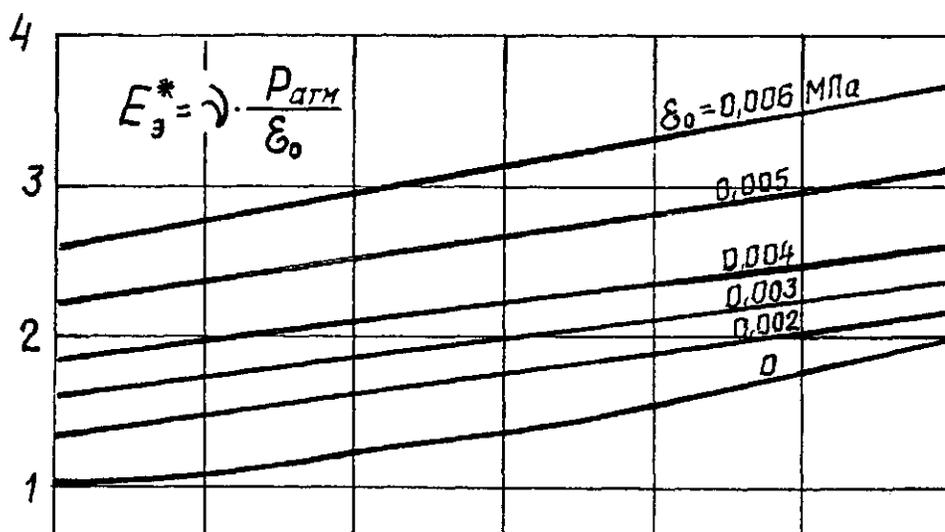


Рис. 3.2.

Таблица 3.1

Опытные данные определения модуля $E_э^*$ для реальных бетонных смесей.

Тип смеси	Характеристика смеси	$E_э^*$ МПа	ϵ_0	ϵ_k
I	Мелкозернистые бетоны	1...2	0,12...0,09	-
II	Мелкозернистые бетоны ($d_{max} = 10$ мм)	2...4	0,11...0,08	-
III	Тяжелые бетоны ($d_{max} = 20$ мм)	3...6	0,10...0,06	-
IV	Гиперуплотненные бетоны ($d_{max} = 10$ мм)	3...6	0,09...0,06	0,03...0,05
V	Гиперуплотненные бетоны ($d_{max} = 20$ мм)	4...7	0,04...0,03	0,02...0,04

Для гиперуплотненных смесей большое значение имеет также способность бетонной смеси поглощать энергию при виброударно-перистальтических воздействиях. Раскрытие этой закономерности позволяет прогнозировать технологические параметры уплотнения. Однако, в настоящее время эта способность изучена недостаточно, что обуславливается сложностью механизма деформирования рассматриваемой среды, сопровождающегося внутренним

трением зерен заполнителя, течением цементного теста и потерями энергии в результате объемных деформаций воздушных включений.

Анализируя данные различных экспериментальных исследований определения напряжений уплотнения можно пользоваться упруго-вязкой моделью бетона:

=

E
где K_0 - коэффициент вязкого сопротивления, определяемый опытным путем.
 ε

Для гиперуплотненного бетона упругая часть напряжений ($E_3^* \cdot \varepsilon$) значительно превосходит вязко-пластичную компоненту напряжений. По окончании уплотнения гиперуплотненный модифицированный бетон ведет себя как твердое тело.

d

ε

3.2. Модификация бетонной смеси в процессе прессования

По данным А.В. Саталкина [114] американцы еще в начале века указывали на необходимость удаления излишков воды после того как бетонная смесь уложена в форму. И.Н. Ахвердов [125] указывает, что в процессе сжатия цементного теста с $(В/Ц)_{нач} = 1,65 \cdot [В/Ц]$ частицы цемента, вытесняя воду, сближаются, и при относительно малом давлении $P = P_0 = 0,065$ МПа их сольватные оболочки могут соприкоснуться*. При больших значениях ($P > 0,065$ МПа) происходит отжатие, в основном, диффузного слоя воды и вытеснение ее может продолжаться до тех пор, пока в системе цемент-вода не останется одна лишь адсорбционная вода (в этом случае система будет состоять из связанных гранул). Потенциальная энергия, расходуемая на обжатие диффузных прослоек воды, может быть оценена из всеобщего закона сохранения энергии.

В процессе уплотнения бетона преодолевается потенциальная энергия взаимодействия поверхностных слоев воды и твердой фазы. Сближение частиц твердой фазы будет происходить при значительных затратах энергии, которая необходима для преодоления расклинивающего давления. При сближении частиц надо затратить энергию, которая будет расходоваться на уменьшение толщины поверхностного слоя (работа дисорбции), что приводит к появлению значительных сил отталкивания между частицами.

В результате анализа современных технологий установлено, что физическая модификация возможна путем удаления излишка воды затворения, добавляемой в бетонную смесь для придания ей необходимой текучести и удобоукладываемости.

Как показано выше, удаление свободной воды в процессе уплотнения смеси увеличивает использование потенциальных свойств цемента для повышения плотности, водонепроницаемости и прочности бетона. В настоящее время в технологии сложных элементов известно несколько способов обезвоживания бетонной смеси: центрифугирование, прессование, вакуумирование, вибропрессование и др. Одним из наиболее эффективных следует считать способ виброударно-перистальтического прессования, так как при этом могут быть созданы необходимые условия для максимального обезвоживания бетонной смеси.

Исходя из изложенного можно предположить, что высокопрочный бетон, применяемый, в частности, для изготовления малонапорных и безнапорных труб может быть получен за счет уплотнения смеси виброударным прессованием с интенсивным обезвоживанием.

В производстве труб выдавливание свободной воды затворения из бетонной смеси осуществлялось через перфорированную поверхность наружной формы, покрытую специальной фильтровальной тканью [6, 18],

Основной недостаток использования таких фильтров - высокий расход ручного труда. Поэтому задача настоящих исследований состоит в изыскании таких фильтров, которые бы имели простую, легкодоступную в производственных условиях конструкцию, и отжимали из бетонной смеси свободную воду за сравнительно небольшой отрезок времени. Для этой цели нами были исследованы сквозные конические отверстия, устроенные на поверхностях используемых форм [16]. Оптимальность этих фильтрационных отверстий оценивалась путем сравнения их работоспособности, т.е. максимально пропускать свободную воду при низкой потере цементного теста. Геометрия, плотность и форма отверстий требуют специального исследования.

Процесс отжима жидкой и газообразной фазы из формуемого материала является основным процессом структурообразования и модификации свойств бетона. Причиной удаления жидкости и газа из бетона является перепад давления по толщине стенки формуемой трубы по направлению к перфорированной поверхности опалубочной формы. Удаление жидкой и газообразной сред бетонной смеси является процессом эксфильтрации, т.е. удаления жидких и газообразных флюидов из материала в окружающую среду [19].

Основную роль в формировании особоплотной структуры бетона играет процесс обезвоживания бетона. Отжим излишней воды затворения из бетонной смеси под действием приложенного нормального давления является фильтрационным процессом [1, 20]. Большую роль в нем играют разность химических потенциалов взаимодействующих фаз и различные градиенты, возникающие в системе в зависимости от вида источника энергии, под влиянием которой перемещается свободная вода. Перемещение свободной воды под действием градиента влажности происходит в сторону менее увлажненных пор до полного выравнивания влажности.

Следовательно, для удаления свободной воды затворения из бетонной смеси под действием давления необходимо совершить работу (расход энергии) на

преодоление сил связи воды с частицами цемента и на перемещение ее в системе. Естественно, что основная задача исследования переноса излишней воды затворения из бетонной смеси заключается в определении зависимости параметров виброударно-перистальтического воздействия и скорости фильтрации от различных технологических параметров и величины нормального давления

При виброударном действии перистальтических волн на бетонную смесь в ней возбуждаются собственные колебания зерен заполнителей, которые, в свою очередь, приводят к определенному разжижению цементного теста и перераспределению в нем жидкости. В вязкопластичном цементном тесте смеси возникает турбулентный гидродинамический процесс, который под влиянием перистальтического волнового давления сопровождается отжатием воды из ближе расположенных к сердечнику слоев смеси, что приводит к уплотнению бетона. В этих случаях образуются направленные к наружной форме фильтрационные каналы, по которым под действием перистальтического прессования фильтруется излишняя вода. Наружная форма, в свою очередь, имеет многочисленные специально устроенные фильтрующие конусные отверстия [16]. Весь процесс начального виброуплотнения, отжим воды и водовоздушной фазы, а также последующего гиперуплотнения бетона можно представить как комплексный трехступенчатый процесс. Этот процесс носит сложный характер и состоит из трех различных по механизму действия стадий:

Стадия переукладки составляющих (первая стадия уплотнения) . Она заключается в разрушении и перестройке под влиянием вибрирования неустойчивой структуры скелета заполнителей бетонной смеси. Образующие ее зерна в момент разрушения структуры под влиянием собственной массы стремятся занять наиболее низкое положение, меняют взаимную ориентацию и образуют новую устойчивую структуру. В ней зерна заполнителей размещены уже не случайно, а наиболее выгодно по условию получения минимума объема

скелета. Одновременно с перестройкой скелета удаляется основная масса воздуха, в основном, через фильтрационные отверстия перфорированной формы. После окончания первой стадии воздуха остается не более 3..,4% от общего объема бетонной смеси,

Рассматривая особенности поведения бетонной смеси на первой стадии виброуплотнения, можно заметить, что переукладка составляющих интенсивно протекает лишь при отсутствии значительных статических нагрузок на смесь. Это создает условия оптимальной переукладки составляющих бетонной смеси. Как показывают опыты, время, необходимое для завершения первой стадии уплотнения в активных ("виброкипящих") слоях бетонной смеси, относительно невелика и даже для жестких смесей не превышает 20...30 с.

Стадия сближения составляющих (вторая стадия уплотнения). Она начинается тогда, когда перестройка структуры бетонной смеси закончилась и после этого изменения в ней порядка расположения зерен заполнителей обычными средствами практически неосуществимо. В проведенных опытах сближения, раздвижки относительные сдвиги частиц заполнителей происходят в результате перераспределения по объему растворной составляющей и цементного теста из-за удаления остаточной части воздуха, а также избыточной воды затворения через фильтрационные отверстия перфорированной наружной формы. В отличие от первой, вторая стадия уплотнения интенсивно протекает в предельно стесненных условиях, под действием приложенного комбинированного виброударно-перистальтических воздействий.

Для завершения второй стадии необходимо более длительное время, чем для первой. Продолжительность этой стадии зависит от жесткости бетонной смеси, толщины стенки бетонируемой конструкции, режима виброударно-перистальтического прессования, фильтрационной способности формы и начального значения В/Ц. Например, при изготовлении неармированных бетонных труб (диаметром 1000 мм, длиной 1500 мм и толщиной стенки 150 мм)

из умеренно жестких смесей стадия сближения составляющих продолжалась 3...5 мин., т.е. почти на два порядка больше первой стадии. Завершение второй стадии четко определяется окончанием значительных деформаций бетонной смеси, после чего структура свежего бетона может считаться сложившейся. Дальнейшее вибрирование практически не повышает плотности и прочности бетона, а также не улучшает качество его поверхности.

Стадия комплексного уплотнения бетонной смеси (третья стадия уплотнения). Опыты показывают, что после окончания второй стадии уплотнения еще можно достигнуть некоторого дополнительного (компрессионного) обжатия путем сочетания интенсивного перистальтического давления со сдвиговым возвратно-поступательным перемещением наружной перфорированной формы относительно вибросердечника. Так как эта мера осуществляется без прекращения виброударного воздействия, то полезный эффект в виде повышения прочности и плотности бетона достигается за сравнительно короткое время (до 1...3 мин.). Рассматриваемый эффект достигается в результате отжатия остаточной части избыточной воды затворения с растворенным в ней воздухом, а также гиперуплотнения контактов между зернами заполнителей.

Из изложенного видно, что процесс уплотнения бетонной смеси на разных стадиях подчиняется различным закономерностям. На первой стадии бетонная смесь ведет себя как вязко-сыпучая среда, подвергаемая вибрационным перемещениям. На второй стадии, сопротивляясь сплочению составляющих и отжиму водовоздушной фазы, смесь реагирует на внешнее уплотняющее воздействие, как вязко-упруго-пластичное тело, характеризуемое определенным модулем деформации. На третьей стадии решающее значение приобретает оптимальное сочетание фильтрационных свойств бетонной смеси и перфорированной формы. В этом случае свежесформованная смесь деформируется по законам динамики многокомпонентных сред.

Следует обратить внимание на качественное различие виброуплотнения бетонной смеси и гиперуплотнения бетона в рассматриваемом случае. Обычное одностадийное уплотнение заменяется высокоинтенсивным трехстадийным гиперуплотнением, в результате которого коэффициент уплотнения K_u приближается к теоретически возможному значению, равному единице. Трехстадийное гиперуплотнение будет особенно эффективным при получении бетонной смеси оптимальной вибровязкости, упругости и способности поглощать энергию в процессе виброударных колебаний. Этот важный вывод определяет необходимость разработки надежного метода назначения составов бетона, отвечающих заданным условиям. При этом, используя исследования О.А. Савинова и Е.В. Лавриновича [21] бетонную смесь можно представить как вязкую жидкость с постоянным коэффициентом вязкости.

Кроме определения оптимального состава бетона необходимо определить также физико-механические свойства бетонной смеси и бетона. Наиболее просто определяется интегральная характеристика деформативности бетона или эффективный модуль деформации бетонной смеси. Для этого рассмотрим описанную выше первую стадию уплотнения бетонной смеси.

Определим энергию, затрачиваемую при сжатии бетонной смеси внешними усилиями вибропрессования, возрастающими в процессе обжатия от нулевого значения до конечного $R_{вп}$. Вначале определим элементарную работу внешних сил, которая будет равна произведению силы P_e на перемещение de (рис.3.10)

=

· В работе [252] доказано, что при P свыше 2,2 МПа, между деформацией e и усилиями существует зависимость упругого сопротивления по известному закону Гука.

Примечание: Сольватная оболочка в местах взаимных контактов между частицами сплющивается.

Схема определения энергии уплотнения бетонной смеси

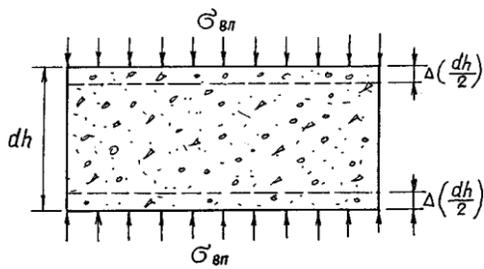


Рис. 3.10.

Элементарный слой уплотняемой бетонной смеси

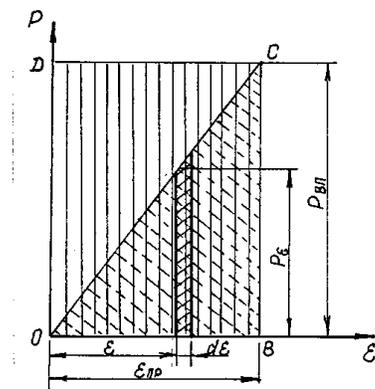


Рис. 3.11.

=

$P \cdot h \cdot E \cdot F$ (3.45)
Откуда давление прессования равно:

=

$E \cdot F \cdot \Delta h$ (3.46)
Или переходя к относительной деформации $\epsilon = \Delta h/h$, находим:

=

Подставив выражение $P \epsilon$ в уравнение элементарной работы прессования, находим

ϵ

=

Полную энергию, затрачиваемую на прессование смеси, получим, проинтегрировав выражение в пределах от нуля до окончательного значения перемещения $\varepsilon_{пр}$

=

$$\int_0^{\varepsilon_{пр}} E \cdot F \cdot d\varepsilon = E \cdot F \cdot \varepsilon_{пр}^2 / 2 \quad (3.49)$$

где E — модуль упругости прессуемой смеси, МПа;
 F — площадь сечения образца, см²;

$\varepsilon_{пр}$ — предельная относительная деформация.

Выражая потенциальную энергию через приложенное усилие $P\varepsilon = E \cdot F \cdot \varepsilon = P_{вп}$, получаем:

=

$$P_{вп} \cdot \varepsilon_{пр} / 2 \quad (3.50)$$

Таким образом, работа усилия прессования равна половине произведения окончательного давления $P_{вп}$ и деформации сжатия $\varepsilon_{пр}$. Графически эпюра уплотнения от усилий прессования выражается площадью треугольника ОСВ диаграммы (рис.3.10). В нашем случае, при виброударном приложении давления $P_{вп}$, если усилие прикладывать почти мгновенно, то работа гиперуплотнения будет в два раза больше, чем при статическом прессовании. Геометрия эпюры уплотнения выражается площадью прямоугольника ОДСВ (рис. 3.10).

В образцах, опрессованных под большим давлением, вода между частицами твердой фазы находится в виде тонких пленок, плотность упаковки частиц максимальна, что повышает структурную прочность, как свежееотформованного изделия, так и затвердевшего бетона.

В процессе уплотнения бетонной смеси работу уплотнения совершают не только внешние усилия, но и внутренние силы упругости. Работу внутренних сил при обжатии можно вычислить следующим образом. На рис.3.11 показан элемент dh уплотненной бетонной смеси, на который действуют нормальные напряжения $\delta_{вп}$ являющиеся для данного слоя внешними силами. Внутренние силы будут

направлены в противоположную перемещению сторону. Поэтому работа внутренних сил при прессовании всегда отрицательна.

Элементарная работа внутренних сил для элемента dh вычисляется по формуле, аналогичной формуле (3.48)

=

$$\delta_{вп} \cdot F \cdot \Delta h = \frac{(\delta_{вп} \cdot F) \cdot dh}{E \cdot F},$$

где $\delta_{вп}$ – напряжение вибропрессования, МПа.

Следовательно,

=

$$\delta_{вп}^2 \cdot F^2 \cdot dh^2 \cdot E \cdot F \quad (3.52)$$

Полную энергию уплотнения от действия внутренних сил находим,

п

p

о

$$\delta_{вп}^2 \cdot F^2 \cdot dh \cdot E \cdot F = -12 \delta_{вп}^2 \cdot F^2 \cdot h \cdot E \cdot F = P_{вп}^2 \cdot h^2 \cdot E \cdot F = E \cdot F \cdot \Delta h^2 \cdot h = -E \cdot F \cdot \varepsilon_{пр}^2 \cdot h^2 = E \cdot$$

и

$$V \cdot \varepsilon_{пр}^2 \quad (3.53)$$

н где $\Delta h = \frac{P_{вп} \cdot h}{E \cdot F}$ – упругая часть деформации сжатия бетонного образца.

т

Величина, равная работе внутренних сил, но имеющая противоположный знак,

е

называется потенциальной энергией деформации. Таким образом, потенциальная

г

энергия при сжатии бетонной смеси будет определяться по формуле:

р

$$U = -W = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta_{вп}^2 \cdot F^2 \cdot h}{E \cdot F} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{вп}^2 \cdot h}{E \cdot F} = \frac{E \cdot F \cdot \Delta h^2}{2 \cdot h} = \frac{E \cdot V \cdot \varepsilon^2}{2} \quad (3.54)$$

р

о Потенциальная энергия, отнесенная к единице объема формуемого элемента, называется удельной потенциальной энергией:

ф

ф

=

$$F \cdot h = 12 \cdot \delta_{вп}^2 \cdot F^2 \cdot h \cdot E \cdot F \cdot F \cdot h = 12 \cdot \delta_{вп}^2 E = P_{вп}^2 E \quad (3.55)$$

$$E \cdot V \cdot \varepsilon^2 = E \cdot \varepsilon^2 V \quad (3.56)$$

о

Таким образом, в прессуемых дисперсных системах, в том числе и бетонной

б

е

смеси, происходит увеличение потенциальной энергии. При почти мгновенном приложении виброударно-перистальтического давления Рвп также происходит увеличение удельной потенциальной энергии в два раза

=

следовательно, энергия гиперуплотнения в два раза больше удельной энергии уплотнения при статическом прессовании и накопление удельной потенциальной энергии прессуемой бетонной смеси пропорционально произведению квадрата относительной упругой деформации сжатия $\epsilon_{пр}$ на m

Отжим воды из уплотняемой смеси закончится тогда, когда разность внешнего давления на концах капилляров будет преодолена внутренним капиллярным давлением. В этом случае давление сопротивления фильтрации пропорционально силам вязкости жидкой фазы.

ь

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА

у

4.1. Исследование прочностных свойств модифицированного бетона при растяжении

-

Соппротивление бетона осевому растяжению значительно меньше, чем сопротивление сжатию и, в значительной степени, определяется сцеплением его составляющих. Малая прочность обычного бетона при растяжении объясняется неоднородностью его структуры и нарушением сплошности бетона, что способствует развитию концентрации напряжений, особенно при действии растягивающих усилий [1, 2, 3, 4, 5, и 6].

п

Для повышения прочности бетона при растяжении необходимо устранить, прежде всего, неоднородности строения бетона - одной из главных причин большого рассеяния результатов механических

е

с

с

и

испытаний этого материала, что сказывается при экспериментальном определении прочности на сжатие.

Существенная разница между временным сопротивлением сжатию для обычных бетонов свидетельствует о довольно большом разбросе таких величин [7, 8, 9]. Этот разброс объясняется различным влиянием факторов на растяжение и сжатие. Так например, для обычных бетонов установлено [10, 11, 12, 13], что с ростом В/Ц сопротивление разрыву снижается, однако в меньшей степени, чем сопротивление сжатию.

С увеличением марки бетона возрастает временное сопротивление разрыву. Высокопрочные бетоны, как правило, приготовленные на бетонных смесях с низким В/Ц и на чистых кондиционных заполнителях в виде щебня и песка, имеют повышенную плотность, следовательно, у них меньше разброс в показаниях прочности как при сжатии, так и при растяжении [14, 15].

Для определения величины временного сопротивления растяжению R_p в свое время Фере предложил зависимость в виде

$$R_p = 0,50 \cdot R^{2/3}, \quad (4.1)$$

которая была получена для бетонов низких марок. В настоящее время эта зависимость распространяется и на бетоны марки 600 и более.

Под действием виброударного прессования происходит уплотнение бетона, характеризующееся уменьшением толщины (высоты) образца. Во всех экспериментальных наблюдениях отмечались небольшие расхождения относительной деформации при разных высотах образцов, т.е. размеры образцов принимались 80 x 80 , 100 x 100, 150 x 150, а состав бетона был 1 : 1,1 : 2,84 при (В/Ц)_{нач}=0.35.

Таким образом, при виброударном прессовании бетонной смеси предварительное виброударное уплотнение создает благоприятные условия для равномерной деформации смеси. В процессе виброударного

уплотнения бетонной смеси зерна заполнителя начинают перемещаться, встречаясь, отталкиваются друг от друга и от стенок формы. В результате между ними появляется прослойка цементного теста, увеличивая однородность цементирующей матрицы, что способствует более компактному расположению зерен заполнителей в бетонной смеси. Изложенное подтверждается тем, что на поверхности образцов, приготовленных виброударным прессованием без предварительного виброударного уплотнения, наблюдались отдельные зерна крупного заполнителя, не покрытые цементным раствором.

У образцов, изготовленных виброударным прессованием, после предварительной вибрации смеси, наружная поверхность состояла, в основном, из цементного камня толщиной 0,5...1,0 мм.

Режим вибропрессования бетонной смеси с обезвоживанием (табл.1), обеспечивает возможность снижения водоцементного отношения от 0,31...0,40 до 0,263...0,290, т.е. на 14...29,5% от первоначального В/Ц. В результате этого прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток повысилась до 110,7 МПа, прочность на растяжение достигла 16 МПа, а водонепроницаемость повысилась до 3 МПа. Значения R_b и R_p для ГУМБ и обычных бетонов приведены на рис.1.

Зависимость прочности бетона при осевом растяжении R_p от его цилиндрической прочности R_b

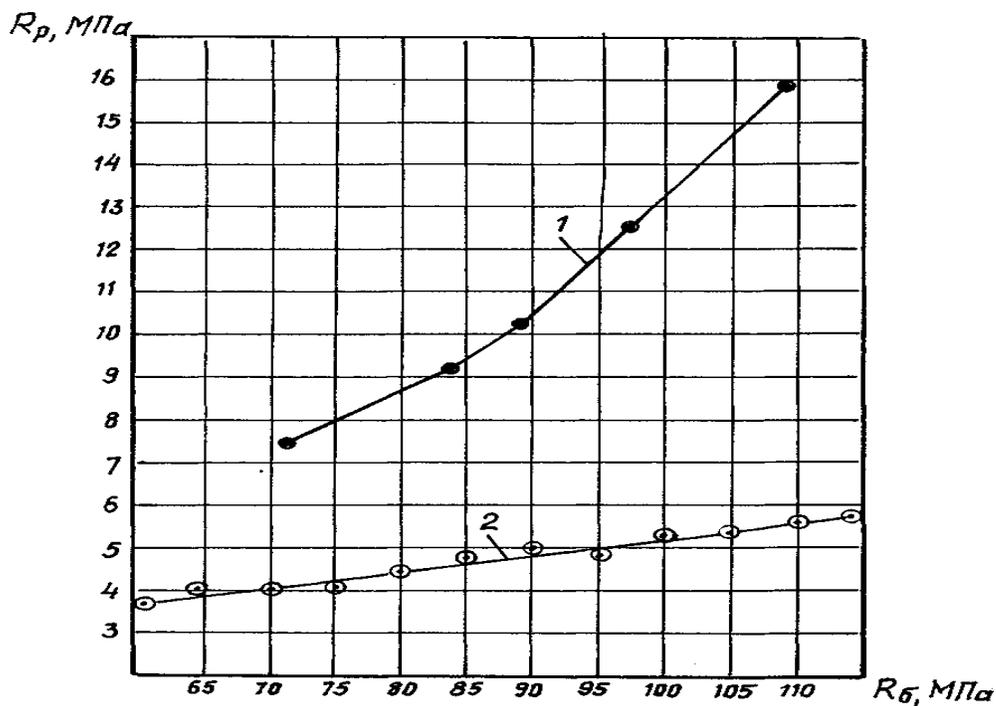


Рис. 4.1.

1 - виброударно-перистальтическигиперуплотненный бетон (R_p);

2 - данные О.Я. Берга [11].

При этом значение R_p для обычных бетонов приняты по опытным данным О.Я.Берга [247]. Характерно, что область гиперуплотненных бетонов лежит выше области обычных и даже высокопрочных бетонов. Особенно существенное различие в величинах R_p наблюдалось в особопрочных гиперуплотненных бетонах. [175].

Существенное изменение прочности бетона при сжатии и растяжении (R_b/R_p) характерно тем, что это соотношение уменьшается с уменьшением $(В/Ц)_{нач}$. Можно заключить, что при понижении начального $В/Ц$ эффективность гиперуплотнения возрастает [22, 23, 24]. Наибольший эффект гиперуплотнения наблюдался при $(В/Ц)_{нач}=0,31$, когда соотношение R_b/R_p снижалось до 7...8. Следовательно, средняя прочность при растяжении гиперуплотненного бетона составила $109,7/6,9=15,9$ МПа. Такая прочность при растяжении соответствует марке М150 обычного

бетона при сжатии. Этот материал способен выдерживать значительные растягивающие напряжения. Например, он может надежно применяться без армирования для безнапорных и малонапорных трубчатых элементов. Производственная проверка этих положений подтвердила правомерность и надежность этих положений.

Соотношения прочности бетона при растяжении и сжатии, приведенные в табл. 2, также отражены на графике, рис. 2.

Анализ опытных, данных определения прочности гиперуплотненного бетона при растяжении приводит к заключению, что использование формулы Фере невозможно. Как следует из зависимости (1), коэффициент 0,5 является постоянной величиной. Это может быть справедливо для виброуплотненных бетонов. При гиперуплотнении и модификации бетона коэффициент в формуле Фере становится переменным и зависящим от значения прочности бетона при сжатии, рис. 3. Из опытных данных следует, что при изменении прочности бетона от 70 до 110 МПа коэффициент возрастает от 0,55 до 0,70. Можно принять линейную зависимость K_p от K_b . В этом случае формула Фере для ГУМБ принимает вид:

$$R_p = K \cdot R_b \sqrt[3]{R_b^2}. \quad (4.2)$$

Таблица 4.2

Соотношение прочности бетона при растяжении и сжатии

Характеристика прочности бетона, Мпа, в возрасте	Обозначение	(В/Ц)нач/(В/Ц)ост.ср
--	-------------	----------------------

28 суток		$\frac{0,31}{0,265}$	$\frac{0,33}{0,270}$	$\frac{0,35}{0,276}$	$\frac{0,37}{0,281}$	$\frac{0,40}{0,285}$
Виброуплотненные	R_{δ}	46,3	45,1	42,0	41,2	34,9
	R_p	5,1	4,9	4,5	4,0	3,4
	R_{δ}/R_p	9,1	9,2	9,3	10,3	10,1
Виброударно-прессованные	R_{δ}	109,7	97,4	89,1	84,9	71,3
	R_p	15,9	12,5	10,2	9,1	7,4
	R_{δ}/R_p	6,9	7,8	8,7	9,3	9,6

Соотношение прочности бетона при растяжении и сжатии

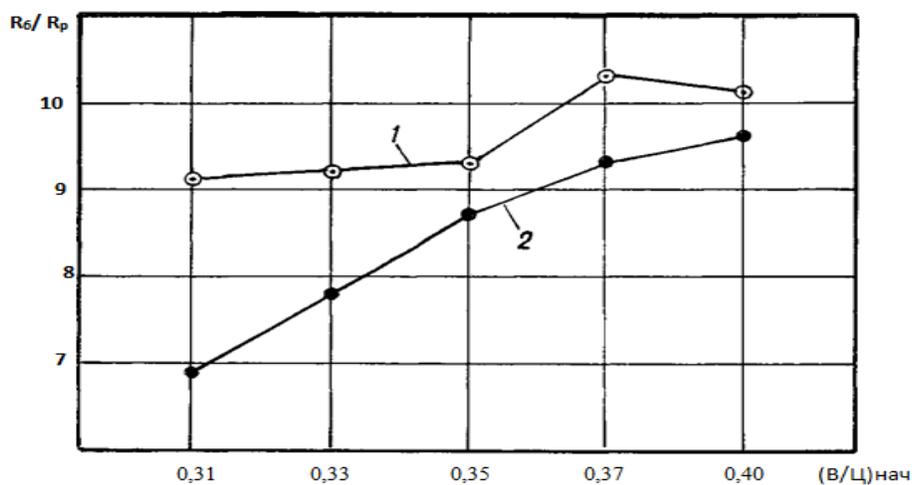


Рис. 4.2.

- 1 - бетон, уплотненный вибрированием;
- 2 - бетон, уплотненный виброударным прессованием.

Зависимость коэффициента растяжения в уточненной формуле Фере для ГУМБ

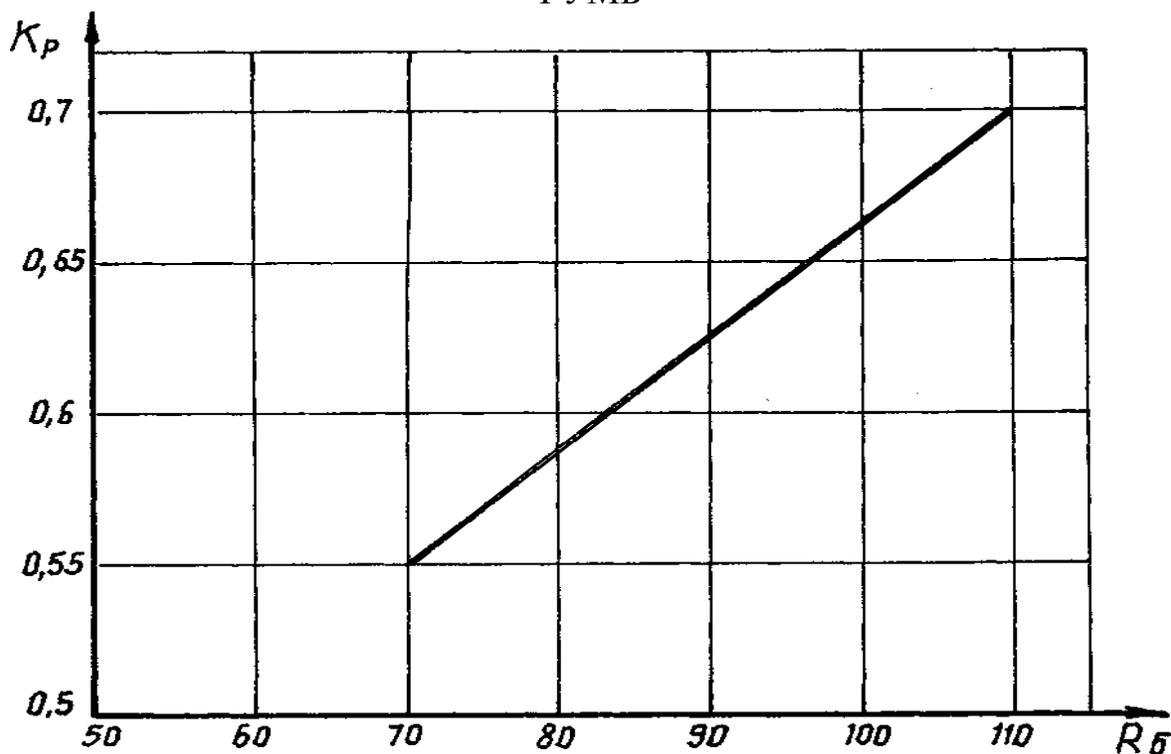


Рис. 4.3.

Более рационально привести эту формулу к виду

$$R_p = \frac{K \cdot \sqrt[3]{R_b^5}}{100}. \quad (4.3)$$

Как показали проведенные эксперименты, эта зависимость позволяет надежно прогнозировать прочность гиперуплотненных бетонов при растяжении. Следует обратить внимание, что для ГУМБ прочностью выше 90 МПа, соотношение R_b/R_p снижается до 7...8. Следовательно, высокоинтенсивное уплотнение и модификация бетона приводит также к повышению однородности материала, а следовательно, дополнительному приросту прочности на растяжение.

4.2. Изменение прочностных свойств модифицированных бетонов во времени

До настоящего времени данных об изменении прочности гиперуплотненного бетона не имеется. Проведенные натурные наблюдения обобщают данные многолетнего периода позволяют сделать ряд заключений.

Как показывают многочисленные исследования [244,245,239], характер развития прочности бетона с течением времени зависит, в основном, от вида цемента, состава бетонной смеси, температурно-влажностных условий твердения, а также от многих других факторов.

Получение высокоэффективных строительных материалов возможно путем модифицирования структуры цементного камня и бетона. Следовательно, модифицирование структуры бетона в данном направлении призвано улучшить технологические свойства материала. Путем модифицирования возможно изменение кинетики нарастания физических свойств и конечных значений прочности бетона.

Не рассматривая физико-аналитический механизм модифицирования структуро-образования бетона, отметим, что он, прежде всего, направлен на снижение количества воды - затворителя в единице объема материала. Однако различными исследованиями доказано, что в начальный период структурообразование цементного камня развивается в оптимальном направлении лишь при определенном объемном содержании воды. Предельное снижение водосодержания затрудняет процесс гидратации вяжущего, ограничивая конечные прочностные свойства материала. В то же время конечные прочностные свойства материала улучшаются при всемерном снижении объемного водосодержания смеси. Во всех случаях модификация бетона предполагает его состав неизменным от затворения

смеси до конечной стадии формирования структуры бетона.

Зависимость прочности и водонепроницаемости бетона от В/Ц вытекает из физической сущности формирования структуры бетона. Изучение процесса гидратации цемента показало, что цемент, в зависимости от качества и срока твердения, связывает всего 15...25% воды от своей массы [4, 5]. В течение первого месяца связывается не менее 20% воды от массы цемента. Вместе с тем, для придания бетонной смеси пластичности, улучшения условий гидратации вяжущего, вводится значительно большее количество воды, так как при $(В/Ц)_{нач} = 0,20$ бетонная смесь остается практически сухой и ее невозможно качественно уложить, отформовать и уплотнить. Избыточная вода, не вступая в химические реакции с цементом, остается в бетоне в виде водяных пор и капилляров или испаряется, оставляя воздушные поры. Несомненно это является основной причиной снижения прочности и водонепроницаемости бетона.

Для оптимизации свойств бетона, получения предельной прочности необходимо удалить избыточную воду затворения. Физико-механические показатели бетона при этом будут находиться в прямой зависимости от количества остаточной воды затворения [6]. Если бетонная смесь будет уплотняться за счет отжатия определенного количества свободной воды, то прочность бетона будет находиться в обратной функциональной зависимости от остаточного В/Ц, так как именно оно определяет пористость цементного камня и бетона. Поэтому, с целью получения бетона предельно высокой прочности и плотности, предварительно уложенная смесь должна дополнительно уплотняться в условиях максимального обезвоживания бетона.

Для предварительного выявления факторов, влияющих на обезвоживание, рассмотрим процесс уплотнения бетонной смеси, уложенной в форму, представляющую цилиндр со сплошной стенкой. Предположим, что

смесь подвергается сжатию нормальным давлением, приложенным к поршню. Если объем цементного раствора ($V_{ц.р.}$), имеющегося в бетонной смеси, окажется меньше объема пор ($V_{пор}$) между зернами крупного заполнителя, то нормальное давление будет воспринято только крупным заполнителем, а цементный раствор не воспримет в этом случае никакого давления. Влияние виброударно-перистальтического прессования в этих случаях, вероятно, будет отрицательным, так как под действием нормальной силы возможны случаи раздробления отдельных зерен крупной фракции, который приводит к снижению прочности бетона.

Е

с

л

и

И.ц.р. Если $V_{ц.р.}$ между зернами крупного заполнителя больше нормального давления будет воспринято зернами всех компонентов бетонной смеси. В этих условиях эффект виброударно-перистальтического прессования будет зависеть от способности цементного раствора деформироваться. Раствор будет деформироваться, если количество цементного теста будет больше объема пор мелкого заполнителя. В этих условиях вся нагрузка должна быть воспринята цементным тестом. При избыточном количестве воды в цементном тесте вся нагрузка будет воспринята водой.

Процесс отжима жидкой и газообразной фазы из формуемого материала является основным процессом структурообразования и модификации свойств бетона. Причиной удаления жидкости и газа из бетона является перепад давления по толщине стенки формуемого изделия по направлению к перфорированной поверхности опалубочной формы. Удаление жидкой и газообразной сред

бетонной смеси является процессом эксфильтрации, т.е. удаления жидких и газообразных флюидов из материала в окружающую среду [7].

Основную роль в формировании особоплотной структуры бетона играет процесс обезвоживания бетона. Отжим излишней воды затворения из бетонной смеси под действием приложенного нормального давления является фильтрационным процессом [1]. Большую роль в нем играют разность химических потенциалов взаимодействующих фаз и различные градиенты, возникающие в системе в зависимости от вида источника энергии, под влиянием которой перемещается свободная вода. Перемещение свободной воды под действием градиента влажности происходит в сторону менее увлажненных пор до полного выравнивания влажности.

Следовательно, для удаления свободной воды затворения из бетонной смеси под действием давления необходимо совершить работу (расход энергии) на преодоление сил связи воды с частицами цемента и на перемещение ее в системе. Естественно, что основная задача исследования переноса излишней воды затворения из бетонной смеси заключается в определении зависимости параметров виброударно-перистальтического воздействия и скорости фильтрации от различных технологических параметров и величины нормального давления.

Рассмотрим общие закономерности нарастания прочности бетона при нормальном температурно-влажностном режиме среды ($\Theta=90\text{...}100\%$, $t=20^\circ\text{C}$). Исключив таким образом влияние внешних факторов на процесс гидратации, сопоставим потенциальные возможности роста прочности обычных, высокопрочных и гиперуплотненных бетонов в зависимости от их индивидуальных качеств. Высокопрочные, гиперуплотненные бетоны характеризуются тем, что они изготавливаются на высокоактивных цементах и имеют низкие значения В/Ц [244-247,239]. Однако количественно оценить их суммарный эффект в большинстве случаев довольно трудно, тем более, что бетон

заданной прочности может быть получен при самых разнообразных сочетаниях этих технологических параметров.

С увеличением активности портландцемента или снижением В/Ц, в частности, в результате отжима воды, нарастание прочности бетона при прочих равных условиях, как правило, ускоряется. Поэтому влияние обоих факторов на рост прочности бетона (при заданной его марке) должно, по крайней мере, компенсировать друг друга. Учитывая эти соображения, можно попытаться оценить совместное влияние этих факторов на темп роста прочности бетона через его номинальную марочную прочность R_6 . Хотя такого рода оценка в достаточной степени ориентировочна, она удобна тем, что позволяет исходить из общепринятой характеристики качества материала. Ю.Н.Хромец и Е.Н.Щербаков [248] предложили следующее эмпирическое выражение для оценки роста прочности бетона во времени:

$$\frac{R_\tau}{R_6} = 1 - \frac{100-\tau}{5 \cdot (100+R_6)} \cdot \lg \frac{28}{\tau} , \quad (4.4)$$

где R_τ - кубиковая прочность бетона при загрузении его в произвольном возрасте $3 < \tau < 180$ суток;

R_6 - кубиковая прочность бетона в 28-суточном возрасте.

Дальнейшие, исследования, проведенные Е.Н. Щербаковым [249], показали, что высокопрочные бетоны (марки до 1000) также достаточно хорошо подчиняются закономерности (1). Это видно из анализа данных многочисленных исследователей, приведенных в работах

Это относится также к опытным данным о гиперуплотненных бетонах, хотя они лежат обособленной областью, но подчиняются общим закономерностям. Поэтому зависимость (1) можно принять справедливой и для

гиперуплотненного модифицированного бетона. Рис. 1, на котором величины

о

т
н Использованные в опытах гиперуплотненные бетоны твердели в нормальных температурно-влажностных условиях. Состав смесей и индивидуальные свойства алитовых портландцементов колебались в широких пределах. Тем не менее расположение опытных точек во всем рассмотренном диапазоне R_6 удовлетворительно подчиняется закономерности (1).

и У бетонов раннего возраста ($\tau = 3$ суткам) замечен несколько повышенный разброс экспериментальных точек, но общий характер R_{τ}/R_6 ($\tau = 3, 7$ и 90 суток) для обычных и высокопрочных бетонов занесены в функции марочной прочности R_6 в 28-суточном возрасте.

в

и

с Высокопрочные гиперуплотненные бетоны по сравнению с бетонами обычных марок характеризуются более интенсивным нарастанием прочности в раннем возрасте ($\tau < 28$ суток) и менее значительным приростом прочности за пределами 28-суточного возраста (рис. 1). Это отмечалось также в работах

с

т Развитие прочности бетонов во времени в зависимости от их марочной прочности. Алитовые портландцементы 40 различных партий

(

1

)

с

о

х

р

э

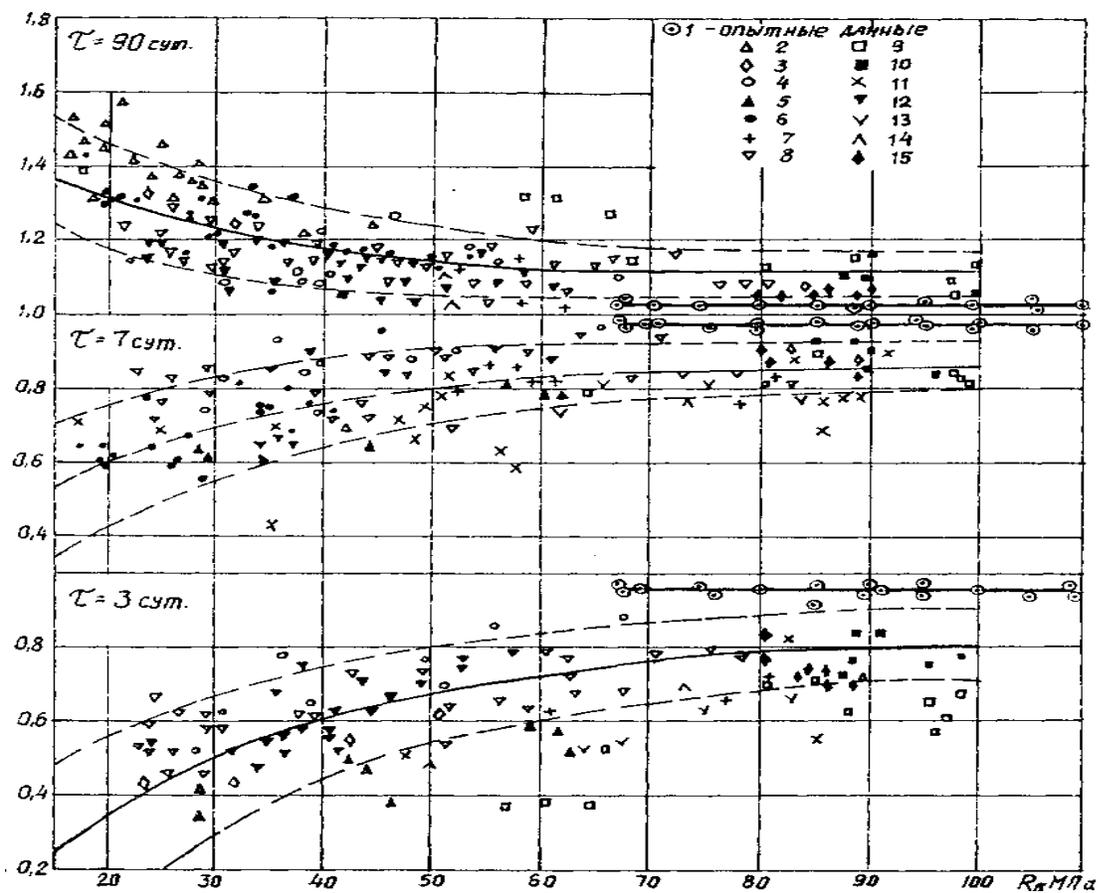


Рис. 4.4

1-опытные данные; 2-Дютрона [18]; 3-Гуммеля [17]; 4-Киселева [1]; 5-Мейера [19]; 6-Вишерса [21]; 7-Цейлон [2]; 8-Квао [20]; 9-Сытникова и Иванова [16]; 10-Писанко и Голикова [14]; 11-Берга, Писанко и Хромца [12]; 12-Бонцеля и Дамса [23]; 13-Пинуса [8]; 14-Рокача и Кочеткова [15]; 15-Берга и Рожкова [13]; (-) по данным О.Я. Берга [11].

Характер развития во времени прочности различных тяжелых бетонов на алитовых портландцементях

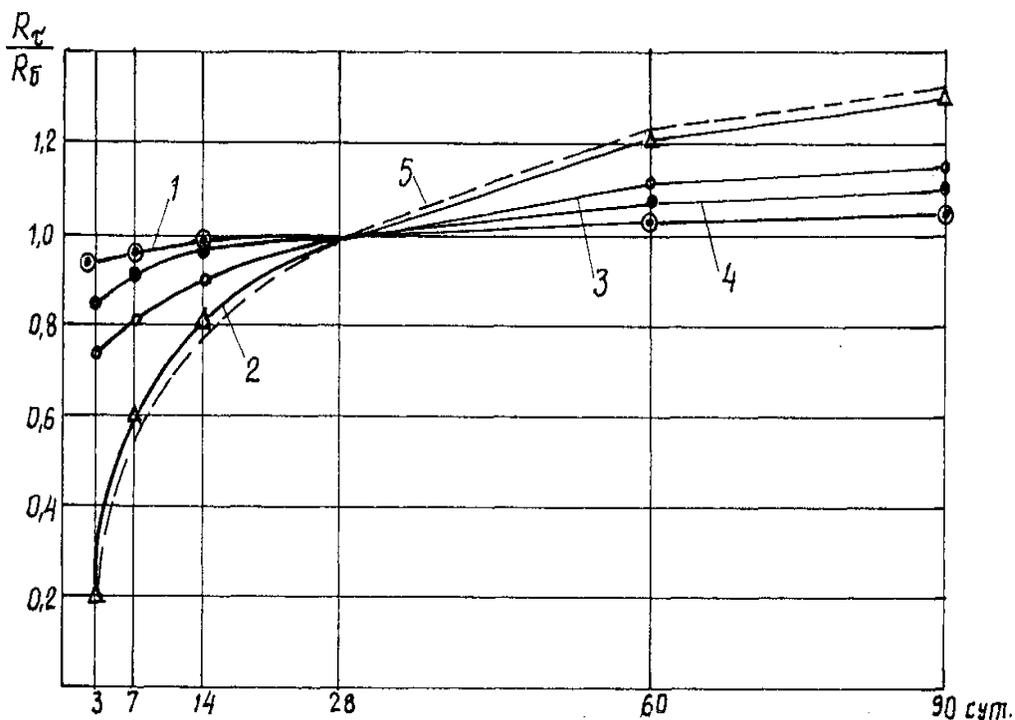


Рис. 4.5

1 - гиперуплотненный бетон; 2 - бетон марки 200; 3 - то же, 600;
4 - то же, 1000; 5 - по логарифмической зависимости, (кривые 2, 3, 4, 5 -
данные О.Я. Берга) [11...13].

Выражение (1) имеет более общий характер по сравнению с другими известными формулами подобного типа. В частности, для бетона низких марок оно близко к известной логарифмической зависимости [263], а с повышением марки все больше отклоняется от этой зависимости [246,245,239,264]. Как видно из рис.2, вследствие этого скорость роста прочности обычных и высокопрочных бетонов может различаться весьма существенно. Эта особенность гиперуплотненного, высокопрочного бетона представляет одно из важных преимуществ, позволяющее сократить сроки изготовления конструкций, и в ряде случаев, например, в климатических условиях Узбекистана, отказаться от применения

тепловлажностной обработки.

Вместе с тем следует с большей осторожностью подходить к вопросу об учете возможного прироста прочности этого бетона за пределами 28-суточного возраста. Для опытного вида бетонов R_{28} следует принимать предельным уровнем прочности. В то же время за период наблюдений сбросов прочности не наблюдалось

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение особовысокопрочного бетона возможно в результате комплексного использования физической модификации бетонной смеси, высокоинтенсивного гиперуплотнения формуемого материала с одновременным управлением процессом структурообразования бетона.

Физическая модификация бетонной смеси, аналогично вакуумированию бетона, должна быть основана на использовании надежного и равномерного отжима водно-газовой фазы из формуемого материала.

Установлено, что при физической модификации и гиперуплотнения бетонной смеси с использованием виброударного, сдвигового и перистальтического уплотнения процесс структурообразования приводит к изменению морфологии гидратированного вяжущего по сравнению с обычным вибрированным бетоном.

Разработанный комплексный способ гиперуплотнения и модификации бетонной смеси позволяет увеличить прочность опытного бетона в 2...2,2 раза по сравнению с прочностью виброуплотненного бетона с одинаковым начальным значением В/Ц.

Соотношение между прочностью- гиперуплотненного бетона и (В/Ц)_{ост} носит линейный характер, однако, тангенс угла наклона зависимости $R_b=(В/Ц)_{ост}$ в 2 раза больше аналогичного параметра виброуплотненного бетона.

Опытами доказано, что гиперуплотнение совместно с модификацией бетонной смеси, в большей степени влияет на прочность бетона при растяжении, при этом соотношение R_b/R_p снижается до 7...8 по сравнению с аналогичным показателем высокопрочных бетонов, равным 9...10.

Предложена уточненная зависимость для определения R_p по марочной прочности R_b полученная из формулы Фере.

Экспериментальными данными подтверждено, что наибольшая прочность бетона обеспечивается при $(V/C)_{ост}$ близком нормальной густоте цементного теста и использованием составов бетонной смеси с расходом цемента на 10...12% превышающего минимальный расход вяжущего, что обеспечивает оптимальные условия деформирования, гиперуплотнения и модификации смеси.

Уровень модификации бетонной смеси, определяемый соотношением $(V/C)_{ост}/(V/C)_{нач}$ зависит от величины начального V/C и режима виброударного прессования.

Литература

1. Соломатов В.И. Элементы общей теории композитных строительных материалов //Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1980. - N 8. - С. 61-70.
2. B. Khasanov and T. Mirzaev, "Production of extra-strong concrete axisymmetric products," in E3S Web of Conferences, 2019, vol. 97, doi: 10.1051

/ e3sconf / 20199706011.

3. Гегузин Я.Е. Почему и как исчезает пустота. - М. : Наука, 1983. - 191 с
4. Десов А.Е. Внутреннее вакуумирование монолитного и сборного железобетона // Строительная промышленность. - 1954. - N 10. - С. 16-17.
5. Дерягин Б.В., Кротона Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. - М.: Наука, 1973. - 280 с.
6. Де Бур Я. Введение в молекулярную физику и термодинамику. - М.: Изд. иностр. лит., 1962. - 277 с.
7. Дерягин Б.В. Современная теория устойчивости лиофобных суспензий и зольей: Тр, III Всесоюзн. конф. по коллоидной химии. - М. : Изд. АН СССР, 1956. - С. 225-249.
8. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами // ЖЭТФ. 1955. - Т. 29. - Вып. 1. С. 94-110.
9. Дерягин Б.В., Абрикосова И. И., Лифшиц Е.М. Молекулярное притяжение конденсированных тел // Успехи физ. наук. - 1958. - Т. 64, N 3. С. 493-528.
10. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. - М.: Химия, 1976. - 432 с.
11. Аретемцев В.П., Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Формование объемных элементов методом вибровacuумирования // Бетон и железобетон. - 1974. - N 12.
12. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. - М.: Стройиздат, 1966. - 208 с.
13. Ефремов И.Ф. Периодические коллоидные структуры. - Л.: Химия, 1971. - 192 с.
14. Десов А.Е. Свойства вакуумбетона // Строительная промышленность. - "1940. - N 8, - С. 6-8.

15. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. - М.:Химия, 1980. - 320 с.
16. Ратинов В.Б., Иванов Ф.М. Химия в строительстве. - М.: Стройиздат, 1977, - 220 с.
17. Лебедев А.Ф. Уплотнение грунтов при различной их влажности и различной уплотняющей работе. - М.г Стройиздат, 1949. - 55 с.
18. How to det Hidth – Quality Concrete Floors. Nremix Siestem // Asian Building and Construction .- "1985.N 8. P. 41
19. Ахвердов И.Н., Маргулис Л.Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности. - Минск.: Нау-ка и техника, 1975. - 174 с.
20. Повышение долговечности бетонов транспортных сооружений//Труды ММИТа. - М.: Изд. МИИТа, 1982. - 115 с.
21. Реализация региональной комплексной научно-технической целевой программы "Бетон", Харьков: Облполиграф- издат, 1983. - 121 с.
22. Использование отходов в цементной промышленности: Тр. института НИИЦемент. - М., 1982. - Вып. 69. -143 с.
23. Горелкин В.Н., Смилга В,П. Вычисление силы взаимодействия микроскопических тел, разделенных тонкой пленкой раствора электролита //Коллоидн. ж. - 1972. Т. 34, - N 5. - С. 685-895.
24. Малкина А.Д., Дерягин Б.В. Прилипание кварцевых нитей в водных средах //Коллоидн. ж. - 1950. - Т.12. - Вып.6. - С. 431-447.
25. Brux G.,Vacuum – Concrete – Verfahren – Maschinen, _ Gerate – und Personaleinsat.- (Zement und beton),1967, V .,N 39, SS.11-12.
26. Хамский Е.В. Кристаллизация из раствора. - Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1967. - 150 с.
27. Нерпин С.В. Гидромеханика тонких слоев: Автореф. дисс.... докт. хим, наук, - Л.: Ленингр. институт инженеров водного транспорта, 1956. - 24 с.

- 28.** Дерягин Б.В., Ландау Л.Д. Теория устойчивости сильно заряженных лиофобных золь и слипания заряженных частиц в растворах; электролита //ЖЗТФ. - 1945. - Т. 15. - Вып. 11. С. 663.
- 29.** Зимон А.Д., Дерягин Б.В. Прилипание частиц пыли к плоской поверхности в водной среде //Тез.докл. : Всесоюзн. конф. по коллоидной химии. - М.: Изд. АН СССР, 1962. С. - 37.
- 30.** Meyer A. Uler die Einfluss des Wassserzementwertes auf die Fruhfestigkeil von Beton. "Betonstein –Zeitung"29, Ig.,H.8,1963.
- 31.** Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. - М.г Химия, 1975. - 512 с.
- 32.** Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1961. - 163 с
- 33.** Щербаков Е.Н. О прогнозе величин деформаций ползучести и усадки тяжелого бетона в стадии проектирования конструкций, труды ЦНИИС, вып. 70, - М.Транспорт, 1969,- 184 с.
- 34.** Гершберг О.А., Десов А.Е., Итин А.Е. Вакуумбетон. - М.: Стройиздат, 1940. - 116 с.
- 35.** 371 LurtonR. Les matieres inertes et du beton arme , vol. 11. Liegem 1930.
- 36.** Аретемцев В.П., Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Формование объемных элементов методом вибровакуумирования // Бетон и железобетон. - 1974. - N 12.
- 37.** Аретемцев В.П., Потапиевский А. Г., Конопленко А.Н., Сторожук Н.А. Вакуумбетон // Строительные материалы и конструкции. - 1977. N 4. - С. 30-31.
- 38.** ГанжаА.Н., Пикулик С.В., Скворцов С.Г, Вакуумирование бетонных поверхностей водосливной плотины на строительстве Цимлянского гидроузла //Гидротехническое строительство. - 1952. - N 5. - С. 17-18.
- 39.** Гершберг О.А., Симонов М.З. Изготовление пустотелых балочных настилов с применением вакуумирования //Бюл-летень строительной техники.- 1950.- N 12.- С. 18-21.

- 40.** Дибров Г.Д., Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Вакуум-ная обработка бетонной смеси в монолитных конструкциях //Бетон и железобетон. - 1984.- N 7.- С. 33-34.
- 41.** Конопленко А.И. Способ определения состава вакуумбетона //Известия ВУЗов. Строительство и архитектура, 1977. - N 10. - С. 23-24.
- 42.** Конопленко А.И., Панасюк В.И., Павлов В.Н. Вакуумбетон с песчаным фильтром, используемым в одном цикле формирования изделий //Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1985. - N 5. - С. 128-130.
- 43.** Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Прочность и водонепроницаемость вакуумбетона оптимального состава //Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1973, N 8. - С. 55-59.
- 44.** Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Оптимальный состав бетонной смеси, подвергаемой вакуумированию //Бетон и железобетон. - 1973. - N 5. - С. 20-22.
- 45.** Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Режим уплотнения бетонных смесей вибровакuumированием //Строительные материалы и конструкции. - 1962. - N 3. - С. 45-46.
- 46.** Конопленко А.И., Сторожук Н.А., Ильченко Н.Г. О совершенствовании технологии и улучшении качества вакуумбетона //Материалы семинара "Совершенствование технологии и повышение качества производства сборных железобетонных конструкций и изделий." - Л.: 1976. С.29-33.
- 47.** Сторожук Н.А. Механизм уплотнения бетонных смесей вакуумированием //Изв. ВУЗов, Строительство и архитектура. - 1979. - N 2. - С. 72-76.

- 48.** Сторожук Н.А. К вопросу уплотнения бетонных смесей вибровакуумированием //Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура, - 1976. - N 2,- С. 110-115,
- 49.** Сторожук Н.А. Оптимальное управление процессом вибровакуумной обработки бетонной смеси //Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. 1980, N 12. - С. 82-86.
- 50.** Сторожук Н.А. Управление режимом формирования железобетонных конструкций //Строительные материалы и конструкции. - 1987. - N 3. - С. 25.
- 51.** Сторожук Н.А. Исследование режима уплотнения бетонных смесей вакуумированием //Изв. ВУЗов, - Новоси-бирск. - 1977. - N8.-0. 69-74.
- 52.** Гершберг О.А., Итин А.Е. Вакуумбетон //Строительная промышленность, - 1944, - N 7-8,
- 53.** Гершберг О.А. Вакуумирование бетона в монолитных конструкциях. - М.; Стройиздат, 1952, - 60 с.
- 54.** Сердюков Б.М., Толмачев А.Ф, Изготовление железобетонных изделий методом вакуумирования. - М.: Дориздат, 1953. - 45 с.
- 55.** Скворцов С.Г. Поточное производство железобетонных изделий методом вакуумирования //Бюллетень строительной техники. - 1947. - N 7. - С. 1-5.
- 56.** Гершберг О.А., Скворцов С.Г., Звенигородский А.М. Опыт вакуумирования бетона в гидротехническом строительстве // Строительная промышленность,- 1951, N 11. - С. 24-18,
- 57.** Десов А.Е. Свойства вакуумбетона //Строительная промышленность. - "1940. - N 8, - С. 6-8.
- 58.** Гершберг О.А., Скворцов С.Г. Изготовление железобетонных вакуумированных плит без опалубки //Бюллетень строительной техники. - 1948. - N 15, - С. 1-5.

- 59.** Десов А.Е. Внутреннее вакуумирование монолитного и сборного железобетона // Строительная промышленность, 1950. - N 12. - С. 19-20.
- 60.** Blaha B. GFRСpanels from Basalt draw heightened interst //Concrete Products.-1980.-v.83.-N 8.-P.48-50.
- 61.** Bruх G.,Anvendug des Vacuum – Concrenit – Verhahrens in Beuckenbau in Europa.Zement und Beton 8(1962) 23,Februar.
- 62.** Bruх G.,Vacuum – Concrete –Verhahren und Anwendungsgebiete Beton Verlag,Dusseldorff,1966.
- 63.** Нарижный В.А., Артемцев В.П. Эффективное применение вакуумирования в производстве крупнопанельных изделий //Бетон и железобетон. - 1960. - N 2.- С. 29-30,
- 64.** Гирштель Г.Б. Физические основы вибровакuumирования // Изготовление железобетонных конструкций способом_ O'7p, - вибровакuumирования. - Киев, 1977. С. 39-41.
- 65.** Гирштель Г.Б. Основы теории вибровакuumного формования //Реология бетонных смесей и технологические задачи. Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума. - Рига, РПИ, 1979, С. 25-27.
- 66.** Влещик Н.П. Основы теории прессования и вакуумирования бетонных смесей /УТехнологиябезвибрационногоформования железобетонных изделий. - Минск: ИСиАГосстроя БССР, 1979. С. 45-49.
- 67.** Артемцев В.П, Вакуумный метод изготовления объемных элементов /7 Строительные материалы и констру - 370 " - 1970, - N 4. - С. 7-10.
- 68.** Сторожук Н.А. Технология вибровакuumированных бетонов, изделий и конструкций: Автореф. Дисс. . . . д-ра. Техн. Наук. – Харьков, 1990. -34 с.
- 69.** Сторожук Н.А. Научно-технические основы технологии вакуумированных обычных и пропитанных полимерами бетонов: дис канд . техн. Наук. – Днепропетровск, 1973. -246 с.

- 70.** Дибров Г.Д., Конопленко А.И., Сторожук Н.А. Повышение эффективности вакуумной обработки бетонных смесей //Бетон и железобетон. -1982. - N 5.- С. 35-37.
- 71.** Конопленко А.И., Сторожук Н.А., Ильченко Н.Г. О совершенствовании технологии и улучшении качества вакуумбетона //Материалы семинара "Совершенствование технологии и повышение качества производства сборных железобетонных конструкций и изделий." - Л.: 1976. С.29-33
- 72.** Конопленко А.И., Панасюк В.И., Павлов В.Н. Вакуумцит с песчаным фильтром, используемым в одном цикле формирования изделий //Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1985. - N 5. - С. 128-130.
- 73.** Панасюк В.И, Вакуумирование бетонных смесей с использованием металлических фильтров: Дис, ... канд. , техн. наук, 1989, - 198 с.
- 74.** Панасюк В.И., Мустафин Ю.И, Оптимизация конструкции металлических фильтров для вакуумирования бетонной смеси //Повышение эффективности строительства. Ср. научн, трудов, - Киев, 1988, С. 153-155,
- 75.** Clayfield E.I., Lumb E.C. Detachment of Adhered Colloidal Particles by Non – Aqueous Surfactant Solutions //Disc. Faraday Soc -1966. -V.12, N 42.P. 285-293.
- 76.** Speedy method strengthens concrete-World construction, 1983, vol 36, N 1. - P. 24.
- 77.** Schiller K. Mechanism of re-crystallisation in calcium sulphate hemihydrate plasters // Appl.Chem.- 1962. - V.12 N 3. - P.135-144.
- 78.** Vakuunieren von betonflächen /Tiefbau Ingenieur-bau Strassenbau ,1982, N 9, S, 542-543, 546, 548,550, 111.383
- 79.** Rusch H. Researches toward a general flexural theory for structural concrete – ACI, I. Inlu, 1960.
- 80.** Житкевич И.А. Бетон и бетонные работы, СПб, 1912.

- 81.** Десов А.Е. Вибрированный бетон. М.: Стройиздат, 1956. - 229 с.
- 82.** Alexander R., Wardlaw J. Dependence of Cement-Aggregable Bond Strength on Size of Aggregate. Nature, L., 1960, vol. 187, N 4733,
- 83.** Аваков А.И. Вибропрессованный бетон на строительстве Днепровских комбинатов. М-Л, Главная редакция строительной литературы, 1936, - 95 с,
- 84.** Десов А.Е. К теории вибрации бетона, Сб. "Технология бетона", по ред. проф. Скрамтаева Б.Г., ОНТИ, 1937.- 75 с.
- 85.** Миклашевский П.М. Вибрирование бетонной смеси. Вол- гострой. 1937. - 130 с.
- 86.** Абаза С.А. Моечные машины с ультразвуковыми вибраторами. "Бюллетень технике-экономической информации", 1952, N7,8,
- 87.** Аксенов И.П. Аксенов П.Н, Оборудование литейных цехов, ч. 1. М.: Машгиз, 1949. - 117 с.
- 88.** Баркин Д.Д., Гуцаленко И.С., Ефимов А.Д. Применение вибрирования при устройстве оснований сооружений // Строительство. - 1951. - N 6. - С. 31-33.
- 89.** Баркин Д.Д. Погружение свай // Механизация строительства. - 1952. - N 10. - С. 28-29
- 90.** Баркин Д.Д. Новый вибратор для погружения металлического шпунта, свай, труб // Бюллетень строительства. - 1953. - N 3
- 91.** Баркин Д.Д. Устройство оснований сооружения с применением вибрирования. - М.: Госстройиздат, 1949.- 37 с.
- 92.** Головачев И.М., Зелевич, П.М., Разоренов И.Ф., Черняев В.Н., Ярошенко Б.А. Опыт применения вибромолота для погружения свайных фундаментов /7 "Железнодорожное строительство". - 1952. - N 2. С. 10-11.
- 93.** Дейнего Ю.Б, Исследование машин для уплотнения грунта методом вибрации и трамбования, Машгиз, 1950,

- 94.** Казанский Н.И. Опыт глубинного виброуплотнения лессовидных грунтов // "Строительная промышленность".1952. - N 7. - С. 18-19.
- 95.** Куприянов Е.М. Уплотнение насыпных грунтов, М.:Стройиздат, 1950. -132 с.
- 96.** Мацевитый Д.А. Вибротранспорт бетона, сборка //"Технология бетона", УкрНИС.- 1930.- N 5. С. 14-15.
- 97.** Михайлов В.В. Современные методы изготовления напорных железобетонных труб, - М.: Гостоптехиздат, 1963.64 с.
- 98.** Ратнер А. Виброгрохот Т-155." Бюллетень технико-экономической информации". - 1952, - N 7,8,
- 99.** Ротман В.М. К вопросу уплотнения дорожных покрытий и оснований методом виброаии //Механизация строительства. - 1948. - N 6. С. 15-17.
- 100.** Савинов О.А., Луокин А.Я, Метод погружения шпунта в сваи совместным действием вибрации и подрессорной пригрузки. - Л.: 1951, - 93 с.
- 101.** Савинов О.А., Лускин А.Я. О новом типе вибропогружателя ВПП-2 // "Бюллетень строительной техники". - 1953. - N 3. - С. 14-15.
- 102.** Тихомиров С.С., Ченбеков С.С. Закрытые способы строительства подземных сооружений //Городское хозяйство Москвы. - 1953. - N 5. - С. 21-23.
- 103.** Физель И.А. Подземная проходка скважин вибровакуумным методом //"Бюллетень строительной техники". - 1952. - N 19. С. 21-22.
- 104.** Рекомендации по вибрационному формованию железобетонных изделий, - М.: НИИЖБ, 1986. - 77 с.
- 105.** Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формования бетонных смесей. - Л.: Стро-йиздат, 1986. - 280 с.
- 106.** Гусев Б.В., Деминов А.Д., Крюков Б.И. и др. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей. М.: Стройиздат, 1982. - 152 с.

- 107.** Брауде Ф.Г. Сравнительное исследование процессов уплотнения бетонных смесей на вибрационных, виброударных и ударных столах // Сб. тр. ВНИИГС. 1962. N 20. 1962. - С. 25-29. '
- 108.** Брауде Ф.Г., Кормушкин Н.А., Веревкин Л.Р., Голубенков В.А. Виброударный метод уплотнения песчаных бетонов // Бетон и железобетон.- 1977. -N11. - С. 26-27.
- 109.** Брауде Ф.Г., Османов С.А., Голубенков В.А. Виброударное формование изделий из песчаного бетона // Бетон и железобетон. - 1982. - N 3. - С. 30-31.
- 110.** Македон, Н.И., Калеченко В.Г. Ударно-вибрационная технология изделий из песчаного бетона //Бетон и железобетон. - 1980. - N 2. - С. 15-16.
- 111.** Саталкин А.В. Исследование свойств прессованного бетона // Труды института бетонов. - Л., 1931. Вып. 8.
- 112.** Саталкин А.В., Сенченко В.А., Комохов П.Г. Уплотнение бетонных и тонкомолотых смесей методом вибропрессования и проката /7 Тр. ЛИИЖТ. - Л, 1962. Вып. 200. С. 5-39.
- 113.** Саталкин А.В. Изменение структуры и свойств цементного камня и бетона при твердении их под нагрузкой // Труды совещания по химии цемента, - М., Госстройиздат, 1956, - 124 с.
- 114.** Саталкин А.В, Исследование свойств прессованного бетона //Тр. НИШЕ. 1931. Вып. 8, - 40 с.
- 115.** Десов А.Е. Вибрационные площадки, Научные сообщенияЦНИИСП, вып. 7. X.: 1953. С. 25-29.
- 116.** Десов А.Е. Основные вопросы технологии вибропрокатного бетона. - Тр. НИИЖБ. М.: 1961, вып. 20. - 195 с.
- 117.** Десов А.Е. К теории вибрации бетона, Сб."Технология бетона", по ред. проф. Скрамтаева Б.Г., ОНТИ, 1937.- 75 с.

- 118.** Десов А.Е. Вибрированный бетон. М.: Стройиздат, 1956. - 229 с.
- 119.** Десов А.Е., Бахрушева А.И. Дисперсное армирование бетона //Тр. НИИЖБ. - 1974, вып. 16. С. 82-101.
- 120.** Десов А.Е. Внутреннее вакуумирование монолитного и сборного железобетона // Строительная промышленность, 1950. - N 12. - С. 19-20.
- 121.** Десов А.Е. Внутреннее вакуумирование монолитного и сборного железобетона // Строительная промышленность. - 1954. - N 10. - С. 16-17.
- 122.** Десов А.Е. Свойства вакуумбетона //Строительная промышленность. - "1940. - N 8, - С. 6-8.
- 123.** Десов А.Е. Изготовление железобетонных пустотелых элементов вибрированием, вакуумированием и прессованием //Строительная промышленность. - 1948. - N 12.С. 9-10.
- 124.** Десов А.Е., Гершберг О.А. Вакуумбетон. - М.-Л.: Госстройиздат, 1940. - 144 с.
- 125.** Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1961. - 163 с,
- 126.** Ахвердов И.Н. Возведение каленных сооружений из раз дельной бутовой кладки. - М.: Стройиздат, 1952. С 18-21.
- 127.** Ахвердов И.Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы. - М.: Стройиздат, 1967. - 164 с.
- 128.** Ахвердов И.Н., Маргулис Л.Н. Неразрушающий контроль качества бетона по электропроводности. - Минск.: Наука и техника, 1976. - 174 с.
- 129.** Ахвердов И.Н, Основы физики бетона, - М.: Стройиздат 1981. 464 с,
- 130.** Ахвердов И.Н., Бензарь В.К. Теоретическое обоснование процесса твердения портландцементных вяжущих /7 ДАН БССР. - 1963. - Т. 13. - N 11. - С. 1001-1004.
- 131.** Фрейоине Е. Переворот в технике бетона. /Пер, с 1 франц. ОНТИ. М.; 938. - 86 с,

- 132.** Попов А.Н., Мамонтов И.И., Ционский А.Л. Производство железобетонных напорных труб вибропрессованием. Л.: 1967. – 256 с
- 133.** Королев Н.Е. К вопросу станков для массового производства бетонных и железобетонных труб //Бетон и железобетон. - 1973. - N 3. - С. 9-10.
- 134.** Мелихов В.И., Маврин К.Ф., Глузман М.А. О выборе рационального способа производства железобетонных низ-конапорных труб //Бетон и железобетон. - 1980. - N 2. - С. 20-21.
- 135.** Мчедлов-Петросян О.П., Вандаловский А.Г., Ладыженский В.Н. Бетонные трубы для водохозяйственного строительства, М.: Стройиздат, 1971. - 96 с.
- 136.** Попов А.Н., Макаров П.А. Оборудование для производства бетонных и железобетонных труб. - М.: Машиностроение, 1965. - 184 с.
- 137.** Попов А.Н. Бетонные и железобетонные трубы. - М.: Стройиздат, 1973. - 269 с.
- 138.** Борщевский А.А., Ильин А.С. Механическое оборудование для производства строительных материалов и изделий. -М.; Высш. шк., 1987. - 368 с.
- 139.** Казарин С. К., Биэин Е.С., Пономарев В.П. Технологические линии по производству бетонных и железобетонных труб методом радиального прессования //Строительные и дорожные машины. - 1980. - N 10. - С. 10 - 13.
- 140.** Соломатов В.И. Технология полимербетонов и армополимербетонных изделий. - М.: Стройиздат, 1985.- 142 с.
- 141.** Кааарин С.К. Станок СШ-542 для производства железобетонных колец //Строительные и дорожные машины. 1984.- N6. - С. 17-18.
- 142.** Пономарев В.П., Казарин С.К. Технологические линии и оборудование по производству бетонных труб и колец методом

радиального прессования //Бетон и железобетон. <- 1977. - N 10. - С. 31-34.

143. Гарнец В.Н.Рюшин В,Т, К вопросу определения режимов роликового формования // Реология бетонных смесей и ее технологические задачи.- Юрмала, 1982. С. 348-350.

144. Гирский В.А., Мокров А.А. Технологическая линия для производства плитных изделий //Строительные и дорожные машины. - 1985. - N 12. - С. 12-13.

145. Лукьянов А.С., Грайфер А.А. Производство железобетонных труб диаметром 800-1200 мм способом радиального прессования //Промышленность сборного железобетона, серия 3, вып.4.- М.: ВНЖЗСМ, 1980. С. 9-13.

146. Мелихов В.И., Грайфер А.Г. Производство бетонных и железобетонных труб' способом радиального прессования. ВНИМЭСМ, 1981. - 61 с.

147. Ахвердов И.Н., Бензарь В.К. Теоретическое обоснование процесса твердения портландцементных вяжущих //7 ДАН БССР. - 1963. - Т. 13. - N 11. - С. 1001-1004.

148. Гершберг О.А., Симонов М.З. Изготовление пустотелых балочных настилов с применением вакуумирования //Бюллетень строительной техники.- 1950.- N 12.- С. 18-21.

149. Гордон С.С. Вопросы внедрения вакуумбетона в производство //Бюллетень строительной техники.- 1948.N 8. - С. 25-28.

150. Зинченко В.С, Эффективность вибровakuумного формования железобетонных изделий //Строительные материалы и конструкции. - 1986. - N 3. - С. 25-26.

151. Ахвердов И.Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы. М.: Стройиздат, 1967. - 164 с.

- 152.** Розенфельд С.Е., Новиков П.Г., Ключнев Н.И., Савейко В.Н, Основы центробежного литья. Машгиз,1947.- 195с.
- 153.** Соколов В.И. Современные промышленные центрифуги. - Машгиз, 1961. - 57 с..
- 154.** Водопровод, канализация, теплофикация // Сборник трудов Московского института коммунального строительства. Вып. 1. Изд. Наркомхоза РСФСР, 1940. - 173 с.
- 155.** Гениев Н.Н., Сироткин В.П., Абрамов Н.Н. Опыты с центробежными железобетонными трубами. - М.: Госстройиздат. - 127 с.
- 156.** Овсянкин В.И. Железобетонные трубы для напорных водопроводов. - М.: Стройиздат, 1971, - 318 с.
- 157.** Файнер М.Ш. Ресурсосберегающая модификация бетона. - Черновцы: Прут, 1993. - 151 с.
- 158.** Хасанов Б.Б. Технология высокопрочного бетона при изготовлении неармированных труб методом виброударного прессования / Разд. 1. Научно-технического отчета по теме: "Организация производства бетонных неармированных труб диаметром 1,0 м", ТИИИМСХ. - Ташкент, 1987. С. 7-20.
- 159.** Хасанов Б.Б. и др. Модификация бетонной смеси в процессе прессования // Ресурсосберегающие технологии бетонов в транспортном и гидротехническом строительстве: Межвузовский сб.науч. трудов ДГТУЖТ и ПГАСА Днепропетровск, 1995. Вып. 1. С. 17-18.
- 160.** Апарин И.Л., Исакович Г.А, о комплексном подходе к практике снижения материалоемкости в строительстве // Пром. строительство. - 1982. - N 7. - С. 15-18.
- 161.** Попкова О.М. Сборные железобетонные конструкции многэтажных зданий /Зарубежный опыт./ //Обзорная информация. Строительные материалы и конструкции. - 1980. - Вып. 7. - 65 с.

- 162.** Беликов В.А., Гуща Ю.П., Русанова Л.П. и др. Сборные железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. - М. : Стройиздат, 1979. - 184 с.
- 163.** Рекомендации по применению методов математического планирования эксперимента в технологии бетона. - М.: НИИЖБ, 1982. – 103 с.
- 164.** Технология изготовления сборных железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов. РСН 311-86/ Госстрой УССР. - К., 1987. – 36 с.
- 165.** Горяйнов К.Э. Счастный Л.Н., Свистун Г.В. Высокопрочный бетон для изготовления деталей шахтной крепи // Бетон и железобетон. - 1978. - N 3. - С. 25-26.
- 166.** Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: Высш. шк., 1987. - 416 с.
- 167.** Вандаловский А.Г., Учингуо Д.А. Улитина Г.А. Бетонные трубы ротационного осевого прессования // Бетон и железобетон. - 1979, - N 12. - С. 15-16.
- 168.** Влещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. - Минск: "Наука и техника", 1977. - 232 с.
- 169.** Michaelis W. Involuta later in alte veritas // Chemiker – Zeitung. – 1893. – Bd.2, N 69. -3. 217.
- 170.** Довжик В.Г., Дорф В.А., Петров В.П. Технология высокопрочного керамзитобетона. - М.: Стройиздат, 1972. - 136 с.
- 171.** Глуховский В.Д., Кривенко П.В., Румына Г.В. и др. Производство бетона и конструкций на основе шлакощелочных вяжущих. - К.: Будхвельник, 1988. - 184 с.
- 172.** Луховский В.Д., Кривенко П.В., Старчук В.Н. и др. Шлакощелочные бетоны, - К.: Вища школа, 1981, - 224 с

- 173.** Рунова Р.Ф., Фунда Ю. Активность щелочных пуццолановых портландцементов //Строительные материалы и конструкции. - "1990. - N 4. - С. 9-10.
- 174.** Рыбьев И.А. К вопросу соответствия свойств материалов оптимальным структурам //Бетон и железобетон. - 1984. - N 11 - С. 27-29.
- 175.** Потураев В.В., Сысоев О.М., Соловьев Г.К. и др. Тяжелые полимербетоны на основе метилметакрилата //Бетон и железобетон. - 1983. - N 9. - С. 17-19,
- 176.** Баженов.Ю.М. Технология бетона. - М.: Высш. шк.,1987. - 416 с.
- 177.** Угинчус Д.А. Высокопрочный цементный бетон, наполненный полиметилметакрилатом //Повышение эффективности, качества бетона и железобетона. - Харьков, 1977. С. 34-36.
- 178.** Кирилишин В.П. Кремнебетон. - К.: Будхвельник, 1975.110 с.
- 179.** Десова.Е., Бахрушева А.И. Дисперсное армирование бетона //Тр. ИИЖБ. - 1974, вып. 16. С. 82-101.
- 180.** Рабинович Ф.Н. Дисперсное армирование бетона. - М.: Стройиздат, 1989. - 175 с.
- 181.** Рагульскене В.Л, Виброударные системы, - Вильнюс, Минтис, 1974,- 173 с,
- 182.** Влещик Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и прессвакуумбетона. - Минск:"Наука и техника", 1977. - 232 с.
- 183.** Ахвердов И.Н, Основы физики бетона, - М.: Стройиздат 1981. 464 с,
- 184.** Бутт Ю.М. Рашкович Л.Н. Твердение вяжущих при повышенных температурах. - М.: Стройиздат, 1965. - 222 с.
- 185.** Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцемент. - М.: Стройиздат, 1974. С. 229-320.
- 186.** Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. - М.: Стройиздат, 1966. - 208 с.

- 187.** Ратинов В.Б., Лавут А.П. Вывод уравнений кинетики гидратации при твердении вяжущих веществ //Сб. трудов НИИЖБ. - М.: Госстройиздат, 1962. Вып. 6.132-137.
- 188.** Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетона. - М.:Стройиздат, 1973. - 207 с.
- 189.** Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. - М.-Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1974. - 79 с.
- 190.** Чураев Н.В. О расчете констант Гамакера для тел, взаимодействующих через прослойки жидкости //Коллоидн. ж. - 1972. - Т. 34, - Вып, 6. - С. 959-963.
- 191.** Krupp H. Particle adhesion. Theory and experiment // Advances Colloid Interface Sci , - Bd. 1, 1967.- S.111.
- 192.** Manfred O. Uber tntluften betonvacuum-beton //Zement-1935, N 28, - V.24.
- 193.** Vacum – Hartbeton – Boden-/38/Fussbodern – ZTG.,1984, N 5, S. 107-110., ТАЕ,
- 194.** Michaelis W. Involuta later in alte veritas //Chemiker – Zeitung. – 1893. – Bd.2, N 69. -3. 217.
- 195.** Байков.А.А.Собрание трудов. - М.: Изд. АН СССР, 948.Т. 5. С. 20-38.
- 196.** Le Chatelier H. Cristalloids agaist colloids in the theory of cement //Transactions of the Faraday Soc. – 1919. –V. 14. Part. 1 – Н.47.
- 197.** Сегалова Е.Е., Ребиндер П.А. Современные физико-химические представления о процессах твердения минеральных вяжущих веществ //Строительные материалы. -1960. - N 1. - С. 21-26.
- 198.** Полак А.Ф. Элементарные процессы твердения мономинеральных вяжущих веществ //Вопросы строительствапредприятий нефтепереработки и нефтехимии в Башкирии: Сб. трудов БашНИИСтроя. - Уфа, 1963. Вып. 3.

С. 17-19.

199. Полак А.Ф. Кинетика гидратации и развития кристаллизационной структуры срастания мономинеральных вяжущих веществ типа полуводного гипса // Коллоидн. ж. 1960. - Т. 22. - Вып. 6. - С. 689-701.

200. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И., Рубина Н.М., Исследование кинетики кристаллизации гидросульфатоалюмината кальция // ДАН СССР. - 1962, - Т. 145, N 5. С. 1098 - 1103

201. Ranen A. Zum Wirkungsmechanismus von Betonflussigern auf der Basis von Wasserlöslichen Melaminharzen // Cement und Concrete Research - 1976. - N 1. - S. 57-61.

202. Волосян Л.Я. Тепло- и массообмен при термообработке бетонных и железобетонных изделий. - Минск.: Наука и техника, 1973. - 256 с.

203. Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий. - М.: Стройиздат, 1965. - 327 с.

204. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. - М.-Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1974. - 79 с.

205. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов. - М.: Стройиздат, 1971. - 224 с.

206. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцемент. - М.: Стройиздат, 1974. С. 229-320.

207. Volter M. Kinetik der Phasenbildung.- 1939. - S. 220.

208. Vacuum – Hartbeton – Boden-/38/Fussbodern – ZTG., 1984, N 5, S. 107-110., TAE,

209. Бартон В., Кабреран., Франк Ф. Рост кристаллов и равновесная структура их поверхностей // Сб. Элементарные процессы роста кристаллов. - М.г Изд. иностр. литературы, 1959. С. 30-45.

210. Варма А. Рост кристаллов и дислокация. - М.: Изд-во иностр. литературы, 1958. - 216 с.

- 211.** Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. - М.г Химия, 1975. - 512 с.
- 212.** Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами // ЖЭТФ. 1955. - Т. 29. - Вып. 1. С.94-110.
- 213.** Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. - М.: Стройиздат, 1974. - 173 с.
- 214.** Попов А. Н. Строительные материалы и детали. - М.: Стройиздат, 1966, - 117 с.
- 215.** Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций. - М.: Стройиздат, 1983. - 128 с.
- 216.** Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: Стройиздат, 1978. - 455 с.
- 217.** Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. - М.: Стройиздат, 1974, - 95 с.
- 218.** Высокопрочные бетоны // Тр. НИИЖБ. Вып. хN15. - М.: Стройиздат, 1963. - 95 с.
- 219.** Осмаков С.А., Брауде Ф.Г. Виброударные формовочные машины, - Л.: Стройиздат, 1976, - 128 с.
- 220.** Попов А.П., Ционский А.Л., Хрипунов В.А. Производство железобетонных напорных виброгидропрессованных труб. - М.: Стройиздат, 1979. - 273 с.
- 221.** Пунагин В.Н. Технология бетона в условиях сухого жаркого климата, - Ташкент: Фан, 1977.- 223 с.
- 222.** Сизов В.Н., Киров С.А., Попов Л.Н. Технология бетонных и железобетонных изделий. - М.: Стройиздат, 1972. - 518 с.
- 223.** Сорокер В.И., Довжик В.Г. Жесткие бетонные смеси в производстве сборного железобетона. - М.: Стройиздат, 1964. - 307 с.
- 224.** Ступаков Г.И. Бетоны на мелкозернистых песках для промышленного и гражданского строительства. - Ташкент : Фан, 1986 - 102 с.

- 225.** Malgorzata L., Modified pavement quality concrete as material alternative to concrete applied regularly on airfield pavements., *Materials Science and Engineering*, 2019 vol: 603 (3).\
- 226.** Huang K., Ding T., Xiao J., Singh A., Modification on Recycled Aggregates and its Influence on Recycled Concrete. Institute of Physics Publishing. 2019 vol: 323 (1)
- 227.** Baydjanov D., Abdrakhmanova K., Kropachev P., Rakhimova G., Modified concrete for producing pile foundations. Magazine of Civil Engineering. 2019 vol: 86 (2) pp: 3-10
- 228.** Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и желе-зобетонных изделий.-М.:Стройиздат,1984.-672с.
- 229.** Горчаков Г,И. Состав, структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат, 1976. - 145 с.
- 230.** Комар А.Г., Баженов Ю.М., Сулименко Л.М. Технология производства строительных материалов. - М.: Высш. школа, 1984. - 408 с.
- 231.** Мит-рац Л. В. Экономия цемента за счет совершенствования испытания бетона //Бетон и железобетон. - 1976.N 12. - С. 32-33.
- 232.** Пунагин В.Н., Савин Л,С,, Хасанов Б,Б,, Шишкш 0,0, Фиаико-аналитичний метод проектування складив бето-ну, - Дніпропетровськ. НВО "Захист", 1994. - 156 с.
- 233.** Ахвердов И.Н. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1961. - 163 с,
- 234.** B. Khasanov and T. Mirzaev, "Production of extra-strong concrete axisymmetric products," in E3S Web of Conferences, 2019, vol. 97, doi: 0.1051/e3sconf/20199706011.
- 235.** Макаров А.С. Центрифугирование бетонных смесей в сплошных и перфорированных формах .// - В кн.: Расчет и технология изготовления железобетонных напорных труб. - М.: Стройиздат, 1969. С. 56-71.

- 236.** Попов А.П., Ционский А.Л., Хрипунов В.А. Производство железобетонных напорных виброгидропрессованных труб. - М.: Стройиздат, 1979. - 273 с.
- 237.** Чеховский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. - М.: Стройиздат, 1970. - 97 с.
- 238.** Берг О.Я., Писанко Г.Н., Хромец Ю.П. Высокопрочный бетон. - М.: Стройиздат, 1971. - 208 с.
- 239.** Хромец Ю.Н., Щербаков Е.Н. Опыт нормирования ползучести и усадки бетона в расчетах железобетонных конструкций // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Вып. 31. - М.-Л.: Энергия, 1966. С. 81-84.
- 240.** Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формования бетонных смесей. - Л.: Стройиздат, 1986. - 280 с.
- 241.** Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами. М.: Стройиздат, 1972. - 150 с.
- 242.** Файтельсон Л.А., Линарте П.П., Бриедис И.П. Опыт вибропоршневого формования сборных железобетонных конструкций, Рига: АН Латв.ССР, 1965. - 137 с.
- 243.** Никитин А.Д. Затраты энергии на обратимую и необратимую деформации бетонных смесей // Доклады XX научной конференции ЛИСИ, Л.: - 1962. С. 16-21.
- 244.** Сытник В.И., Глазкова С.В., Велик П.И., Язова Г.С. Исследование бетонов на высокопрочных цементах // В сб. "Высокопрочные бетоны". Киев, Будивельник, 1987. С. 18-19.
- 245.** Френкель И.М. Использование роста прочности бетона во времени для экономии цемента, НИИЖБ. Вып. 9. Госстройиздат, 1961, С. 122-127.

- 246.** Хасанов Б.В., Сайганов А.Я. Производство бетонных неармированных труб диаметром до 1,0 м для строительства закрытых коллекторов / Тр. ТИИИМСХ. - 1984. - Вып. 132. - С. 73-82.
- 247.** Bakhrudin Khasanov, Nikolai Vatin, Timur Mirzaev, Abdugani Suyunov and Mirzokhid Radjabov, Physicochemical fundamentals of modifying concrete mix and concrete, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1030 (2021) 012022 doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012022.
- 248.** Христианович С.А. О движении газированной жидкости в пористых породах. Прикладная математика и механика., т. V. Вып. 2, 1941. С. 115-120.
- 249.** Щелкачев В.Н., Ланчпк Б.В. Подземная гидравлика. Гостоптехиздат, 1949. - 210 с..
- 250.** Берг О.Я., Рожков А.И. Исследования неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений. Тр. ЦНИИС, вып. 70. М.: Транспорт, 1969.
- 251.** Писанко Г.Н. Исследование прочностных и деформативных свойств высокопрочных бетонов // Труды ДНИИС. Вып. 36. М.: - Трансжелдор издат, 1960. С. 88-91.
- 252.** Рзмачандран В.С. Применение дифференциального термического анализа в химии цементов. - М.: Стройиздат, 1977. - 407 с.
- 253.** Сытник В.И., Иванов Ю.А. Результаты экспериментальных исследований прочностных и деформативных характеристик бетонов марков 600-1000, - Киев.: Стройиздат, 1966 – 128 с.
- 254.** Френкель И.М. Использование роста прочности бетона во времени для экономии цемента, НИИЖБ. Вып. 9. Госстройиздат, 1961, С. 122-127.
- 255.** Hoestad E. Hanson N.W. and Me Henru D “Concrete stress distribution in ultimate Strength design” – AC169I, vol .27 , N 4, Dec. 1995./Proceedings, vol.521.P. 455-479.

- 256.** Jutzi W. Butrag zur Kenntnis der elektrischen Eigenschaften grobkolloider Aerosole. – Dusseldorf, 1954. – S. 56.
- 257.** Le Chatelier H. Cristalloids against colloids in the theory of cement //Transactions of the Faraday Soc. – 1919. –V. 14. Part. 1 – H.47.
- 258.** Patent Specification N 422445. Commonwealth of Australia.27.869/71.Glass Reinforced Cement /Brain A.R. – Publ. 13th April, 1972. - 9 p.
- 259.** Volter M. Kinetik der Phasenbildung.- 1939. - S. 220.
- 260.** Bakhrudin Khasanov, Nikolai Vatin, Timur Mirzaev, Abdugani Suyunov and Mirzokhid Radjabov, Physicochemical fundamentals of modifying concrete mix and concrete, IOP Conf. Series: MaterialsScienceandEngineering 1030 (2021) 012022 doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012022.
- 261.** B. Khasanov and T. Mirzaev, “Production of extra-strong concrete axisymmetric products,” in E3S Web of Conferences, 2019, vol. 97, doi: 10.1051/e3sconf/20199706011.
- 262.** Bakhrudin Khasanov, Nikolai Vatin, Temur Mirzaev, Abdugani Suyunov and Mirzokhid Radjabov, Analysis of the mode of squeezing out excess water for mixing concrete mixture in the process of peristaltic compaction, IOP Conf. Series: MaterialsScienceandEngineering 1030 (2021) 012021 doi:10.1088/1757-899X/1030/1/012021
- 263.** B Khasanov, N Vatin, Z Ismailova and T Mirzaev Physical modification of concrete mix and concrete. Materials Science and Engineering 883 (2020) 012205 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/883/1/012205
- 264.** B Khasanov, R Choriev, N Vatin and T Mirzaev The extraction of the water-air phase through a single filtration hole. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 883 (2020) 012206 doi:10.1088/1757-899X/883/1/01220

