

Сулейманова Л.А., д-р техн. наук, проф.,  
Агеева М.С., канд. техн. наук, доц.,  
Малюкова М.В., аспирант,  
Анучкин Я.А., студент,  
Шураков И.М., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОПРЕССОВАНИЯ ПЛИТ БЕТОННЫХ ТРОТУАРНЫХ

[ludmilasuleimanova@yandex.ru](mailto:ludmilasuleimanova@yandex.ru)

Установлены и оптимизированы параметры вибропрессования для производства высококачественных плит бетонных тротуарных с повышенными эксплуатационными свойствами.

**Ключевые слова:** вибропрессование, уплотнение, прессующее давление, плиты бетонные тротуарные.

Метод вибропрессования – уплотнения бетонной смеси путем приложения к ней вибрационных нагрузок и статического давления, совмещает переналаживаемый и гибкий способы формования, так как при замене формы возможен выпуск широкой номенклатуры вибропрессованных изделий. Его применяют с целью достижения плотности и прочности бетона, превышающие аналогичные показатели традиционно уплотненного бетона (при одинаковых водоцементных отношениях бетонных смесей). Вибропрессование объединяет в одном непрерывном процессе укладку, распределение и уплотнение бетонной смеси.

Для понимания сущности процесса вибропрессования бетонной смеси, который осуществляется под действием вибрационных и прессующих воздействий рассмотрен вопрос изменения дисперсно-зернистых систем с учетом их вязкости, относительно пульсационного движения как отдельных твердых частиц или пузырьков, так и фрактально-кластерных образований, столкновения частиц, разрушения агрегированных структур в условиях внешних динамических воздействий. Вибропрессование заключается в укладывании в форму и равномерном уплотнении виброобработкой бетонной смеси, которая подвергается прессованию при давлении, обеспечивающем дальнейшее принудительное уплотнение в результате вытеснения или уменьшения в объеме вовлеченного воздуха и вытеснения несвязанной воды из бетонной смеси. При использовании вибрирования в сочетании с прессующим давлением появляется возможность снижения величины давления в 10...100 раз по сравнению с обычным прессованием [1].

Учеными [2] выделено три стадии процесса вибропрессования, отражающие закономерности формирования структуры бетонных смесей при

уплотнении вибрацией в сочетании с прессующим давлением: стадия переукладки составляющих бетонной смеси; стадия сближения составляющих и стадия компрессионного уплотнения, возникающего при приложении внешнего давления. На первой стадии поведение жесткой бетонной смеси можно описать как зернистую среду, где под действием вибрации ее составляющие образуют устойчивую структуру, отвечающую требованиям плотных упаковок. На второй стадии смесь реагирует на внешнее уплотняющее действие как упруго-вязкое пластичное тело, которое сопротивляется сплочению составляющих, и возможно лишь их сближение, раздвижка или небольшие сдвиги в результате перераспределения растворной составляющей, цементного теста и удаления воздуха. Одновременное воздействие вибрации и прессующего давления при сравнительно небольшой величине, приложенной на короткий период времени, позволяет значительно повысить плотность и прочность отформованного бетона. Основными условиями успешного протекания процесса вибропрессования является достаточное разжижение бетонной смеси и прессующее давление на нее, которое целесообразно применять на второй и третьей стадиях формования.

Главным эффектом виброреологии является «разжижение» под действием вибрации дисперсной системы с сухим трением. Известно, что в основе эффекта виброразжижения бетонных смесей лежит явление относительного движения составляющих вследствие сдвиговых напряжений и деформаций. Эффект вибрационного воздействия проявляется в снижении сил межфазных взаимодействий на границах раздела твердой и жидкой фаз, вследствие изменения свойств связанной воды и снижения вязких сил. Сдвиговые напряжения, возникающие при вибрационном воздействии из-за

взаимного перемещения частиц, способствуют их переукладке и уплотнению системы.

Вибрационное разжижение бетонной смеси имеет огромное значение и лежит в основе всей современной технологии бетона. В жестких смесях требуется совместное применение интенсивного направленного вибрирования и дополнительного прессующего давления.

Пригруз предназначен для сокращения продолжительности формирования жестких бетонных смесей, создания дополнительного прессующего воздействия для интенсификации процесса уплотнения, улучшения равномерности уплотнения и качества лицевой поверхности изделий.

Формование с пригрузом предотвращает возникновение деструктивных явлений, которые возможны при виброформовании бетонных смесей без пригруза и приводящих к неоднородности свойств материала, таких как расслоение бетонной смеси из-за разности плотностей отдельных ее составляющих; вибротранспортный эффект, который является следствием создания неравномерного напряженно-деформированного состояния обрабатываемой среды; разрыхление смеси в результате разрывов в ее слоях, интерференция и резонансные явления в верхней части формируемого изделия.

Методика исследования процесса вибропрессования предусматривает выявление момента укладывания пригруза на поверхность обрабатываемой бетонной смеси. Следует отметить, что первоначальная перестройка смеси при вибрировании протекает при отсутствии статических нагрузок от прессующего устройства. Наличие давления приведет только к увеличению сил внутреннего сухого трения между частицами смеси за счет создаваемых напряжений на контактах микрогетерогенных и грубодисперсных частиц, что затрудняет процесс уплотнения. А когда наблюдается сближение частиц смеси и их перемещение, целесообразно применять прессующее давление.

Продолжительность предварительного вибрирования зависит от состава и удобоукладываемости бетонной смеси, типа пригруза, величины вибрационного воздействия и высоты формируемого изделия.

Одним из основных факторов при подборе режимов вибропрессования является правильное назначение величины прессующего давления на формируемую бетонную смесь. При оптимальной величине прессующего давления создаются условия для эффективного совместного действия вибрации и прессующего давления. В

этом случае прессующее давление совпадает с направлением сил тяжести и увеличивает их, в то же время, препятствуя перемещению составляющих смеси, и приводит к формированию плотной структуры бетона. Величины прессующего давления, превышающие оптимум, приводят к замедлению процесса переукладки составляющих смеси и остановке процесса уплотнения, что исключает возможность совместной работы вибрации и прессующего давления.

Рассмотрев технологические факторы управления структурой вибропрессованного бетона, можно выделить значения параметров вибропрессования: амплитуда колебаний – 0,2...0,8 мм, частота – 50...100 Гц, величина прессующего давления – 0,0002...200 МПа и конструктивные особенности пригрузов, которые зависят от жесткости бетонной смеси, высоты изделия и интенсивности колебаний.

Основной задачей при подборе параметров вибропрессования является оптимизация совместного действия прессующего давления и параметров вибрационного воздействия. При вибропрессовании жестких бетонных смесей должен быть обеспечен оптимум сил пригруза и вибрации, создающих с одной стороны условия для относительного вибрационного движения и переукладки составляющих, а с другой, обеспечивающих дополнительное прессующее давление, совпадающее с направлением действия сил тяжести.

Для более детального подхода рассмотрим процесс производства плит тротуарных методом полусухого вибропрессования на бетоноформовочной машине, где применяется уплотнение с помощью виброудара, и факторы, влияющие на качество продукции.

На бетонную смесь, находящуюся в замкнутой ячейке, воздействуют возмущающая сила вибростол  $F_1$ , усилие давления пуансона  $F_2$ , вибрационные воздействия, передаваемые через металлические стенки матрицы  $F_3$  и силы отталкивания частиц компонентов бетонной смеси  $F_4$  (рис. 1).

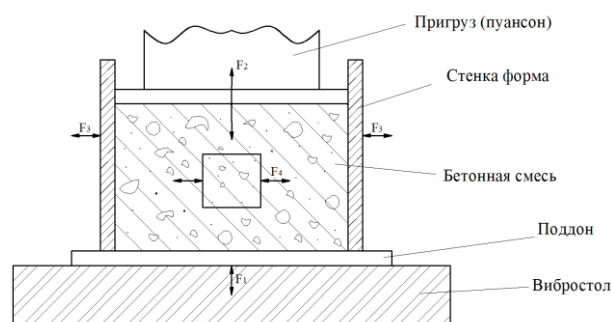


Рис. 1. Схема поведения бетона в замкнутой ячейке

После укладки бетонной смеси в форму начинается конечный процесс уплотнения бетонной смеси в готовую продукцию, называемый основной вибрацией. Пуансон опускается в форму, пластины пуансона при давлении закрывают ячейки матрицы, заполненные предварительно уплотненной бетонной смесью.

На стадии вибрации для достижения высокого качества изделия необходимо добиться равномерного распределения энергии вибрации по всем зонам контакта с бетонной смесью. Колебательные воздействия на массу являются одним из решающих факторов в производственном процессе. Бетонная смесь уплотняется в ячейках, ограниченных снизу поддоном, а сверху – пуансоном. Увеличение времени вибрации позволяет загрузить в формоснастку больше бетонной смеси, а повышение интенсивности вибрации дает возможность лучше уплотнить ее. При недостаточной интенсивности вибрирования, силы, возникающие в результате ускорения вибрации, могут оказаться недостаточными для преодоления силы сопротивления сдвигу и наступит равновесие – момент, когда уплотнение приостанавливается.

Интенсивность, частота и время основной вибрации всегда зависят от типа продукции. Вибрационные параметры должны обеспечить передачу энергии уплотнения в бетонную смесь как можно глубже, в результате необходимо получить однородную плотность, как по всему поперечному сечению изделия, так и по каждому из изделий в частности.

Нормативный показатель для основной вибрации (как стадии вибропрессования):

Возмущающая сила вибрации:

– при высоте изделия < 10 см: 600...650 Н/кг;

– при высоте изделия > 10 см: 350...400 Н/кг.

Частота вибрации:

– полнотельные изделия: 47 Гц (2800 об/мин);

– пустотельные изделия: 42 Гц (2500 об/мин).

Время вибрации: 2,0...2,5 сек.

При производстве плиты тротуарной методом полусухого вибропрессования смесь бетона облицовочного слоя укладывается только на предуплотненный основной слой бетона. При производстве двухслойной плиты тротуарной облицовочный слой укладывается на уплотненную поверхность бетона основного слоя ударом пуансона (без вибрации).

Факторами, приводящими к возникновению дефектов при двухслойной технологии формования являются: различная влажность основного и облицовочного слоев бетона, переуплотнение основного слоя, неблаго-

приятное сочетание фаз пригруза при распалубке, прилипание частиц основного или облицовочного слоев бетона к пуансону и некорректно подобранный состав облицовочного слоев бетона.

Для повышения эффективности производства плит бетонных тротуарных из вибропрессованных бетонов проводились работы по оптимизации жестких бетонных смесей и технологических приемов производства [3...8]

Первоначальной задачей при производстве плиты тротуарной, является подбор оптимального заполнения ячеек бетонной смесью. Опытным путем подбирали количество бетонной смеси (уровень в ящичном дозаторе), таким образом, чтобы смеси было достаточно для равномерного заполнения всех ячеек, при этом оставшееся количество смеси в ящичном дозаторе после возвращения его на стартовую позицию было таким, при котором виден ворошитель [9].

Оптимальное время вибрации определяли по степени уплотнения. Форма и пуансон должны одинаково двигаться без соударений. В начале процесса основной вибрации, когда пластины пуансона опускаются в матрицу, свежееуложенная бетонная смесь хорошо уплотняется, пуансон сначала достаточно быстро, а затем все медленнее, опускается в форму, что связано с увеличением плотности формируемой бетонной смеси. При достижении максимального уплотнения пуансон уже не опускается далее вниз. Если время вибрации настроено на большой период, пуансон начинает разрушать хорошо уплотненную бетонную смесь, так как силы вибрации передаются от уплотненного бетона на пластины пуансона.

Время основной вибрации назначается таким образом, чтобы с достижением максимального уплотнения, процесс вибрации заканчивался.

Зависимость средней плотности свежеотформованных образцов от времени уплотнения представлена на рис. 2.

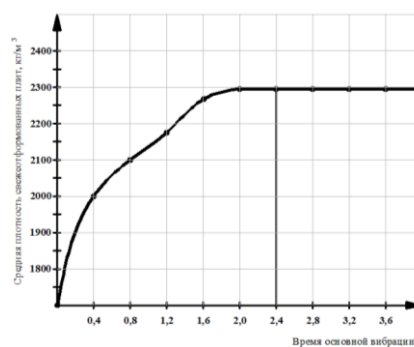


Рис. 2. Зависимость средней плотности свежеотформованных образцов от времени уплотнения

Пригруз (пуансон) играет значительную роль в процессе формирования и уплотнения. Усилие давления пуансона должно подаваться так, чтобы не заглушать вибрационные колебания. Давление пуансона на бетонную смесь может быть динамической нагрузкой (развивается гидроцилиндром) или статической (собственный вес). Усилие давления должно быть на 20...30 % меньше возмущающей силы вибростола.

Изделия высотой более 10 см требуют меньшего давления в сравнении с изделиями высотой менее 10 см, так как бетонная смесь сама работает как демпфирующий промежуточный слой.

Если давление пуансона недостаточно, т.е. не хватает давления для уплотнения уложенной бетонной смеси, то уже в начале процесса вибрации он не опускается вниз, а разрушает структуру. Бетонная смесь давит во все стороны одинаково, поэтому величина сцепления бетона со стенками может превысить усилие, развиваемое пуансоном, что приводит к дефектам при распалубке (рис. 3).



Рис. 3. Дефект изделия при распалубке

Бетонная смесь теряет свойства дальнейшего сжатия при увеличении плотности. Установленная сила давления пуансона должна быть компромиссной между началом уплотнения смеси и уплотненной бетонной смеси, находящейся в форме. Необходима двухступенчатая настройка: небольшое давление для начала уплотнения и повышенное – для конца процесса основной вибрации.

Динамическое давление пуансона – это параметр, который надо использовать для изменения вибрационного эффекта в жестких бетонных смесях в зависимости от качества смеси и размеров изделий, качества поддонов и других. Для повышения эффективности формирования допускается применять периодическое воздействие на смесь вибраторами, установленными на пуансоне.

Зависимость средней плотности свежесформованных плит тротуарных от режима уплотнения представлена на рисунке 4.

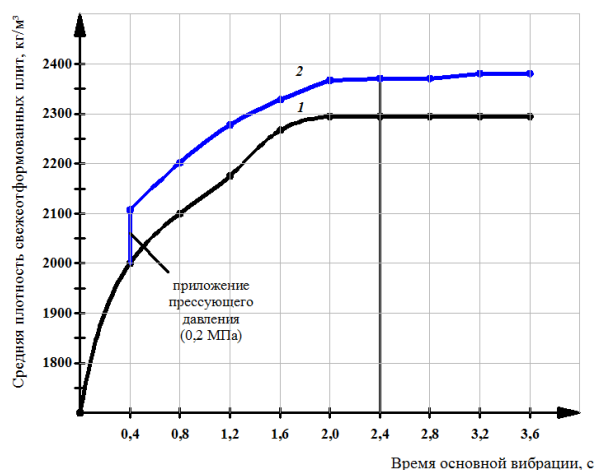


Рис. 4. Зависимость средней плотности свежесформованных плит тротуарных от режима уплотнения: 1 – виброуплотнение; 2 – вибропрессование

Результаты исследований (рис. 4) дают основание предполагать, что процессы виброуплотнения и вибропрессования являются нестационарными. Энергоемкость процессов виброуплотнения и вибропрессования, определяемая балансом внутренних и внешних сил, различна из-за наличия дополнительного прессующего давления при вибропрессовании. Под действием небольшого давления прессования, совпадающего с направлением силы тяжести, частицы грубодисперсной составляющей стремятся занять положение в пределах, соответствующих идеальным классическим упаковкам. Перестройка частиц твердой фазы происходит на всех масштабных уровнях бетонной смеси до установления равновесия между внешними вибрационными и внутренними силами.

Энергетические изменения в системе и структурные перестройки при вибропрессовании будут происходить только при оптимальной величине прессующего давления, которое создается для эффективного совместного действия вибрации и давления пуансона. При этом прессующее давление совпадает с направлением сил тяжести и как бы увеличивает их, не препятствуя вибрационному перемещению составляющих бетонной смеси.

Оптимизация величин прессующего давления на структурообразующие процессы дисперсно-зернистых систем с учетом действия внутренних сил осуществлялась по структурным изменениям, оцениваемым по плотности свежесформованных образцов тротуарных плит (рис. 5).

По результатам экспериментальных данных получены оптимальные величины давления, необходимые при вибропрессовании. Величина оптимального давления находится в интервале 0,1...0,2 МПа (рисунок 5). При величине давления пригруза менее 0,1 МПа его недостаточно для уплотнения системы, а при давлении более 0,2 МПа также не достигается максимальное уплотнение.

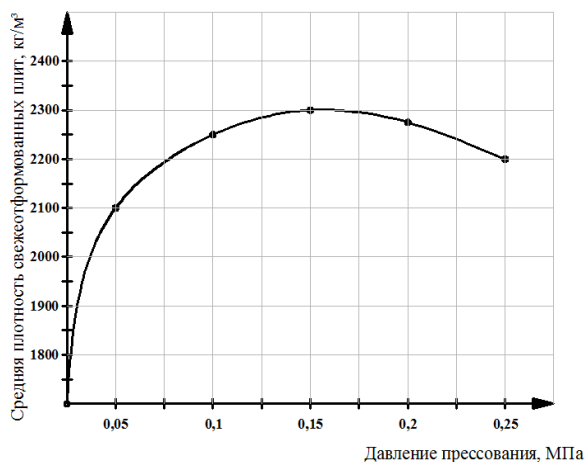


Рис. 5. Средняя плотность свежеотформованных образцов плит тротуарных от величины прессующего давления

Подбор соотношения величины прессующего давления и времени основной вибрации также производили по показателям плотности свежеотформованных образцов (рис. 6).

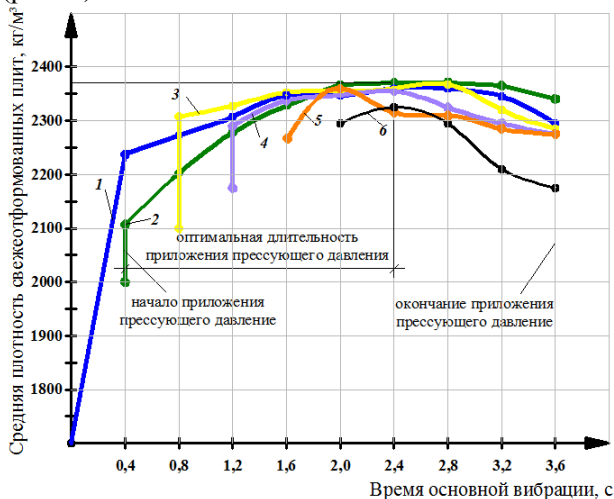


Рис. 6. Зависимость средней плотности свежеотформованных плит тротуарных от длительности приложения прессующего давления (0,15 МПа) с начала вибрации: 1 – 0 с; 2 – 0,4 с; 3 – 0,8 с; 4 – 1,2 с; 5 – 1,6 с; 6 – 2,0 с

Время приложения прессующего давления до определенной величины, или так называемой оптимальной, создает условия для эффективного совместного вибрационного и прессующего воздействия, обеспечивая увеличение плотности свежеотформованных образцов. Превышение

длительности приложения прессующего давления, отмеченного как оптимальное, приводит либо к прекращению роста плотности, либо к разрушению образца.

Таким образом, установлены оптимальные параметры вибропрессования для производства высококачественных плит бетонных тротуарных с повышенными эксплуатационными характеристиками.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гершберг О.А. Технология бетонных и железобетонных изделий. М., 1971. 360 с.
2. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формования бетонных изделий. Л.: Стройиздат, 1986. – 280 с.
3. Сулейманова Л.А., Погорелова И.А., Малюкова М.В. Высокоплотные составы вибропрессованных бетонов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 48–50.
4. Сулейманова Л.А., Лесовик Р.В., Глаголев Е.С., Сопин Д.М. Высококачественные бетоны на техногенном сырье для ответственных изделий и конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2008. № 4. С. 34–37.
5. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Шакарна М.И.Х. Efficient Binding Using Composite Tuffs Of The // Middle East World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 24. №10. С. 1286–1290.
6. Kharkhardin A.N., Suleymanova L.A., Kara K.A., Malyukova M.V., Kozhukhova N.I. The Determination of Topological Properties in Polydispersed Mixtures on the Results of Sieve Laser and Particle Size Analysis // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 25. №2. С. 347–353.
7. Малюкова М.В., Агаркова Т.В. Перспективное направление модифицирования вибропрессованных бетонов // Международная научно-практическая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сб. тез. докл. – Белгород, 2014. С. 4–7.
8. Шейченко М.С., Алфимова Н.И., Попов М.А., Калатоzi В.В. Мелкоштучные изделия на основе композиционных вяжущих с использованием отходов Ковдорского месторождения // В сборнике: Инновационные материалы и технологии (XX научные чтения) Материалы Международной научно-практической конференции. 2013. С. 302–305.
9. Сулейманова Л.А., Малюкова М.В. Повышение качества мелкоштучных изделий за счет равномерного заполнения формы жесткой смесью // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 56–60.