

УДК 693.547.2

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРИ ВАКУМИРОВАНИИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ В  
МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

*д.т.н., проф. Сторожук Н.А., к.т.н., доц. Павленко Т.М.,  
к.т.н., доц. Дехта Т.Н.*

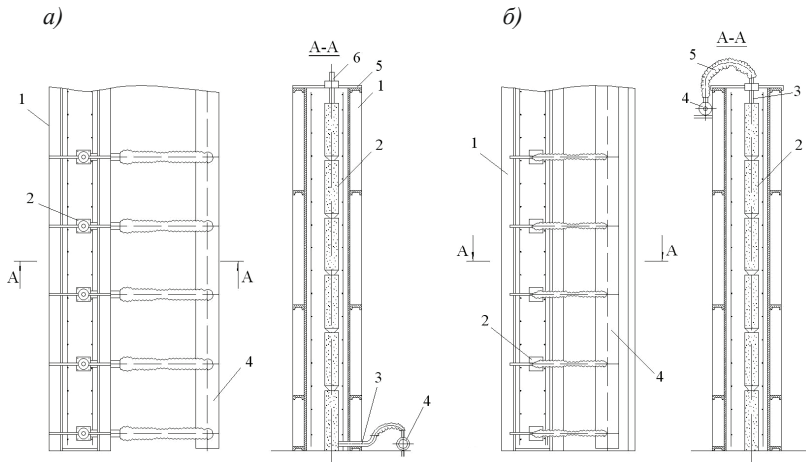
*ГВУЗ "Приднепровская государственная академия строительства и  
архитектуры"*

**Постановка проблемы.** В настоящее время при возведении сооружений из монолитного бетона применяют пластичные или даже литые бетонные смеси за счет использования пластификаторов или разжижителей. Это позволяет легко укладывать бетонные смеси в опалубку, получать удовлетворительные поверхности отформованных (возведенных) конструкций. Однако в этом случае применяемая технология характеризуется высокой материалоемкостью из-за продолжительной выдержки конструкций в опалубке (особенно изгибаемых), относительно высокими расходами цемента для приготовления бетонных смесей, низкими (неудовлетворительными) темпами производства бетонных работ.

На практике убедительно доказаны преимущества вакуумного способа укладки бетонных смесей в монолитные конструкции [1-4]. Основные из них: повышение производительности труда, сокращение сроков возведения сооружений или отдельных конструкций, значительное уменьшение металлоемкости (материалоемкости) опалубки, экономия энергоресурсов, снижение удельного расхода цемента, значительное улучшение качества бетонных работ (бетона). Однако вакуумное оборудование характеризуется, как по конструкции, так и в эксплуатации, относительно большой сложностью, что сдерживает широкое применение вакуумирования в строительстве.

**Цель статьи.** Предусматривается разработать новую технологию возведения конструкций из монолитного бетона с применением вакуумной обработки бетонных смесей. Возврат к вакуумной обработке бетонных смесей при возведении сооружений из монолитного бетона необходимо осуществить на качественно новом уровне, с использованием всех возможностей, присущих вакуумбетону [5].

**Основной материал.** Особенностью разработанной и предложенной технологии является то, что для формирования монолитных конструкций используются подвижные (литые) бетонные смеси (без пластификаторов и разжижителей), которые после укладки в опалубку подвергаются обработке при помощи специального вакуумного оборудования. За счет этого удаляется избыточная вода затворения, происходит интенсивное уплотнение, благодаря чему получают бетон как из бетонных смесей жесткостью СЖ-3 и более. При этом используется существующая опалубка без конструктивных изменений. Предложено несколько вариантов вакуумной обработки бетонных смесей при возведении колонн и стен, некоторые из них приведены на рис. 1.



*Рис. 1. Вакуумная обработка монолитного бетона при помощи вакуумтрубок разового использования: а) при подключении снизу; б) при подключении сверху; 1 – опалубка; 2 – вакуумтрубка разового использования; 3 – приемник; 4 – коллектор; 5 – направляющая; 6 – соединительная трубка*

Для вакуумирования бетонной смеси при возведении конструкций из монолитного бетона в этом случае применяют вакуумтрубки разового использования, которые собирают из пористых и полых объемных элементов с контактной поверхностью в виде профильных впадин и выступов. Собирают их во время монтажа арматурного каркаса, и после укладки и вакуумной обработки бетонной смеси оставляют в конструкции. При помощи вакуумтрубок из пористых элементов предоставляется возможность вакуумировать конструкции любых размеров и самой сложной конфигурации.

Объемные элементы изготавливают из мелкозернистого бетона на основе золы, шлака, обычного, керамзитового или перлитового песков (состав 1 : 8 – цемент : наполнитель). Формуют элементы фильтров методом прессования из полусухих смесей на широко распространенных станках-автоматах, которые характеризуются большой производительностью. Исходя из этого, такие фильтры имеют очень низкую себестоимость и поэтому представляется возможность их одноразового использования. Если вакуумной обработке подвергаются стены, колонны, подпорные стенки и другие подобные конструкции, то распалубку осуществляют сразу же после окончания вакуумной обработки, если перекрытия (и другие изгибаемые элементы), то выдержка в опалубке сокращается в 2...3 раза в сравнении с выдержкой виброуплотненного бетона.

Касаясь состава бетонной смеси для вакуумирования, а также самого

режима вакуумирования, можно отметить следующее. 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).

Особенности состава и режима 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.).

Ниже приведена сравнительная оценка составов и свойств вакуумированных и вибрированных бетонов, имеющих принципиальное значение при возведении конструкций из монолитного бетона. Для приготовления бетонных смесей применяли:

- шлакопортландцемент М400 (г. Кривой Рог) (ГОСТ 310.1-76);

- песок днепроровский (ДСТУ Б В.2.7.-32-95);

- щебень гранитный Рыбальского карьера, фракции 10...20 мм (ДСТУ Б В.2.7-75-98);

- вода водопроводная (ГОСТ 23732-79).

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/м<sup>3</sup>, различавшиеся соотношением П/Щ и расходом воды. Формовали образцы 15×15×7 см вакуумированием и для сравнения вибрационным способом.

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

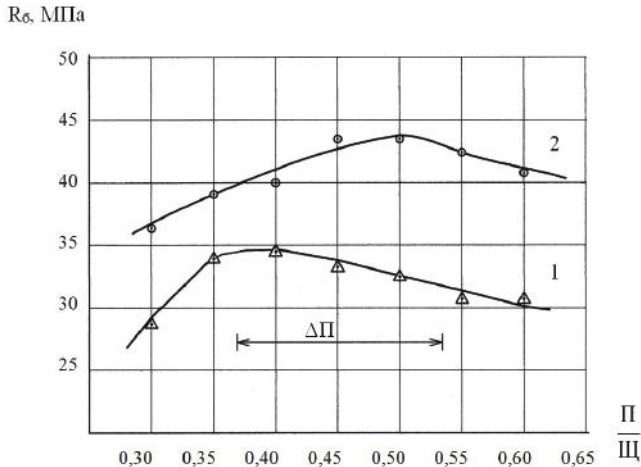


Рис. 2. Зависимость прочности бетона от его состава и способа уплотнения: 1 – виброуплотненный бетон; 2 – то же, вакуумированный

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

Кроме этого, особо следует отметить, что бетонные смеси, рациональные для вакуумирования, являются оптимальными по составу для транспортирования бетононасосами [6]. Известно, что такие смеси являются также запесоченными и при укладке их вибрационным способом требуют повышенного расхода цемента для обеспечения необходимого класса бетона. Вакуумирование решает эту проблему без перерасхода цемента.

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 ( $\Delta V$ ) должно стремиться к объему извлеченной воды и в идеальном случае они должны сравняться. Данные рис. 3 и 4 позволяют сделать ряд заключений.

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

(вакуумирования).

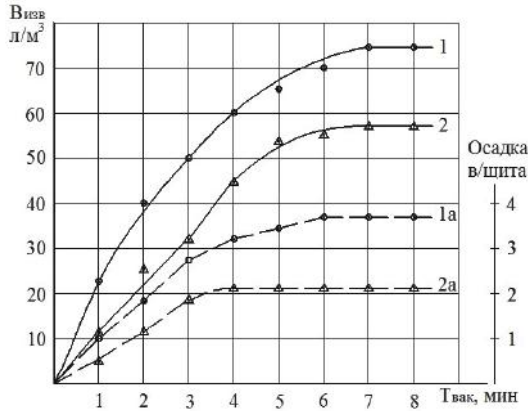


Рис. 3. Количество извлеченной воды и осадка вакуумцита в зависимости от продолжительности вакуумирования: 1 – количество извлеченной воды для бетона рационального состава для вакуумирования; 2 – то же, для виброуплотнения; 1а, 2а – соответственно, осадка вакуумцита

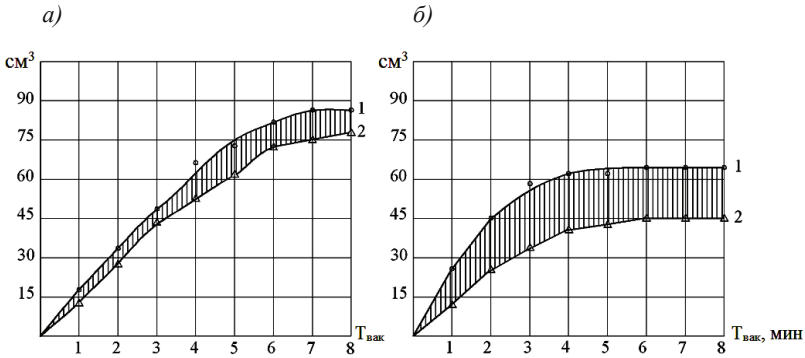


Рис. 4. Количество извлеченной воды и уменьшение объема формуемого образца в зависимости от продолжительности вакуумирования: а – для бетона состава рационального для вакуумирования; б – то же, для виброуплотнения; 1 – количество извлеченной воды; 2 – уменьшение объема образца

При оптимальном для виброуплотнения составе бетонной смеси, характеризуемом 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 для этого способа уплотнения. 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).

Важнейшей характеристикой монолитного бетона является его структурная прочность сразу же после формирования, так как только при определенной ее величине осуществляют немедленную распалубку монолитных конструкций, что обеспечивает значительный экономический эффект.

Таблица 1

*Плотность и структурная прочность бетонов  
в зависимости от их состава и способа уплотнения*

Состав бетона		В/Ц бетонов		Плотность бетонов (кг/м <sup>3</sup> )		Структурная прочность бетонов (МПа)	
Ц:П:Щ	Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Вибрированный	Вакуированный	Вибрированный	Вакуированный	Вибрированный	Вакуированный
1:1,2:2,8	485	0,33	0,33	2564	2571	0,033	0,24
1:2,2:3,8	320	0,44	0,44	2539	2548	0,040	0,28
1:2,98:4,52	275	0,52	0,52	2494	2510	0,050	0,37
1:3,6:5,4	220	0,56	0,56	2475	2492	0,041	0,32

Определяли структурную прочность бетонов, так же, как и в предыдущих исследованиях, на образцах 15×15×7 см, которые испытывали «на ребро» (для уменьшения влияния масштабного фактора). При формировании образцов продолжительность вакуумной обработки при разрежении 0,7 (полный вакуум принят за единицу) составляла 6 мин. Для сравнения из того же состава, что и вакуумбетон (при том же содержании составляющих) приготавливали жесткую смесь, из которой вибрационным способом с пригрузом 0,006 МПа формовали такие же образцы. Результаты испытаний (табл. 1) показали, что структурная прочность свежееотформованного вакуумбетона больше в 7...8 раз, чем у вибрированного из жесткой бетонной смеси при одном и том же В/Ц, практически одинаковых расходах цемента и плотности. Прочность свежееотформованного вакуумбетона составила 0,24...0,37 МПа, а вибрированного (жесткого) – 0,03...0,04 МПа. Это является важнейшей особенностью вакуумированных бетонов – такая высокая прочность свежееотформованного вакуумбетона по данным Р. Лермита позволяет

возводить конструкции высотой до 6 м с немедленной распалубкой [7]. Это свидетельствует о высокой надежности вибровакуумной технологии. Возможности возведения монолитных конструкций из жестких бетонных смесей с немедленной распалубкой являются весьма ограниченными, так как резко усложняется уплотнение таких смесей в опалубке и сама конструкция опалубки. Бетоны из пластичных бетонных смесей после их укладки в опалубку структурной прочностью не обладают, поэтому осуществлять немедленную распалубку монолитных конструкций в этом случае не представляется возможным.

При возведении монолитных конструкций принципиальное значение имеет режим вакуумирования, поэтому приведена сравнительная оценка нескольких наиболее характерных режимов (рис. 5).

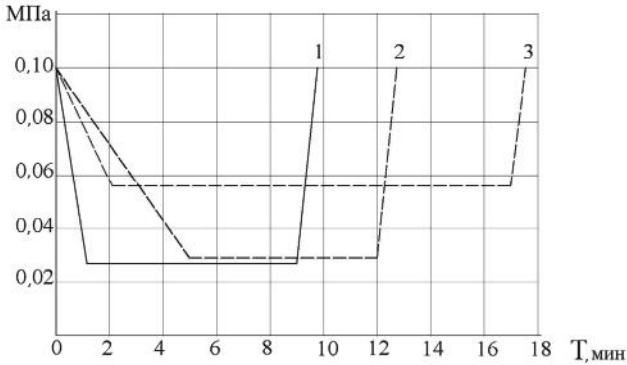


Рис. 5. Режимы вакуумирования бетонных смесей в монолитных конструкциях: 1 – традиционный режим – при постоянном (максимально возможном) разрежении; 2 – при постепенно увеличивающемся разрежении (за 5 мин) до максимального; 3 – при постоянно малом разрежении (0,4)

Формовали такие же образцы, как и в предыдущих исследованиях, методом вакуумирования и для сравнения вибрационным способом. В процессе вакуумирования измеряли количество извлеченной воды. Продолжительность вакуумирования определяли по прекращению извлечения воды из уплотняемой бетонной смеси. Все отформованные образцы твердели 28 суток в нормальных условиях. Результаты исследований приведены на рис. 6 и 7.

По полученным данным обычно применяемый режим (при постоянном, возможно большем разрежении) оказался самым малоэффективным. Вместе с тем, эксперимент подтвердил эффективность предлагаемого режима (вакуумирование с постепенно увеличивающейся величиной разрежения). В этом случае получено наибольшее повышение прочности бетона (при наибольшем количестве извлеченной воды).

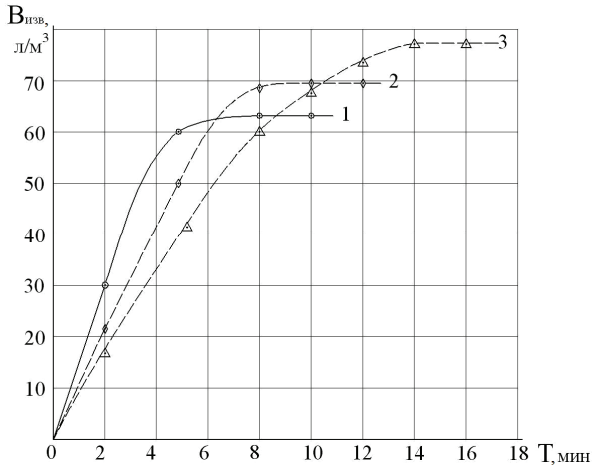


Рис. 6. Количество извлеченной воды в зависимости от режима вакуумирования бетонной смеси: 1 – традиционный режим – при постоянном (максимально возможном) разрежении; 2 – при постепенно увеличивающемся разрежении (за 5 мин) до максимального; 3 – при постоянно малом разрежении (0,4)

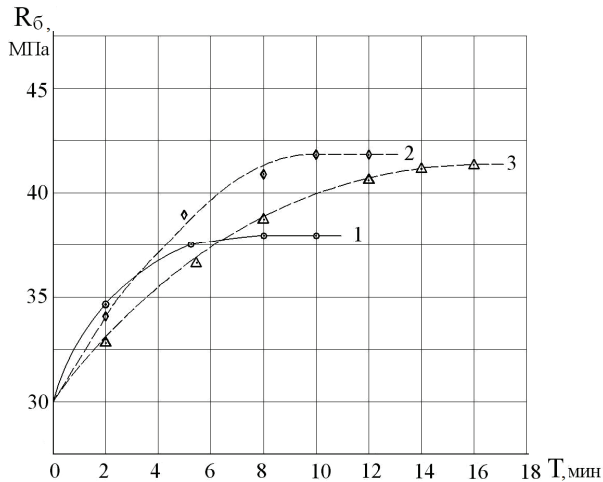


Рис. 7. Прочность бетонов в зависимости от режимов вакуумирования: 1 – традиционный режим – при постоянном (максимально возможном) разрежении; 2 – при постепенно увеличивающемся разрежении (за 5 мин) до максимального; 3 – при постоянно малом разрежении (0,4)



При возведении монолитных конструкций право на применение имеет и режим вакуумирования при небольшом разрежении. В общем случае увеличение продолжительности вакуумирования на несколько минут не скажется на производительности труда (на сроках строительства). Тем более что операция вакуумирования совмещается с другими технологическими операциями, но в этом случае предоставляется возможность существенно уменьшить мощность вакуумнасоса.

Большое практическое значение имеет при возведении конструкций из монолитного бетона рост прочности бетона во времени. Ниже приведены результаты наших исследований, касающиеся этой проблемы. При проведении экспериментов для приготовления бетонных смесей использовались те же материалы, что и в предыдущих опытах. Исходная бетонная смесь так же характеризовалась подвижностью ОК = 3...4 см. Результаты исследований, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что при твердении бетонов в нормальных условиях вакуумбетон за сутки набирает такую же прочность, как виброуплотненный за 3-е суток, а за трое суток – такую же, как виброуплотненный за 7 суток. Как и следовало ожидать, в возрасте 28 суток прочность вакуумбетона на 25...30% выше, чем у виброуплотненного.

*Таблица 2*

*Прочность бетонов в зависимости от условий и продолжительности твердения*

Вид бетона	Прочность бетонов (МПа) при продолжительности твердения (сутки)					
	1	3	7	14	21	28
Нормальные условия твердения						
Вакуумированный	7	11	14	20	24	28
Виброуплотненный	2	6	9	15	18	20
Твердение при температуре 4...8 °С						
Вакуумированный	3	5	9	14	17	21
Виброуплотненный	1	3	6	8	12	13

Очень важные результаты получены при твердении бетонов при пониженных температурах ( $t = 4...8$  °С). Такие температурные условия являются характерными при возведении монолитных конструкций в осенне-зимний период. Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что вакуумирование предоставляет возможность получать проектную прочность бетона (20 МПа) в 28-ми суточном возрасте, даже при твердении при пониженных температурах. Это обеспечивает значительную экономию энергоресурсов при производстве бетонных работ при таких температурах.

Возможность управления водопотребностью бетонных смесей путем вакуумирования предоставляет возможность применять для приготовления бетонных смесей заполнители высокой и даже очень высокой водопотребности. Ниже приведены результаты вакуумной обработки золобетонных смесей. Известно, что зола-унос тепловых электростанций относится к заполнителям самой высокой водопотребности и, соответственно, при обычной технологии требуют значительного перерасхода цемента при приготовлении бетонных смесей для обеспечения проектной прочности бетона. Вакуумная обработка позволяет решить это противоречие.

В исследованиях использовали золобетонную смесь следующего состава: цемент – 280 кг/м<sup>3</sup>, зола-уноса – 970 кг/м<sup>3</sup>, вода – 296 л/м<sup>3</sup>, пластичность бетонной смеси характеризовалась осадкой стандартного конуса – ОК = 4...6 см.

Формовали образцы также 15×15×7 см вибрационным способом и вакуумированием. При вакуумной обработке продолжительностью 6 мин. извлечено 96 л/м<sup>3</sup> воды (34% воды затворения). Все образцы твердели в нормальных условиях 28 суток. При испытании виброуплотненные образцы показали прочность 12,7 МПа, а вакуумированные – 22,9 МПа, т.е. прирост прочности составил 10 МПа или прочность за счет вакуумирования бетона увеличилась в 1,8 раза. Таким образом, вакуумирование открывает широкие возможности для использования в строительстве заполнителей высокой водопотребности, получать бетоны на их основе высокого качества без перерасхода цемента.

Упрощение конструкции вакуумного оборудования, уменьшение его энергоемкости, сокращение продолжительности вакуумирования при использовании предлагаемого режима, возможность совмещения вакуумирования с другими технологическими операциями открывает широкие возможности применения вакуумной обработки бетонных смесей при возведении сооружений или отдельных конструкций из монолитного бетона.

**Выводы.** При получении равнопрочных бетонов оптимальный состав вакуумбетона является более экономичным, чем виброуплотненного за счет более низкого расхода цемента и замены значительной части дорогого щебня песком. Кроме того, бетонные смеси для вакуумирования, имеют оптимальный состав и для транспортирования бетононасосами, что также принципиально сказывается на расходе цемента.

Интенсивное твердение вакуумбетона в начальный период предоставляет возможность сократить сроки выдержки отформованных конструкций в опалубке в 2...3 раза, что дает возможность значительно уменьшить объем (количество) опалубки на строительной площадке. Кроме того, высокая структурная прочность вакуумбетона сразу же после формирования позволяет осуществлять немедленную распалубку таких конструкций, как стены, колонны и др.

Повышенная на 30% и более прочность вакуумбетона позволяет снизить расход цемента на 15...20% в сравнении с виброуплотненным (при получении равнопрочных бетонов).

Интенсивное твердение монолитного вакуумбетона даже при пониженных (положительных) температурах позволяет получить проектную прочность бетона в 28-ми суточном возрасте, не применяя дорогостоящего электропрогрева и других способов ускорения твердения бетона.

Вакуумирование предоставляет возможность при возведении монолитных конструкций применять заполнители для приготовления бетонных смесей самой высокой водопотребности, например, золы ТЭС, без перерасхода цемента.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гордон, С.С. К вопросу вакуумирования бетона каркасных железобетонных сооружений [Текст] / С.С. Гордон // Строительная промышленность. – 1949. – С. 13-18.
2. Временная инструкция по вакуумированию бетона в бетонных конструкциях при производстве строительных изделий [Текст]. – М.: Госстройиздат, 1951. – 68 с.
3. Гершберг, О.А. Вакуумирование бетона в монолитных конструкциях [Текст] / О.А. Гершберг. – М.: Стройиздат, 1952. – 60 с.
4. Тарашинский, Е.Г. Вакуумированный бетон в дорожном строительстве [Текст] / Е.Г. Тарашинский. – М.: Дориздат, 1952. – 64 с.
5. Сторожук, Н.А. Теоретические исследования по вакуумированию бетонных смесей [Текст]. Н.А. Сторожук // Вісник ПДАБА. – Д.: ПДАБА. – 2012. – № 2-3. – С. 32-38.
6. Соколов, И.А. Бетонные смеси для транспортирования бетононасосами и вакуумной обработки при возведении монолитных конструкций [Текст]. И.А. Соколов, А.Н. Березюк, А.Р. Аббасова // Вісник ПДАБА. – Д.: ПДАБА. – 2012. – № 7-8 – С. 64-70.
7. Лермит, Р. Проблемы технологии бетона [Текст] / Р. Лермит. – М.: Госстройиздат, 1959. – 294 с.