

БЕТОННЫЕ СМЕСИ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ БЕТОНОНАСОСАМИ И ВАКУУМНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*И. А. Соколов, д. т. н., проф., А. Н. Березюк, к. т. н., проф.,
А. Р. Аббасова, магистр*

Ключевые слова: *заполнители, бетонная смесь, бетоны, бетононасос, вакуумирование, вакуумбетон, прочность*

Постановка проблемы. Бетонные смеси, оптимальные по составу для транспортирования бетононасосами, не являются оптимальными для обеспечения требуемых прочностных показателей при возможно минимальном расходе цемента. Перемещаемые трубопроводным транспортом бетонные смеси характеризуются повышенным содержанием мелкого заполнителя, что влечет за собой повышенный расход цемента для обеспечения требуемого класса бетона в сравнении с составами бетонных смесей, которые транспортируются обычными способами и являются оптимальным и по составу для уплотнения, например, вибрационным способом.

Анализ публикаций. Требования к бетонной смеси для транспортирования бетононасосами всегда содержат ограничения по подвижности. Зарубежные нормы нередко регламентируют минимальную величину В/Ц при сравнительно узком диапазоне рекомендуемого расхода цемента. Эти ограничения основаны на том, что снижение водосодержания смеси обуславливает рост ее эффективной вязкости, приводящей к повышению гидравлических сопротивлений движению смеси по бетоноводу [1].

Подвижность бетонной смеси, транспортируемой бетононасосами с механическим приводом, обычно назначают не менее 7...10 см. Улучшение гидравлического режима движения смеси по бетоноводу при транспортировании ее насосами с гидроприводом с соответствующим снижением сопротивлений движению позволило резко снизить требования к минимальной подвижности смеси, назначая ее в пределах 4...6 см осадки стандартного конуса.

Казалось бы, повышая давление в рабочем цилиндре бетононасоса (что технически не представляет особой сложности), можно было бы снижать подвижность смеси и далее. Это, к сожалению, не так. Указанные величины подвижности соответствуют давлению в рабочем цилиндре бетононасоса порядка 5 МПа, что близко к максимально возможному давлению, воспринимаемому бетонной смесью без резкого повышения водоотжима. Дальнейшее увеличение давления приводит к частичному обезвоживанию смеси за счет выдавливания воды через манжеты рабочих цилиндров в малейшие неплотности уплотнений насоса и бетоновода. Если такой процесс начался, то образование пробки неизбежно, причем ликвидация ее повышением давления невозможна; смесь лишь утрамбуется сильнее [2; 5].

Определенные ограничения существуют и по верхнему пределу подвижности транспортируемых бетонных смесей (обычно 11...14 см). Более подвижные смеси могут расслаиваться при транспортировании, что ведет к образованию пробок. Повышение подвижности бетонной смеси сверх указанного предела возможно при одновременном увеличении предельного напряжения сдвигу растворной части смеси. Такие условия создаются, к примеру, при транспортировании бетонной смеси на мелких песках с большим содержанием фракций мельче 0,35...0,14 мм, а также при повышенных расходах цемента. Такие мероприятия препятствуют расслоению смеси.

Требования к гранулометрическому составу заполнителей и требования к цементам, используемым в бетонных смесях, транспортируемых бетононасосами как с механическим, так и с гидравлическим приводом, одинаковы. Желательно, чтобы максимальная крупность используемых заполнителей не превышала 0,33...0,4 диаметра бетоновода, т. е. для бетоноводов диаметром 100...150 мм максимальная крупность заполнителя не более 40 мм, а для бетоноводов диаметром 203 и 283 мм – не более 70 мм. Известны примеры подачи бетонной смеси с заполнителем крупностью до 70 мм по бетоноводам диаметром 180 мм [5].

Следует учесть, что для транспортируемых смесей количество заполнителя максимальной фракции не должно превышать 15...25 % от всей массы смеси заполнителей. Повышенное содержание крупной фракции возможно для жирных смесей. Меньшие сопротивления движению возникают при транспортировании смесей на гравии, чем на щебне.

При подборе песков следует обращать особое внимание на содержание мелких фракций (до 0,2 мм). Недостаток этих фракций, характерный, к примеру, для промытых песков, требует увеличения расхода цемента либо введения молотых добавок. В противном случае условия транспортирования ухудшаются из-за недостаточной смазки стенок бетоновода и повышенного водоотделения бетонной смеси. Считается, что суммарное содержание цемента и мелких фракций песка (0...0,2 мм) должно быть не менее 350 кг/м³.

Избыточное количество мелких фракций песка, а также присутствие пылевидных и глинистых частиц также вредно. В этом случае повышаются водопотребность и вязкость бетонной смеси, вызывающие рост сопротивлений движению смеси по трубопроводу. Для сохранения заданной подвижности смеси приходится увеличивать содержание в ней цементного теста. С подобной необходимостью пришлось столкнуться, например, при подборе для бетононасосов составов бетонных смесей на мелких песках на строительстве Чернобыльской АЭС [5].

Важным является правильный выбор доли песка в смеси заполнителей. Экспериментально доказано, что увеличение количества песка в бетонной смеси при постоянной ее подвижности снижает сопротивления движению в трубопроводе. Более того, С. Н. Алексеев показал, что даже при постоянном водоцементном отношении повышение доли песка в смеси заполнителей от 0,33 до 0,4 приводит к некоторому снижению напряжения сдвига [1].

Количество растворной составляющей в бетонной смеси должно обеспечивать необходимую раздвижку зерен крупного заполнителя. Растворная составляющая призвана при транспортировании бетонной смеси воспринимать и передавать давление. Недостаточная раздвижка зерен крупного заполнителя опасна передачей давления от насоса через каменный скелет, что ведет к заклиниванию и дроблению зерен щебня (гравия) с неизбежным лавинным ростом сопротивлений и образованием пробки.

Большинство фирм, выпускающих бетононасосы, приводят в технической документации оптимальную кривую гранулометрического состава заполнителей для бетонной смеси (рис. 1). По этой кривой оптимальная доля песка в смеси заполнителей (по массе) находится в пределах $r = 0,45...0,52$. Меньшие значения относятся к смесям на гравии, большие – на щебне. В случае повышенного содержания в смеси цементного теста количество песка можно уменьшить до $r = 0,36...0,38$ при обеспечении достаточного коэффициента раздвижки крупного заполнителя [5].

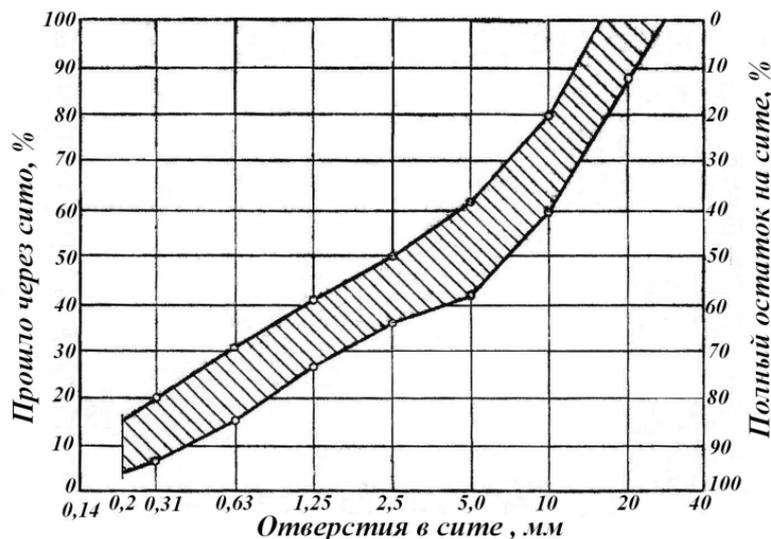


Рис. 1. Оптимальный гранулометрический состав заполнителя для бетонных смесей, перемещаемых трубопроводным транспортом

Необходимое количество цемента в бетонной смеси во многом определяется соображениями, изложенными выше в части содержания песка. Цементное тесто должно быть в количестве, достаточном для надлежащей раздвижки зерен песка с тем, чтобы давление от насоса передавалось через несжимаемую дисперсионную среду. Количество цементного теста не может быть увеличено путем дополнительного введения воды. Не говоря о неизбежном при

этом снижении физико-механических характеристик затвердевшего бетона, условия для транспортирования могут лишь ухудшиться. Причиной этого является отжатие от бетонной смеси воды, слабо связанной в непрочной структуре разжиженного теста, и неизбежная при этом передача давления на заполнители с ростом сопротивления движению и закупоркой бетоновода [4; 5].

Таким образом, рациональные составы бетонных смесей для транспортирования бетононасосами являются запесоченными. Известно, что смеси, которые содержат повышенный расход мелкого заполнителя, характеризуются повышенным расходом цемента в сравнении со смесями оптимального состава для укладки, например, самым распространенным вибрационным способом.

Цель работы разработать технологию укладки в опалубку монолитной конструкции бетонной смеси рационального состава для транспортирования бетононасосами, которая обеспечивает максимально возможную прочность бетона из таких смесей при заданном расходе цемента.

Результаты исследований. Для решения возникшей проблемы при возведении монолитных конструкций предусматривается применить вакуумирование, так как особенности состава и уплотнения бетонных смесей вакуумированием сводятся к следующему.

В процессе вакуумирования, вследствие удаления воды и уплотнения смеси, меняются реологические свойства бетонной смеси и ее состав (соотношение между жидкой и твердой фазами). Переменной величиной становится и степень заполнения пустот крупного заполнителя растворной составляющей; непрерывно изменяются состав и свойства самой растворной составляющей. Поэтому следует различать (и разграничивать) состав бетона, исходный (состав бетонной смеси до вакуумирования) и конечный – после вакуумирования (состав вакуумбетона).

Состав бетонной смеси, предназначенный для вакуумирования, должен обеспечивать:

- удобообрабатываемость и требуемую удобоукладываемость (в зависимости от конкретных условий могут применяться подвижные смеси с осадкой конуса от 2...3 до 10...12 см);
- нормальный ход процесса вакуумирования, т. е. извлечение избыточной воды и воздуха при соответствующем уплотнении смеси;
- заданные свойства вакуумбетона (при высокой его плотности, прочности, водонепроницаемости и пр.).

Каждому методу и интенсивности уплотнения соответствует свой оптимальный состав бетонной смеси. Метод вакуумирования имеет свои особенности. В соответствии с этим бетонная смесь, оптимальная для виброуплотнения, не может быть одновременно рациональной и при вакуумировании (или вибровакуумировании).

Если в процессе вакуумирования атмосферное давление через вакуумщик будет передано только на каркас («скелет») из крупного заполнителя, а не на растворную составляющую, то уплотнение бетонной смеси будет неполным. Это имеет место при недостатке растворной составляющей. Эффективное уплотнение достигается при условии, если давление от вакуумщика в процессе вакуумирования будет передаваться на растворную составляющую бетонной смеси. Из этого следует, что плотный вакуумбетон должен иметь «бесконтактное», базальное строение, а бетонная смесь должна содержать определенный (оптимальный) избыток растворной составляющей. При этом должно быть учтено, что в процессе вакуумирования изменяются состав и объем растворной составляющей. Иными словами, в вакуумбетоне должна быть увеличена доля песка (состав бетона «запесочен») аналогично составу бетонных смесей, транспортируемых бетононасосами.

Таким образом, отличительной особенностью вакуумбетона оптимального состава является его бесконтактное строение, обусловленное избыточным содержанием растворной составляющей за счет повышения доли песка. Для проверки этого предположения выполнены специальные исследования. Оптимизации подвергались соотношение между мелким и крупным заполнителем, подвижность бетонной смеси (параметры управления). За показатель эффективности (качества) приняты количество извлеченной воды при вакуумировании и прочность бетонов.

При выполнении исследований применяли следующие материалы:

- портландцемент М400 Криворожского цементного завода;
- песок днепропетровский (мелкий);

- щебень фракции 10...50 мм Рыбальского карьера.

Формовали образцы 15 × 15 × 7 см вакуумированием и вибрационным способом. Продолжительность вакуумирования составляла 8 мин при разрежении 0,7 (полный вакуум принят за единицу).

Правильный выбор соотношения между мелким и крупным заполнителями (П/Щ) является важным фактором качества и экономичности вакуумбетона. Для выявления характера зависимости основных показателей вакуумбетона от соотношения П/Щ и влияния последнего на ход процесса вакуумирования испытаны равноподвижные бетонные смеси (ОК = 3...5 см) состава 1 : 5,5 (цемент: щебень + песок) с расходом цемента 340...350 кг/м³, различавшиеся соотношением П/Щ и расходом воды.

В процессе вакуумирования замерены количество извлеченной воды и величина осадки (перемещения) вакуумщита. Результаты определения прочности образцов через 28 суток твердения в нормальных условиях приведены на рисунке 2.

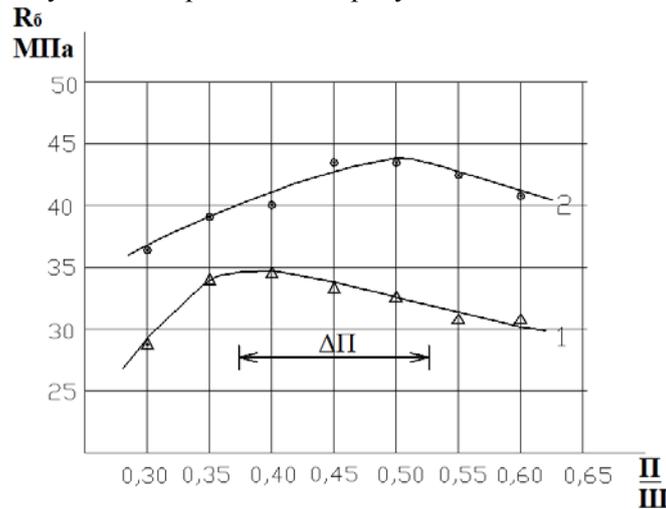


Рис. 2. Зависимость прочности бетона от его состава и способа уплотнения:
1 – вакуумированный бетон; 2 – то же, виброуплотненный

Данные показывают значительное увеличение прочности для всех составов вакуумбетона в сравнении с вибрированным. Оптимальное соотношение П/Щ, обеспечивающее наибольшую прочность вакуумбетона, на 30 % больше против виброуплотненного бетона. Это подтверждает наше предположение о принципиальном отличии оптимального состава вакуумбетона от виброуплотненного бетона.

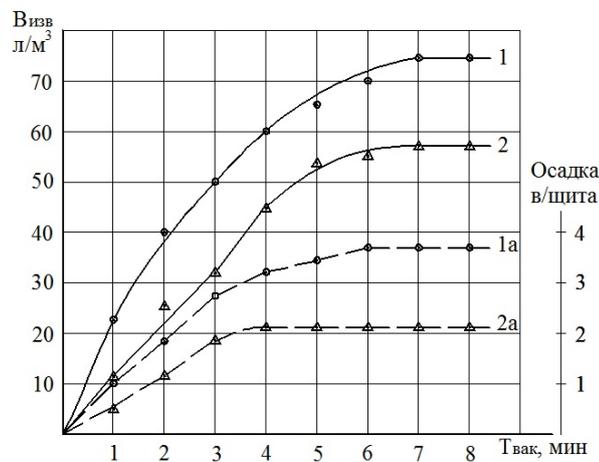


Рис. 3. Количество извлеченной воды и осадка вакуумщита в зависимости от продолжительности вакуумирования: 1 – количество извлеченной воды для бетона рационального состава для вакуумирования; 2 – то же для виброуплотнения; 1а, 2а, – соответственно осадка вакуум щита

Вакуумирование (при сравнении оптимальных составов) обеспечило увеличение прочности бетона на 32 %. При вакуумировании бетонной смеси, состав которой оптимальный для виброуплотнения, это увеличение составило только 18 %. Следовательно, оптимальный состав бетонной смеси для виброуплотнения не является таковым для вакуумбетона.

При рациональном составе бетонной смеси и эффективном уплотнении под действием вакуума уменьшение объема бетонной смеси (ΔV) должно стремиться к объему извлеченной воды и в идеальном случае они должны сравняться. Данные рисунков 3 и 4 позволяют сделать ряд заключений.

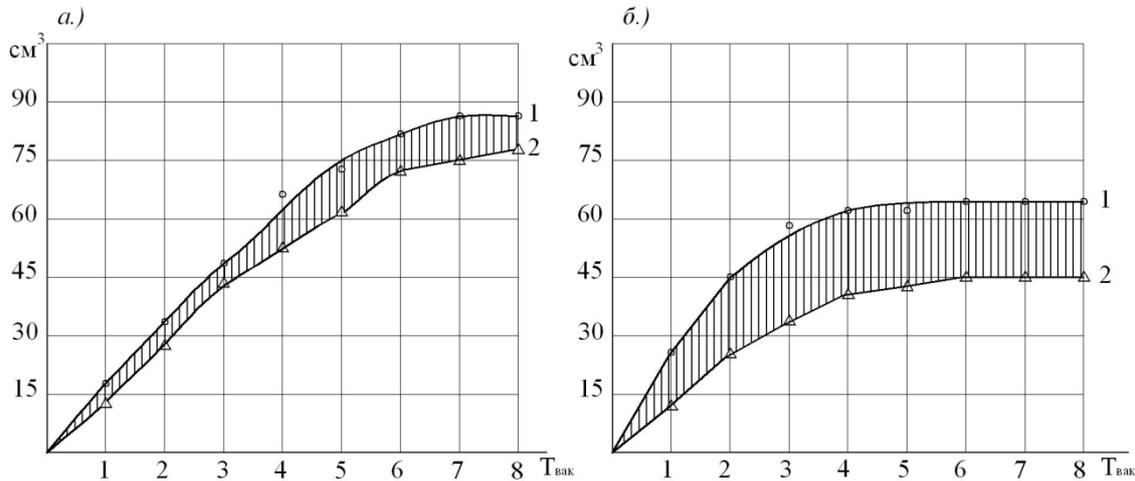


Рис. 4. Количество извлеченной воды и уменьшение объема формуемого образца в зависимости от продолжительности вакуумирования: а – для бетона состава, рационального для вакуумирования; б – то же для виброуплотнения; 1 – количество извлеченной воды; 2 – уменьшение объема образца

При явном недостатке растворной составляющей (песка), объем смеси стабилизируется в течение первых минут вакуумирования, хотя извлечение воды продолжается на протяжении всего периода уплотнения (вакуумирования).

При оптимальном для виброуплотнения составе бетонной смеси, характеризующегося минимальной водопотребностью, наблюдаются наименьшие уменьшение объема и количество извлеченной воды. Такая смесь наиболее стабильна и не поддается существенному уплотнению вакуумированием.

Максимальное уплотнение вакуумированием достигается при оптимальном составе бетонной смеси. Уменьшение ее объема наблюдается на протяжении всего периода вакуумирования и разница между объемом извлеченной воды и уменьшением объема смеси оказалась минимальной (рис. 3 и 4).

Эффективность составов бетона и самого процесса уплотнения при вакуумировании не может характеризоваться количеством извлекаемой воды, недостаточна характеристика и по одной величине уменьшения объема смеси. Уменьшение объема должно рассматриваться не отдельно, а в связи с количеством извлеченной воды, например, в виде их соотношения, названного коэффициентом эффективности вакуумирования (уплотнения при вакуумировании) [3]:

$$K_{упл.}^B = \frac{\Delta V_{б.с.}}{\Delta B} = \frac{V_{н.б.с.} - V_{к.б.с.}}{V_{изв.}}$$

где $V_{н.б.с.}$, $V_{к.б.с.}$ – соответственно объемы бетонной смеси до и после вакуумирования ($V_{н.б.с.} - V_{к.б.с.} = \Delta V_{б.с.}$);

ΔB , $V_{изв.}$ – объем воды, извлеченной при вакуумировании.

Степень уплотнения бетонной смеси при вакуумировании возрастает с увеличением объема извлеченной воды по мере возрастания $K_{упл.}^B$ (в пределе $K_{упл.}^B = 1$).

Характерно, что $K_{упл.}^B$ для смесей оптимального для виброуплотнения состава имел наименьшее значение и не возрастал (даже уменьшался) в процессе вакуумирования. Для

оптимального состава вакуумбетона величина $K_{упл.}^B$, имея наибольшие значения, увеличивается во времени и приближается к единице.

Сравнивая рациональные составы для транспортирования бетононасосами и для укладки (уплотнения) вакуумированием, можно прийти к заключению, что требования к указанным бетонным смесям практически одинаковы, таким образом, открываются большие возможности повышения эффективности производства бетонных и железобетонных работ при возведении монолитных конструкций. Вакуумирование позволяет существенно повысить прочность монолитного бетона.

Вывод. Проведена сравнительная оценка рациональных составов бетонных смесей для транспортирования бетононасосами и для возведения монолитных конструкций с использованием вакуумирования. Показано, что эти смеси сходны по составу и характеризуются повышенным содержанием мелкого заполнителя, что в общем случае при обычных способах уплотнения ведет к перерасходу цемента. Вакуумирование предоставляет возможность устранить этот недостаток, при этом повысить прочность бетона из таких смесей на 30 % и более.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев С. Н.** К расчету сопротивления в трубах бетононасосов / С. Н. Алексеев. – Механизация строительства. – 1952. – № 1. – С. 9 – 12.
2. **Евдокимов Н. И.** Технология монолитного бетона и железобетона / Н. И. Евдокимов, А. Ф. Мацевич, В. С. Сытник. – М. : Высшая школа, 1980. – 336 с.
3. **Сторожук Н. А.** Свойства вакуумбетона / Н. А. Сторожук. – Строительные материалы и конструкции. – 1990. – № 1. – С. 18 – 19.
4. **Соколов И. Г.** Механизация бетонных работ при возведении монолитных конструкций / И. Г. Соколов, Я. Г. Могилевский. – М. : Стройиздат, 1977. – 296 с.
5. **Хаютин Ю. Г.** Монолитный бетон (технология производства работ) / Ю. Г. Хаютин. – М. : Строй издат, 1981. – 447с.
6. **Чирков Ю. Б.** Напорное бетонирование монолитных конструкций и сооружений / Ю. Б. Чирков, В. Д. Коломиец. – К. : Будівельник, 1989. – 96 с.

УДК 693.54

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ЗИМНЕГО БЕТОНИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

А. П. Приходько, д. т. н., проф., В. Т. Шаленный, д. т. н., проф., И. В. Никитина, асп.

Ключевые слова: бетонная смесь, уход за бетоном, набор прочности, форсирование, эффективность, низкие температуры

Постановка проблемы. Строительство всегда было и остается одним из приоритетных секторов экономики Украины. В первую очередь, речь идет о монолитном строительстве, которое занимает ведущее место в данной индустрии в последние годы. Оценивая природные условия Украины, следует отметить особенности выполнения строительных работ в разное время года с учетом базовых критериев для всех отраслей деятельности человека, таких как: минимизация затрат (трудовых, сырьевых, финансовых и др.), безопасность, сохранение окружающей среды и пр. Использование зарубежного опыта, такого как полный или частичный отказ от ведения открытых строительных работ при отрицательных температурах наружного воздуха, является не эффективным и не приемлемым по отношению к Украине из-за значительной продолжительности этого периода на территории нашей страны. Кроме того, производство железобетонных работ в курортный сезон на ЮБК запрещено решением местных органов власти, а последние зимы оказались достаточно суровыми.

В настоящее время при отрицательных и положительных температурах наружного воздуха строительная отрасль активно использует те виды работ и технологии, которые универсальны – наиболее разработаны и обоснованы как теоретически, так и практически. Однако в последнее время в Украине происходят значительные изменения традиционных ориентиров в части