

## ЭЛЕМЕНТЫ САМООРГАНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ «ПОДВИЖНАЯ БЕТОННАЯ СМЕСЬ – ВИБРАЦИЯ»

Кучеренко А.А., Кучеренко Р.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Предложен вариант синергетического подхода к проблеме виброуплотнения бетонных смесей, как системы, связанной с понятиями хаоса, самоорганизации и порядка.

Технологии виброуплотнения бетонных смесей посвящено много работ и казалось бы этот передел уже решен. Однако, четкой последовательности происходящих в ней процессов (при вибрации) в технической литературе нет. Задача технолога привести в колебание (разжижение, высокую подвижность) цементное тесто. А заполнитель уже имеет потенциальную энергию в виде сил гравитации (собственной массы), под действием которых возникнут процессы самоорганизации на самоуплотнение. Для осуществления этого, надо изучить поведение объекта (бетонной смеси), в окружающей среде (параметрах вибрирования).

Рассмотрим систему «цемент - вода затворения». Здесь единый пространственный каркас – вода, в которой дискретно размещены зерна цемента. До момента вибрации – это микрогетерогенная структурированная жидкость, состоящая из трех фаз: твердой, газообразной и жидкой.

(особенно цемента). В зоне контакта ионы разряжаются и нейтрализуют вновь открывшиеся неподеленные пары и активные поверхности. При добавлении ПАВ повышается толщина смазочного слоя, что способствует снижению сил трения между рядом расположенными поверхностями.

Еще в бетономешалке вода затворения, водные растворы активных и химических веществ относятся к группе жидких систем смазки (жидкостная смазка), допускающих контакт зерен заполнителя друг с другом. В результате этого могут добавиться мелкие продукты износа поверхностей твердых компонентов. Лавинообразная гидратация и снятие гидратированной пленки с зерен цемента повышают количество микродисперсной твердой фазы, а вновь открывшиеся поверхности цемента требуют еще большего количества адсорбционно и химически связанной воды. В итоге уменьшается количество свободной воды затворения. Создается менее пластичное

цементное тесто, исключая взаимный контакт зерен заполнителя. Такое тесто постепенно приобретает вязкопластические свойства (пластическая смазка). Перед вибрацией, очевидно, обе смазки присутствуют одновременно. Вода обеспечивает режим трения микрозаполнителя, а пластичное тесто – зерен заполнителя. Такое тесто уже обладает вязкопластическими свойствами. В состоянии изложенного цементное тесто (матрица) совместно с заполнителем подлежат вибрационным воздействиям. Цель – приблизить зерна заполнителя, находящегося в среде этого теста, на максимум друг к другу. И в момент вибрации, всего на несколько минут, мы обязаны цементное тесто рассматривать только как смазку: водную и пластическую. В процессе вибрации соотношение и качество этих видов смазок постоянно меняется, но в пользу последней.

Теперь рассмотрим систему «цементное тесто – виброуплотнение», т.е. поведение цементного теста в условиях параметров вибрирования как смазочного материала в пространстве между зернами заполнителей.

Схематический разрез прослойки цементного теста, в пространстве между двумя рядом расположенными зернами заполнителей, приведен на рис 1 а.

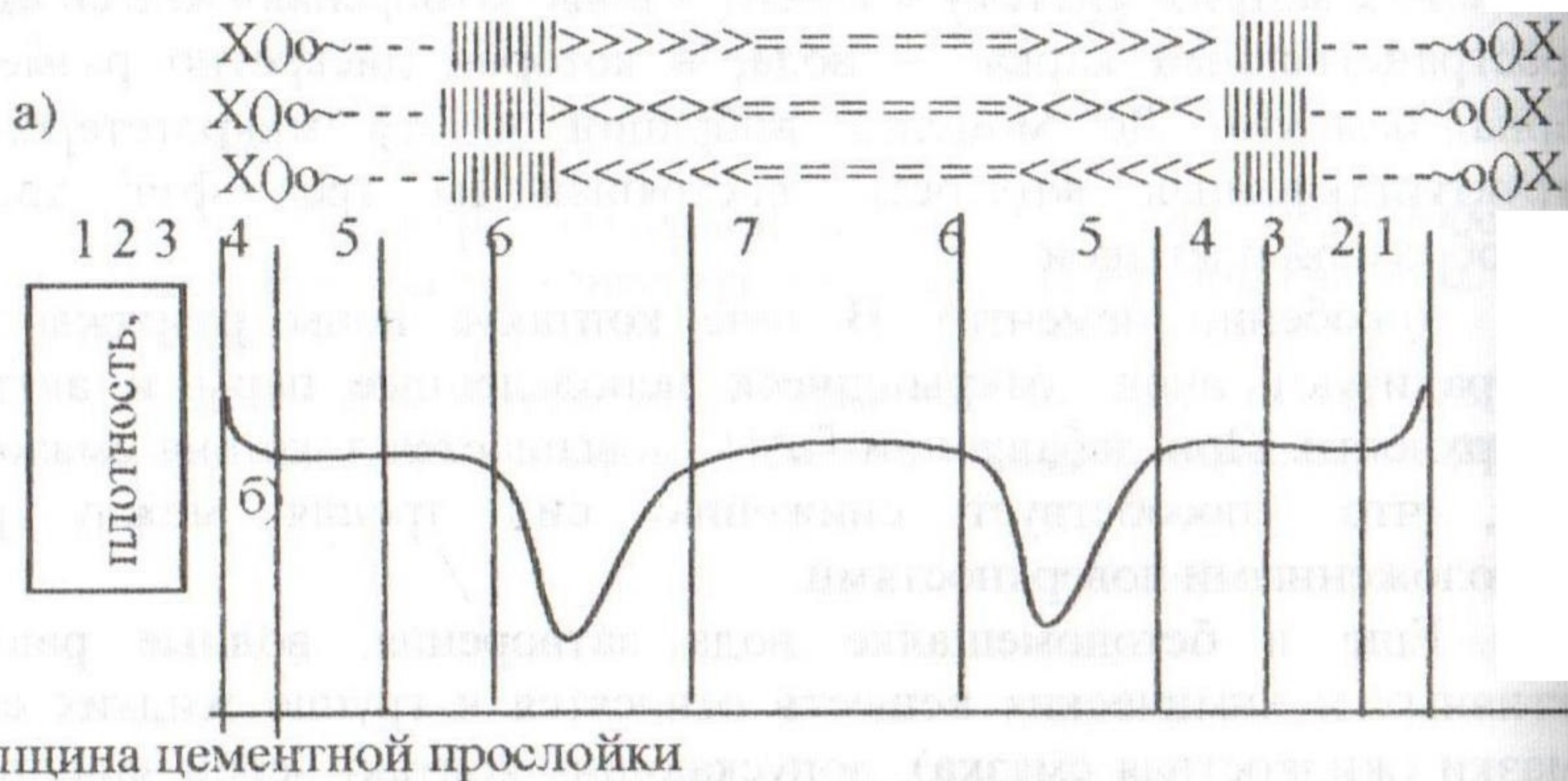


Рис. 1.

Структура заполнителя (1) гетерогенна. Ее химическая природа, при переходе от одного участка поверхности к другому, изменяется. Изменяется и свободная энергия, которой обладают молекулы поверхности (2). Удельный избыток поверхностной свободной энергии твердой фазы равен поверхностному натяжению равновесной изотропной поверхности. Наружные атомы, по сравнению с

внутренними, связаны менее прочно и находятся в состоянии повышенной химической активности. Они взаимодействуют с окружающей средой: адсорбируют воду затворения или ПАВ.

Адсорбированный монослой ПАВ (3) и полислой воды (4) обусловлен действием поверхностно активных сил. Адсорбционные свойства гетерогенной поверхности обеспечиваются физическими силами молекулярного сцепления. В случае адсорбции на раскрывшихся зернах цемента, она химическая. Адсорбированный слой ПАВ (если в состав смеси вводятся такие вещества) мономолекулярен. Он способен сообщить соседним слоям воды ориентацию. Так, после монослоя полярных молекул возникает граничный слой (5), в котором молекулы воды расположены не беспорядочно, а правильно ориентированы. Как правило, это граничная, пристеночная фаза жидкости. Наши опыты показывают, что при вибрации в мензурке поверхность воды приобретает форму мениска: максимальная высота – у стенок мензурки, минимальная – в центре. Это свидетельствует о разной плотности каждого микрослоя воды. Для более пластичных или вязких систем изложенная закономерность сохраняется. Очевидно, такое явление возможно за счет сил трения о стенки сосуда, которые складываются из касательной составляющей сил взаимодействия поверхности и сопротивления вязкому сдвигу. По мере вибрации (лавинообразное второе диспергирование зерен цемента) тесто становится все более вязкопластичным. В нем начинает проявляться послойное скольжение, а не только относительно поверхности и формы.

У подвижных бетонных смесей с плавающей структурой механизм передачи вибрации следующий. Вибровозбудитель приводит в колебание форму, которая передает их пластичному тесту. В нем создаются волновые колебания от низа кверху (при вертикально-направленном колебании). Волновые колебания – это волнообразное (максимум-минимум) колебание плотности теста. Последнее встречает на своем пути неподвижный заполнитель. Многократно ударяясь в него, пластичное тесто на толщину величины амплитуды колебаний разжижается. Даже граничный слой как бы разрыхляется, силы продольной когезии между молекулами исчезают. Происходит дезориентация адсорбированных молекул и понижается плотность зон (3,4). Это способствует гравитационному перемещению зерен заполнителя и облегчает их сближение и более плотную упаковку. Под действием сил гравитации, в менее плотной среде теста (смазки) заполнитель продвигается вниз («тонет»). При этом траектория движения его самоорганизована так, как необходимо для

восстановления равновесия. Так, если масса сухого заполнителя 25 г, то извлекаемого из цементного теста под действием вибрации – 15 г, а полностью извлеченного с налипшим цементным тестом 35 г. Значит, силы трения гранитного щебня в среде цементного теста или выталкивающая сила вибрационного воздействия составили 40%.

В сильной мере уплотнению бетонной смеси способствует и газообразная (скорее воздушная) фаза. В достаточно большом количестве ее поставляет цемент. Диспергирование его (адсорбционное, химическое, механическое) – это и выход воздуха из раскрывшихся от ультра- до макро пор и капилляров. Если считать, что истинная плотность цемента 3,1, а насыпная - 1,1... 1,3 г/см<sup>3</sup>, то межзернового воздуха в сухом цементе 55... 65%.

Существует три этапа: зарождение пузырьков, их рост и удаление из смеси. В момент вибрации наступает стадия самоорганизации в сторону упорядочения размеров, связи (с другими компонентами) и направления перемещения воздушной фазы. Зарождение может быть искусственное и естественное. Искусственное – при введении воздухововлекающих и воздухообразующих добавок. Естественное – растворимый в воде кислород и воздух адсорбированный, в порах и капиллярах, вовлеченный и заземленный. Рост – за счет преодоления энергии связи молекул воздуха и воды, молекул воздуха и цементного теста и сил трения в них. Удаляется воздух из бетонной смеси практически только в процессе вибрации. В этом один из недостатков литых бетонных смесей: в них воздух остается.

До вибрации цементное тесто характеризуется определенной вязкостью, количеством и размером воздушных пузырьков. Здесь давление воздуха в пузырьке уравнивается силами поверхностного натяжения и вязкого трения. В момент вибрации, из-за разжижения, вязкость теста падает. Давление в пузырьках превосходит силы поверхностного натяжения и уже менее вязкого трения. Они начинают перемещаться и соединяться в более крупные пузырьки, но с давлением выше каждого из них. Должен существовать интервал активной, динамической вязкости цементного теста, но при определенных (для каждой смеси оптимальных) параметрах вибрирования. Это отрезок времени между началом вибрирования и вязко текучего состояния смеси до потери этого состояния. Дальше вибрация бесполезна, но этот отрезок можно продлить и смесь еще больше уплотнить, если изменить предыдущие параметры вибрирования (частоту, амплитуду, пригруз) и т.д. Именно в этот отрезок времени воздух уходит из смеси, а после – фиксируется в ней.

В подвижных бетонных смесях этот интервал длиннее, у жестких – короче. В подвижных смесях происходит плавный и постепенный переход от вязко текучего до вязко жесткого состояния. Это позволяет большинству воздушных пузырьков покинуть бетонную смесь.

Почему в вибрируемой бетонной смеси воздушные пузырьки приобретают движение? В процессе вибрации между двумя рядом расположенными зернами заполнителя в цементном тесте возникает разная плотность: максимальная в центре, т.е. в зоне ламинарного потока (7), в зоне устойчивого равновесного состояния и минимальная – в зоне бифуркационного потока (6), т.е. в зоне неустойчивого равновесного состояния, рис 1б. Здесь бифуркация – это раздвоение или качественная перестройка ламинарного потока в более сложный бифуркационный (быть может, турбулентный) под действием вибрации. Приграничная с заполнителем зона изначально разжижена и более текуча, чем ламинарная. Поэтому плотность цементного теста в ней ниже, чем в последней. Воздушные пузырьки, образовавшиеся в зоне ламинарного потока, и выросли до такого размера пор, что возникло избыточное давление, легко прорывают оболочку цементного теста со стороны бифуркационного потока, где плотность цементной оболочки ниже, покидают ее и перемещаются в сторону бифуркационного потока. В том и раздвоение, что в цементном тесте бифуркационной зоны увеличивается количество воздушной фазы. Потому и плотность ниже, что в единице объема такого цементного теста (матрицы) повышенное количество воздуха. С укрупнением воздушных пузырьков их энергетический потенциал возрастает и возможность прорыва оболочки усиливается. Потому они способны преодолеть не только сопротивление оболочки по горизонтали, но и по вертикали (плюс силы антигравитации). Кроме того воздух выжимается и более тяжелыми, уплотняющимися твердыми компонентами смеси. Следовательно, воздушные пузырьки в основном скапливаются в зоне бифуркации (вокруг заполнителя) в зоне контакта с опалубкой, а затем по ним, огибая заполнитель, и двигаясь вдоль бортов формы уходят из вибрируемой бетонной смеси.

Жидкая фаза вначале совместно с воздушной, а затем и вслед за ней перемещается по тем же путям следования. Во внутренних слоях уплотняемой смеси уменьшается количество свободной воды затворения, В/Ц и толщина цементных прослоек между зернами заполнителя. От этого бифуркационный поток уже в тонкой цементной оболочке вновь превращается в ламинарный. Последний более предпочтителен для образования цементной прослойки твердеющего бетона. Именно в этот момент технолог должен прекратить

вибрирование. Но вполне возможно, что можно и дальше вибрировать, но это уже будет бесполезным.

Очевидно, чем крупнее заполнитель и подвижнее матрица, тем больше разжижена бифуркационная зона. Это плохо, так как эта зона формирует цементную прослойку. Кроме того, чем крупнее заполнитель, тем менее подвижен он в среде цементного теста, т.е. труднее вовлекается в процесс вибрации. Вибрирующее цементное тесто и неподвижный заполнитель – система малоэффективна. Уменьшая размер крупного заполнителя (вплоть до перехода к мелкозернистым бетонам) возникает система, более четко реагирующая на параметры вибрирования и лучше уплотняемая. Представляется, что только мелкозернистая смесь, приготовленная в высокоскоростных смесителях (возможно с измельчением части песка и перевода его в силикагель) и более четко реагирующая на параметры уплотнения и упаковки твердых компонентов приведет нас к высокопрочным бетонам. При этом силикагель надо затворять бетоном на известковой воде, в которой  $\text{CaO}$  столько, сколько необходимо  $\text{SiO}_2$ -гель перевести в гидросиликаты нужной основности.

При этом воздушная фаза выполняет роль: уменьшения плотности того сечения смазки, в котором она находится; уплотнения тех зон, которые она покинула; улучшает смазку для зерен твердых компонентов; образует полости под зернами заполнителя, а потому нужно работать в области обеспечения оптимальной формы последних. Воздушная фаза может и должна покинуть бетонную смесь и уйти в атмосферу, но часть ее может остаться заземленной в составе бетонной смеси, что, очевидно, зависит от параметров вибрирования, вязкости теста, формы твердых компонентов и других факторов.

Гидродинамика цементного теста может проявиться в том случае, если геометрия рядом расположенных поверхностей зерен заполнителя такова, что существуют сужающиеся зазоры, рис 2. В них цементное тесто может заклиниваться, особенно при вертикально направленных колебаниях. Если такая полость полностью заполнена цементным тестом, то, при соответствующем режиме вибрации и при ударе вверх, поток цементного теста создает подъемную силу (минус сила гравитации зерен), а при обратном - удар вниз (плюс силы гравитации зерен).

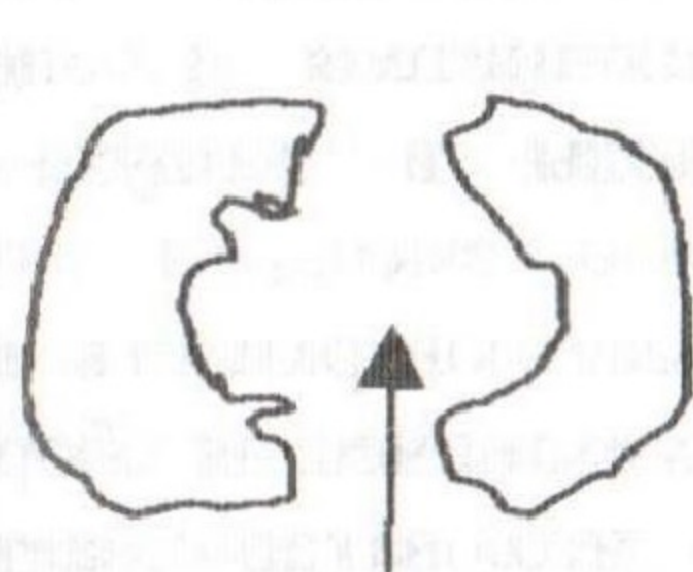


Рис 2

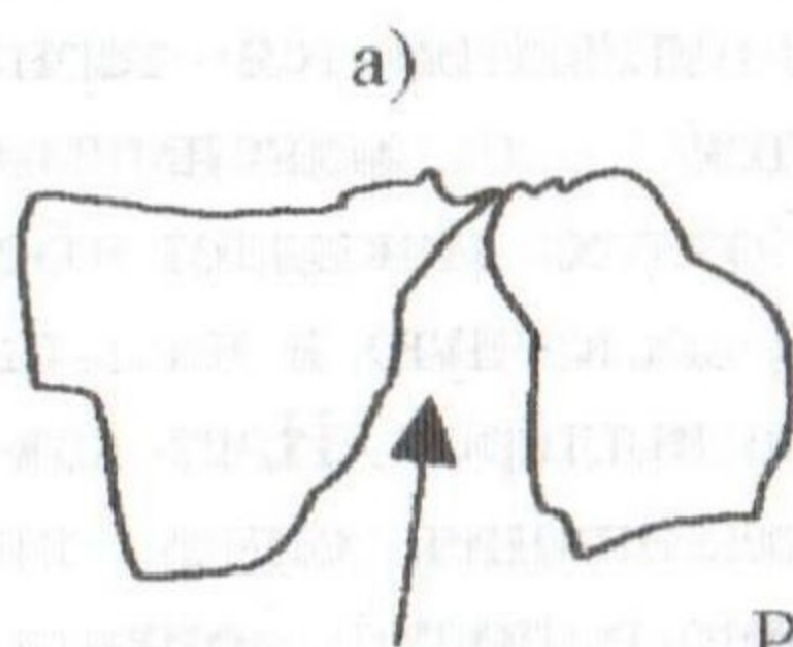
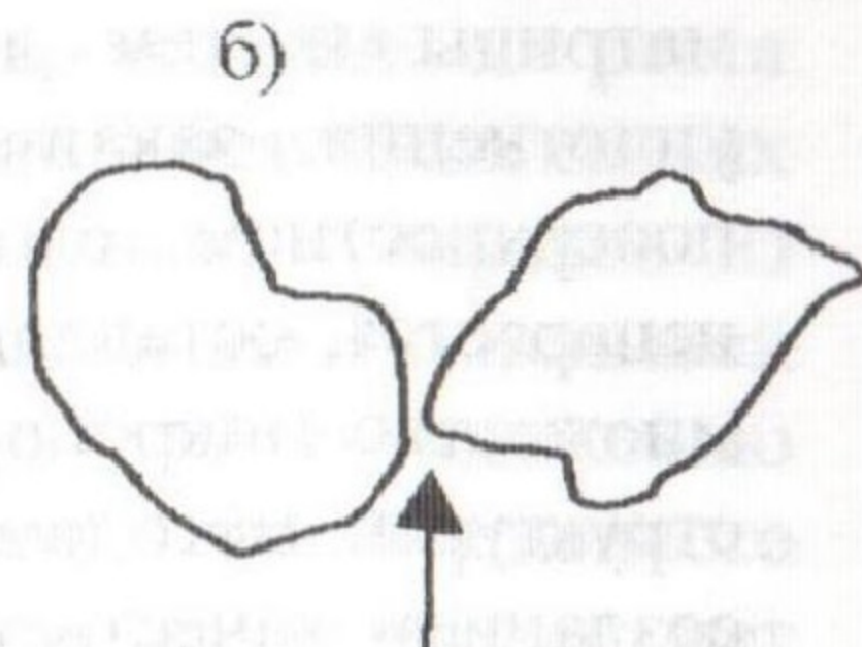


Рис 3.



Кроме того, гидродинамика цементного теста может возникнуть и тогда, когда поверхности зерен заполнителя расположены относительно направления колебания так, что образуют каналы, сужения и расширения, рис 3. Тогда цементное тесто, перемещаясь вверх-вниз и заполняя эти каналы, выполняет роль микро- или макроклиньев. Это способствует диспергации зерен цемента и проворачиванию зерен заполнителя, что создает силы трения качения. Опять же, способствуя укладке и уплотнению заполнителя, так как силы трения качения в десятки раз меньше сил трения скольжения.

Таким образом, в основе виброуплотнения лежит хаос (в разнородности геометрии твердых компонентов, качества матрицы, параметров вибрирования и др.), который надо упорядочить, чтобы получить нужный результат. При виброуплотнении бетонной смеси именно из хаоса рождается порядок. В хаосе постепенно зарождаются устойчивые структуры, так как идут самоорганизующиеся процессы. Самоорганизация присутствует всегда только там, где есть хаос и где еще нет порядка (нужного результата, т.е. свежесформованного бетона). Поэтому единственное, что остается технологу – это научиться управлять хаосом, а результатом этого будет качественный свежесформованный бетон. Хотя даже в самом хаосе зарождается, существует и укрепляется порядок: в создании смазочного слоя из цементного теста, во все более упорядоченном движении воздушной фазы, во взаимодействии воды с твердыми компонентами (адсорбция, диффузия, синтез и др.). Часть приемов упорядочивания хаоса в подвижных бетонных смесях нам известны (введение добавок, модификация твердых компонентов и др.), другая (параметры вибрирования) – изучены недостаточно.

Условно первая зона уплотненной смеси - у дна формы (опалубки), за ней - следующая и т.д. В первой зоне отжимается излишняя вода затворения и воздух, перемещаясь в вышележащую вторую зону, где еще добавляются, отжатые твердыми компонентами, вода и воздух и т. д. Чем больше слоев уплотнения, тем больше

свободной воды и воздуха и тем ниже плотность единицы объема матрицы и тем лучше уплотняются зерна заполнителя. Процесс уплотнения заканчивается с максимумом воды и воздуха в поверхностном слое. Воздух покидает бетонную смесь, а вода испаряется, оставляя разрыхленную и шелушащуюся поверхность или множество микропор и капилляров. Идет как бы механическая сборка структуры методом наслаивания снизу вверх, что заканчивается созданием качественно иного полуфабриката – свежесформованного бетона. При этом заполнитель проходит три состояния: индукционное - с минимальной скоростью перемещения - в уложенной в форму (опалубку) смеси, гравитационное - с максимальной скоростью передвижения - в момент вибрации и состояние «покоя» - в конце вибрации, в свежесформованном бетоне. Что касается цементного теста, то после виброуплотнения начинается процесс самоорганизации в сторону его самосовершенствования, т.е. превращения в камень. Можно говорить о структурной приспособляемости бетонной смеси к условиям окружающей среды (параметрам вибрирования), следствием чего изменяется ее же уровень: переход от менее к более уплотненным смесевым структурам. Да и сами параметры вибрирования изменяются по мере воздействия их на все более плотную структуру смеси в форме. Бетон рождается (синтез, гидратация, самоорганизация) в форме (опалубке), а умирает (антисинтез, коррозия, самоуничтожение) в окружающей среде.

Оседают и упаковываются зерна заполнителя за счет наличия: сил гравитации их; воздушной фазы в цементном тесте и за счет этого разной плотности его; бифуркационных и, быть может, турбулентных потоков; гидродинамики цементного теста. Заполнитель как бы ждет от цементного теста достойной смазки, он пассивен. И только цементное тесто обладает свойством тиксотропии, связующего, твердеющего материала, обеспечивающего прочность бетона. Поэтому для подвижных бетонных смесей с плавающим заполнителем конструирование вибраторов и назначение их параметров должно быть связано не с крупностью зерен заполнителя, а с качеством цементного теста (матрицы, смазки, в перспективе цементной прослойки). При этом надо отметить, что существуют методы, облегчающие движение заполнителя. Так, в наших опытах коэффициент внутреннего трения гидрофобизированного керамзитового гравия при движении в воде ниже на 54% (14,6 вместо 22,5) сравнительно с обычным, в вибрируемом цементном тесте – на 71% (32 вместо 54,7) и в вибрируемом цементно-песчаном растворе – на 57% (81 вместо 128,4).



Параметры вибрирования способствуют: снижению вязкости смазки (матрицы) в целом; организации, зарождения и роста воздушных пузырьков, что минимально обеспечено в бетонных смесях без вибрации; самоорганизации движения воздушных пузырьков из зон смазки с большей (ламинарный поток) в зону смазки с меньшей (бифуркационный поток) плотностью, что способствует снижению вязкости последней и повышению скорости гравитационного перемещения зерен заполнителя; удалению воздуха из смеси, чего нет в безвибрационных смесях; минимальному количеству заземленного воздуха.

По мере сближения зерен заполнителя в процессе вибрации происходят следующие изменения: уменьшается толщина цементной прослойки; исчезает зона ламинарного потока; усиливается гидродинамика бифуркационного потока за счет объединения двух потоков у двух, рядом расположенных зерен заполнителя; по окончании вибрации цементная прослойка формируется из бифуркационного потока, т.е. должно быть, прочности ниже, чем если бы она создавалась ламинарным потоком.

Рассмотрена, систематизирована и, с учетом гидродинамики, изложена самоорганизация твердой, жидкой и газообразной фаз в системе «бетонные смеси – вибрация». Рекомендовано для подвижных бетонных смесей назначать параметры вибрирования, направленные на улучшение качества смазки (цементного теста), а не приведения в движение (в резонанс) заполнителя. Схематически рассмотрен механизм действия вибрации на цементное тесто как смазочного материала между гравитационно уплотняющимися зернами заполнителя.)

Несколько иной подход к рассматриваемой проблеме и ряд спорных положений требуют практического подтверждения или опровержения изложенного.

#### **Литература:**

1. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. – М.: стройиздат, 1981. – 464 с. ил.
2. Бондаренко О. Я. О самоорганизации. В кн. «Фундаментальные проблемы естествознания и техники». Часть 2. – С.-П.: 2002.
3. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М.: машиностроение, 1985. 424с. ил.
4. Ребю П. Вибрирование бетона. – М.: стройиздат, 1970. 256с.