

**ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

МАСЛОВ Александр Гаврилович

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И РАЗРАБОТКА ПОЛИЧАСТОТНЫХ
ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН ДЛЯ ОБРАБОТКИ И
УПЛОТНЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ И
ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

05.05.04 — дорожные и строительные машины

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

г. Харьков, 1994 г.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00755941 (V)

Харьковский государственный автомобильно-дорожный
технический университет

На правах рукописи

Маслов Александр Гаврилович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ И РАЗРАБОТКА ПОЛИЧАСТОТНЫХ
ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН ДЛЯ ОБРАБОТКИ И УПЛОТНЕНИЯ
АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ И ЦЕМЕНТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

05.05.04 – дорожные и строительные машины

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

ЛНБ ім. В. Стефаники
АН України

г. Харьков, 1994г.

Диссертация представлена в виде рукописи

Работа выполнена в Кременчугском филиале Харьковского государственного политехнического университета

Научный консультант – доктор технических наук,
профессор Холодов Андрей Михайлович

Официальные оппоненты:

докт. техн. наук, профессор Назаренко Иван Иванович

докт. техн. наук, профессор Емельянова Инга Анатольевна

докт. техн. наук, профессор Золотарев Виктор Александрович

Ведущая организация:

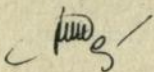
Акционерное общество "Кременчугские дорожные машины"
(Кременчугское производственное объединение "Дормашина")

Защита состоится "7" декабря 1994 г. в 14⁰⁰ час.
на заседании специализированного ученого Совета Д 02.17.02 при
Харьковском государственном автомобильно-дорожном техническом
университете по адресу: 310078, г.Харьков, ул.Петровского, 25.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского
государственного автомобильно-дорожного технического универси-
тета по адресу: 310078, г.Харьков, ул. Петровского, 25.

Автореферат разослан "2" ноября 1994 г.

Ученый секретарь специализированного ученого Совета,
кандидат технических наук, доцент



Подригало М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Вибрационные машины и процессы занимают существенное место в строительном производстве. Они широко используются для приготовления смеси, уплотнения грунта, дорожных оснований и покрытий, формирования бетонных и железобетонных изделий и выполнения других технологических операций.

Практика использования вибрационных машин и механизмов показывает, что наибольший эффект в строительном производстве при перемешивании, обработке и уплотнении асфальтобетонных и цементобетонных смесей дают поличастотные вибрационные машины, позволяющие снизить энергоемкость процесса, повысить производительность и увеличить прочность изделий.

Конструктивные схемы поличастотных вибрационных машин, как правило, сравнительно не сложны, но для эффективной и надежной работы необходимо точно выбрать их параметры и режимы вибрационного воздействия в зависимости от вида и физико-механических характеристик обрабатываемого материала. Для чего необходимо изучить физико-механические процессы, происходящие в обрабатываемом материале при вибрационном воздействии, и на этой основе исследовать динамику вибрационных машин и обрабатываемого материала.

Настоящая работа посвящена изложению научно-обоснованных технических решений по созданию научных основ и разработке поличастотных вибрационных машин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей, переводу процесса разработки и проектирования вибрационных машин на качественно новый уровень, реализация которых вносит заметный вклад в научно-технический прогресс.

Исследования выполнялись в соответствии с комплексной программой О.Ц.031, утвержденной Постановлением Госстроя СССР, ГИИТ СССР и Госплана СССР от 22 декабря 1981 года №205/509/246 по ре-

шению научно-технической проблемы "Создать и освоить в производстве вибрационные машины различного технологического назначения, обеспечивающие значительное повышение производительности труда, экономию материальных, энергетических и трудовых ресурсов и улучшение условий труда", на основании постановления Совета Министров УССР №272 от 14 июля 1985г., планов отраслевых министерств и ведомств - Минстройдормаша СССР, Минстроя УССР, Укргростроя, Укоопсоюза, Миндорстроя УССР.

Цель работы заключается в создании научных основ процессов вибрационной обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей, изучении напряженно-деформированного состояния уплотняемой среды при взаимодействии её с рабочим органом вибрационной машины и разработка на этих основах высокоэффективных поличастотных вибрационных машин для приготовления, обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей.

Для решения этой проблемы автором предложены и обоснованы три направления:

1. Разработка теории вибрационного уплотнения и обработки асфальтобетонных и цементобетонных смесей и создание на этой основе новых технологических процессов приготовления, укладки и уплотнения строительных материалов.
2. Разработка теории и инженерных методов расчета поличастотных вибрационных машин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей.
3. Создание поличастотных вибрационных машин.

Научная новизна и практическая ценность выполненной работы. На основе анализа явлений, происходящих в уплотняемой среде, уточнена существующая и сформулирована более общая гипотеза вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей. В зависимости от интенсивности прикладываемой динамической нагрузки и физико-меха-

нических характеристик смесей определены продолжительность, плотность и коэффициент уплотнения асфальтобетона, скорость перемещения рабочего органа. Исследовано совместное движение уплотняемой среды, представленной в виде системы с распределенными параметрами, и виброударного рабочего органа с одночастотным возбуждением колебаний и, на основе изучения распространения упруго-пластических волн деформаций, определены реологические характеристики асфальтобетонных смесей, напряженно-деформированное состояние уплотняемой среды, закон движения и основные параметры рабочего органа. Обоснованы рациональные режимы вибрационного воздействия и предложены новые способы уплотнения асфальтобетонных смесей.

Уточнена существующая гипотеза вибрационного уплотнения цементобетонных смесей и определены необходимая продолжительность уплотнения и плотность цементобетона в зависимости от интенсивности вибрационной нагрузки, направления вибрации, количества частот возмущения и физико-механических характеристик смеси. Исследовано совместное движение уплотняемой среды и виброплощадки с вертикально направленными и горизонтальными одночастотными и поличастотными колебаниями и на основе изучения распространения упруго-пластических волн деформаций определены реологические характеристики цементобетонных смесей, закон движения уплотняемой среды и виброплощадки, напряжения в уплотняемом слое. Установлены рациональные режимы вибрационного воздействия и предложены новые способы уплотнения цементобетонных смесей.

Предложена гипотеза и разработаны новые способы вибрационной обработки и приготовления асфальтобетонных смесей. Разработаны теория и методы расчета, позволяющие определить закон движения и основные параметры поличастотных вибрационных машин для обработки асфальтобетонных смесей, закон движения и напряжения

в обрабатываемом слое, выбрать рациональные параметры вибрационного воздействия. Созданы новые конструкции установок для обработки и приготовления асфальтобетонных смесей.

Разработаны теория, методы расчета и конструкции рабочих органов асфальтоукладочных машин с поличастотными вертикальными и крутильными колебаниями виброплиты, позволяющие определить закон движения и основные параметры этих рабочих органов в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемой среды, найти напряжения в уплотняемом слое, выбрать скорость перемещения и режимы вибрационного воздействия в зависимости от типа смеси и толщины уплотняемого слоя.

Предложены теория, методы расчета и конструкция поличастотных вибрационных устройств бетоносмесителей и установок для обработки цементобетонных смесей.

Разработаны методы расчета поличастотных инерционных и резонансных виброплощадок с пространственными колебаниями, основанные на теоретических исследованиях совместного движения виброплощадки и уплотняемой среды, представленной в виде системы с распределенными параметрами. Предложены новые конструкции поличастотных виброплощадок.

Конструктивные решения вибрационных машин и способы приготовления, обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей, предложенные автором или разработанные при его непосредственном участии, защищены авторскими свидетельствами.

Внедрение результатов работы. Созданы и внедрены в производство:

- асфальтосмесительные установки непрерывного действия с вибрационной обработкой асфальтобетонных смесей ДСВ-50 и ДСВ-200 про-

изводительностью 50 и 200 т/ч;

- вибрационная установка для обработки асфальтобетонных смесей на опытный образец регенерационной асфальтосмесительной установки ДС-154;
- экспериментальные образцы поличастотных рабочих органов асфальтоукладчиков с поличастотными вертикальными и крутильными колебаниями;
- вибрационные бетоносмесители БП-100В, БП-250В и БП-750В с емкостью по загрузке 100, 250 и 750 л и бетоносмеситель непрерывного действия производительностью 100 т/ч;
- бетоно-раствороукладочная машина с вибрационными устройствами для обработки керамзитобетонной смеси и раствора;
- поличастотные виброплощадки с пространственными колебаниями ПВ-15, ПВ-20, ПВ-25, ПВ-30, ПВ-40 грузоподъемностью 15, 20, 25, 30 и 40 т.

Разработаны и переданы в производство:

- нормативно-техническая и конструкторская документация на асфальтосмесительную установку ДСВ-50 (ТУ 10.20 УССР 112-90), бетоносмесители БП-100В и БП-250В (ТУ 61 УССР 155-88), поличастотные виброплощадки и вибрационные рабочие органы асфальтоукладочных машин;
- прикладные объектно-ориентированные программы для расчета на ПЭВМ рабочих режимов поличастотных вибрационных машин.

Разработаны и внедряются в производство:

- вибрационный рабочий орган прицепного асфальтоукладчика;
- асфальтосмеситель производительностью 50 т/ч.

Результаты работы внедрены в Кременчугском производственном объединении "Дормашина", Волгодонском опытном заводе Миндорстроя России, Кременчугском энергомеханическом заводе, Кременчугском опытно-экспериментальном механическом заводе Укоопсоюза, ВНИИ-

Стройдормаше, на ряде заводов ЖБИ и дорожно-строительных организаций строительных министерств Украины и России.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на Всесоюзном совещании по вибрационной технике (Тбилиси, 1978), научно-техническом совете РПО "Укрпромжелезобетон" Минстроя УССР (Калуш, 1980), Всесоюзной конференции по вибрационной технике (Кутаиси, 1981), Всесоюзном совещании по основным направлениям научно-технического прогресса в дорожном строительстве (Москва, 1981), секции научно-технического совета НПО "ВНИИ-Стройдормаш" (Москва, 1988), на кафедре дорожных и строительных машин и объединенном семинаре ХАДИ (Харьков, 1988, 1994), Республиканской научно-практической конференции по внедрению новой техники в системе Укragростроя (Харьков, 1988), научно-техническом совете Укragростроя (Киев, 1990), Международной научно-практической конференции "Актуальные вопросы охраны окружающей среды от антропогенного воздействия" (Кременчуг, 1994).

На защиту выносятся:

- основы теории вибрационных процессов уплотнения и обработки асфальтобетонных и цементобетонных смесей;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований вибрационных процессов уплотнения и обработки асфальтобетонных и цементобетонных смесей на основе изучения напряженно-деформированного состояния уплотняемой среды, представленной в виде системы с распределенными параметрами и совместного её движения с рабочим органом вибрационной машины;
- рациональные режимы поличастотных вибрационных способов приготовления, укладки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей, обеспечивающих эффективную и качественную проработку этих смесей;
- теоретические и экспериментальные исследования поличастотных

вибрационных машин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей в условиях взаимодействия с обрабатываемой напряженно-деформируемой средой;

- инженерные методы расчета и принципы создания вибромашин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей с рациональными энергетическими характеристиками; результаты внедрения этих машин.

Публикации. По материалам, изложенным в диссертации, опубликовано 106 работ, в том числе 1 монография, 2 технических условия, 47 авторских свидетельств.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего 254 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Состояние и актуальность проблемы

Большой вклад в развитие вибрационной техники вообще и уплотняющих вибрационных машин и технологии в частности, внесли известные ученые И.И.Артоболевский, А.А.Афанасьев, Д.Д.Баркан, В.А.Бауман, И.И.Блехман, И.И.Быховский, А.А.Борщевский, И.Ф.Гончаревич, Б.Г.Гольдштейн, Б.В.Гусев, А.Е.Десов, Б.И.Зыков, Б.И.Крюков, Э.Э.Лавендел, А.Н.Лялинов, Е.П.Миклашевский, И.И.Назаренко, Я.Г.Пановко, В.Н.Потураев, К.М.Рагульскис, И.Ф.Руденко, О.А.Савинов, П.Ф.Овчинников, К.А.Олехнович, С.А.Осмаков, К.Ф.Фролов, Н.Я.Хархута, Д.Ф.Чубук, В.Н.Шмигальский и др. В своих работах они заложили фундаментальные теоретические основы вибрационной техники, обеспечив её развитие как в научном, так и в прикладном направлениях.

Анализ исследований по вибрационной технике и технологии показывает, что вопрос вибрационной обработки цементобетонных и

асфальтобетонных смесей практически не исследован. Для промышленного освоения этих процессов необходимо изучить механизм и предложить новые эффективные способы вибрационной обработки, провести теоретические и экспериментальные исследования, разработать промышленные вибрационные устройства и исследовать их рабочие режимы.

Внедрение вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей основывается главным образом на работах И.М.Эвентова, М.П.Зубанова, Н.Я.Хархуты, Н.П.Бородачева, С.А.Цаплина, С.К.Носкова, Г.А.Ромаданова, В.Н.Кононова, С.А.Варганова и др. Детальное ознакомление с этими работами показывает, что приведенные в них данные, касающиеся параметров уплотнения асфальтобетонных смесей (частота и амплитуда колебаний, температура уплотняемой смеси, тип смеси и процентное содержание битума в ней, скорость перемещения вибрационного рабочего органа относительно уплотняемой поверхности) не исчерпывают вопроса, а иногда противоречивы. Во многих исследованиях предполагалось, что вибрационный рабочий орган колеблется безотрывно от уплотняемой среды (М.П.Зубанов, А.Б.Десов, М.П.Миклашевский, Н.П.Бородачев, М.И.Эстрин и др.), которая представлялась в виде реологической модели из упругих элементов, либо элементов Кельвина. Однако было установлено, что при увеличении амплитуды колебаний виброплиты более 0,3-0,4 мм, вибрационная система переходит в виброударный режим работы. Рассмотрение же движения системы, работающей в виброударном режиме, с точки зрения теории гармонических колебаний, всегда приводит к количественным и качественным ошибкам в оценке происходящих явлений. Общеизвестным считается (И.И.Быховский, А.Е.Десов, Н.Н.Круглицкий и др.), что вибрационное уплотнение цементобетонных смесей происходит вследствие вызываемого вибрацией разрушения структурных связей, уменьшения сил тре-

ния и сцепления, а также предела текучести, что создает условия для проявления течения при более низких сдвиговых напряжениях. В этом и других предлагаемых механизмах уплотнения (Е.М. Куприянов, Р.Лермит, Н.В.Михайлов) не в полной мере учитываются физико-механические свойства уплотняемой среды, характер внешнего вибрационного воздействия и инерционных сил, возникающих в уплотняемом слое. Предложенные критерии оценки эффективности вибрационного уплотнения цементобетонных смесей (частота ω , амплитуда A , скорость колебаний $A\omega$, ускорение $A\omega^2$, интенсивность вибрационного воздействия $A^2\omega^3$) носят, в основном, эмпирический характер, связаны в проработкой узкого диапазона амплитудно-частотных характеристик, вида и форм колебаний и не позволяют определить нарастание и достигаемые значения плотности бетона, необходимую продолжительность уплотнения в зависимости от направления, вида и интенсивности вибрационного воздействия, физико-механических характеристик смеси, толщины уплотняемого слоя. Дискуссионным остается вопрос о влиянии частоты колебаний на эффективность уплотнения цементобетонных смесей.

Следовательно, вопрос вибрационного уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей требует дальнейшего изучения в теоретическом и экспериментальном плане. Для комплексного решения этой проблемы необходимо: уточнить механизм вибрационного уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей и разработать критерии оценки эффективности уплотнения в зависимости от параметров вибрационного воздействия, вида и форм колебаний, физико-механических характеристик уплотняемой среды; уточнить релогическую модель и разработать более эффективные способы уплотнения; исследовать совместное движение вибрационной машины и уплотняемой среды, представленной в виде системы с распределенными параметрами, и определить её напряженно-деформируемое состояние,

разработать новые типы вибрационных машин и изучить их взаимодействие с уплотняемой средой.

2. Физико-механические основы вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей

Асфальтобетонная смесь представляет собой рыхлую среду с произвольным ориентированием минеральных частиц и их агрегатов, покрытых битумной пленкой. При вибрационном воздействии периодические импульсы, передаваемые от рабочего органа, создают в асфальтобетонной среде упруго-пластические волны деформаций, вызывающих уменьшение сил поверхностного натяжения битума, нарушение первоначальных связей и увеличение подвижности частиц каменного остова. Большая подвижность минеральных частиц приводит к их соударениям, переориентации и относительному сближению друг с другом с образованием большего количества контактов, а следовательно, и более плотной упаковки. Каждый цикл вибрационного воздействия сопровождается разрушением первоначальной структуры уплотняемой среды, её течением, вытеснением воздуха и образованием новой более плотной структуры, имеющей большее количество контактов, а следовательно, и большую прочность. По мере возрастания плотности асфальтобетонной смеси возрастают напряжения, необходимые для её деформирования, нарушения образовавшихся связей и дальнейшего уплотнения, т.е. каждому значению плотности соответствует свое минимальное значение напряжений, обеспечивающих разрушение структуры асфальтобетонной смеси.

Характер протекания процесса уплотнения определяется интенсивностью вибрационных нагрузок, вызывающих пластическое деформирование слоя асфальтобетона, и может быть описан следующим выражением:

$$\rho = \rho_0 + (\rho_k - \rho_0) \left(\frac{P}{P_k} \right)^n \cdot \exp \left[\left(\frac{T - T_k}{T} + \frac{32 - \omega_c}{\omega_c} \right) \alpha_0 \right], \quad (1)$$

где ρ - плотность смеси, соответствующая прикладываемой динамической нагрузке P ; ρ_0 - начальная плотность смеси; ρ_K - плотность смеси при стандартной нагрузке $P_K = 40$ МПа; n - показатель степени, принимаемый равным $(\rho_K - \rho_0)/(2\rho_0)$; T , T_K - температура асфальтобетонной смеси при уплотнении вибрационным воздействием и стандартной нагрузкой, $T_K = 145^\circ\text{C}$; α_0 - эмпирический коэффициент, принимаемый в зависимости от типа смеси: $\alpha_0 = 0,35$ для мало- и среднещебенистой, а для многощебенистой $\alpha_0 = 0,25$; ω - содержание щебня в средне- и многощебенистой асфальтобетонной смеси, %; для малощебенистой и песчаной смесей $\exp\left(\frac{32-\omega}{\omega}\right) = 1$.

Динамическая нагрузка, действующая в процессе уплотнения на асфальтобетонную смесь, может быть представлена в виде произведения интенсивности динамической нагрузки J на время её приложения t , т.е. $P = Jt = \sigma_0 \omega t$, где σ_0 - амплитуда напряжений, возникающих в уплотняемом слое асфальтобетонной смеси, МПа; ω - частота колебаний, Гц. Напряжения в уплотняемом слое должны быть больше или равны минимальным напряжениям $\sigma_{0i} = 0,08-0,09$ МПа, обеспечивающим предельное разрушение структуры асфальтобетонной смеси и наиболее эффективное уплотнение.

Зависимость между напряжением и деформацией асфальтобетонной среды может быть описана уравнением

$$\sigma = E \frac{\partial u}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + f u, \quad (2)$$

где u и x - эйлерова и лагранжева координаты; E и η - динамический модуль упругой деформации и коэффициент динамической вязкости асфальтобетонной смеси; f - коэффициент сопротивления, учитывающий затраты энергии на процессы, сопровождающие колебания уплотняемого материала (конечные перемещения частиц, их соударение и переориентация, трение слоев асфальтобетона, перераспределение битума и др.).

Для диапазона температур от 120 °С до 150 °С, при котором обычно осуществляется укладка и вибрационное уплотнение асфальтобетонных смесей, элементы E , f и η зависят от относительной плотности и типа смеси:

$$E = E_0 \left[1 + M \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_k - \rho_0} \right)^z \right]; \quad f = f_0 \left[1 + \Omega \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_k - \rho_0} \right)^f \right]; \quad (3)$$

$$\eta = \alpha \rho H_1.$$

Здесь E_0 , f_0 - динамический модуль упругой деформации и коэффициент сопротивления при начальной плотности ρ_0 ($E_0 = 0,95; 1,1; 1,2$ МПа; $f_0 = 24,4; 21,3; 18,4$ МПа/м соответственно для мало-, средне- и многощебенистых асфальтобетонных смесей); M , z , Ω , f - экспериментальные коэффициенты, принимаемые соответственно 10; 3; 0,92 и 2; α - скорость распространения возмущения в уплотняемом слое; H_1 - приведенная толщина уплотняемого слоя асфальтобетона, принимаемая в зависимости от направленности вибрационного воздействия на уплотняемый слой и соотношения между толщиной слоя и длиной волны возмущения $L = (2\pi/\omega) \sqrt{E/\rho}$:

а) при вибрационном воздействии на поверхность уплотняемого слоя, уложенного на жесткое основание, и $H \leq \frac{1}{4}L$, $H_1 = 0,7H$, а если $H \geq \frac{1}{4}L$, то $H_1 = 0,7 \frac{1}{4}L$;

б) при вибрационном воздействии на основание уплотняемого слоя и $H \leq \frac{1}{4}L$, $H_1 = H$, а если $H \geq \frac{1}{4}L$, то $H_1 = \frac{1}{4}L$;

Для изучения динамических процессов, возникающих при вибрационном уплотнении асфальтобетонных смесей, была рассмотрена динамическая система "виброплита - уплотняемая среда" (Рис. 1). Под действием возмущающей силы $Q \sin \omega t$ виброплита массой m , подвешенная к несущим брускам базовой машины на упругих амортизаторах с коэффициентами жесткости C_3 и демпфирования B_3 , приобретает периодические движения в отрыве от уплотняемой среды и в контак-

те с ней.

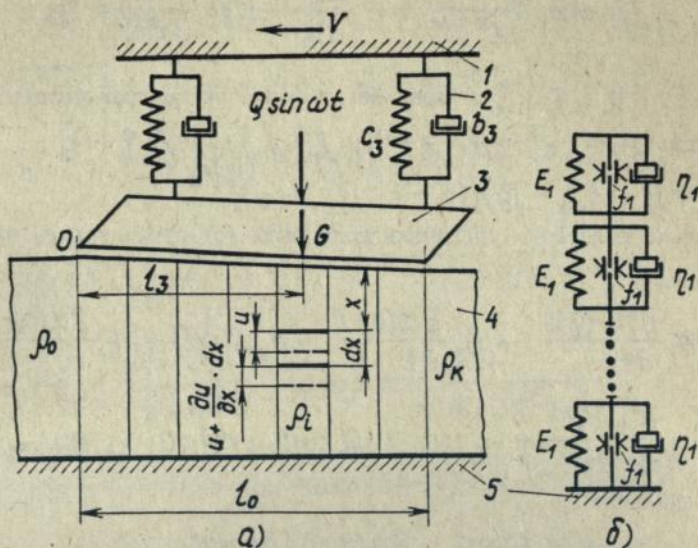


Рис. 1. Расчетная схема (а) и реологическая модель элементарного столба асфальтобетона из n элементов (б):

1 - несущие брусья; 2 - упругие амортизаторы; 3 - виброплита; 4 - асфальтобетон; 5 - основание.

Поскольку изучаемая система является существенно нелинейной, её движение рассматривались поэтапно: удар и совместное движение виброплиты и уплотняемой среды за время t_1 ; отрыв от уплотняемой среды и движение виброплиты в воздухе до следующего удара за время t_2 . Условие периодичности движения:

$$t_1 + t_2 = 2\pi n / \omega, \quad (4)$$

где n - коэффициент, определяющий периодичность ударов.

На первом этапе движения дифференциальное уравнение движения уплотняемой среды в направлении координаты x за время t будет иметь вид $\partial \sigma / \partial x = \rho_i \partial^2 u / \partial t^2$ или с учетом зависимости (2)

$$E_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta_1 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + f_1 \frac{\partial u}{\partial x} - \rho_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

где E_1 , η_1 , f_1 , ρ_1 - средние значения параметров уплотняемой

среды: $E_1 = E_0 [1 + \mu / (z + 1)]$; $f_1 = f_0 [1 + \Omega / (\xi + 1)]$;

$$\rho_1 = \rho_0 + (\rho_k - \rho_0) [(E_1 - E_0) / (\mu E_0)]^{1/2}.$$

Решение волнового уравнения колебаний /5/ отыскивалось при граничных

$$\begin{aligned} -m_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - b_3 \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} - c_3 u(0,t) + FE_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \\ + F \eta_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} + F f_1 u(0,t) + Q \sin(\omega t + \psi) = 0; \quad u(H,t) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

и начальных

$$u(x,0) = 0; \quad \partial u(x,0) / \partial t = v_1 \quad (7)$$

условиях.

Здесь F - опорная поверхность виброплиты; ψ - угол сдвига фаз между перемещением виброплиты и возмущающей силой в момент удара об уплотняемую среду; v_1 - скорость виброплиты в момент удара.

Решение уравнения (5), удовлетворяющее граничным (6) и начальным (7) условиям, было найдено в виде:

$$\begin{aligned} u(x,t) = \frac{A_2 \omega}{p} \cdot \frac{\sin[\rho_0(H-x)/a_1]}{\sin(\rho_0 H/a_1)} e^{-(\delta_1 x + \alpha_3 t)} \cdot \sin pt + \\ + A e^{-\delta_1 x} \frac{\sin k_1(H-x)}{\sin k_1 H} \left[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \Delta e^{-\alpha_3 t} \sin(pt + \beta) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$A = Q / \left[m_1 \sqrt{(\rho_0^2 - \omega^2)^2 + b^2 \omega^2 / m_1^2} \right]; \quad (9)$$

$$A_2 = Q / \left[m_1 \sqrt{(q_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta_3^2 \omega^2} \right]; \quad \rho_0 = \sqrt{(c + c_3) / m_1}; \quad (10)$$

$$c = F[E_1(\kappa_1 \operatorname{ctg} \kappa_1 H + \delta_1) + \eta_1 \nu_1 \omega^2 - f]; \quad \kappa_1 = \omega/a_1; \quad (11)$$

$$\rho = \sqrt{p_0 - \alpha_3^2}; \quad q_0^2 = c_3/m_1; \quad \delta_3 = \beta_3/(2m_1);$$

$$\alpha_3 = \beta/(2m_1); \quad \beta = \beta_3 + F[\eta_1(\kappa_1 \operatorname{ctg} \kappa_1 H + \delta_1) - \nu_1 E_1]; \quad (12)$$

$$\delta_1 = \frac{f_1 E_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)} + \alpha_1; \quad \nu_1 = \frac{\eta_1 f_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)}; \quad (13)$$

$$\psi = \alpha z \operatorname{ctg} \frac{2\delta_3 \omega}{q_0^2 - \omega^2}; \quad \varphi = \alpha z \operatorname{ctg} \frac{\beta \omega}{m_1(p_0^2 - \omega^2)};$$

$$\beta = \alpha z \operatorname{ctg} \left\{ p \sin(\psi - \varphi) / [\omega \cos(\psi - \varphi) + \alpha_3 \sin(\psi - \varphi)] \right\};$$

$$\Delta = \sqrt{\left[\frac{\omega \cos(\psi - \varphi) + \alpha_3 \sin(\psi - \varphi)}{\rho} \right]^2 + \sin^2(\psi - \varphi)}$$

Используемые в выражениях (8) и (13) фазовая скорость распространения колебаний a_1 и коэффициент поглощения α_1

$$a_1 = \omega / \sqrt{z_1 + \sqrt{z_2}}; \quad \alpha_1 = \sqrt{-z_1 + \sqrt{z_2}}, \quad (14)$$

где

$$z_1 = \frac{\beta_1^2 \omega^2 E_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)} - \frac{f_1^2 (E_1^2 - \eta_1^2 \omega^2)}{8(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)^2},$$

$$z_2 = \frac{\beta_1^2 \omega^4}{E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2} + \frac{f_1^4}{16(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)^2} - \frac{\beta_1 \omega^2 f_1^2 E_1}{2(E_1^2 + \eta_1^2 \omega^2)^2}$$

Выражение (8) описывает движение уплотняемой среды в зависимости от координаты X и времени t . При $X=0$ оно характеризует движение верхнего слоя уплотняемой среды и движение виброплиты в

контакте с уплотняемой средой.

Через некоторое время t_{12} произойдет максимальное деформирование поверхности уплотняемой среды и скорость виброплиты при этом станет равной нулю, т.е. $u(0, t_{12}) = A_1$; $\dot{u}(0, t_{12}) = 0$.

Процесс отрыва и движения виброплиты в воздухе до следующего взаимодействия с уплотняемой средой описывается уравнением

$$m_1 \frac{d^2 u}{dt^2} + b_3 \frac{du}{dt} + c_3 u = Q \sin[\omega(t+t_1) + \psi],$$

решение которого будет иметь вид

$$u(t) = (A_1 - A_2) e^{-\delta_3 t} (\cos qt + \frac{\delta_3}{q} \sin qt) + A_2 \cos \omega t. \quad (15)$$

Нормальные напряжения $\sigma(x, t)$, возникающие в уплотняемом слое асфальтобетона, определяются при подстановке выражения (8) в зависимость (2).

Для эффективной проработки асфальтобетонной смеси необходимо, чтобы амплитуда напряжений, возникающих в основании слоя асфальтобетона, превышала бы или была равна минимальным напряжениям σ_{oi} , обеспечивающим предельное разрушение структуры смеси, т.е. $\sigma(H, t_{12}) \geq \sigma_{oi}$. Используя это условие и выражения (1) и $\sigma(x, t)$, были получены зависимости для определения скорости перемещения рабочего органа V и амплитуды возмущающей силы Q .

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований было установлено:

1. Эффективность уплотнения асфальтобетонных смесей повышается с ростом динамической нагрузки $P = \sigma \omega t$ и температуры смеси и снижается с увеличением содержания щебня более 32%.

Наибольшее расхождение теоретических и экспериментальных значений плотности асфальтобетона наблюдается при уплотнении мнонощебенистых смесей, но не превышает 0,5%, что свидетельствует о хорошем соответствии предложенной зависимости физической сущнос-

ти процесса уплотнения.

2. Наиболее рациональным с точки зрения энергоемкости и эффективности процесса уплотнения является использование вибрационного воздействия в виде колебаний с угловой частотой $\omega = 335-370$ рад/с и амплитудой $A_2 = 0,75$ мм, обеспечивающих формирование асфальтобетонного слоя толщиной 40-70 мм с коэффициентом уплотнения 0,98-0,99 при скорости перемещения виброплиты 1,7-2,4 м/мин и температуре смеси 125-140 °С. Для уплотнения асфальтобетонного слоя толщиной 100 мм необходимо использовать колебания с той же частотой и амплитудой $A_2 = 0,95$ мм. Мало- и среднещебенистые асфальтобетонные смеси уплотняются лучше, чем многощебенистые смеси.

3. Основные параметры вибрационного рабочего органа целесообразно выбирать из условия, при котором угловая частота собственных колебаний динамической системы "виброплита - уплотняемая среда" располагается в диапазоне $\rho = 200-450$ рад/с, причем большие значения необходимо принимать при толщине слоя $H = 40$ мм, а меньшие - при $H = 100$ мм.

3. Физико-механические основы вибрационного уплотнения бетонных смесей

В приготовленной бетонной смеси, представляющей собой сложную многокомпонентную полидисперсную систему, вода занимает значительный объем. Из него 4-7% находится в физико-химической, а 93-95% - физико-механической связи (свободная вода) с цементом и заполнителем. Свободная вода удерживается на поверхности частиц силами поверхностного натяжения. При вибрационном воздействии на бетонную среду в ней возникают упруго-пластические волны деформаций, которые разрушают первоначальные связи и увеличивают подвижность заполнителя, что приводит к соударениям, периориентации и сближению частиц, вытеснению части воздуха и, как следствие, к образованию более плотной упаковки и заметной осадке

смеси. Наряду с увеличением подвижности уплотняемой среды возрастают инерционные силы, действующие на водные пленки, покрывающие поверхность частиц. Когда инерционные силы превышают силы поверхностного натяжения, часть свободной воды отделяется от пленок и заполняет межзерновое пространство, выполняя при этом роль смазки между частицами и обеспечивая лучшую передачу вибрационных воздействий от одной частицы к другой. Чем больше свободной воды находится в межзерновом пространстве, тем эффективнее процесс уплотнения. Количество выделенной свободной воды зависит от водосодержания смеси и интенсивности вибрационного воздействия. Поэтому для смесей с пониженным водосодержанием (жесткие смеси) требуются интенсивные вибрационные воздействия, при которых инерционные силы превышают силы поверхностного натяжения тонких пленок. Поскольку инерционные силы пропорциональны ускорениям, то для разжижения смесей предпочтительны режимы уплотнения с малыми амплитудами и большими частотами колебаний. Однако применение на заключительной стадии процесса уплотнения высокочастотных колебаний с малыми амплитудами увеличивает продолжительность обработки из-за небольших относительных перемещений частиц. Для интенсификации процесса уплотнения необходимо в бетонной смеси создать под действием вибрационного возмущения большую относительную подвижность частиц соответствующим динамическим давлением. Этого можно достичь увеличением размаха колебаний и созданием эффекта встряхивания при поличастотном вибрационном воздействии, когда на основную гармонику в виде высокочастотных колебаний с небольшой амплитудой дополнительно накладываются низкочастотные колебания с большой амплитудой /54/ или низкочастотные и среднечастотные колебания /53/. Поскольку динамическое давление и частота его приложения существенно влияют на процесс уплотнения и взаимодействия бетонной смеси с вибрационным

рабочим органом (виброплощадкой), то в качестве основного фактора, определяющего характер протекания процесса уплотнения, принята интенсивность динамической нагрузки $\mathcal{I} = \sigma_{ср} \omega$, где $\sigma_{ср}$ - средние напряжения, возникающие в уплотняемом слое. При одновременном воздействии на бетонную смесь касательными и нормальными напряжениями используется среднее эквивалентное напряжение

$$\sigma_{эkv. ср} = \sqrt{\sigma_{ср}^2 + 3\tau_{ср}^2}. \quad (16)$$

Характер нарастания плотности бетонной смеси может быть определен из зависимости (1) при условии, что температурный фактор не влияет на её уплотняемость, а стандартная динамическая нагрузка P_k , обеспечивающая требуемое уплотнение, зависит от подвижности (консистенции) бетонной смеси. Зависимость между напряжением и деформацией в бетонной среде при нормальном приложении вибрации может быть описана уравнением (2). Используемые при этом элементы E и f существенно зависят от консистенции и относительной плотности бетонной смеси.

При действии на подвижную раму виброплощадки вертикальной гармонической силы $Q \sin \omega t$, движение уплотняемой среды будет описываться уравнением (5) при значениях элементов бетонной смеси E, f, η , а граничные условия при этом будут иметь вид

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_3 u(0,t) + EF \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \eta F \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} + fFu(0,t) = -Q \sin \omega t; \quad (17)$$

$$EF \frac{\partial u(H,t)}{\partial x} + \eta F \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x \partial t} + fFu(H,t) = 0, \quad (18)$$

Здесь m - масса подвижной рамы виброплощадки с формой без бетонной смеси; F - площадь днища формы с бетонной смесью.

Решение уравнения (5) с учетом граничных условий (17) и (18):

$$u(x,t) = e^{-\delta x} \frac{A}{\sqrt{B_1^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_1) + B_2^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_2)}} \times \\ \times \left\{ B_1 \cos[\kappa(H-x) + \lambda_1] \sin[\omega(t + \nu x) - \beta_1 - \beta_2] + \right. \\ \left. + B_2 \cos[\kappa(H-x) + \lambda_2] \cos[\omega(t + \nu x) - \beta_1 - \beta_2] \right\}, \quad (19)$$

где A - амплитуда движения подвижной рамы виброплощадки:

$$A = \frac{Q}{\sqrt{(c_1 + c_3 - m\omega^2)^2 + b_1^2 \omega^2}} \quad (20)$$

$$B_1 = \sqrt{(\kappa E)^2 + (\delta E + \nu \eta \omega^2 - f)^2}; \quad B_2 = \omega \sqrt{(\eta \kappa)^2 + (\eta \delta - \nu E)^2} \quad (21)$$

$$\lambda_1 = \alpha \text{arctg} \left[\frac{(\delta E + \nu \eta \omega^2 - f)}{(\kappa E)} \right]; \quad \lambda_2 = \alpha \text{arctg} \left[\frac{(\eta \delta - \nu E)}{(\eta \kappa)} \right]; \quad (22)$$

$$c_1 = [E(\delta - \kappa d_1) + \nu \eta \omega^2 + \eta \kappa d_2 \omega - f] \cdot F; \quad (23)$$

$$b_1 = [E(\kappa d_2 / \omega + \nu) + \eta \kappa d_1 - \eta \delta] \cdot F; \quad (24)$$

$$d_1 = 0,5 \frac{B_1^2 \sin 2(\kappa H + \lambda_1) + B_2^2 \sin 2(\kappa H + \lambda_2)}{B_1^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_1) + B_2^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_2)}; \quad (25)$$

$$d_2 = \frac{B_1 B_2 \sin(\lambda_2 - \lambda_1)}{B_1^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_1) + B_2^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_2)}; \quad (26)$$

$$\beta_1 = \alpha \text{arctg} \frac{b_1 \omega}{c_1 + c_3 - m\omega^2}; \quad \beta_2 = \alpha \text{arctg} \frac{B_2 \cos(\kappa H + \lambda_2)}{B_1 \cos(\kappa H + \lambda_1)};$$

c_3 - жесткость упругих опор виброплощадки; δ, κ, ν - коэффициент затухания, волновое число и коэффициент дополнительного смещения, определяемые зависимостями (I2+I4) при значениях параметров бетонной смеси ρ, E, η, f .

Выражение (19) служит для определения закона движения бетонной смеси при различных значениях координаты x и времени t . При $x=0$ оно описывает движение нижнего слоя бетонной смеси и подвижной рамы виброплощадки.

Напряжения, возникающие в уплотняемом слое, определяются при подстановке зависимости (19) в уравнение (2) и с учетом силы тяжести бетонной смеси

$$\sigma(x, t) = \rho g(H-x) + \sigma(x) \sin[\omega(t+\gamma x) - \beta_3], \quad (27)$$

где $\sigma(x)$ — амплитуда напряжений в уплотняемом слое,

$$\sigma(x) = e^{-\delta x} \frac{\sqrt{(B_1^2 - B_2^2)^2 + 4B_1^2 B_2^2 \cos^2(\lambda_2 - \lambda_1)}}{\sqrt{B_1^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_1) + B_2^2 \cos^2(\kappa H + \lambda_2)}} \sin \kappa(H-x); \quad (28)$$

$$\beta_3 = \beta_1 + \beta_2 - \alpha \operatorname{ctg} [2B_1 B_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1) / (B_1^2 - B_2^2)].$$

Амплитуда средних напряжений в уплотняемом слое:

$$\bar{\sigma}_{cp}(x) = 0,5 \rho g H + \frac{1}{H} \int_0^H \sigma(x) dx. \quad (29)$$

Анализ выражений (27-29) и (20-26) показывает, что амплитуды напряжений $\sigma(x)$ и $\bar{\sigma}_{cp}(x)$ существенно зависят от физико-механических характеристик бетонной смеси, частоты и амплитуды колебаний, толщины уплотняемого слоя и соотношения частот вынужденных и собственных колебаний системы.

При полигармоническом возбуждении $Q(t) = \sum_{j=1}^n Q_j \sin \omega_j t$, действующем на подвижную раму виброплощадки в вертикальном направлении, закон движения уплотняемой среды и подвижной рамы и напряжения, возникающие в уплотняемом слое, определяются из выражений

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^n u_j(x, t); \quad \sigma(x, t) = \sum_{j=1}^n \sigma_j(x, t); \quad (30)$$

$$\sigma_{jcp} = \frac{1}{H} \int_0^H \sigma_j(x) dx.$$

Здесь $u_j(x, t)$, $\sigma_j(x, t)$ - перемещение и напряжения в уплотняемом слое, определяемые соответственно из выражений (19) и (27) при действии гармонической возмущающей силы $Q_j \sin \omega_j t$; σ_{jcp} - элементарная амплитуда средних напряжений j гармоники, определяемая на основании выражения (28).

При горизонтальных колебаниях виброплощадки днище формы вызывает в бетонной смеси касательные напряжения τ , изменение которых в зависимости от сдвиговых деформаций имеет вид

$$\tau = G \frac{\partial v}{\partial x} + \eta_{\tau} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} + f v, \quad (31)$$

где G - динамический модуль сдвиговых деформаций; η_{τ} - коэффициент динамической вязкости бетонной смеси при сдвиговых деформациях; v - смещение бетонной смеси в горизонтальной плоскости.

Поскольку бетонная среда обладает ярко выраженными анизотропными свойствами и $G \approx 0,025E$, то слагаемым $G \frac{\partial v}{\partial x}$, из-за его малости, можно пренебречь. Тогда при действии горизонтальной силы $Q(t) = \sum_{j=1}^n Q_j \sin \omega_j t$, движение уплотняемой среды в направлении координаты X и во времени t будет описываться уравнением

$$\eta_{\tau} \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial t} + f \frac{\partial v}{\partial x} - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0, \quad (32)$$

а граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} -m \frac{\partial^2 v(0, t)}{\partial t^2} - c_2 v(0, t) + \eta_{\tau} \frac{\partial^2 v(0, t)}{\partial x \partial t} \cdot F + f F v(0, t) = \\ = -\sum_{j=1}^n Q_j \sin \omega_j t; \quad \eta_{\tau} F \frac{\partial^2 v(H, t)}{\partial x \partial t} + f F v(H, t) = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

В результате решения полученных уравнений определены напряженно-деформированное состояние уплотняемой среды и закон дви-

жения виброплощадки, найдены соотношения основных параметров виброплощадки в зависимости от физико-механических характеристик уплотняемой среды.

В процессе экспериментальных исследований определена эффективность уплотнения пластичных и жестких смесей вертикально направленными, горизонтальными и пространственными одночастотными и поличастотными колебаниями. Экспериментальные исследования подтвердили соответствие предложенной теории физической сущности вибрационного процесса уплотнения бетонных смесей и позволили рекомендовать предложенную теорию и методы расчета для практического использования.

На основе проведенных исследований было установлено:

1. Необходимая продолжительность вибрационного воздействия на бетонную смесь зависит от эквивалентной динамической нагрузки

$$P_{экв} = t \sum_{j=1}^n G_{эквj} \omega_j$$
, консистенции и других физико-механических характеристик смеси и определяется зависимостью

$$t = \left(P_{н1} / \sum_{j=1}^n G_{эквj} \omega_j \right) \left(\frac{\rho_k - \rho_{o1}}{\rho_k - \rho_o} \right)^{n_1} \left(\frac{K_y \rho_k - \rho_o}{\rho_k - \rho_o} \right) \frac{2\rho_o}{\rho_k - \rho_o}.$$

Максимальное расхождение теоретических и экспериментальных значений необходимой продолжительности уплотнения не превышает 5-8% при угловой частоте колебаний $\omega = 300-375$ рад/с и 12% - при $\omega = 150$ рад/с.

2. Амплитуда колебаний виброплощадки с вертикально направленными колебаниями существенно зависит от статического момента массы дебалансов возбудителя колебаний, массы подвижной рамы, соотношения частот собственных и вынужденных колебаний динамической системы "виброплощадка - уплотняемая среда", коэффициента сопротивления смеси. С момента запуска амплитуда колебаний виброплощадки непрерывно уменьшается и стабилизируется в конце уплотнения.

3. Вертикально направленные колебания с $\omega = 225$ рад/с и $\omega = 300-375$ рад/с обеспечивают необходимое уплотнение бетонных смесей жесткостью соответственно до 30 с и 90-120 с. При этом продолжительность уплотнения $t = 160-180$ с, а режимы с $\omega = 300-375$ рад/с имеют высокую энергоемкость и их целесообразно использовать на виброплощадках малой грузоподъемности - 1-2 тонны.

4. Горизонтально направленные колебания с угловыми частотами 300, 225 и 150 рад/с могут быть использованы соответственно для формирования изделий из смесей жесткостью до 60, 30 с и осадкой конуса 3,5-3 см. Двухчастотные режимы колебаний ($\omega_1 = 150$ рад/с, $A_{1XX} = 0,75$ мм и $\omega_2 = 300$ рад/с и $A_{2XX} = 0,5$ мм) уменьшают продолжительность уплотнения в 1,33-1,65 раза и обеспечивают изготовление изделий из смесей жесткостью до 120 с. Поличастотные режимы вынужденных колебаний /52/ ($\omega_1 = 167,5$ рад/с, $A_{1XX} = 0,75$ мм, $\omega_2 = 251,2$ рад/с и $A_{2XX} = 0,5$ мм и $\omega_3 = 335$ рад/с и $A_{3XX} = 0,3$ мм) сокращают продолжительность проработки бетонных изделий по сравнению с одночастотным вибрационным воздействием в 2-2,5 раза, повышают прочность изделия и позволяют уменьшить расход цемента. При этом почти в 2 раза уменьшается амплитуда высокочастотной составляющей, что снижает уровень шума и повышает надежность виброплощадки.

5. Пространственные двух- и поличастотные режимы вибрационного воздействия /53, 54/ обеспечивают качественное формирование изделий из жестких и пластичных бетонных смесей и позволяют сократить продолжительность уплотнения в 1,5-3 раза, увеличить прочность изделия на 15-20%, снизить энергоемкость процесса. Пространственные двухчастотные режимы уплотнения целесообразно использовать на виброплощадках грузоподъемностью до 10 т, а поличастотные - на виброплощадках грузоподъемностью 15-40 т.

4. Исследование и разработка вибрационных установок для обработки асфальтобетонных смесей

Вготавливаемой асфальтобетонной смеси присутствуют два типа агрегатов: 1) образованных из слипшихся между собой мельчайших либо мельчайших и крупных частиц, покрытых битумной пленкой только по поверхности агрегатов; 2) состоящих из капелек битума и покрывающих оболочек, образованных минеральными частицами. Поскольку внутри первых агрегатов частицы не связаны битумом, то силы сцепления между ними малы, а это приводит к снижению прочности и долговечности асфальтобетонного покрытия. Второй тип агрегатов не только снижает прочность асфальтобетона, но и увеличивает расход битума. Для формирования асфальтобетонного покрытия из смесей, содержащей такие агрегаты, требуются интенсивные уплотняющие нагрузки.

Уменьшения количества и размеров образовавшихся агрегатов можно достичь путем приложения вибрационного воздействия на асфальтобетонную смесь в процессе перемещения /43/ или при выходе её из смесителя /46/.

Применение вибрационной обработки позволяет получить качественную асфальтобетонную смесь при упрощенной технологии приготовления, включающей дозирование сырых минеральных материалов и порошка, их просушивание и нагрев, предварительное перемешивание минеральных материалов с битумом в смесительном отделении сушильного барабана, вибрационное перемешивание и обработку в транспортирующем вибрлотке и выдачу готовой смеси в накопительный бункер /47/.

Механизм вибрационной обработки асфальтобетонных смесей заключается в следующем. Вибрлоток I (Рис.2), установленный на упругих опорах 2, под действием низкочастотного 3 ($\omega_1 = 135-195$ рад/с, $A_1 = 0,8-2$ мм) и высокочастотного 4 ($\omega_2 = 270-390$ рад/с, $A_2 =$

= 0,5–1 мм) источников вибрации приобретает сложные полигармонические колебания.

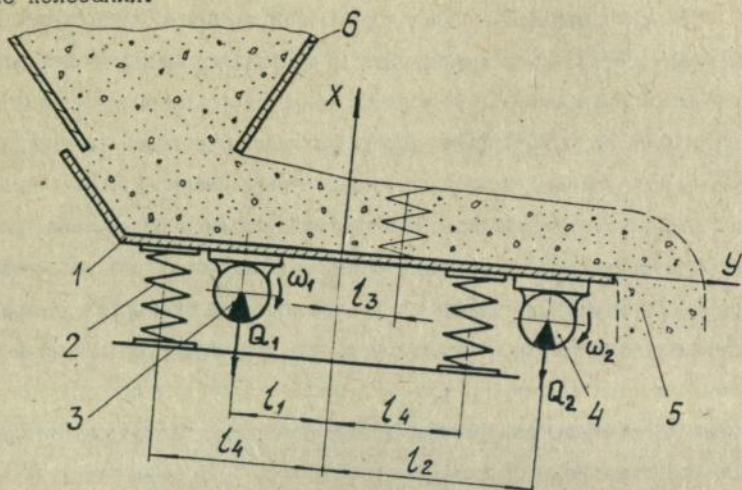


Рис. 2.

При этом асфальтобетонная смесь 5 перемещается по вибролотку и подвергается в течении 7–20 с переменному амплитудно-частотному вибрационному воздействию: у торца вибролотка преобладает составляющая низкочастотных, а на его конце – высокочастотных колебаний. Благодаря такому вибрационному воздействию асфальтобетонная смесь вначале интенсивно перемешивается и затем уплотняется, при этом разрушаются агрегаты слипшихся минеральных частиц и оболочки вокруг капелек битума, битум перераспределяется и равномерно обволакивает каждую частицу, из трещин и раковин крупных минеральных частиц удаляется воздух и они заполняются асфальтовым вяжущим, уменьшается толщина битумных пленок, среда становится однороднее, увеличивается сцепление вяжущего с минеральным материалом. Этот процесс носит необратимый характер. В конце обработки уплотненный слой асфальтобетонной смеси разрыхляется до удобоукладываемого состояния кромкой вибролотка, совершающей высокочастотные колебания с большой амплитудой.

Дифференциальное уравнение движения обрабатываемой среды в направлении координаты x за время t имеет вид

$$E_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \eta_1 \frac{\partial^3 u_1}{\partial x^2 \partial t} + f_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} - \rho_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = 0, \quad (33)$$

где $u_1 = u + \varphi l_3$; u - смещение смеси по центру тяжести вибротка; φ - угловое смещение вибротка; l_3 - расстояние от центра тяжести вибротка до равнодействующей сил сопротивления асфальтобетонной смеси.

Решение волнового уравнения колебаний (33) отыскивалось при следующих граничных условиях

$$\begin{aligned} & -m_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_3 u(0,t) + E_1 F \left[\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + l_3 \frac{\partial \varphi(0,t)}{\partial x} \right] + \\ & + \eta_1 F \left[\frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} + l_3 \frac{\partial^2 \varphi(0,t)}{\partial x \partial t} \right] + f_1 F \left[u(0,t) + l_3 \varphi(0,t) \right] = \\ & = - \sum_{j=1}^2 Q_j \sin \omega_j t; \\ & -J \frac{\partial^2 \varphi(0,t)}{\partial t^2} - c_3 l_3^2 \varphi(0,t) + E_1 F l_3^2 \frac{\partial \varphi(0,t)}{\partial x} + \eta_1 F l_3^2 \frac{\partial^2 \varphi(0,t)}{\partial x \partial t} + \\ & + f_1 F l_3^2 \varphi(0,t) = - \sum_{j=1}^2 Q_j (-1)^j l_3 \sin \omega_j t, \\ & E_1 \left[\frac{\partial u(H,t)}{\partial x} + l_3 \frac{\partial \varphi(H,t)}{\partial x} \right] F + \eta_1 \left[\frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x \partial t} + l_3 \frac{\partial^2 \varphi(H,t)}{\partial x \partial t} \right] F + \\ & + f_1 \left[u(H,t) + l_3 \varphi(H,t) \right] = 0. \end{aligned}$$

Здесь m_1 , J - масса и момент инерции вибротка; c_3 - жесткость упругих амортизаторов; F - площадь дна вибротка.

В результате решения полученных уравнений найдены законы движения обрабатываемой среды и вибротка устройства для обра-

ботки асфальтобетонной смеси. Установлен закон распространения волн напряжений в обрабатываемой асфальтобетонной смеси и выбрано рациональное соотношение параметров обрабатываемой среды и вибрационного устройства при поличастотных колебаниях. Определена эффективность обработки асфальтобетонных смесей переменным амплитудно-частотным вибрационным воздействием.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований и внедрения вибрационных устройств было установлено:

1. Вибрационная обработка улучшает качество асфальтобетонных смесей, позволяя повысить прочность асфальтобетона на 30-60% при температуре 20 °С и в 1,7-2 раза при 50 °С, снизить водонасыщаемость и уменьшить интенсивность уплотняющих нагрузок.

2. Полученные теоретические зависимости достаточно точно определяют поведение реальной динамической системы "виброток - обрабатываемая среда": расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 8% при определении перемещений обрабатываемой среды и вибротка и 12% при вычислении напряжений в обрабатываемом слое.

3. Эффективность вибрационной обработки асфальтобетонных смесей определяется параметрами вибрационного воздействия, толщиной обрабатываемого слоя и углом наклона вибротка. Рациональным является: переменное амплитудно-частотное вибрационное воздействие с частотами $\omega_1 = 151,8-167,5$ рад/с и $\omega_2 = 303,6-335$ рад/с, продолжительность обработки - 9-16 с, средняя скорость транспортирования смеси в вибротке - 3,5-7 м/мин, угол наклона вибротка - 10-14°, толщина обрабатываемого слоя - 0,1-0,2 м. Высокое качество обработки достигается при амплитуде напряжений в основании обрабатываемого слоя не менее 80 кПа при его толщине $H = 0,1$ м и 120 кПа при $H = 0,2$ м.

4. Использование вибрационной обработки позволяет значительно уп-

ростить технологические процессы и установки для приготовления асфальтобетонных смесей, снизив их энергоемкость и металлоемкость.

5. Разработка и исследование вибрационных рабочих органов для уплотнения асфальтобетонных смесей

Предложенная гипотеза, теоретические и экспериментальные исследования процесса уплотнения и обработки асфальтобетонных смесей стали основой для создания и внедрения в производство различных рабочих органов (Рис.3), работающих в устойчивом режиме с определенным, наперед заданным законом движения и обеспечивающих требуемое технологическими нормами уплотнение за один проход.

Разработана конструкция двухмассного вибрационного рабочего органа (Рис.3а) и исследован его виброударный режим работы, вызывающий наряду с вынужденными параметрическими колебаниями виброплиты I. В результате этого асфальтобетонная смесь подвергается поличастотному вибрационному воздействию, способствующему эффективной проработке и уплотнению. Величина передаваемых вибрационных воздействий от виброплиты на базовую машину, а также эффективность уплотнения покрытия во многом обуславливаются приведенной реактивной массой 2 рабочего органа (масса верхней рамы, опорной плиты и отвала), массой виброплиты I, жесткостью упругих амортизаторов 7 и физико-механическими характеристиками уплотняемой среды.

В поличастотном вибрационном рабочем органе (Рис.3б) виброплита I под действием гармонических сил высокочастотного 3 и низкочастотного 4 возбудителей колебаний /31, 37/ совершает сложные поличастотные движения, периодически деформируя асфальтобетонную среду, которая при этом испытывает переменное по частоте и амплитуде вибрационное воздействие: у передней кромки виброплиты преобладает составляющая низкочастотных колебаний, а у задней кром-

ки - высокочастотных.

Перспективным для широкозахватных и высокоскоростных асфальтоукладочных машин является использование рабочих органов (Рис.3 в, г), снабженных высокочастотными 5 и низкочастотными 6 возбудителями крутильных колебаний /34, 42/.

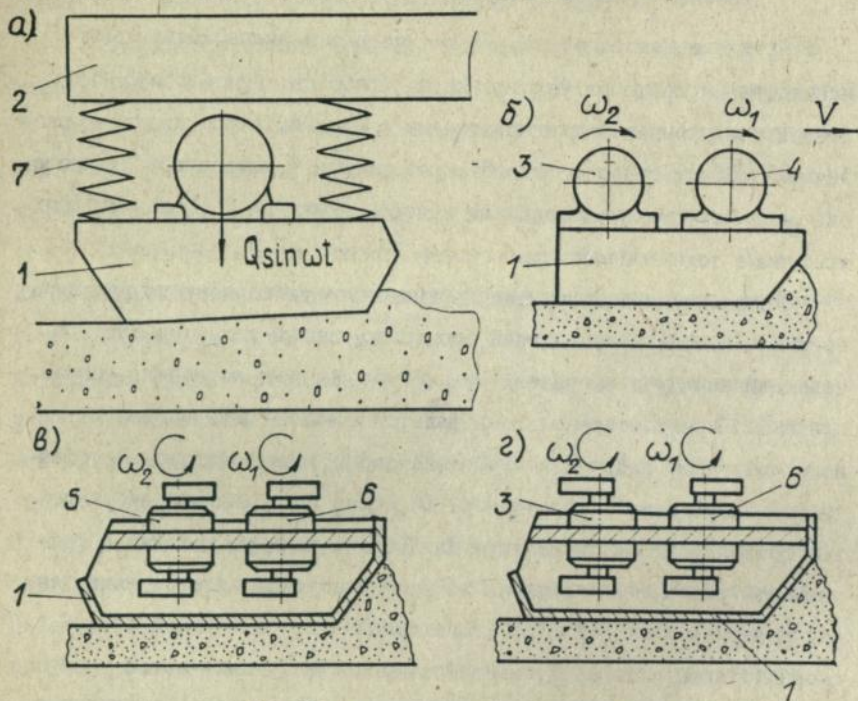


Рис.3.

В результате исследования динамической системы "виброплита-уплотняемая среда", в которой асфальтобетонная среда представлена в виде системы с распределенными параметрами, определены законы движения поличастотного вибрационного рабочего органа и рабочего органа с крутильными колебаниями виброплиты. Установлен закон распространения волн напряжений в асфальтобетонной среде и выбрано рациональное соотношение параметров уплотняемой асфальтобетонной среды и вибрационных рабочих органов.

Лабораторные и натурные испытания подтвердили правильность теоретических предпосылок и послужили основой для внедрения в производство методики расчета основных параметров и конструкций поличастотных вибрационных рабочих органов и рабочих органов с крутильными колебаниями виброплиты.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований и внедрения вибрационных рабочих органов было установлено:

1. В двухмассном вибрационном рабочем органе отношение приведенной реактивной массы m_2 к массе виброплиты m , целесообразно принимать равным $\mu = 0,8-1,2$. При этих значениях μ базовой машине практически не передается вредное вибрационное воздействие. Для создания условий эффективной проработки асфальтобетонных смесей и уменьшения энергозатрат частоту собственных колебаний системы ρ_0 при движении виброплиты в контакте с уплотняемой средой целесообразно назначать близкой к частоте вынужденных колебаний ω , т.е. из условия работы вблизи резонансного режима: $\rho_0 = (0,9-1,2)\omega$.

2. Поличастотный вибрационный рабочий орган, работающий в виброударном режиме, обеспечивает эффективное и качественное уплотнение асфальтобетонных смесей всех типов до коэффициента 0,98-0,99 при толщине слоя 40-100 мм, температуре смеси 125-140 °С и скорости перемещения 3,4-1,7 м/мин. Получаемый асфальтобетон имеет замкнутую поровую структуру и прочность, на 40-60% превышающую прочность асфальтобетона, уплотненного стандартным способом.

3. Рабочие органы с крутильными колебаниями виброплиты обеспечивают качественное уплотнение асфальтобетонных смесей до коэффициента 0,98-1,0 при толщине слоя 40-100 мм и скорости перемещения 2,4-3,4 м/мин. Наиболее рациональным является вибрационное воздействие крутильными колебаниями с угловой частотой 235,6-471 рад/с и амплитудой 0,004-0,00812 рад, а также воздействие крутиль-

ными колебаниями с угловой частотой 235,6–471 рад/с и амплитудой 0,004–0,006 рад совместно с горизонтально направленными колебаниями с угловой частотой 471 рад/с и амплитудой 0,7 мм.

4. Поличастотный вибрационный рабочий орган целесообразно использовать для укладки и уплотнения покрытия шириной до 4 м, а рабочий орган с крутильными колебаниями виброплиты – для уплотнения покрытия до 7 м.

6. Исследование и разработка вибрационных установок для обработки и приготовления цементобетонных смесей

После приготовления в смесителях, как со свободным, так и принудительным перемешиванием, бетонные смеси, особенно жесткие и умеренно жесткие, имеют в своем составе значительное количество агрегатов, образованных: из слипшихся частиц цемента, покрытых водной пленкой только по поверхности агрегатов; из капелек воды и покрывающих их оболочек и частиц цемента /1/. Разрушению образовавшихся агрегатов препятствуют капиллярные силы. Эти агрегаты уменьшают подвижность бетонных смесей и прочность изделия.

Для разрушения образовавшихся агрегатов в смеси и, как следствие, для увеличения её подвижности, повышения прочности изделия и снижения энергоемкости процесса уплотнения было предложено бетонную смесь подвергать переменному амплитудно-частотному вибрационному воздействию в момент укладки её в форму /51/ или на заключительной стадии процесса приготовления в лопастных бетоносмесителях принудительного действия /72, 75/, а также изготавливать в вибрационных установках /66, 67, 68/. В результате приложения вибрационного воздействия цементобетонная смесь вначале интенсивно перемешивается, оседает и затем переходит в тиксотропное состояние. Из нее удаляется воздух, улучшается обмазка заполнителя цементным тестом. Смесь уплотняется, становится однород-

ной и в таком виде выдается в приемное устройство. Обработанная вибрационным воздействием цементобетонная смесь имеет большую подвижность и для её окончательного уплотнения на виброплощадке требуется вдвое меньшая продолжительность проработки, а бетон имеет большую прочность.

Теоретические и экспериментальные исследования вибрационной обработки бетонных смесей послужили источником для разработки эффективных технологических процессов и машин для приготовления бетонных смесей. Были разработаны новые способы, вибрационные устройства для обработки смесей в бетоноукладочных машинах и бетоносмесительные установки. Исследованы рабочие режимы, определено напряженно-деформированное состояние обрабатываемого слоя и установлена эффективность обработки и перемешивания бетонных смесей переменным амплитудно-частотным вибрационным воздействием.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований, внедрения и эксплуатации разработок в производстве было установлено:

1. Вибрационная обработка в момент перемешивания в смесителе, на заключительной стадии приготовления или в момент укладки смеси в форму улучшает качество бетонных смесей, позволяя повысить на 15-20% прочность и однородность бетона и уменьшить вдвое интенсивность уплотняющих нагрузок.
2. Высокая эффективность обработки бетонных смесей достигается переменным по частоте и амплитуде вибрационным воздействием, при котором смесь вначале обработки подвергается воздействию преимущественно низкочастотными колебаниями с угловой частотой $\omega_1 = 146,6-167,5$ рад/с и амплитудой 0,1-0,12 см, а в конце обработки - высокочастотными колебаниями с угловой частотой $\omega_2 = 293,2-335$ рад/с и амплитудой 0,05-0,07 см.
3. Использование бетоносмесителей с вибрационной обработкой бе-

тонных смесей в процессе перемешивания или на заключительной стадии приготовления позволяет обеспечить качественное приготовление жестких и пластичных бетонных смесей и растворов, снизить продолжительность цикла до 60-70 с, что в 1,25-1,5 раза увеличивают производительность по сравнению с обычными лопастными бетоносмесителями принудительного действия, снизить их энергоемкость и металлоемкость.

7. Поличастотные вибрационные машины (виброплощадки) для формирования бетонных и железобетонных изделий

Для реализации двухчастотного и поличастотных способов уплотнения были разработаны инерционные поличастотные /55, 56, 60, 61/ и двухмассные резонансные /57, 58, 59, 62, 63/ виброплощадки, сочетающие высокую технологическую эффективность формирования бетонных изделий с преимуществами вибрационных установок горизонтального действия.

Поличастотная инерционная виброплощадка (Рис.4) содержит подвижную раму 1, установленную посредством упругих опор 2 на основании 3. На торце подвижной рамы 1 в трапециидальном гнезде 4 установлен поличастотный возбудитель горизонтальных колебаний 5, соединенный с приводным электродвигателем 6 при помощи клиноременных передач 7 так, что между дебалансными валами 8 и 9 передаточное отношение равно двум, а между дебалансными валами 10 и 11 - полтора, причем валы 9 и 11 имеют одну частоту вращения. Упругие опоры имеют наклон амортизирующей части $\alpha = 7 + 15^\circ$.

Во время работы возбудитель колебаний сообщает подвижной раме и закрепленной на ней форме 20 с бетонной смесью поличастотные колебания в горизонтальной плоскости, синтезированные в результате наложения низко-, средне- и высокочастотных гармонических колебаний с частотами ω_1 , $\omega_2 = 1,5\omega_1$, $\omega_3 = 2\omega_1$. В свою оче-

редь, колебания в горизонтальной плоскости вследствие наклона амортизирующей части упругих опор вызывают поличастотные колебания подвижной рамы в вертикальном направлении. В результате наложения гармонических колебаний с указанным соотношением частот, подвижная рама движется импульсивно и бетонная смесь подвергается переменному амплитудно-частотному вибрационному воздействию в горизонтальном и вертикальном направлениях, способствующему увеличению подвижности минеральных частиц и обеспечивающему эффективное уплотнение.

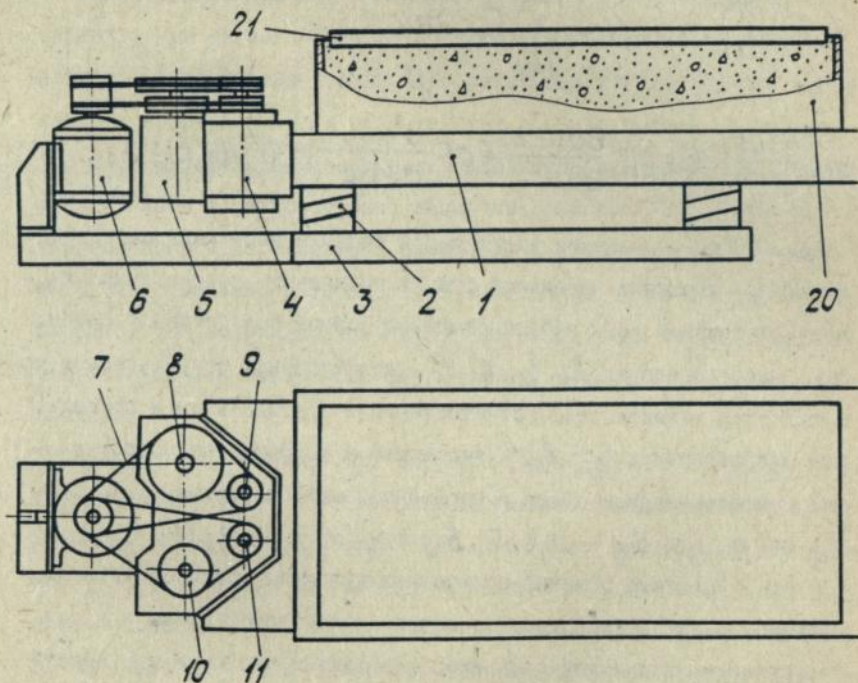


Рис.4. Поличастотная инерционная виброплощадка

Движение уплотняемой среды описывается уравнением колебаний (5), решение которого отыскивалось при следующих граничных условиях:

$$-m_1 \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - b_1 \left[\frac{\partial u(0,t)}{\partial t} - \frac{dy}{dt} \operatorname{tg} \alpha \right] - c_1 \left[u(0,t) - y \operatorname{tg} \alpha \right] + EF \frac{\partial u(0,t)}{\partial x} + \eta F \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial x \partial t} + fFu(0,t) = 0;$$

$$m_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + b_2 \left[\frac{dy}{dt} + \frac{\partial u(0,t)}{\partial t} \operatorname{tg} \alpha \right] + c_2 \left[y + u(0,t) \operatorname{tg} \alpha \right] + b_{3j} \frac{dy}{dt} + c_{3j} y = \sum_{j=1}^3 Q_j \sin \omega_j t;$$

$$m_2 \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial t^2} + EF \frac{\partial u(H,t)}{\partial x} + \eta F \frac{\partial^2 u(H,t)}{\partial x \partial t} + fFu(H,t) = 0.$$

Здесь $u(x,t)$ - смещение уплотняемой среды в вертикальном направлении; y - смещение подвижной рамы в продольном направлении; m_1 - масса подвижной рамы виброплощадки с формой без бетонной смеси; m_2 - масса пригруза; b_1, b_2, c_1, c_2 - коэффициенты сопротивления упругих опор и жесткости соответственно в вертикальном и продольном направлениях; c_{3j}, b_{3j} - жесткость и коэффициент сопротивления цементобетонной смеси в горизонтальной плоскости,

$$c_{3j} = (\eta \omega_j k_j d_{2j} - 1,5f)F; \quad b_{3j} = \eta (\kappa_j d_{1j} + d_j)F.$$

В результате решения полученных уравнений были определены напряженно-деформированное состояние уплотняемой среды и характер движения подвижной рамы виброплощадки и пригруза при действии поличастотного возбуждения, найдены рациональные соотношения основных параметров виброплощадки и уплотняемой среды, определена эффективность её работы.

Исследован рабочий режим поличастотной резонансной виброплощадки /57/, определены законы движения и амплитуды колебаний ак-

тивной и реактивной масс виброплощадки и найдены рациональные соотношения её основных параметров и уплотняемой среды.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования послужили основой для создания и внедрения в производство целого ряда поличастотных виброплощадок грузоподъемностью от 10 до 40 т.

В результате выполненных теоретических и экспериментальных исследований, внедрения и эксплуатации разработок в производство было установлено:

1. Амплитуды напряжений в уплотняемом слое и каждой гармоники вертикальных колебаний поличастотной виброплощадки существенно зависят от возмущающей силы Q_j , жесткости упругих опор в вертикальном направлении C_1 , угла наклона амортизирующей части упругих опор α , физико-механических характеристик уплотняемой среды. Угол наклона α целесообразно назначать равным $7-15^\circ$, а жесткость упругих опор в вертикальной плоскости C_1 принимать такой, чтобы её сумма с динамической жесткостью бетонной смеси в вертикальной плоскости C_3 отличалась от $m_1 \omega_j^2$ не менее, чем на 10-15%, причем это условие желательно обеспечивать для высшей гармоники колебаний.

2. Применение поличастотных виброплощадок с пространственными колебаниями позволяет в 1,5-2 раза сократить продолжительность уплотнения, обеспечить качественное формование изделий из пластичных и жестких бетонных смесей, уменьшить расход цемента или повысить прочность изделия, снизить энергоемкость процесса уплотнения.

3. Использование поличастотных резонансных виброплощадок позволит в 2-2,5 раза уменьшить амплитуду высокочастотных колебаний и снизить соотношение между частотами собственных и вынужденных колебаний динамической системы до 0,8-0,9, что обеспечит надежность и повысит устойчивость режима работы при значительном изменении массы формируемых изделий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны научные основы вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей с учетом параметров и продолжительности вибрационного воздействия, вида рабочего органа и направления вибрации, температуры, содержания щебня и других физико-механических характеристик смеси, скорости перемещения рабочего органа. Предложены и разработаны поличастотные способы уплотнения асфальтобетонных смесей с использованием вертикальных и крутильных колебаний виброплиты.

2. Предложена реологическая модель, удовлетворяющая целям описания зависимостей "напряжение - деформация", характерных для деформируемых вибрационным методом асфальтобетонных смесей, и учитывающая потерю энергии на процессы, сопровождающие колебания уплотняемого материала.

3. Изучен процесс вибрационного уплотнения асфальтобетонной смеси, в результате чего выявлен наиболее благоприятный устойчивый периодический режим вибрационного уплотнения: удар и движение виброплиты в контакте с уплотняемой средой, отрыв и движение виброплиты в отрыве от уплотняемой среды, - определены законы движения уплотняемой асфальтобетонной смеси и виброплиты рабочего органа и получены выражения для определения основных параметров виброплиты, установлен закон распространения волн напряжений в асфальтобетонной среде и выбрано рациональное соотношение её параметров с параметрами вибрационного рабочего органа.

4. Разработаны научные основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей с учетом величины динамической нагрузки и продолжительности проработки, направления колебаний (вертикально направленные, горизонтальные и пространственные) и вида вибрационных воздействий (одно-, двух- и поличастотные), консистенции бетонной смеси и других её физико-механических характеристик. Пред-

ложены и разработаны новые способы вибрационного уплотнения подвижных, умеренно жестких и жестких цементобетонных смесей.

5. Изучен процесс вибрационного уплотнения цементобетонной смеси, в результате чего найдена теоретическая зависимость для описания реологических свойств бетонной смеси различной консистенции при её вибрационном уплотнении, определены законы движения уплотняемой среды и виброплощадки с одночастотными и поличастотными горизонтальными и вертикально направленными колебаниями, установлен закон распространения нормальных и касательных напряжений в цементобетонной среде соответственно при вертикально направленных и горизонтальных одно- и поличастотных колебаний подвижной рамы виброплощадки, найдены максимальные и средние значения нормальных и касательных напряжений в уплотняемом слое, определена эффективность уплотнения подвижных и жестких цементобетонных смесей вертикально направленными, горизонтальными и пространственными низкочастотными и поличастотными колебаниями и дано обоснование использования каждого способа и режима уплотнения в зависимости от консистенции смеси, необходимой продолжительности формирования изделия и грузоподъемности виброплощадки.

6. Изучен механизм вибрационной обработки асфальтобетонных смесей, на основе которого разработаны новые способы и вибрационные устройства для обработки и приготовления асфальтобетонных смесей с использованием переменного амплитудно-частотного вибрационного воздействия.

7. Разработаны теория и расчет вибрационных устройств для обработки асфальтобетонных смесей. Найдены законы движения обрабатываемой среды и вибролотка устройства для обработки, установлен закон распространения волн напряжений в обрабатываемой асфальтобетонной смеси и выбрано рациональное соотношение параметров вибрационного устройства и обрабатываемой среды, определена эффек-

тивность обработки асфальтобетонных смесей переменным амплитудно-частотным вибрационным воздействием.

8. На основе исследования распространения упруго-пластических волн деформаций в асфальтобетонной смеси и совместного движения уплотняемой среды и виброплиты разработаны теория и расчет: двух-массного с одночастотным возбуждением колебаний и поличастотного вибрационных органов, рабочих органов с крутильными колебаниями виброплиты.

9. Изучен механизм вибрационной обработки цементобетонных смесей, на основе которых разработаны новые способы и вибрационные устройства для обработки смесей в бетоноукладочных машинах, а также вибрационные бетоносмесители для приготовления цементобетонных смесей. Установлены законы движения вибрационных устройств в зависимости от их основных параметров и физико-механических характеристик обрабатываемых цементобетонных смесей, найдены амплитуды напряжений, возникающих в обрабатываемом слое цементобетона и определена эффективность обработки и перемешивания цементобетонных смесей переменным амплитудно-частотным вибрационным воздействием в установках для обработки и бетоносмесителях.

10. В результате исследований распространения упруго-пластических волн деформаций в цементобетонной смеси и совместного движения уплотняемой среды и виброплощадки разработаны теория и расчет: инерционной поличастотной виброплощадки с пространственными колебаниями, обеспечивающей формирование изделий из подвижных и жестких бетонных смесей; резонансной поличастотной виброплощадки с продольными и пространственными колебаниями.

11. Внедрение поличастотных вибрационных машин для обработки и уплотнения асфальтобетонных и цементобетонных смесей показало их высокую эффективность и позволило снизить энергоемкость, повысить производительность и увеличить прочность изделий.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Маслов А.Г., Пономарь В.М. Вибрационные машины и процессы в дорожном строительстве. - К.: БудІвельник, 1985. - 128 с.
2. Маслов А.Г. Установка асфальтосмесительная ДСВ-50. - Технические условия. ТУ 10.20 УССР 112-90. Госстандарт, 1990, 34 с.
3. Маслов А.Г. Бетоносмеситель принудительного действия БП-100В. - Технические условия ТУ 61 УССР 155-88. Госстандарт, 1988, 20 с.
4. Холодов А.М., Маслов А.Г. Исследование процесса уплотнения асфальтобетонных смесей вибрационным методом. - Горн., строит. и дор. машины: Респ. межвед. научн.-техн. сб., 1973, вып. 16, с. 114-123.
5. Холодов А.М., Маслов А.Г. Исследование процесса распространения волн напряжений в асфальтобетоне. - Сборник докладов и сообщений на третьей научно-технической конференции по вопросам дорожного строительства, Алма-Ата, 1973, с. 254-259.
6. Холодов А.М., Маслов А.Г. Определение амплитуды виброударных возмущений, необходимой для уплотнения асфальтобетона. - Горн., строит. и дор. машины: Респ. межвед. научн.-техн. сб., 1974, вып. 17, с. 80-84.
7. Холодов А.М., Маслов А.Г. Определение возмущающей нагрузки, необходимой для уплотнения асфальтового бетона. - Горн., строит. и дор. машины: Респ. межвед. научн.-техн. сб., 1975, вып. 20, с. 58-64.
8. Маслов А.Г. Теоретические основы вибрационного уплотнения асфальтобетонных смесей. - Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1983, №8, с. 122-126.
9. Маслов А.Г. Обоснование параметров вибрационного рабочего органа асфальтоукладчика. - Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1980, №7, с. 133-139.
10. Маслов А.Г. Определение параметров рабочего органа для уплотнения асфальтобетона. - Горн., строит. и дор. машины: Респ. межвед. на-

учн.-техн.сб., 1980, вып.30, с.69-76.

II. Маслов А.Г. Исследование двухмассного вибрационного рабочего органа асфальтоукладчика. - Горн., строит. и дор.машины: Респ. межвед.научн.-техн.сб., 1982, вып.34, с.98-104.

12. Маслов А.Г. Эффективные рабочие органы асфальтоукладчиков.- Автомобильные дороги, 1983, №5, с.16-18.

13. Маслов А.Г. Вибрационный рабочий орган асфальтоукладчика.- Тезисы всесоюзного совещания по вибрационной технике, Тбилиси, 1978, с.29-30.

14. Маслов А.Г. Обоснование рациональных параметров вибрационных машин для уплотнения асфальтобетонных покрытий. - Тезисы всесоюзной конференции по вибрационной технике, Кутаиси, 1981.

15. Маслов А.Г. Исследование процесса поличастотного уплотнения асфальтобетонных смесей. - Изв.вузов. Строительство и архитектура, 1982, №10, с.132-139.

16. Маслов А.Г. Исследование параметров поличастотного вибрационного рабочего органа асфальтоукладчика. - Динамика и прочность машин, 1983, вып.37, с.26-34.

17. Маслов А.Г. Эффективный рабочий орган асфальтоукладчика. - Механизация строительства, 1983, №12, с.11-12.

18. Маслов А.Г. Исследование процесса низкочастотного уплотнения асфальтобетонных смесей. - Горн., строит. и дор.машины: Респ. межвед.научн.-техн.сб., 1983, вып.36, с.66-73.

19. Маслов А.Г. Исследование процесса вибрационной обработки асфальтобетонных смесей. - Изв.вузов. Строительство и архитектура, 1983, №3, с.135-139.

20. Маслов А.Г. Способ приготовления асфальтобетонных смесей. Рефер.сборник: Автомобильные дороги. Изобретения, рекомендуемые для внедрения в дорожном хозяйстве, 1982, №10.

21. Маслов А.Г. Пути повышения эффективности двухмассных резонан-

- сных виброплощадок. - Изв.вузов. Строительство и архитектура, 1981, №8, с.119-123.
22. Маслов А.Г., Калина Ю.А. Исследование двухчастотной виброплощадки для уплотнения бетонных смесей. - Горн., строит. и дор. машины: Респ.межвед.научн.-техн.сб., 1982, вып.33, с.102-107.
23. Маслов А.Г. Определение параметров поличастотной виброплощадки для уплотнения бетонных смесей. - Изв.вузов. Строительство и архитектура, 1982, №6, с.121-125.
24. Маслов А.Г. Повышение эффективности виброплощадок горизонтального действия. - В сб.: Исследование рабочих процессов строительных и дорожных машин. Ярославль, 1983, с.34-37.
25. Маслов А.Г. Определение параметров поличастотной виброплощадки для формирования железобетонных изделий. - Горн., строит. и дор. машины: Респ.межвед.научн.-техн.сб., 1984, вып.37.
26. Маслов А.Г., Зеркалов Д.В. Конструкция рабочего органа асфальтоукладчика Д-150Б. - Информация №25 Миндорстроя УССР:Информ.листок №78-0302, УкрНИИТИ, 1978.
27. Маслов А.Г. Способ уплотнения бетонной смеси. - Рефер.сборник: Автомобильные дороги. Изобретения, рекомендуемые для внедрения в дорожном хозяйстве, 1986, №2, с.1-3.
28. Маслов А.Г., Зеркалов Д.В. Новая технология устройства асфальтобетонного покрытия. - Информация №38 Миндорстроя УССР: Информ.листок №81-0454, УкрНИИТИ, 1981.
29. Маслов А.Г. Бетоносмеситель периодического действия. - Информация УкрНИИТИ №Р-89-181, 1989, с.4.
30. Маслов А.Г. Проблемы создания виброплощадок для уплотнения бетонных смесей. - Тезисы докладов на международной научно-практической конференции "Актуальные вопросы охраны окружающей среды от антропогенного воздействия", Кременчуг, 1994, с.124-126.
31. Маслов А.Г. Способ уплотнения и выравнивания дорожного пок-

рытия. - Авт.свид. №647386, БИ №37, 1981.

32. Маслов А.Г. Способ уплотнения и выглаживания дорожного покрытия, преимущественно из бетонных смесей. - Авт.свид. №815107, БИ №11, 1981.

33. Маслов А.Г., Лотоус В.К. Способ уплотнения дорожного основания. - Авт.свид. №916639, БИ №12, 1982.

34. Маслов А.Г., Декань В.А., Тимофеев В.А. и др. Способ уплотнения дорожных покрытий. - Авт.свид. №1288240, БИ №5, 1987.

35. Маслов А.Г. Рабочий орган асфальтоукладчика. - Авт.свид. №916640, БИ №12, 1982.

36. Маслов А.Г. Рабочий орган асфальтоукладчика. - Авт.свид. №850778, БИ №27, 1981.

37. Маслов А.Г. Рабочий орган асфальтоукладчика. - Авт.свид. №916638, БИ №12, 1982.

38. Маслов А.Г. Рабочий орган асфальтоукладчика. - Авт.свид. №1020480, БИ №20, 1983.

39. Маслов А.Г. Рабочий орган асфальтоукладчика. - Авт.свид. №1081262, БИ №11, 1984.

40. Маслов А.Г., Холодов А.М. Рабочий орган асфальтоукладчика. - Авт.свид. №1006561, БИ №11, 1983.

41. Маслов А.Г. Рабочий орган укладчика дорожно-строительных материалов. - Авт.свид. №1206362, БИ №3, 1986.

42. Маслов А.Г. Рабочий орган укладчика дорожно-строительных материалов. - Авт.свид. №1237731, БИ №22, 1986.

43. Маслов А.Г. Способ приготовления асфальтобетонной смеси. - Авт.свид. №903454, БИ №5, 1982.

44. Маслов А.Г., Холодов А.М., Литвиненко А.К. и др. Вибрационный смеситель. - Авт.свид. №908608, БИ №8, 1982.

45. Маслов А.Г. Способ уплотнения дорожно-строительных материалов. - Авт.свид. №1168643, БИ №27, 1985.

46. Маслов А.Г. Способ обработки асфальтобетонной смеси. - Авт. свид. №916634, БИ №12, 1982.
47. Маслов А.Г., Холодов А.М., Литвиненко А.К. Устройство для обработки асфальтобетонной смеси. - Авт.свид. №916635, БИ № 12, 1982.
48. Маслов А.Г. Способ обработки асфальтобетонной смеси. - Авт. свид. №1040026, БИ №33, 1983.
49. Маслов А.Г., Холодов А.М. Устройство для обработки асфальтобетонной смеси. - Авт.свид. №966135, БИ №38, 1982.
50. Маслов А.Г. Устройство для обработки асфальтобетонных смесей. - Авт.свид. №990930, БИ №3, 1983.
51. Маслов А.Г. Устройство для вибрационной активации бетонной смеси. - Авт.свид. №1206104, БИ №3, 1986.
52. Маслов А.Г. Способ уплотнения бетонной смеси. - Авт.свид. №799944, БИ №4, 1981.
53. Маслов А.Г. Способ формования бетонных изделий. - Авт.свид. №814732, БИ №11, 1981.
54. Маслов А.Г., Калина Ю.А. Способ формования бетонных изделий. - Авт.свид. №823128, БИ №15, 1981.
55. Маслов А.Г. Виброплощадка для уплотнения бетонной смеси в форме. - Авт.свид. №823127, БИ-15, 1981.
56. Маслов А.Г. Виброплощадка. - Авт.свид. №715324, БИ № 6, 1980.
57. Маслов А.Г. Виброплощадка. - Авт.свид. №659381, БИ №16, 1979.
58. Маслов А.Г. Виброплощадка. - Авт.свид. №727433, БИ №14, 1980.
59. Маслов А.Г. Виброплощадка. - Авт.свид. №729058, БИ №15, 1980.
60. Маслов А.Г., Таран И.С., Калина Ю.А. и др. Установка для изготовления изделий с пустотами из бетонных смесей. - Авт.свид. №893528, БИ №48, 1981.
61. Маслов А.Г., Василенко В.В., Калина Ю.А. и др. Установка для изготовления изделий с пустотами из бетонных смесей. - Авт. свид. №1038233, БИ №32, 1983.

62. Маслов А.Г. Двухмассная виброплощадка. - Авт.свид.№753638, БИ №29, 1980.
63. Маслов А.Г. Двухмассная виброплощадка. - Авт.свид.№772852, БИ №39, 1980.
64. Маслов А.Г. Виброплощадка для изготовления изделий из бетонных смесей. - Авт.свид. №795944, БИ №2, 1981.
65. Маслов А.Г., Калина Ю.А. Установка для формирования изделий из бетонных смесей. - Авт.свид. №816749, БИ №12, 1981.
66. Маслов А.Г., Ткаченко А.А., Розанов А.М. и др. Смеситель. - Авт.свид. №1399131, БИ №20, 1988.
67. Маслов А.Г., Ткаченко А.А., Розанов А.М. и др. Бетоносмеситель. - Авт.свид. №1477564, БИ №17, 1989.
68. Маслов А.Г., Бардаев С.В., Тимофеев В.А. и др. Смеситель непрерывного действия. - Авт.свид. №1333735, БИ №32, 1987.
69. Маслов А.Г. Самоходный вибрационный каток. - Авт.свид. №1245641, БИ №27, 1986.
70. Маслов А.Г., Пономарь В.М., Шишенный А.П. Скиповый подъемник асфальтосмесительной установки. - Авт.свид. №1330233, БИ №30, 1987.
71. Маслов А.Г. Лопастной смеситель. - Авт.свид. №1663054, БИ №9, 1991.
72. Маслов А.Г. Способ обработки бетонной смеси. - Авт.свид. №1570919, БИ №22, 1990.
73. Маслов А.Г. Бетоносмеситель. - Авт.свид. №1477564, БИ №17, 1989.
74. Маслов А.Г., Заболотный В.М., Тимофеев В.А. Лопастной смеситель. - Авт.свид. №1564248, БИ №18, 1990.
75. Маслов А.Г., Кулешов С.П., Кужненко Г.С. и др. Бетоносмеситель. - Авт.свид. №1564247, БИ №18, 1990.
76. Бардаев С.В., Тимофеев В.А., Маслов А.Г. и др. Лопасть смесителя. - Авт.свид. №1520175, БИ №49, 1989.

Али 7

Маслов О.Г. Наукові основи і розробка полічастотних вібраційних машин для обробки і ущільнення асфальтобетонних і цементобетонних сумішей.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.05.04 - дорожні і будівельні машини, Харківський державний автомобільно-дорожній технічний університет, Харків, 1994 р.

Захищається рукопис дисертації, який містить теоретичні дослідження вібраційних процесів і робочих режимів вібраційних машин для приготування, обробки і ущільнення асфальтобетонних і цементобетонних сумішей, а також результати експериментальних досліджень. Установлено, що вивчення напружено-деформованого стану оброблюваного або ущільнювального середовища при взаємодії її з робочим органом вібраційної машини дозволяє досить точно визначити необхідні режими вібраційного діяння і основні параметри створюваної полічастотної вібраційної машини. Здійснено промислове упровадження вібраційних робочих органів асфальтоукладальників і асфальтозмішувальних установок безперервної дії, полічастотних віброплощадок і бетонозмішувачів, які спрощують процеси приготування, обробки і ущільнення асфальтобетонних і цементобетонних сумішей, знижують їх енергоємність, збільшують продуктивність, підвищують на 40-60% міцність асфальтобетону і на 10-20% міцність цементобетону.

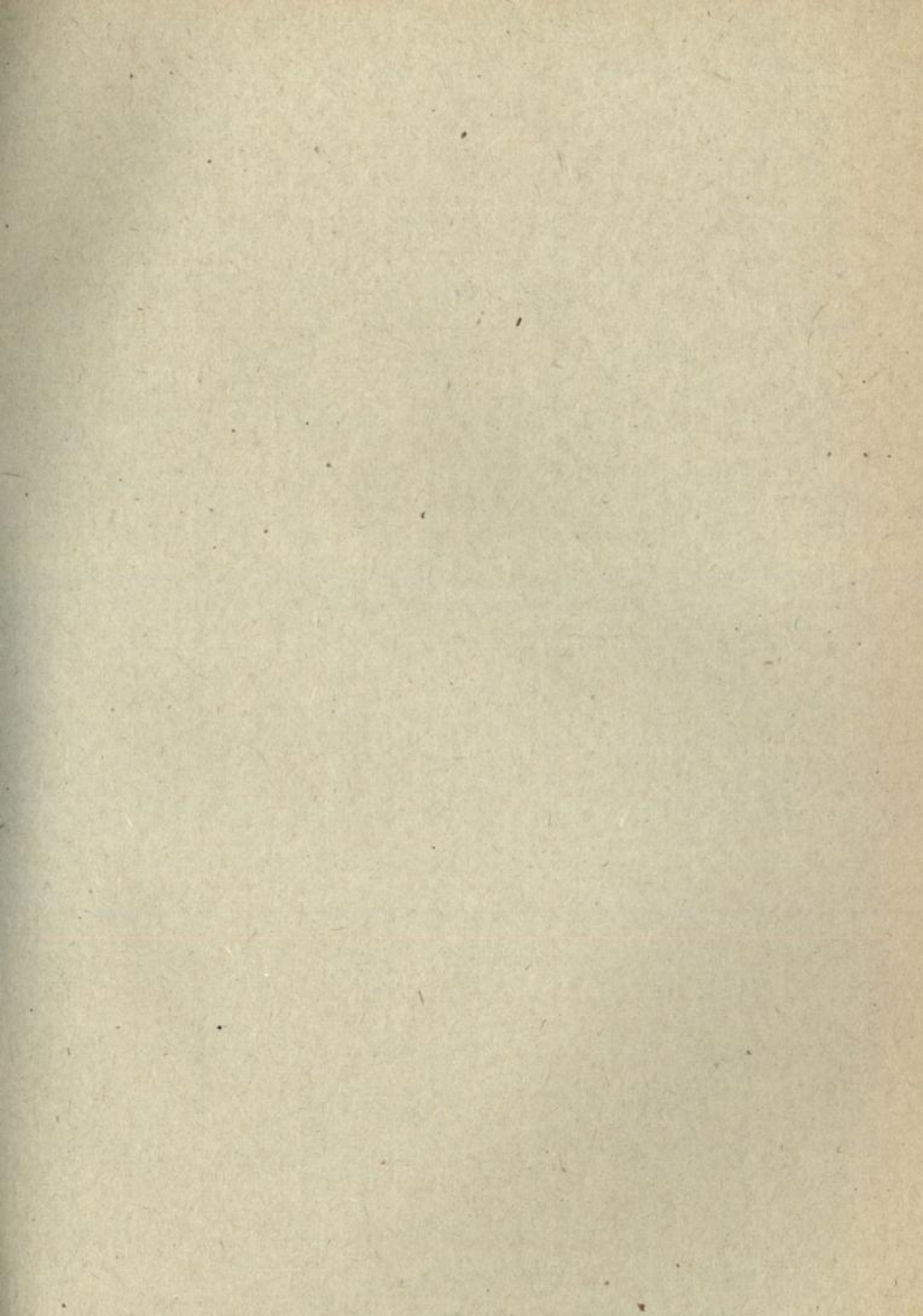
Ключові слова: вібромашини, обробка, ущільнення, асфальтобетонні і цементобетонні суміші.

Maslov A. G. The scientific principles and elaboration of Polyfrequent vibratory machines for processing and compaction of asphalt concrete and cement concrete mixes.

The dissertation for an academic degree of doctor of technical science by the speciality 05.05.04 " Road and building machines ", Charcov State automobile-road technical university, Charcov, 1994.

The manuscript of dissertation is defended. This thesis deals with the theoretical researches of vibratory processes and working regimes for vibratory machines for preparation, processing and compaction of asphalt concrete and cement concrete mixes and the results of experimental researches. It has been established, that the study of stress-deformed state for manufactured or compacted surroundings in the time of its interaction with a working organ of vibratory machines allows to define necessary regimes of vibratory affect and basic parameters of created polyfrequent vibratory machine exactly enough. The industrial application of vibratory working organs of asphalt pavers and continuous asphalt mixing plants, polyfrequent vibroplatforms and concrete mixers, that simplify processes of preparation, processing and compaction asphalt concrete and cement concrete mixes, decreases their power-intensivity, increase productivity, increase solidity of asphalt concrete by 40-60 % and solidity of cement concrete by 10-20 %, has been done.

The clue words: vibratory machines, processing, compaction, asphalt concrete and cement concrete mixes.



Зак. № 264 формат 60x90 1/16

бумага офсетная, поч. листов 2, 28.10.1994 г.

AB 31.257

AB 31.257