

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

ФАЙВУСОВИЧ Абрам Соломонович

УДК 691.32:693.546.4

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ  
СБОРНЫХ И БЕТОНИРОВАНИЯ  
МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЛОЯ СМЕСИ  
С ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ**

05.23.05 — «Строительные материалы и изделия»

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ**  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Харьков—1993



00814098 (U)

Диссертационная работа выполнена в Луганском филиале НИИ строительного производства Минстройархитектуры Украины.

Научный консультант — чл.-корр. РАН, доктор технических наук, профессор **Б. В. Гусев**

Официальные оппоненты:

академик АИН Украины, доктор технических наук, профессор **И. М. Грушко**

доктор технических наук, профессор **И. И. Назаренко**

доктор технических наук, профессор **Н. П. Блещик**

Ведущая организация — Харьковский «ПромстройНИИ-проект» Минстройархитектуры Украины.

Защита диссертации состоится «14» декабря 1993 г.  
в 14<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета Д 068.33.01 по присуждению ученой степени доктора технических наук Харьковского инженерно-строительного института (310002, г. Харьков, ул. Сумская, 40).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан «29» октября 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
д. т. н., профессор

**А. В. Ушеров-Маршак**

ДВ - 28.956

Актуальность работы. В странах Содружества ежегодно (по данным 1985 г.) перерабатывалось около 250 млн. м<sup>3</sup> бетонных смесей для изготовления сборных и монолитных железобетонных конструкций. Указанное связано с затратой значительных ресурсов. Так, на обновление парка форм расходовалось около 700 тыс. т стали, на опалубку для изготовления монолитных железобетонных конструкций 7,0 млн. м<sup>3</sup> пиломатериалов, 240 тыс. т стали. С учетом формовочного оборудования, оснастки необходимые ресурсы для изготовления сборных и монолитных конструкций достигают ощутимых для народного хозяйства объемов. Доля Украины составляет в них примерно 20%. Значительная экономия ресурсов связана со снижением материалоемкости форм, опалубки и повышением их долговечности, оптимизацией технологических процессов, позволяющих повысить качество изделий, снизить расход цемента. Решение указанной задачи возможно путем создания научно-обоснованных методов расчета технологических процессов, определения нагрузок на оборудование, формы и опалубки.

Разработка методов расчета технологических процессов, включая их оптимизацию, связана с решением задач взаимодействия бетонной смеси с формовочным оборудованием как в статических, так и динамических системах. Решение перечисленных процессов, видов оборудования и оснастки связано, прежде всего, с необходимостью учета изгибных деформаций механических систем, учетом в полном объеме граничных условий. В сравнении с имеющимися решениями одноосных задач появляется необходимость в использовании дополнительных уравнений состояния смеси и формулировании новых граничных условий. Поэтому математическое формулирование прикладных задач и разработка алгоритмов их решения включает в качестве ключевого момента экспериментально-теоретическое обоснование системы уравнений бетонной смеси для нормальных и сдвиговых деформаций, разработку новых граничных условий для статических и динамических воздействий.

Указанное позволяет строгим образом без введения каких-либо эмпирических коэффициентов, справедливых только для конкретной расчетной схемы (изделий определенной конфигурации и данного вида оборудования) получать достаточно общие решения, имеющие широкое применение.

Цель диссертационной работы заключается в разработке на-

учно-обоснованных методов расчета, позволяющих оптимизировать технологические процессы формования, снизить материалоемкость форм, опалубок и повысить их долговечность.

Объектом исследований являются процессы формования сборных и бетонирования монолитных железобетонных конструкций по вибрационной и безвибрационной технологии. Предметом исследований являются основные закономерности и особенности протекания технологических процессов, представляемые в виде систем уравнений, теоретических моделей, экспериментальных зависимостей, адекватно их отражающих.

Автор защищает:

- а) впервые использованную для описания свойств бетонных смесей систему уравнений двухфазных насыщенных пористых сред (Био) с формулированием граничных условий на контакте с твердыми стенками при сдвиге для статических и динамических воздействий;
- б) методики определения характеристик бетонных смесей при статических воздействиях; полученные значения механических характеристик подвижных бетонных смесей, рассматриваемых в качестве двухфазной среды;
- в) математическое формулирование и алгоритмы решения задач, связанных с определением давления бетонных смесей, характеризующихся показателем подвижности, на опалубку; исследованием процессов формования изделий различного назначения нагнетанием; теоретическую модель процессов вакуумирования;
- г) полуэмпирические зависимости для определения бокового давления бетонной смеси на опалубку, позволяющие повысить точность расчетных значений в 1,5-2 раза;
- д) систему уравнений для описания процесса виброуплотнения (изменения плотности), основывающуюся на уравнениях массопереноса, волнового уравнения и виброкомпрессионной зависимости; имитационную модель процесса виброуплотнения, устанавливающую связь между гранулометрическим составом заполнителей и плотностью смеси;
- е) установление вида распространяемых в ограниченном объеме бетонной смеси волн; формулирование и обоснование граничного условия на контакте с твердой стенкой при вибрационном сдвиге; установление области применимости моделей однофазных сред на основе сопоставления дисперсионных уравнений двух- и однофаз-

ных сред на основе структурных и фазовых характеристик соответствующих двухфазных сред;

ж) методики определения механических характеристик бетонных смесей при ударных и вибрационных воздействиях, в т.ч. при вибрационном сдвиге. Экспериментально установленный факт об анизотропии свойств бетонных смесей;

и) установленные зависимости, определяющие величину рассеиваемой бетонной смесью энергии при вибрационных и ударных воздействиях как функции режимов вибрирования, неупругих свойств смеси, расчетной схемы системы, позволившие внести существенные уточнения в представление о форме критерия интенсивности;

к) математическое формулирование, решение задачи колебаний системы бетонная смесь - форма - формовочная установка (БФУ) с учетом влияния изгибной жесткости упругой системы для случая ударных, ударно-вибрационных и вибрационных воздействий. Установленные области оптимальных режимов колебаний, обеспечивающие интенсификацию процессов формования, критерий минимизации массы формы; аналитические зависимости для определения частотных характеристик системы БФУ;

л) инженерные методики динамического расчета форм и опалубок, включающие необходимые справочные данные, оптимизацию процесса формования за счет обоснованного (допустимого по условиям долговечности) сближения собственных и вынужденных колебаний системы БФУ; повысить долговечность форм за счет исключения резонансных режимов колебаний;

м) зависимости для определения механических характеристик бетонных смесей по данным о характеристиках исходного состава смеси.

Практическое значение работы:

1) разработана инженерная методика расчета боковых давлений бетонной смеси на стенках опалубки, позволяющая за счет повышения точности формул снизить материалоемкость опалубок на 20...30%;

2) сформулированы критерии оптимизации системы БФУ при ударных, ударно-вибрационных и вибрационных воздействиях, минимизации массы форм;

3) разработаны инженерные методики динамического расчета форм, технологических процессов, позволяющие снизить металлоемкость форм на 10...25% при одновременном повышении их долговечности;

повысить качество изготавливаемых конструкций;

4) разработаны и усовершенствованы различные конструкции форм и опалубок, нашедшие применение на заводах ЖБИ и стройках Украины, при этом достигнуто снижение массы форм до 25%, опалубок до 30%. Результаты работы использованы при разработке ряда методических и нормативных документов:

1. Рекомендации по расчету динамических параметров и технологических режимов работы ударно-вибрационных машин и оснастки. - Киев, НИИСП, 1980, с. 63.
2. Технологические правила по ударной и ударно-вибрационной технологии формования железобетонных изделий. РСН 326-82. Госстрой УССР, с. 30.
3. Рекомендации по динамическому расчету стальных форм. НИИЖБ, ЧПСНИИП, ЛФ НИИСП. - М., 1984, с. 43.
4. Организационно-технологические решения для условий реконструкции промышленных предприятий. ч. III. Организационно-технологические решения по производству отдельных видов работ. Усиление железобетонных конструкций. ЦНИИОМТП. - М., 1987, с. 24-36. (Раздел : технология производства бетонных работ).
5. Реконструкция промышленных предприятий. т. I. Справочник строителя. - М., Стройиздат, 1990 (10.4, 10.5. Технология производства бетонных работ) с. 400-430.
6. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений под нагрузкой в условиях реконструкции. НИИСП. - К, 1990. (раздел "Технология производства бетонных работ") с. 16-33.
7. Технология производства работ по усилению строительных конструкций на реконструируемых предприятиях (РСН 342-86, РСН 342-91) (Раздел бетонные работы). Госстрой Украины, с. 40-57.

Материалы, изложенные в вышеуказанных документах, были использованы при разработке различных типов форм: для изготовления предварительно напряженных многоспустотных плит перекрытий; тротуарных плит; кассетных форм для изготовления бортовых рамней и изделий на заводах ЖБИ ПО Луганскжелезобетон.

Они использованы также при разработке объемной опалубки с навесными вибраторами для устройства обойм усиления колонн крановых эстакад; самонесущей щитовой опалубки для устройства обойм усиления колонн крановых зданий, подкрановых балок, ригелей и т.п. в ПО Лугансктепловоа, ПО Винницаметаллоснабсбыт,

Алчевского металлургического комбината и др. При этом были достигнуты следующие показатели:

снижение массы форм составило 360,6 т;

общий объем сборных железобетонных изделий, изготовленных в формах улучшенных конструкций составил 410 тыс. м<sup>3</sup>;

экономический эффект при производстве сборных железобетонных изделий и усилении железобетонных конструкций обетонированием составил (в ценах 1984 г.) - 916,2 тыс. руб. В 1989-1991 гг. экономический эффект определялся частично.

В диссертации использованы результаты исследований, выполненных в 1974-1991 гг. в лабораториях технологии производства сборного железобетона и технологии усиления железобетонных конструкций Луганского филиала НИИСП в соответствии с планами работ института и координационными планами б. Госстроев СССР и УССР. Экспериментальные исследования выполнялись автором диссертации самостоятельно и при участии сотрудников лабораторий. Программы для расчетов на ЭВМ разработаны инж. Майером В.Г. Автор выражает глубокую благодарность к.ф.-м.н., доц. Потетюню Э.Н. за участие в обсуждении постановочных вопросов и результатов исследований.

Апробация работы. Основное содержание и отдельные разделы диссертации в период с 1977 по 1991 гг. докладывались на 12 всесоюзных и республиканских конференциях, совещаниях, симпозиумах и семинарах.

Публикации. Результаты исследований изложены более чем в 60 публикациях, использованы при разработке 7 рекомендательных, 2 нормативных документов.

Объем работы. Диссертационная работа объемом 386 стр. машинописного текста, в т.ч. 103 рис. и 27 табл.6 и 132 стр. приложений. Библиография включает 326 наименований.

Многочисленными исследованиями отечественных и зарубежных ученых были разработаны основы технологической механики бетона как раздела механики сплошных сред, физико-химической механики, что позволило широко использовать методы механики для разработки, исследований и оптимизации технологических процессов, расчета технологического оборудования. Крупный вклад в разработку различных разделов технологической механики, в т.ч. в теорию виброформования, внесли: А.А. Афанасьев, В.И. Бабушкин, Н.П. Блещик, Ф.Г. Брауде, В.А. Бриедде, И.П. Бриедис, И.И. Ей-

ховский, В.Н. Гарнец, Г.Б. Гирштель, И.М. Грушко, Б.В. Гусев, А.Е. Десов, Г.Б. Ивянский, В.Г. Завимко, В.Е. Карамзин, К.Н. Ким, В.И. Крюков, Г.Я. Куннос, Е.В. Лавринович, Р. Лермит, П.П. Линарт, Б.А. Лишанский, Е.П. Миклашевский, О.П. Мчедлов-Петросян, Н.В. Михайлов, И.И. Назаренко, П.Ф. Овчинников, К.А. Олехнович, С.А. Осмаков, П.А. Ребиндер, И.Ф. Руденко, О.А. Савинов, В.И. Сивко, И.Г. Совалов, Э. Фрейсине, Т. Харрисон, С.Г. Шестоперов, В.Н. Шмигальский, М. Шпехт и др.

Несмотря на несомненную научную и практическую ценность выполненных исследований, следует отметить их определенную ограниченность, связанную со слабой практической направленностью. Именно этим объясняется, что расчет форм, опалубок, определяющих металлоемкость производства железобетона, ведется по эмпирическим формулам, предложенным еще в 60-70 гг., и точность которых в настоящее время не удовлетворяет требованиям практики.

Многие виды расчетов, например, динамического расчета форм, подавляющего большинства технологических процессов практически отсутствовали. Наиболее важной особенностью технологических процессов, связанных с деформированием подвижных бетонных смесей при статических воздействиях, является необходимость во многих случаях учета изменения соотношения фаз, особенностей деформирования ограниченных объемов смеси (с границами) в условиях плоского и объемного напряженного состояния.

Что касается теории виброформования, то наиболее важной проблемой является необходимость выявления при исследовании взаимосвязанных колебаний слоя смеси с системой форм - виброплощадки влияния изгибной жесткости (частотных характеристик) механической системы на колебания системы в целом. В существующих расчетах, как известно, реальная механическая система приводится к точечной массе, закрепленной на пружине. Такая система, в отличие от реальной, характеризуется одной собственной частотой. В других случаях при полном учете частотных характеристик механической системы свойства смеси учитываются коэффициентом присоединенной массы, который определяется экспериментально. При таком подходе невозможно сформулировать критерии оптимизации системы, в т.ч. минимизации массы форм, причем точность расчета остается низкой.

Для случаев статических воздействий до последнего времени

не была обоснована система уравнений состояния бетонной смеси, необходимая, прежде всего, для решения плоских и объемных задач. Имеются лишь некоторые модели однофазных сред и эмпирические зависимости, позволяющие получать частные решения без учета граничных условий. В то же время для описания процессов вакуумирования используется уравнение двухфазных сред Терцаги. Указанное позволяет предположить, что все они являются частными случаями более общей системы.

Применительно к вибрационным задачам формирования до последнего времени не исследовались свойства смесей при вибрационном сдвиге, в т.ч. на границах, что не позволяет перейти к решению плоских и объемных задач. Было также установлено, что в рамках однофазных сред не удается строго обосновать граничное условие при сдвиге. Разработка общих методов решения задач (статических и динамических) теории формирования, таким образом включает:

- а) выбор и экспериментально-теоретическое обоснование системы уравнений, новых граничных условий в рамках теории двухфазных сред;
- б) разработку методик определения констант, характеризующих свойства смеси в указанных системах уравнений;
- в) математическое формулирование и решение задач взаимодействия слоя смеси с оборудованием;
- г) выбор и обоснование критериев оптимизации технологических процессов, оборудования, форм и оснастки;
- д) экспериментальную проверку полученных решений и разработку инженерных методов расчета, включая необходимые справочные данные.

В первом разделе (главах 1 и 2) диссертации излагаются результаты исследований свойств бетонных смесей и технологических процессов, связанных с деформированием подвижных бетонных смесей при статических воздействиях. Анализ многочисленных экспериментальных данных о деформировании слоя бетонной смеси между вертикальными стенками опалубок с различными соотношениями сторон в плане, компрессионных испытаний показал, что принципиальным для выбора исходной системы уравнений является:

зависимость скорости деформаций бетонных смесей при компрессионных испытаниях по открытой схеме от высоты слоя;

снижение во времени бокового давления смеси в случае

мгновенного нагружения от максимального в начальный момент времени до некоторой постоянной величины;

изменение во времени суммы главных сжимающих напряжений в случае пространственной задачи.

Убедительное объяснение указанным фактам может быть дано лишь с привлечением представлений механики двухфазных сред, в частности, модели Флорина-Био (объемных сил при линейно-деформируемом "скелете"). Она основывается на следующих предпосылках: поровая жидкость сжимаемая, твердая фаза ("скелет") подчиняется уравнениям линейной упругости, изменение соотношения фаз - закону Дарси и условию неразрывности фаз.

В качестве жидкой фазы принимается свободная, не связанная какими-либо физическими или физико-химическими силами возмущений вода. Причем жидкая фаза объединяется с газообразной в одну - сжимаемую жидкость. К твердой фазе ("скелету") относятся частицы заполнителя, вяжущего и связанная различными силами взаимодействий часть воды затворения, которая не может быть удалена в процессе деформирования при возможности ее фильтрации.

Как известно, в двухфазной среде предполагается наличие двух систем давлений: эффективного в "скелете" и порового (нейтрального) в жидкой фазе. Было установлено, что для полного учета граничных условий необходимо стандартные для двухфазных сред условия дополнить еще одним, отражающим свойства бетонной смеси на твердой стенке при сдвиге. Оно должно верно отражать два экспериментально установленных факта: экспоненциальный характер распределения эффективных давлений в "скелете" по высоте слоя и возможность появления в нем зон с нулевыми давлениями.

Таким требованиям отвечает условие вида

$$\frac{\delta b_{y \text{ эф}}}{\delta x} + \mu_0 b_{y \text{ эф}} + \lambda_0 = 0 \quad (1)$$

где  $b_{y \text{ эф}}$  - нормальные напряжения в "скелете";

$\mu_0$  и  $\lambda_0$  - коэффициенты, имеющие физический смысл шероховатости и сцепления.

Ниже приводится постановка задачи о деформировании слоя смеси между твердыми стенками, позволяющая исследовать величины бокового давления смеси на опалубку. Верхняя граница принята свободной от напряжений, деформации на дне приняты ну-

левыми. Все границы, кроме верхней, приняты непроницаемыми для жидкой фазы. Учет сил трения на вертикальных стенках выполнен в соответствии с (1). В начальный момент времени деформации равны нулю. Уравнения Био записаны в форме, предложенной Ю.К. Зарецким. Индексы для простоты записи опущены. С учетом изложенного:

$$\lambda_1 \frac{\delta^2 U}{\delta y^2} + \lambda_2 \frac{\delta^2 U}{\delta x^2} + \gamma - \frac{1}{\beta} \frac{\delta p}{\delta y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\delta p}{\delta t} - \lambda_3 \left( \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta x^2} \right) + \lambda_4 \frac{\delta^2 U}{\delta y \delta t} = 0 \quad (3)$$

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$t=0, U=0, \quad (4); \quad x=\pm b, \frac{\delta p}{\delta x} = 0, \quad (5); \quad y=0, p=0; \quad (6)$$

$$y=h, \frac{\delta p}{\delta y} = 0; \quad (7); \quad x=\pm b, \frac{\delta \sigma_{y, \text{эф}}}{\delta x} \pm (\mu_0 \sigma_{y, \text{эф}} + \lambda_0) = 0; \quad (8)$$

$$y=0, \frac{\delta U}{\delta y} = 0; \quad (9) \quad y=h, U=0; \quad (10)$$

$$\text{где } \lambda_1 = a \frac{1-\nu}{\nu(1+\nu)}; \quad \lambda_2 = G; \quad \lambda_3 = \frac{C}{\nu(1+B)}; \quad \lambda_4 = \frac{a \beta B}{3(1+B)};$$

$$b_{yy} = \frac{1-\nu}{1+\nu} a \frac{\delta U}{\nu \delta y} - \frac{p}{\beta}; \quad b_{xx} = \frac{2G\nu}{1-2\nu} \frac{\delta U}{\delta y} - \frac{p}{\beta},$$

$b_{yy}$  и  $b_{xx}$  - полные внутренние напряжения, действующие в направлении осей  $x$  и  $y$ ;  $p$  - поровое давление;  $E, G$  - модули упругости и сдвига "скелета";  $a_{\nu}$  - модуль мгновенной объемной сжимаемости "скелета";  $a_{\kappa}$  - коэффициент сжимаемости при компрессии;  $\zeta_{\kappa}$  - коэффициент бокового давления;  $a_{\kappa}^0$  - коэффициент относительной сжимаемости при компрессии;  $\nu$  - коэффициент Пуассона "скелета";  $\beta$  - коэффициент, определяющий часть внешнего

давления, которое в начальный момент времени ( $t=0$ ) воспринимается жидкой фазой;  $a_w$  - модуль объемного сжатия поровой жидкости;  $\gamma_w$  - объемная масса воды;  $\gamma_{вз}$  - объемная масса смеси (при непроницаемой нижней границе - взвешенная);  $c_u$  - коэффициент плоской консолидации.

Ниже приводится конечный вид расчетных формул для определения величин боковых давлений

$$\sigma_{xx} = -\lambda_5 \sum_{n=1}^{\infty} c_n \left[ (\beta_0 h - \frac{\beta_0}{\gamma_n} \text{sh} \gamma_n h - \theta_n) \frac{\gamma_n \text{sh} \gamma_n y}{\text{ch} \gamma_n h} + \beta_0 \text{ch} \gamma_n y - \beta_0 \right] x$$

$$x \cos \frac{\varphi_n x}{b} + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1, 3, 5}^{\infty} \left( \frac{2c_m \psi_{mk}}{h} \right) \left[ \lambda_5 \frac{\pi k}{2h} \frac{1}{\beta \omega_{mk}} \right] \cos \frac{\pi \pi x}{b} \sin \frac{\pi k y}{2h} \exp(-\alpha_{mk} t), (1)$$

$$\text{где } \lambda_5 = \frac{2Gv}{1 - 2\nu}; \quad \theta_n = \frac{\gamma b^2}{\lambda_2 \varphi_n},$$

$$c_n = \frac{2 \sin \varphi_n}{\varphi_n + \sin \varphi_n \cos \varphi_n}; \quad \text{tg} \varphi_n = \frac{\mu_0 b}{\varphi_n}; \quad \gamma_n = (\varphi_n / b) \sqrt{\lambda_2 / \lambda_1};$$

$$\omega_{mk} = \frac{(\pi k / 2h)}{\beta [\lambda_1 (\pi k / 2h)^2 + \lambda_2 (\pi m / b)^2]}; \quad \beta_0 = \lambda_0 / \lambda_1 \mu_0;$$

$$\psi_{mk} = \frac{R_m (\pi k / 2h) (-1)^{(k-1)/2}}{\gamma_m^2 + (\pi k / 2h)^2} \cdot \text{ch} \gamma_m h + (\beta_0 / \gamma_m) x,$$

$$x \frac{(-1)^{(k-1)/2} (\pi k / 2h) \text{sh} \gamma_m h - \gamma_m}{\gamma_m^2 + (\pi k / 2h)^2} + (2\theta_m h / \pi k) (-1)^{(k-1)/2} - \beta_0 \left( \frac{h}{\pi k} \right)^2;$$

$$R_m = \frac{\beta_0 h - (\beta / \gamma_m) \text{sh} \gamma_m h - (\gamma b^2 / \lambda_2 \varphi_m^2)}{\text{ch} \gamma_m h};$$

$$\alpha_{cm} = \lambda_3 [(\pi k / 2h)^2 + (\pi m / b)^2] / \left[ 1 - \frac{(\lambda_4 / \beta) (\pi k / 2h)^2}{\lambda_1 (\pi k / 2h)^2 + \lambda_2 (\pi m / b)^2} \right];$$

Механические характеристики, используемые в системе уравнений Флорина-Бюо, определялись на компрессионном приборе по открытой схеме (с односторонней фильтрацией). Для исследований использовались бетонные смеси 25 составов, характеризующиеся показателем подвижности по ОК 1...15 см. Размеры прибора в плане (0,25x0,25 м) и высота слоя (0,1 м) исключали возможность появления масштабных и пристегных эффектов. Деформации измеряли индикаторами с ценой деления 0,01 мм, а давления - преобразователями ЦНИИСК. Принятая методика принципиально не отличается от используемой в механике грунтов, однако общая продолжительность экспериментов была увязана со сроками схватывания цементного теста и не превышала 1,0 час. Нагружение слоя смеси осуществлялось ступенями, равными 0,1 МПа, с выдержкой после каждой ступени до прекращения осадки штампа (ориентировочно 3 мин.). Максимальная величина давления составила 1,0 МПа, что соответствует условиям реальных технологических процессов. Значения  $a_k$ ,  $K_F$ ,  $c_k$ ,  $E_0$  для различной степени консолидации (величины нагрузки) определялись по методике, принятой в механике грунтов (рис. 1, 2). Коэффициент бокового давления  $\zeta_k$  определяли по соотношению величин бокового и нормального давлений. Из экспериментов следует, прежде всего, что все исследованные характеристики зависят от величины прессующей нагрузки.

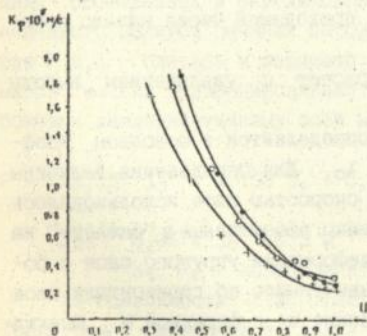


Рис.1. Зависимость коэффициента фильтрации от степени консолидации:

● - состав N 3;

○ - состав N 5;

+ - состав N 7.

Состав N 3 - 1:1,96:2,68:0,54

Состав N 5 - 1:2,5:1,8:0,525

Состав N 7 - 1:2:2,25:0,525

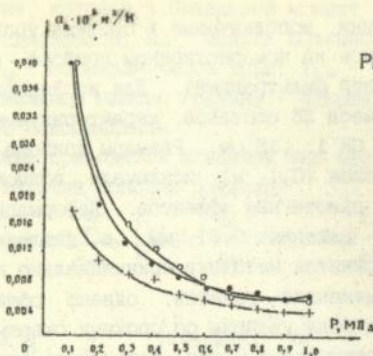


Рис. 2. Зависимость коэффициента сжимаемости при компрессии от прессующей нагрузки:

- - состав N 3;
- - состав N 5;
- + - состав N 7.

Следует отметить также относительно высокие значения коэффициентов консолидации, что определяет значительные скорости и малую продолжительность процессов уплотнения смеси (до 1,5...2,0 часов). На основании численных расчетов уравнения (11) было получено:

при нулевом начальном распределении деформаций в слое существует начальное распределение давлений, которое связывается по В.А. Флорину с мгновенно приложенной нагрузкой;

коэффициент бокового давления снижается от начального значения (для несжимаемой жидкой фазы он равен единице) до стабилизированного состояния, зависящего от коэффициента Пуассона "скелета";

зависимость величины бокового давления от ширины слоя имеет вид S-образной кривой, не проходящей через начало координат;

величина бокового давления растет с увеличением высоты слоя;

величина бокового давления определяется в основном коэффициентом  $\mu_0$  и в меньшей степени  $\lambda_0$ . Для определения величины давлений в растущем с постоянной скоростью слое использовалось приближенное решение. Соответственно: эффективные в "скелете" на основе решения задачи одноосных деформаций упругого слоя с боковым трением, поровых - неограниченного по горизонтали слоя (решение Р. Гибсона). Сопоставление их с формулой М. Шпехта показало, что константа в последней является функцией приведенного радиуса сечения, объемной массы смеси и коэффициента трения смеси по опалубке. Сопоставление второго члена, пропорционального скорости укладки смеси, с величиной поровых давле-

ний из решения Р. Гибсона показала, что известная формула М. Шпехта, вошедшая в нормы многих стран, не учитывает рассеяние напряжений, зависящее от соотношения скорости бетонирования и величины коэффициента консолидации, и продолжительность процесса. Экспериментальные исследования величин бокового давления бетонной смеси выполнялись с применением металлической опалубки с размерами в плане 0,1x0,8 м и высотой до 2,5 м. Измерение давлений в пяти точках по высоте опалубки выполнялось с использованием преобразователей давления ЦНИИСК. Для исследований применялись смеси пяти составов подвижностью 1...8 см. Высота столба смеси изменялась от 0,9 до 2,0 м. Укладка смеси производилась слоями по 0,3 м в течение 3...5 мин. и выдержкой до 18 мин. Общая продолжительность эксперимента (в зависимости от высоты столба) колебалась от 75 до 120 мин. При обработке результатов экспериментов использовались также данные В.Д. Топчия, Т. Харрисона и др. Было установлено (по кривым распределения бокового давления), что для подвижных смесей ( $OK - 8$  см)  $\mu_0 \approx 0,2$  (1/м),  $\beta_0 = 0,0005$  причем влияние  $\mu_0$  более существенно. Из полученных результатов наиболее важными являются установленные закономерности: связанные с суммированием давлений при послойной укладке смеси; значительной скоростью процессов консолидации, сопровождающиеся рассеянием поровых давлений во времени; существенным влиянием сил трения на величину боковых давлений. Выполненные исследования позволили значительно повысить точность формулы СНиП 3.03.01-87 для определения давлений. Для обработки имеющихся экспериментальных данных, собственных и опубликованных, была введена величина приведенного радиуса сечения бетонируемой конструкции  $S_0 = F/S$ , где  $F$  и  $S$  - площадь и периметр сечения. С учетом влияния размеров сечения модифицированная формула норм для определения боковых давлений тяжелых осей может быть представлена в виде:

$$P = (23,457 S_0^2 - 2,108 S_0 + 0,296)(18,72 + 6,48 V)K_1K_2 \quad (12)$$

где  $0,05 \leq S_0 \leq 0,3$  м

$K_1, K_2$  - коэффициенты, принимаемые по нормам.

Из зависимости (12) следует, что только для  $S_0 = 0,25$  (опалубка с размерами в плане 1,0x1,0 м) экспериментальные значения и рассчитанные по нормам согласуются между собой

(рис. 3). При  $S_0 < 0,25$  значения давлений получаются завышенными, а при  $S_0 > 0,25$  заниженными.

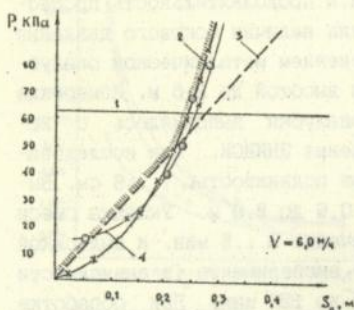


Рис. 3. Зависимость бокового давления бетонной смеси от приведенного радиуса сечения:

- - экспериментальные значения;
- 1 - по СНиП 3.03.01-87;
- 2 -  $P_{\max} = R_1 B_1^2$ ;
- 3 -  $P_{\max} = R_2 B_1 V$ ;
- 4 - по формуле (12)

2,3 - зависимости Якутова А.Н.;  $R_1, R_2$  - эмпирические коэффициенты;  $B_1$  - расчетная ширина бетонизируемой конструкции.

Было получено решение задачи и выполнены экспериментальные исследования процессов нагнетания бетонной смеси в цилиндрическую обойму кольцевого очертания применительно к случаю устройства обойм усиления, изготовления труб и т.д. Эксперименты выполнялись с использованием формы, имеющей высоту 4 м, внешний диаметр - 0,8 м, внутренний - 0,6 м. Наружная опалубка состояла из двух полуцилиндров с резиновыми уплотнениями в стыках. Для нагнетания использовали мелкозернистые смеси состава 1:2,5 (подвижностью 8...10 см по погружению стандартного конуса), песок характеризовался  $M_{кр.} = 1,1$ . Нагнетание осуществлялось растворомасосом, подключаемым к одному или последовательно к двум патрубкам, заделанным в боковую поверхность опалубки на расстоянии 0,1 и 0,2 м от дна.

Нагнетание осуществляли с перерывами, продолжительность которых колебалась в пределах от 2 до 4 мин. Распределение давлений, зафиксированное в экспериментах, качественно совпадает с результатами численных расчетов. С использованием разработанного алгоритма получено решение задачи нагнетания бетонной смеси в кассеты, в т.ч. в пульсирующем режиме и при проницаемых стенках. Результаты численных расчетов величин давлений на стенки кассеты в целом хорошо согласуются с результатами экспериментов, выполненных Н.П. Блещиком, К.Ф. Панышом и др. Ре-

шена задача устройства бетонных стенок тоннелей прессованием, позволившая определить величины давлений на кольцевую опалубку и оценить однородность свойств бетона в зависимости от степени консолидации слоя смеси.

При построении теоретической модели процессов вакуумирования бетонная смесь рассматривалась в качестве трехфазной среды, а в уравнении неразрывности учитывалось дополнительно уравнение деформации воздушной фазы. Рассмотрено два предельных случая процесса вакуумирования, когда скорость фильтрационных процессов больше или меньше скорости деформирования воздушной фазы. В первом случае при заданном законе распределения воздушных пузырьков по размерам скорость процесса вакуумирования определяется скоростью деформирования всего объема пузырьков в вязкой жидкости. Во втором случае, когда воздушная фаза деформируется по закону Войля-Мариотта, исходное уравнение является нелинейным. При отсутствии воздушной фазы исходное уравнение приводится к обычному уравнению Терцаги.

Во втором разделе диссертации (главе 3) рассмотрена теоретическая модель процессов виброуплотнения бетонных смесей. На основе анализа многочисленных экспериментальных исследований было установлено, что в случае виброкомпрессионного уплотнения минимально необходимое количество уравнений, позволяющих адекватно описать процесс равно трем.

При формулировании уравнений модели введены некоторые упрощения. Известно, что при виброуплотнении подвижных смесей динамические давления достигают максимального значения в очень короткие промежутки времени, тогда как собственно процесс виброуплотнения продолжается значительно (в 7-10 раз) дольше. Таким образом, в конце первой стадии виброуплотнения (переукладки составляющих) динамические характеристики стабилизируются и для описания процесса распространения колебаний может быть использовано обычное волновое уравнение. Вторым уравнением, описывающим процесс изменения плотности вследствие фильтрации жидкой фазы (цементного теста) в поровом пространстве "скелета" и сближения его частичек является уравнение массопереноса, определяющее распределение усредненных в единицу времени концентраций (плотности) смеси по объему и во времени. Для определения коэффициентов вышеуказанных уравнений необходимо использование еще одного уравнения, устанавливающего связь между

плотностью смеси и режимами вибрирования. Таким уравнением, характеризующим процесс виброуплотнения элементарного (при однородном напряженном состоянии) слоя смеси, является виброкомпрессионная зависимость. Она устанавливает связь между плотностью смеси и амплитудным значением динамического давления  $|\delta|$  при заданных величинах частоты колебаний и статического давления.

С учетом изложенного система уравнений, определяющих процесс виброуплотнения, может быть записана в виде:

$$\frac{c(t) - c_T}{c_H - c_T} = \theta(t) - e^{-k|\delta|t}, \quad (13)$$

$$\frac{\delta c(x, t)}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c(x, t)}{\delta x^2} + V_0 \frac{\delta c(x, t)}{\delta x}, \quad (14)$$

$$\rho \frac{\delta^2 U}{\delta t^2} = E_K \frac{\delta^2 U}{\delta x^2}, \quad (15)$$

где  $c_H$ ,  $c(t)$ ,  $c_T$  - начальная, текущая и практически достигаемая за время  $T$  концентрация (относительная плотность) смеси;  $\theta(t)$  - текущее значение коэффициента концентрации;  $K$  - коэффициент виброуплотнения;  $D$  - коэффициент виброконсолидации;  $V_0$  - скорость виброуплотнения;  $\rho$  - плотность смеси;  $U$  - смещение;  $E_K$  - комплексный модуль упругости смеси.

Из (13) следует, что константами виброкомпрессионной зависимости являются коэффициенты  $c_H$ ,  $c_T$  и  $k$ . Согласно DIN 18218 (ФРТ) величина  $c_T/c_H$  определяется как коэффициент уплотнения по Вальцу. Его величина для смесей, характеризуемых показателем подвижности, изменяется в пределах от 1,0 до 1,41.

Для регулярного режима и случая слоя смеси, опирающегося на вибратор, при достаточно больших значениях времени, когда значениями высших членов ряда можно пренебречь, среднее по высоте однородного слоя (малой высоты) значение  $\theta(t)$  в частном случае, когда  $(\pi/l)^2 \gg (V_0/2D)^2$  равно:

$$\frac{8}{\pi^3} \theta(t) \exp(F_0) - 1 - \exp\left(-\frac{V_0 l}{2D}\right), \quad (16)$$

где  $F_0 = \pi^2 D t / l^2$  - число Фурье.

Методика определения констант виброкомпрессионных зависимостей по экспериментальным кривым осадки слоя смеси и амплитудным значениям динамических давлений (ускорения колебаний) основывается на использовании уравнений (16) и вычисляемой непосредственно их виброкомпрессионной зависимости, представляемой в форме перемещений, величины средней по толщине слоя скорости уплотнения. Экспериментальные исследования процессов виброуплотнения проводились с использованием формы с размерами в плане  $0,25 \times 0,25$  м, закрепленной на подвижной раме ударно-вибрационного стенда с регулируемой частотой оборотов ( $f = 6 \dots 14$  гц). Высота слоя смеси составляла  $l_0 = 0,1$  м. Для исследований применялись бетонные смеси жесткостью 8 и 15 с (по ГОСТ 10181.1-81). Исследования проводились с использованием пригрузов: инерционных  $P_{ст} = 0,8$  и  $3,0$  КПа, безинерционных -  $P_{ст} = 10,0$  и  $20,0$  КПа. Всего выполнено 71 виброкомпрессионное испытание. В процессе проведения экспериментов осуществлялась автоматизированная запись осадок слоя на ленту самописца, ускорений колебаний и динамического давления.

На основании обработки результатов собственных исследований и других авторов определены значения коэффициентов виброуплотнения для случая гармонических, ударных и ударно-вибрационных воздействий.

На рис. 4 показаны значения  $D$  и  $V_0$ , вычисленные для следующих характеристик смеси и условий эксперимента: смесь состава  $1:1,62:2,88:0,406$  ( $\lambda = 15$  с),  $P_{ст} = 0,8$  КПа,  $C_t = 0,98$ ;  $C_t/C_n = 1,298$ ;  $\kappa = 6,728 \cdot 10^{-4}$  1/КПа·с,  $|6| = 72,5$  КПа,  $f = 8$  гц. Аналогичные результаты получены для случая гармонических колебаний. Зависимость коэффициентов  $V_0$  и  $D$  от  $\theta(t)$  определяет нелинейность уравнения (14).

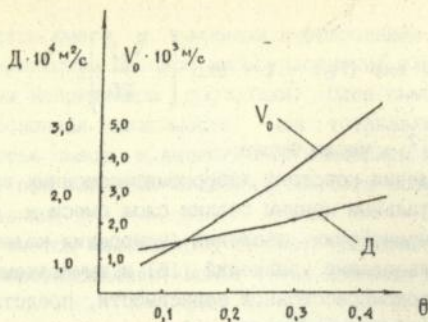


Рис. 4. Зависимость коэффициентов  $V_0$  и  $D$  от  $\theta$

Разработанная модель позволяет определить продолжительность уплотнения столба смеси, возможность образования зон с пониженной плотностью, эффективное распределение амплитуд динамического давления по высоте столба смеси. Разработанная модель исходит из представления об однофазности среды. Между тем имеется целый ряд вопросов, которые можно решить только в рамках трехфазных сред. К ним относится вопрос о влиянии гранулометрического состава заполнителей на процесс виброуплотнения и соответственно плотность смеси. Изучение указанного вопроса выполнено с использованием методов имитационного моделирования. В основу моделирующего алгоритма положены представления о случайном блуждании воздушных пузырьков в поровом пространстве пористой среды, заполненной вязкой жидкостью. На основе результатов моделирования было получено, что поровое пространство заполнителя является своеобразным фильтром, определяющим конечную величину пористости. Результаты численных расчетов хорошо совпадают с данными экспериментальных исследований А.Г. Воткина и др. Установлено, что для подавляющего большинства составов смеси полное удаление вовлеченного воздуха невозможно. Результаты моделирования хорошо объясняют неоднородность распределения плотности по высоте слоя, которая увеличивается у свободной поверхности. Исследования процесса уплотнения слоев смеси различного состава и высоты выполнялись при постоянном значении ускорения колебаний подвижной рамы стенда, но различных значениях изгибной жесткости обшивки формы. Было установлено, что имеются определенные сочетания значений изгибной жесткости днища, высоты слоя и составов смеси, при которых давления максимальны. Причем, с увеличением изгибной жесткости

днища формы давления могут как возрастать, так и снижаться (в экспериментах до двух раз). Таким образом, изгибная жесткость может быть использована в качестве параметра оптимизации процесса виброуплотнения.

Однако в этом случае должна быть в полном объеме решена плоская задача взаимодействия слоя бетонной смеси с упругой (деформируемой) конструкцией. Решению задачи в полном объеме, включая обоснование реологических уравнений бетонной смеси и математическое формулирование, посвящены последующие главы диссертации.

В главе 4 диссертации исследованы упругие и неупругие свойства смеси в стационарном (уплотненном) состоянии при колебательных воздействиях различного вида. Была исследована возможность использования системы уравнений Био-Френкеля для анализа волновых процессов в бетонных смесях, рассматриваемых в качестве двухфазных сред, причем, как установлено далее в экспериментах, в качестве жидкой фазы следует принимать цементное тесто. Основная сложность при использовании указанной системы уравнений для подобного анализа заключается в том, что она устанавливает возможность распространения волн первого и второго рода. Волны первого рода являются медленно затухающими волнами типа сейсмических. Скорость их распространения определяется сжимаемостью обеих фаз. Волны второго рода являются быстроаттenuирующими, скорость их распространения определяется упругостью скелета заполнителей, образующегося на заключительной стадии процесса виброуплотнения. Их скорость примерно на порядок ниже, чем волн первого рода. Развита в работах И.Ф. Руденко модель упругости бетонных смесей, как нетрудно убедиться, в своей физической основе соответствует волнам первого рода. Формула И.Ф. Руденко, как и известные в механике насыщенных пористых сред формулы Ю.В. Ризниченко, Г.М. Ляхова, исходят из допущения о равенстве фазовых давлений в воздушной и жидкой фазе. Последнее, как доказано в многочисленных исследованиях, справедливо при очень малом содержании воздушной фазы, когда ее сжимаемость меньше сжимаемости "скелета".

Распространение волн второго рода связано с переупаковкой твердых частиц, т.е. модуль упругости связан с гранулометри-

ческим составом заполнителей. Наиболее очевидными характеристиками гранулометрического состава (учитывая, что модули упругости зерен заполнителя для тяжелых бетонов весьма близки между собой) является объемная концентрация  $\phi_3$  и средний диаметр  $D_{ср}$  заполнителя. Что касается неупругих характеристик (коэффициента неупругого сопротивления колебаниям  $\mu$ , коэффициента потерь  $\gamma$ ), то они записываются непосредственно из дисперсионных уравнений системы Френкеля Био в виде:

$$\mu = f(1/Re_B) \quad (17)$$

$$Re_B = k\omega/v_{ц},$$

где  $Re_B$  - вибрационное число Рейнольдса;

$k$  - коэффициент проницаемости "скелета";

$v_{ц}$  - кинематическая вязкость цементного теста.

Число Рейнольдса в насыщенных пористых средах является характеристикой взаимодействия фаз.

Для проверки принципиального вопроса об определяющем характере упругости бетонных смесей при колебаниях ограниченного объема смеси были проведены специальные экспериментальные исследования. Для исследований использовались смеси шести составов ( $J = 4 \dots 12$  с по ГОСТ 10181.0-81), характеризующиеся следующими значениями коэффициентов  $\phi_3 = 0,709 \pm 0,77$  и  $D_{ср} = 0,55 \pm 0,6$  см. Исследования выполнялись с использованием герметизированной формы, в которой величина давления (разрежения) воздушного столба изменялась в пределах  $0,01 \pm 0,1$  МПа, высота слоя составляла  $0,12 \pm 0,16$  м. Частота колебаний регулировалась в пределах  $46 \pm 90$  гц. В экспериментах измеряли величину динамических давлений, амплитуду и частоту колебаний. Экспериментальное значение динамического модуля упругости определяли по резонансной частоте колебания слоя смеси при различных давлениях воздушного столба в форме. Всего было проведено 30 экспериментов. Установлено, что изменение давления воздушного столба в столь широких пределах практически не влияет на величину динамических давлений, причем имеются случаи как снижения, так и увеличения давлений, в то время как по формуле И.Ф. Руденко величины динамических давлений должны отличаться на порядок.

Сопоставлением дисперсионных уравнений для волн второго рода в двухфазной среде и однофазной в форме моделей Кельвина-Фойгта, Бокка-Шлиппе-Сорокина и др. установлена область применимости последних. При малых значениях коэффициентов неупругого сопротивления колебаниям дисперсионные уравнения практически для всех моделей однофазных сред совпадают с соответствующим для двухфазной. Для больших значений такое соответствие существует только для модели, учитывающей внешнее трение. В экспериментальных исследованиях упругих и неупругих сил сопротивления колебаниям ставилась задача установить вид зависимости  $E$  и  $\gamma$  от характеристик состава смеси и возможность использования в приложениях линейных моделей однофазных сред. В основу методики исследований положены аналитические зависимости, описывающие колебания системы слой смеси - поверхностный вибратор и слой смеси - виброплощадка. При поверхностном вибрировании определяли также величину рассеиваемой энергии по замерам площади петли гистерезиса, которая сопоставлялась с расчетной величиной.

Величина рассеиваемой за цикл колебаний энергии для модели Е.С. Сорокина равна:

$$S = \frac{E\gamma\omega K_M^2}{2} \cdot \frac{R_1(z_1 - z_2)^2 + 2z_1 z_2 R_2}{(z_1^2 - z_2^2) + 4z_2^2 \cdot z_2^2} \quad (18)$$

где  $K_M$  - статический момент дебалансов,

$$R_1 = \text{ch} \frac{\omega}{v} \alpha_1 l \cdot \cos \frac{\omega}{v} \beta_1 l; \quad R_2 = \text{sh} \frac{\omega}{v} \alpha_1 l \cdot \sin \frac{\omega}{v} \beta_1 l.$$

$$z_1 = \frac{v}{\omega} \frac{m_B}{l} [(\alpha_1 - \gamma \beta_1) (\text{ch} \cdot \omega/v \cdot \alpha_1 l \cdot \cos \omega/v \cdot \beta_1 l) - (\beta + \alpha_1 \gamma) \times$$

$$\times \text{sh} \cdot \omega/v \cdot \alpha_1 l \cdot \sin \omega/v \cdot \beta_1 l] - m_B \text{sh} \cdot \omega/v \cdot \alpha_1 l \cdot \cos \omega/v \cdot \beta_1 l;$$

$m_B$ ,  $m_B$  - соответственно масса вибратора и бетонной смеси.

$$Z_2 = \frac{m_B v}{\omega l} [(\beta_1 + \alpha_1 \gamma) \operatorname{ch} \cdot \omega/v \cdot \alpha_1 l \cdot \cos \cdot \omega/v \cdot \beta_1 l + (\alpha_1 - \gamma \beta_1) \times$$

$$\times \operatorname{sh} \cdot \omega/v \cdot \alpha_1 l \cdot \sin \cdot \omega/v \cdot \beta_1 l] - m_B \sin \cdot \omega/v \cdot \beta_1 l \cdot \operatorname{ch} \cdot \omega/v \cdot \alpha_1 l;$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{\sqrt{1+\gamma^2}-1}{2(1+\gamma^2)}}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{1+\sqrt{1+\gamma^2}}{2(1+\gamma^2)}};$$

Для исследований (исследования выполнены совместно с В.И. Горенштейном) использовались смеси 18 составов, основные характеристики которых изменялись в достаточно широком интервале ( $\varphi_3 = 0,6 \dots 0,75$ ,  $D_{CP} = 0,505 \dots 0,605$ ,  $J = 10 \dots 32$  с.). Исследования системы слой смеси - поверхностный вибратор выполнялись с использованием формы с размерами в плане  $0,25 \times 0,25$  м. Высота слоя смеси составляла  $0,065 \dots 0,12$  м. Статическое давление составляло  $0,01$ ;  $0,0125$  и  $0,0145$  МПа. Частота колебаний плавно регулировалась в интервале  $30 \dots 100$  гц. Динамический модуль упругости определяли по резонансной частоте колебаний, коэффициент неупругого сопротивления колебаниям по усилению амплитуды динамического давления в зоне резонанса. Исследования, выполненные на виброплощадке осуществляли по аналогичной методике ( $f = 20 \dots 70$  гц,  $l_1 = 0,16$  м,  $l_2 = 0,212$  м). Основная часть экспериментов на виброплощадке выполнена с использованием для измерений амплитудно-частотных характеристик виброакустической аппаратуры. Размеры формы составляли в плане  $0,5 \times 0,5$  м, а высота слоев для каждого состава составляли последовательно  $0,05$ ;  $0,1$  и  $0,15$  м. Наряду с резонансными кривыми для случая поверхностного вибрирования использовались аналогичные кривые в форме величины рассеиваемой энергии для чего производили фотографирование петель гистерезиса с экрана лучевого осциллографа. На основе обработки экспериментальных данных для случая гармонических колебаний были получены следующие эмпирические формулы для вычисления величины динамического модуля упругости и коэффициента потерь

$$\ln E = ((54,16 D_{CP}-18,52)-(14,08-1,39 D_{CP}) \varphi_3) MПа, \quad (19)$$

$$\gamma = 0,088 + 0,074 (1/Re_B). \quad (20)$$

Коэффициент корреляции для (20) равен:

$$R = 0,983; \quad \delta = 1,5 \cdot 10^{-2}.$$

Из (20) следует, что для случая вибрационных воздействий для описания свойств бетонных смесей может использоваться модифицированная модель Бокка-Шлиппе-Сорокина. При определении числа Рейнольдса  $Re_B$  коэффициент проницаемости рассчитывался по формуле Ковени. Константа в (20), как показано в динамике зернистых сред, связана с рассеянием энергии из-за поворота частиц заполнителя. Формула (18) с учетом (20) позволяет вычислить величину рассеиваемой за цикл колебаний энергии или мощности и, таким образом, уточнить значение критерия интенсивности. В формуле, характеризующей мощность, только первый член включает в себя критерий интенсивности в общепринятой форме.

В экспериментах получено, что при реализуемых на практике амплитудах колебаний 0,1...0,6 мм в исследованной области частот (30...100 гц) свойства смеси практически линейны. Указанное подтверждается полным совпадением расчетных и экспериментальных значений амплитуд колебаний на восходящей и нисходящей ветвях резонансной кривой, в т.ч. и для величин рассеиваемой энергии, которая в соответствии с (18) оказалась пропорциональной квадрату амплитуды колебаний. Получено, что коэффициент потерь также не зависит от величины амплитуды колебаний. Установлено существенное влияние статической составляющей давления на величины  $E$  и  $\gamma$ , причем эта зависимость нелинейна. Получено, что в зоне резонанса с уменьшением значения  $\gamma$  величина рассеиваемой энергии увеличивается, а за пределами резонансной зоны, наоборот, уменьшается.

Прямые исследования свойств бетонных смесей при вибрационном сдвиге основывались на решении задачи о продольных колебаниях пластинки, погруженной в слой смеси и закрепленной к си-

силоизмерительной консоли, позволяющей измерять суммарные силы трения. Частота колебаний регулировалась в интервале 20...80 гц, амплитуда колебаний 0,04-0,6 мм. Величина безинерционного пригруза принималась равной: 0; 0,009 и 0,018 МПа. Для исследований применялась бетонная смесь состава 1:2,23:3,47:0,442. Щебень фракций 5-20 мм, песок -  $M_{кр} = 1,1$ , цемент портландский М-400 (н.г.-23%).

Вычисленная по результатам экспериментов величина динамического модуля сдвига  $G$  оказалась примерно на два порядка ниже модуля упругости ( $G = 20$  КПа при  $\omega = 314$  1/с). В то же время в предположении об изотропности среды следует ожидать, что  $G \approx 0,3 E$ . Указанное можно объяснить лишь анизотропными свойствами бетонных смесей. На основании обработки результатов экспериментов получено, что толщина пристенного вязкого слоя равна  $b \approx 0,015$  мм, вязкость при  $\omega = 188$  1/с,  $\eta = 6,0$  Па·с, при  $\omega = 314$  1/с  $\eta = 3,5$  Па·с. Отметим также, что значения вязкости пристенного вязкого слоя и вязкость цементного теста, непосредственно измеренная на шариковом вибровискозиметре практически совпали. Линейный коэффициент затухания при вибрационном сдвиге равен соответственно для указанных частот 1 и 1,64 1/мм. Было установлено, что определяющими являются силы вязкого трения, а силы трения "скелета", связанные со статическим давлением, значительно ниже. Ввиду малости чисел Рейнольдса распределение скоростей в пристенном слое может быть принято линейным. В этом случае величина сил трения может характеризоваться параметром  $\eta/bv$ .

Исследования упругих и неупругих свойств бетонных смесей при ударных воздействиях основывались на анализе разверток затухающих колебаний слоя смеси (динамических давлений) от последовательно приложенных ударных импульсов, причем высота слоя и частота следования ударных импульсов задавались таким образом, чтобы колебания от последовательно приложенных импульсов не накладывались.

Для анализа использовалось полученное решение одноосных колебаний (в форме контактных напряжений) вязкоупругого слоя при ударных воздействиях

$$\delta(l, t) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_0 \lambda_n \sin \lambda_n l}{\varphi_n \left( \lambda_n l + \frac{\sin^2 \lambda_n l}{2} \right)} e^{-\frac{\alpha_n t}{2}} \times \quad (21)$$

$$\times \sqrt{\left( E - \frac{\alpha_n \mu}{2} \right)^2 + \frac{\varphi_n^2 \mu^2}{4}} \times \cos \left( \frac{\varphi_n t}{2} + \zeta \right);$$

$$\zeta = \arctg \frac{2E - \alpha_n \mu}{\varphi_n \mu}; \quad \varphi_n = \sqrt{\frac{4E \lambda_n^2}{\rho} - \left[ \mu \frac{\lambda_n^2}{\rho} \right]^2}; \quad \alpha_n = \frac{\mu \lambda_n^2}{\rho}.$$

$$\frac{1}{\theta_n} \left( \frac{cl}{EF} \right) - \frac{m_n \theta_n}{m \delta} = \operatorname{tg} \theta_n; \quad \theta_n = \lambda_n l \quad (22)$$

где  $\mu$  - коэффициент неупругого сопротивления колебаниям в модели Кельвина-Фойгта;  $\lambda_n$  - частотный коэффициент;  $c$  - жесткость ограничителей;  $F$  - площадь слоя;  $m_n$ ,  $m \delta$  - соответственно масса подвижных частей стенда и бетонной смеси;  $V_0$  - скорость смеси в момент удара.

В экспериментах замерялись величины динамических давлений, скорости или ускорения колебаний. Дополнительно строится огибающая развертки затухающих динамических давлений. По основной частоте затухающих колебаний определяется величина  $E$ , по огибающей развертки затухающих колебаний давлений  $v_0$  с учетом значения  $\lambda_1$ , вычисляемого из (22). Частота ударных импульсов изменялась в интервале 3...15 гц, высота слоя 0,12...0,32 м.

На основе обработки результатов экспериментальных данных было получено

$$E = (287,9\varphi_3 - 162,8\varphi_3^2 - 115) \text{ МПа} \quad (23)$$

$$v_0 = [1,1 + (1/Re_{уд})^{3,013}] \text{ м}^2/\text{с}; \quad (24)$$

$$v_0 = \mu/\rho_{цт}; \quad Re_{уд} = \kappa^{1/2} V_0/v_0.$$

где  $Re_{уд}$  - число Рейнольдса при ударных воздействиях;  
 $\rho_{цт}$  - плотность жидкой фазы (цементного теста).

Из (23) следует, что при ударных воздействиях величина динамического модуля упругости в отличие от случая гармонических колебаний не зависит от характерного размера заполнителя. Указанное может быть объяснено тем, что величина напряжений растяжения (раагруаки) в слое остается ограниченной по величине.

Установлено, что свойства бетонной смеси при ударных воздействиях описываются модифицированной моделью Кельвина-Фойгта. Такое существенное отличие от случая гармонических колебаний в первую очередь объясняется тиксотропными свойствами цементного теста, вязкость которого существенно зависит при прочих равных условиях от частоты колебаний.

Выполненные исследования свойств бетонных смесей при вибрационном сдвиге имеют определенный недостаток, связанный с невозможностью прямой проверки соблюдения граничного условия на колеблющейся пластинке. Поэтому в дальнейшем была разработана принципиально отличная методика определения свойств смеси при вибрационном сдвиге. В основу методики было положено решение задачи о взаимосвязанных колебаниях слоя бетонной смеси с упругой (деформируемой) системой в виде прямоугольной пластинки с защемленными краями.

Исходное уравнение колебаний (для простоты выписано для ячейки балочного типа) без учета наложения деформаций от последовательно приложенных ударных импульсов имеет вид:

$$U(x, y, t) = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{kn} \cos \frac{k\pi x}{a} \cos \lambda_n y e^{-\frac{\alpha_{kn} t}{2}} \sin \frac{\varphi_{kn}}{2} t, \quad (25)$$

$$\text{где } A_{kn} = \frac{16V_0 \sin \lambda_n l}{\pi k \varphi_{kn} \left( \lambda_n l + \frac{\sin^2 \lambda_n l}{2} \right)}, \quad \alpha_{kn} = \frac{\lambda_n^2 \mu}{\rho} + \mu_1 \frac{k^2 \pi^2}{a^2};$$

$$\varphi_{kn} = \sqrt{4 \left( \frac{E \lambda_n^2}{\rho} + \frac{k^2 \pi^2 G}{\rho} \right) - \left( \frac{\mu_0 \lambda_n^2}{\rho} + \frac{\mu_1 \pi^2 k^2}{\rho a^2} \right)^2};$$

$$P_k = \frac{\theta_n^2 E}{\rho l^2} \left\{ 1 + \left( \frac{G l^2}{E \theta_n^2} \right) \left( \frac{\pi k}{a} \right)^2 + \left( \frac{m \theta}{m_0} \right) \operatorname{tg} \theta_n / \theta_n \right\};$$

$$P_k = \left( \frac{k\pi}{a} \right)^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_0}}; \quad \theta_n = \lambda_n l.$$

где  $a$  - пролет ячейки;  $l$  - высота слоя смеси;  $m_{\delta}$ ,  $\rho$  - масса (погонная) и плотность бетонной смеси;  $EJ$ ,  $m_0$  - жесткость и погонная масса обшивки;  $P_k$  - собственная частота колебаний незагруженной ячейки;  $\Phi_{kn}/2$  - частота колебаний загруженной ячейки ( $\Phi_{kn}/2 = P_{\delta}$ ).

Вычисление величины  $G$  производилось по разности собственных частот колебаний обшивки с бетонной смесью  $P_{\delta}$  с учетом сдвиговых деформаций и без учета сдвиговых деформаций  $P_{\delta_1}$ . При этом значение  $E$  определяется в экспериментах при одноосных деформациях в том же интервале частот колебаний.

Для ячейки прямоугольного очертания:

$$P_{\delta}^2 - P_{\delta_1}^2 = \frac{\pi^2 G}{\rho} \left( \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right), \quad (26)$$

где  $b$  - ширина ячейки.

Для исследований использовались смеси 14 составов смеси ( $\Phi_3 = 0,644 \dots 0,769$ ) различных консистенций. Для исследований использовалась форма размером  $0,5 \times 0,5$  м (собственная частота обшивки формы  $P_1 = 150$  гц). Каждый состав испытывался при пяти значениях высоты ( $0,05 \dots 0,25$  м) и трех частотах  $4,0$ ;  $5,0$ ;  $6,0$  гц. В экспериментах измерялись частотные характеристики обшивки формы с учетом влияния бетонной смеси. Всего было выполнено 87 экспериментов (без учета записей при различных частотах). На основе обработки результатов экспериментов получена корреляционная зависимость для вычисления  $G$

$$G = (9,09 \Phi_3^2 - 10 \Phi_3 + 2,685) \text{ МПа} \quad (27)$$

Из опытных данных следует, что  $G \approx 0,025 E$ , т.е. и при ударных воздействиях гипотеза об изотропности среды не согласуется с опытными данными. Наличие одной оси изотропии и симметрии в двух остальных направлениях позволяет ограничиться для рассматриваемого круга задач рассмотрением бетонных смесей в качестве трансверсально-изотропных сред.

С учетом изложенного исходная система уравнений состояний, используемая для решения плоских задач (при отсутствии смещений смеси в горизонтальном направлении) может быть записана в форме стандартных уравнений вязкоупругости. При этом принимается, что значения  $E$  и  $G$  не связаны между собой какими-либо соотношениями. Для унификации решения выписываются для уравнений в форме модели Кельвина-Фойгта. Переход к модели Сорокина для случая гармонических колебаний осуществляется путем замены коэффициентов неупругого сопротивления колебаниям в окончательном решении. Указанная система уравнений должна быть дополнена еще одним, отражающим свойства смеси при вибрационном сдвиге на твердой границе, записываемого в форме граничного условия. С учетом указанного исходная система уравнений записывается в виде:

$$\sigma(x, y, t) = E \frac{\delta U(x, y, t)}{\delta y} + \frac{\delta^2 U(x, y, t)}{\delta y \delta t}; \quad (28)$$

$$\tau(x, y, t) = G \frac{\delta U(x, y, t)}{\delta x} + \mu_1 \frac{\delta^2 U(x, y, t)}{\delta x \delta t}; \quad (29)$$

$$X = \frac{a}{2}; \quad \tau_0(x, y, t) = \frac{\eta}{b} \frac{\delta U(x, y, t)}{\delta t}, \quad (30)$$

Для определения вязкости вибрируемой бетонной смеси широко используется формула Стокса, устанавливающая связь скорости погружения (всплывания) сферы с вязкостью жидкости. Более строгий учет сил сопротивления колебаниям при вибрации позволил установить получаемую погрешность. При этом кажущееся значение кинематической вязкости  $\nu_k$  (вычисляемой по Стоксу) и действительное связаны формулой

$$\nu_k = \nu + (1/2) a_0 \sqrt{2\nu\omega} \quad (31)$$

где  $a_0$  - радиус сферы.

Численными расчетами установлено, что с уменьшением вязкости, увеличением радиуса сферы и частоты колебаний величина погрешности быстро растет. Измерениями вязкости цементного теста на шариковом вибровискозиметре с использованием сфер различного радиуса ( $a_1 = 19,75$  мм,  $a_2 = 5,4$  мм) и различной плотности ( $\rho_1 = 1355$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2 = 970$  кг/м<sup>3</sup>) подтверждена справедливость полученной зависимости (31). Для цементного теста

при  $V/D = 0,4$ ; н.г. -  $24,5\%$   $A = 0,4$  мм,  $\omega = 314$  1/с;  $\eta = 5,62$  Па·с величина погрешности для  $a_2$  составляет  $\sim 50\%$ , а для  $a_1$  в несколько раз превышает величину замеряемой вязкости.

Развивая подход, реализованный для определения неупругих сил сопротивления колебаниям можно установить связь между вязкостью бетонной смеси  $\nu_{см}$  с вязкостью жидкой фазы (цементного теста)  $\nu_{ж}$  и геометрическими характеристиками "скелета" заполнителя. При гармонических колебаниях одиночной частицы сферической формы в жидкости критерий Рейнольдса равен:

$$Re_B = \omega D^2 / \nu_{ж} \quad (32)$$

где  $D$  - диаметр сферы.

При увеличении числа частиц и их сближении в качестве характерного размера следует принять толщину прослойки жидкой фазы между частицами  $d_c$ . Вязкость вибрируемой бетонной смеси  $\nu_{см}$  при прочих равных условиях связана с суммарным эффектом рассеяния энергии, поэтому можно принять:

$$\nu_{см} = f(1/Re_B) \quad (33)$$

Раскладывая (33) в ряд и ограничиваясь двумя первыми членами ряда, после преобразований получаем:

$$\nu_{см} / \nu_{ж} = K_1 + K_2 / \omega d_c^2 \quad (34)$$

где  $K_1, K_2$  - коэффициенты разложения.

В.А. Дорфом для керамзитобетонной смеси ( $\omega = 314$  1/с) было получено:  $K_1 = 1$ ;  $K_2/\omega = 1,12$ . Показатель степени при  $d_c$  был равен 1,6, т.е. достаточно близок к теоретическому значению. Из сопоставления (20), (24), (31) и (34) следует, что все неупругие характеристики смеси связаны между собой: вязкость жидкой фазы, коэффициент неупругого сопротивления колебаниям, вязкость вибрируемой бетонной смеси. Исходной является величина вязкости цементного теста, которая при использовании шарикового вискозиметра может определяться по формуле (31).

С использованием системы уравнений (28-30) было выполнено математическое формулирование и получено решение задачи о взаимосвязанных колебаниях слоя смеси с упругой системой, включа-

ющей форму и виброплощадку. Решение задачи получено при следующих исходных предпосылках:

рассматривается случай колебаний системы, обладающей свойствами симметрии;

для упругой системы принимается, что поддон формы жестко соединен с формующей машиной или установкой;

учитывается, что поддон формы является конструкцией с периодической структурой, состоящей из однотипных ячеек.

Колебания системы могут быть представлены в виде колебаний двух частных систем:

колебаний поддона формы в виде ортотропной пластины с сосредоточенными массами (массами подмагнитных плит и виброблоков, массами бортов, приложенных в местах шарниров); взаимодействующей с вязкоупругим слоем (бетонной смесью);

колебаний обшивки отдельных ячеек с вязкоупругим слоем, граничные условия которых учитывают влияние смежных.

Из расчета по первой схеме определяются собственные частоты колебаний формы с бетонной смесью и амплитуды вынужденных колебаний в различных точках поверхности. Целью данного расчета является обеспечение эксплуатации поддона формы вне резонансных режимов колебаний. Расчет по второй схеме связан с оптимизацией режимов формования за счет допустимого сближения частот вынужденных и собственных колебаний системы и усиления динамических воздействий на бетонную смесь. При выборе расчетной схемы поддона балочного типа учитывалась погонная масса балки, сосредоточенные массы подмагнитных плит, виброблоков и координаты их расположения.

Расчетная схема ячейки обшивки формы, закрепленной на одномассовой виброплощадке, приводится к балке с граничными условиями общего вида, включающими приведенную массу  $M_{пр}$  и жесткости  $s$  и  $H$  относительно поперечных и угловых перемещений (рис. 5). Для ударно-вибрационных машин (УВМ) после линеаризации граничных условий относительно поперечных перемещений получается аналогичная схема.

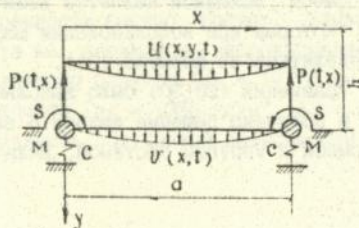


Рис. 5. Расчетная схема системы бетонная смесь-ячейка обшивки-виброплощадка.

Рассмотрим особенности обеих упругих систем. Первая приводится к балке со свободными концами с приведенной погонной массой. Что касается второй, то частотные коэффициенты ее зависят от двух параметров  $\mu = M/m_0 l$  и  $c_0 = c_{np} l^3/D$  (рис. 6). Причем эта зависимость имеет минимум.

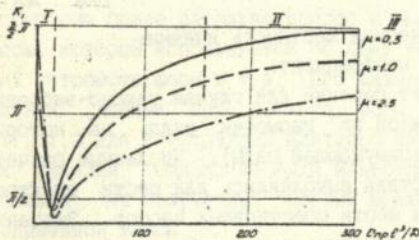


Рис. 6. Зависимость частотного коэффициента  $K_1$  от параметров  $\mu$  и  $c_{np} l^3/D$ .

Для симметричных и антисимметричных форм колебаний расчет для упрощения расчетов на ЭВМ выполняется раздельно.

Для симметричных форм колебаний решение задачи совместных колебаний ячейки с вязкоупругим слоем имеет вид (в форме напряжений)

$$b(x, h, t) = \sum_{m=n=1,3,5,\dots}^N E \frac{P_0 B_m \pi n R_m \cos \frac{\pi n x}{a}}{2 a m_0 (-1)^{(n-1)/2}} \cdot T_n \cos(\omega t + \zeta), \quad (35)$$

где

$$T_n = \frac{\lambda_5}{\lambda_2 \lambda_4 \sqrt{M_1^2 + M_2^2}}; \quad \zeta = \varphi_3 - \varphi_4 - \varphi_2 - \varphi_5 + \varphi_6;$$

$$k_1 = \omega_m^2 - \omega^2 - \frac{b \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_5}{m_0 \lambda_4} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_6);$$

$$k_2 = - \frac{b \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{m_0 \lambda_4} \sin(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4); \quad \lambda_1 = \sqrt{E^2 + \mu_0^2 \omega^2};$$

$$\lambda_5 = \sqrt{1 + \gamma_0^2 \omega^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\mu_0 \omega}{E}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\beta}{\alpha}; \quad \operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{\operatorname{tg} \beta h}{\operatorname{tg} \alpha h};$$

$$\operatorname{tg}\varphi_4 = \operatorname{tg}\alpha h \cdot \operatorname{th}\beta h; \quad \operatorname{tg}\varphi_5 = -\frac{M_2}{M_1}; \quad \operatorname{tg}\varphi_6 = \gamma_0 \omega; \quad \lambda_2 = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2};$$

$$\lambda_3 = \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha h + \operatorname{tg}^2 \beta h}; \quad \lambda_4 = 1 + \operatorname{tg}^2 \alpha h \cdot \operatorname{th}^2 \beta h; \quad \omega_m = \frac{k_m^2}{2\pi a} \sqrt{\frac{D}{m_0}}$$

Здесь  $D$  - цилиндрическая жесткость ячейки;

$k_m$  - частотный коэффициент.

Аналогичный вид имеет решение для случая ударно-вибрационных воздействий (для каждой из гармоник ряда, на который раскладывается импульс возмущающей силы). Численные расчеты для случая ударных воздействий выполнялись для шести спектров с учетом первых пяти или шести собственных частот. Значения частотного коэффициента принимались равными  $\theta_1 = 0 \dots 2,0288$ , что охватывает область от чрезвычайно податливых до абсолютно жестких ячеек обшивки. Остальные значения принимались равными  $E = 5,0 \dots 9,0$  МПа,  $\nu = 1$  м<sup>2</sup>/с,  $c_0 = 0 \dots 500$  1/с,  $l = 0,05 \dots 2,0$  м,  $f = 5 \dots 20$  гц. Всего выполнено 94 серии расчетов с построением графиков. На основе анализа результатов численного моделирования установлено: амплитуда динамических давлений определяется в основном низшей частотой собственных колебаний слоя смеси и, в меньшей степени, соотношением частот в спектре. Зависимость величины динамического давления от частотного коэффициента  $\theta_1$  имеет два максимума, определяющих область эффективных значений собственных частот колебаний ячеек обшивки (толщин обшивки при заданных размерах) (рис. 7).

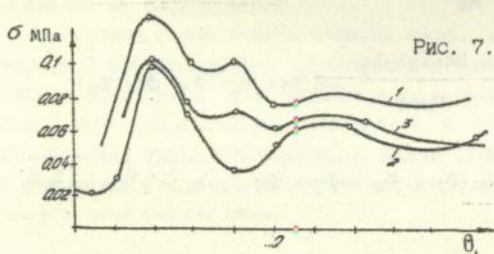


Рис. 7. Зависимость динамического давления от частотного коэффициента  $\theta_1$ .

1 - 1 - 0,05 м;

2 - 1 - 1,0 м;

3 - 1 - 0,3 м;

( $E = 7,0$  МПа)

При ударных воздействиях, когда продолжительность ударного импульса практически равна нулю, динамические давления синфазны по высоте слоя смеси. При гармонических колебаниях распределение давлений по высоте слоя происходит по затухающей синусоиде. При ударно-вибрационных воздействиях имеют место про-

межточный случай, зависящий от продолжительности и формы ударного импульса. Указанное позволяет, в зависимости от высоты изделия, правильно выбрать характеристики импульса возмущающей силы и, соответственно, частоту вынужденных колебаний. Рассмотрим более детально вопрос о коэффициенте присоединенной массы, который используется во всех инженерных расчетах формулирующих устройств, форм и т.д. Его значение на основе экспериментальных данных при расчете форм принимаются в пределах 1,1...1,3 для конструкций плитного типа и 1,3...1:5 для высоких изделий. Однако не были известны зависимости для его вычисления. Из полученных решений можно вычислить величину присоединенной массы

$$\alpha_{nc} = (\omega_m^2 / f_m^2 - 1) m_0 / m_0, \quad (36)$$

где  $f_m$  - собственная частота ячейки с бетонной смесью.

Полученная зависимость (36) (для случая плоского изделия) показывает, что  $\alpha_{nc}$  зависит от соотношения собственных частот нагруженной и незагруженной упругих систем, а также соотношения погонных масс бетонной смеси и упругой системы. Величина его оказывается различной для каждого значения собственной частоты, что и приводит на практике к значительным погрешностям. Указанное повышает опасность наступления резонанса для 2-й - 3-й собственных частот системы. Так, в экспериментах, выполненных ЧПСНИИП с формой размером 3х6х0,16 м, закрепленной на виброплощадке СМЖ-200Б было получено  $\alpha_{nc} = 1,1$ . При его использовании первые три собственные частоты системы равны: 16,0; 44,5 и 84,7 гц. По формуле (25) соответственно 16,5; 43 и 65 гц, а значения  $\alpha_{nc}$  соответственно равны 0,96; 1,287 и 2,74. Для ударно-вибрационных режимов колебаний существенное значение имеет частотный спектр возмущающей силы. Усиление динамических воздействий на бетонную смесь реально может быть достигнуто путем сближения собственных частот колебаний с одной из гармоник возмущающей силы, причем при сближении с 3<sup>й</sup> и последующими гармониками отстройка от резонанса необязательна ввиду относительно слабого усиления колебаний. Подобным же образом достигается усиление колебаний и при вибрационных воздействиях. Были проанализированы амплитудные спектры различных типов ударных и ударно-вибрационных установок, в т.ч. ШС-10, ВРА-15 и др.

В табл. 1 приведены рекомендуемые значения собственных частот колебаний, позволяющие оптимизировать процесс формования.

Таблица 1

Рекомендуемые значения частоты основного тона колебаний системы: уплотняющая установка-обшивка поддона-бетонная смесь

Уплотняющая установка и частота колебаний	Высота слоя бетонной смеси, м							
	0,03	0,05	0,1	0,2	0,3	0,35	0,4	0,5
Виброплощадки блочные с вертикально направленными колебаниями $f = 50$ гц	70	65	65	35	30	28	-	-
То же, с круговыми колебаниями $f = 25$ гц	53	48	48	40	30	20	20	17
Ассимметричные ударно-вибрационные площадки типа СМЖ-460(ВРА-15М) $f = 10$ гц	50	50	30	30	30	13	13	13
Ударный стол $f = 4-6$ гц	93	63	48	40	31	28	26	20

Наряду с оптимизацией режимов формования при выполнении динамических расчетов системы производится минимизация массы форм. Из уравнения (25) с учетом данных табл. 1 определяются требуемые значения собственных частот незагруженных ячеек обшивки  $\omega_n$ .

В настоящее время требуемое значение  $\omega_n$  достигается в основном за счет увеличения изгибной жесткости обшивки. Более рациональный путь заключается в том, чтобы требуемое значение  $\omega_n$  получить за счет соответствующего выбора параметров  $\mu$  и  $c_{пр}l^3/D$ , при которых металлоемкость формы получается минимальной. Нетрудно убедиться, что минимальная металлоемкость достигается при максимальном значении частотного коэффициента  $K_1$ , причем область минимальных значений не должна использоваться, т.к. приводит к реакому увеличению металлоемкости форм. Учиты-

вая реальные значения жесткостей амортизаторов, упругих ограничителей и ударных элементов на рис. 6 показаны области I, II и III, рекомендуемые для случаев расчета форм, эксплуатируемых соответственно на линиях с вибрационными, ударно-вибрационными и ударными формовочными машинами. Поскольку в настоящее время расчет форм и формующего устройства производится раздельно, то на практике это приводит к нежелательным последствиям:

недостаточной долговечности форм из-за возможности их эксплуатации в резонансном режиме; необходимости увеличения амплитуды колебаний из-за демпфирования динамических давлений обшивкой формы, частотные характеристики которой выбраны неудачно.

С использованием системы уравнений (28-30) и разработанного алгоритма расчета получено решение следующих задач: динамический расчет установки продольно-горизонтального формования; установки для изготовления объемных блоков; рабочего органа бетоноукладочной машины и т.п.

На основе выполненных исследований была разработана инженерная методика динамического расчета форм, виброопалубок. Экспериментальная проверка и внедрение результатов исследований были выполнены путем разработки и испытания форм с нормированными частотными характеристиками в производственных условиях. Был также выполнен анализ опыта их многолетней эксплуатации на технологических линиях с различным формовочным оборудованием:

1. двенадцатиместные формы (2x6,0 м) для изготовления тротуарных плит размером 1,0x1,0 м по ударной и вибрационной технологии. Ячейки обшивки формы приняты треугольной формы (размеры катетов - 1,0 м). Толщина обшивки первой партии принята 4 мм, второй партии 6 мм. Расчетные значения собственных частот колебаний формы с бетонной смесью в продольном направлении составили  $f_{\delta_1} - 15$  гц,  $f_{\delta_2} - 34,8$  гц,  $f_{\delta_3} - 64,7$  гц (экспериментальное значение  $f_{\delta_1} - 17$  гц). Расчетные значения собственных частот колебаний ячеек обшивки толщиной 4,0 мм  $f_0 - 110,8$  гц (без бетонной смеси) и  $f_{\delta_1} - 38,8$  гц (с бетонной смесью). Экспериментальные - соответственно 105...110 гц и 36...38 гц. Массы форм снижены соответственно на 1287 и 1100 кг. Всего в 1982, 1986, 1990 гг. было изготовлено 96 форм, а экономия металла составила 105,6 т.

При изготовлении плит по ударной технологии ударный стол ЦС - 10 был модернизирован. Частота колебаний его была увеличена с 140 до 350 уд/мин. Частота собственных колебаний ячеек обшивки форм обеспечивала получение максимальных динамических давлений. Указанное позволило применять малоподвижные смеси ОК - 1...2 см. Такие же смеси и те же формы применялись для формирования изделий на вибротумбах. Выпуск изделий был увеличен на заводе ЖБИ в 3,0 раза и достиг 5000 м<sup>2</sup> в год. Применение форм с нормированными частотными характеристиками позволило резко повысить качество лицевой поверхности;

2. поддоны для изготовления многопустотных предварительно-напряженных плит перекрытий ПТ 60-15 размером 1,5х6,0 м с максимальным усилием натяжения арматуры 43,0 тс. При разработке поддонов учитывалось, что масса изделия с формой не должна превышать 5 тс из-за ограниченной грузоподъемности крана. В качестве формирующих установок использовались вибротумбы. Применявшиеся ранее поддоны имели недостаточную жесткость на кручение (деформация углов поддона при испытаниях составила 7,5 см). Была применена система продольных и перекрестных ребер поддона из швеллеров. Масса поддона была снижена до 1675 кг (масса поддонов типовых серий достигает 2900 кг). Частотные характеристики обшивки с бетонной смесью составили  $f_{\delta} - 41,7$  гц, без -  $f_0 - 99,3$  гц. Первые две собственные частоты колебаний поддона с бетонной смесью составили 18,6 и 62,2 гц. Таким образом, частотные характеристики обшивки обеспечивают необходимую степень усиления колебаний, а поддона - эксплуатацию вне резонансных режимов колебаний. Для изготовления изделий применялись жесткие смеси (20 с) с немедленной распалубкой. Расстояние между вибротумбами (3600 мм) было выбрано таким образом, чтобы величина динамических напряжений в конструкции поддона не превышала 40,0 МПа (фактически 30 МПа). Поддоны эксплуатировались в течение 5 лет (линия оснащена 80 поддонами) при нормативном сроке 3,5 года. В 1990 году линия была оснащена 85 поддонами этой же конструкции. Мощность линии составляет 60,0 м<sup>3</sup> изделий в год. Выпуск плит за годы эксплуатации составил 360 тыс. м<sup>3</sup> плит. Общая экономия металла составила 208,8 т.

Применение поддонов с нормированными частотными характеристиками позволило повысить качество лицевой поверхности и полностью исключить все виды брака от кручения форм.

Были также разработаны и изготовлены десять 14-местных кассетных форм для изготовления бортовых камней, позволившие снизить массу форм с 3675 до 2550 кг. Были освоены формы для изготовления тонкостенных изделий и т.п.

Для усиления железобетонных конструкций крановых эстакад, (колонн, подкрановых балок) была разработана конструкция само-несущей щитовой опалубки с массой щита не более 8,0 кг (до 30 кг/м<sup>2</sup>) закрепляемой на уголковой арматуре, что позволило в стесненных условиях производства исключить применение кранового оборудования.

Бетонирование обойм осуществлялось ярусами высотой 1,0 м (при толщине стенок обоймы 0,1 м) с наращиванием опалубки в процессе бетонирования. Для бетонирования применялись смеси с ОК = 5...6 см. Аналогичные конструкции опалубок использовались при усилении рамных фундаментов. Конструкции объемных опалубок с навесными вибраторами использовались для усиления железобетонных колонн двутаврового сечения открытых крановых эстакад. Указанные конструкции опалубок нашли широкое применение на стройках Украины и стран Содружества.

## В В О Д Ы :

1. Экспериментальными и теоретическими исследованиями доказано, что научной основой для построения основных разделов технологической механики бетонных смесей при статических и динамических воздействиях (в области малых деформаций) является система уравнений Био в форме двух частных систем Флорица-Био и Френкеля-Био, исходящих из представлений о двухфазности среды и учитывающие закон взаимодействия фаз.

2. Разработана методика определения механических констант подвижных бетонных смесей при статических воздействиях, в основном базирующаяся на методах, разработанных в теории консолидации грунтов, но с учетом масштабных эффектов (крупности заполнителя), ограничений продолжительности проведения испытаний из-за схватывания цементного теста. Определение констант, входящих в граничное условие, основано на полученном решении задачи деформирования слоя смеси между стенками опалубки с учетом сил трения. Установлена зависимость констант от величин эффективных напряжений в "скелете".

3. Установлены основные закономерности деформирования подвижных бетонных смесей в уплотненном состоянии при статических воздействиях и доказано, что они следуют уравнениям теории объемных сил (Флорина-Био), которые дополняются специальным уравнением, характеризующим свойства смеси при сдвиге на границе с твердой стенкой.

4. На основе системы уравнений Флорина-Био выполнено математическое формулирование и получено решение (в линейно постановке) основных задач, характеризующих технологические процессы безвибрационной технологии формирования, включая взаимодействие бетонной смеси в опалубке. Разработанный алгоритм решения плоских и объемных задач (при отсутствии боковых деформаций) обладает достаточной универсальностью и позволяет получать различные модификации решений, учитывающие реальные особенности технологических процессов, оснастки и оборудования. Появляется реальная возможность управления процессом безвибрационного формирования.

5. Разработана теоретическая модель процессов виброуплотнения и методика определения ее констант, основывающаяся на виброкомпрессионной зависимости, уравнении массопереноса, волновом уравнении или системы уравнений для определения амплитуды динамических давлений.

6. Установлены основные закономерности деформирования бетонных смесей при ударных, ударно-вибрационных и вибрационных воздействиях. Доказано, что динамические процессы в уплотненных бетонных смесях описываются системой уравнений Френкеля-Био. Обоснована возможность перехода к линейным уравнениям вязкоупругости однофазных сред, при этом константы последних могут быть выражены в форме параметров, учитывающие фазовые и структурные характеристики двухфазных сред, закон взаимодействия между ними.

7. Разработана методика определения механических характеристик бетонных смесей при одноосных деформациях и динамическом сдвиге при вибрационных и ударных воздействиях. Установлено, что бетонные смеси характеризуются анизотропными свойствами. Показано, что для счисления подавляющего большинства реальных процессов достаточно ограничиться уравнениями трансверсально изотропных вязкоупругих сред, включая граничное условие для сдвиговых деформаций.

8. На основе разработанной системы уравнений выполнено математическое формулирование и получено решение задач, связанных с исследованием взаимосвязанных колебаний упругой (деформируемой) системы с вязкоупругим слоем: бетонная смесь - поддон - формирующая установка, бетонная смесь - ячейка обшивки - формирующая установка и др. при вибрационных, ударных и ударно-вибрационных воздействиях. Установлено влияние амплитудного спектра возмущающей силы и собственных частот колебаний системы на напряженно-деформированное состояние слоя смеси при различных граничных условиях в т.ч. с учетом сил трения на вертикальных стенках.

Получены частотные уравнения для расчета собственных частот различных деформируемых конструкций, взаимодействующих с бетонной смесью, в т.ч. ортотропных плит.

9. На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований получена полуэмпирическая формула для определения величин бокового давления, являющаяся модификацией формулы действующих норм, учитывающая дополнительно трение на опалубке и геометрию поперечного сечения. Показано, что для преобладающего большинства бетонируемых конструкций за счет уточнения величин бокового давления возможно снизить материалоемкость опалубок в пределах до 20-30%.

10. Обоснована возможность интенсификации процессов формирования за счет обоснованного (в допустимых пределах) сближения вынужденных и собственных частот колебаний системы;

снижения металлоемкости форм в пределах 15-20% за счет выбора оптимальных значений частотных коэффициентов, зависящих от конструктивных характеристик поддонов (ячеек обшивки) и формирующей установки;

повышения долговечности форм за счет исключения возможностей их эксплуатации в резонансном режиме.

11. На основе опыта многолетней эксплуатации промышленных партий облегченных форм (по 30-90 шт.), рассчитанных в соответствии с разработанными рекомендациями, доказана их надежность и достаточная долговечность (5 лет при нормативной 3,5 года) и, соответственно, правильность основных расчетных положений. Различные типы облегченной самонесущей щитовой опалуб-

ки, объемных опалубок с навесными вибраторами были использованы при усилении железобетонных колонн и др. конструкций и показали высокую эффективность.

К материалам диссертации получено 3 авторских свидетельства на изобретение (NN 386876, 425077, 453303) и опубликовано более 60 работ, в том числе:

1. К определению вязкости бетонных смесей при вибрировании. //Изв. вузов. Стр-во и арх. - 1974, N 12 с. 82-87.
2. Имитационная модель уплотнения бетонной смеси. //Вибрационная техника. М., МДНТП, 1974, с. 141-148 (совместно с Майером В.Г.).
3. Выбор реологического уравнения при расчете колебаний столба бетонной смеси. //Вибрационная техника. М., МДНТП. - 1975. С. 45-53.
4. Об особенностях работы виброформирующих установок для изготовления объемных блоков. //Технология строительных процессов. НИИСП, - К., 1977. - вып. 7. - С.14-21 (совместно с Эпштейном В.Л.).
5. Вибропрессование бетонных обделок тоннелей. Сб.2 Строительное производство". - К.: Будівельник, вып. 17, 1978. - с. 46-51 (совместно с Тимко В.В.).
6. Особенности прессования бетонных стенок тоннелей. //Изв. вузов. Стр-во и арх./1978, - N 6. - с. 80-87.
7. Определение реологических свойств бетонных смесей при вибрационном сдвиге. //Строительные, дорожные и горные машины. - Киев.: Техника, 1979, - N 27. - с. 94-97.
8. Расчет динамических характеристик форм при ударных и ударно-вибрационных воздействиях. //Формы для производства сборного железобетона. М., МДНТП, 1980. - с. 104-111.
9. Рекомендации по расчету динамических параметров и технологических режимов работы ударно-вибрационных машин и оснастки. - К.: НИИСП, 1980. - с. 63 (совместно с Иваненко В.А., Македон Н.Л. и др.).
10. Расчет вибрационных устройств с учетом реологических свойств бетонных смесей. //Горные, строительные и дорожные машины. - К.: Техника, 1981. - N 31. - с. 86-92.
11. Выбор и оптимизация режимов формирования бетонных смесей при ударных и ударно-вибрационных воздействиях. //Стр. пр-во. - К.: Будівельник. - 1981, N 20. - с. 84-91.

12. О связи структурных и реологических характеристик бетонных смесей. //Исследование строительных конструкций. - Красноярск: Красноярский ПромстройНИИпроект, 1981, - с. 64-78. (совместно с Горенштейном И.В., Трухановой И.М.).

13. Технологические правила по ударной и ударно-вибрационной технологии формирования железобетонных изделий (РСН 326-82). Госстрой УССР (совместно с Иваненко В.А., Гусевым Б.В., Горенштейном И.В. и др.). - с. 30.

14. Особенности формирования изделий на ударных и ударно-вибрационных устройствах. //Новые технологические процессы при производстве сборного железобетона. - К.: НИИСП. - 1981, N 8. - с. 47-57. (совместно с Зубовым Ю.А., Малиновской Г.В.).

15. Колебания обшивки формы совместно со слоем бетонной смеси. //Изв. вузов. Стр-во и арх. - 1982, N 7. - с. 87-92. (совместно с Горенштейном И.В.).

16. Исследования колебаний системы бетонная смесь - форма - ударно-вибрационная машина. //Горные, строительные и дорожные машины. - Киев, - 1982, вып. 34. - с. 102-114.

17. Реологические свойства бетонных смесей в условиях плоской задачи. Реф. сб. ВНИИЭСМ, N 8, серия 3, 1984. - с. 6-8. (совместно с Зубовым Ю.А.).

18. Реологические свойства бетонных смесей при ударных и ударно-вибрационных воздействиях. //Изв. вузов. Стр-во и арх. - 1984, N 11. - с. 68-71. (совместно с Зубовым Ю.А.).

19. Колебания вязкоупругого слоя, взаимодействующего с упругой пластинкой. //Волновые движения жидкости: теория и эксперимент. Краснодар: КГУ. - 1984. - с. 139-145. (совместно с Зубовым Ю.А.).

20. Рекомендации по динамическому расчету стальных форм. НИИЖБ. - М., 1984. - с. 43 (совместно с Митником Г.С. и др.).

21. Исследования динамики виброоргана бетоноукладочных машин. //Перспективные технологии и научные методы орг. пр-ва мелиоративных работ. М.: ВНИИГим, 1983. - с. 170-176. (совместно с Прилуцким Б.С., Птушкиным Л.В.).

22. Формы с нормированными частотными характеристиками. //Формы для производства сборного железобетона. - М.: МДНТП, 1985, - с. 110-116. (совместно с Зубовым Ю.А.).

23. Методические рекомендации по усилению железобетонных конструкций на реконструируемых предприятиях. К.: НИИСП, 1984.

- с. 114. (совместно с Балицким В.С., Михеевой Л.Л., Клевцовым В.В. и др.).

24. Колебания слоя бетонной смеси с формой при вибрационных воздействиях. //Изв. вузов. стр-во и арх. - 1986, N 1, с. 65-69.

25. Исследования и оптимизация режимов колебаний системы формовочное устройство - форма - бетонная смесь. //Технология бетонов для условий Сибири. Омск: ОмПИ. - 1986. - с. 7-22. (совместно с Гусевым В.В.).

26. Технология усиления строительных конструкций на реконструируемых предприятиях (РСН 342-86) /Балицкий В.С. и др./ - с. 4-79.

27. Особенности реологических свойств бетонных смесей при ударных и ударно-вибрационных воздействиях. //Технологическая механика бетона. Рига: РПИ, 1987. - с. 98-103. (совместно с Гусевым В.В.).

28. Вынужденные и свободные колебания рабочего органа бетоноукладочной машины. //Сб. Строительное производство N 27. - Киев: Будівельник, 1988. - с. 37-44. (совместно с Гусевым В.В.).

29. Повышение эффективности использования формовочного оборудования и форм. Тезисы докладов X Всесоюзной конференции по бетону и железобетону. //Бетон и железобетон - ресурс- и энергосберегающие конструкции и технологии. Казань, 18-20 октября 1988 г. - М., 1989. - с. 189.

30. Особенности производства бетонных работ при усилении железобетонных конструкций на реконструируемых предприятиях. - Там же, с. 236-238.

31. Усиление железобетонных крановых эстакад. Промышленное стр-во и инженерные сооружения. - К.: 1989, N 4. - с. 24-26. (совместно с Михеевой Л.Л., Харченко А.В.).

32. Нагнетание бетонных смесей в цилиндрические обоймы. //Реконструкция промышленных и общественных зданий и сооружений. - К.: НИИСП, 1989. - с. 58-67 (совместно с Гусевым В.В.).

33. К решению задач механики невибрируемых бетонных смесей. //Реология бетонных смесей и ее технологические задачи. Тез. докл. VI Всесоюзного симпозиума. Рига, 5-7 декабря 1989. Рига: РПИ, 1989. - с. 70-73. (совместно с Гусевым В.В.).

34. Реконструкция промышленных предприятий. Справочник

строителя. т. 1. М.: Стройиздат, 1990. - с. 384-446. (совместно с Балицким В.С. и др.).

35. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений под нагрузкой в условиях реконструкции. К.: НИИСП, 1990. - с. 61. (совместно с Михеевой Л.Л., Гольшевым В.В., Клевцовым В.А. и др.).

36. Давление бетонной смеси на стенки опалубки. //Строительное производство. К., Будівельник, 1990, N 29. - с. 19-25. (совместно с Гусевым В.В.).

37. К построению аналитической модели процессов вакуумирования. //Изв. вузов. Арх. и стр.-во. - 1990, N 7. - с. 52-55. (совместно с Гусевым В.В.).

38. Реологические свойства бетонных смесей при колебательных движениях. //Исследование строительных и дорожных машин. Ярославль: ЯРПИ. - 1990. - с. 49-71. (совместно с Гусевым В.В.).

39. Расчет формы с трехточечным опиранием. //Формы для производства сборного железобетона. М.: МДНТП, 1991. - с. 122-126. (совместно с Митником Г.С.).

40. Реологические свойства невибрируемых бетонных смесей. //Строительное производство. К.: Будівельник, 1991. - N 30. - с. 28-33. (совместно с Волошкой М.Н.).

41. К выбору определяющей системы уравнений технологической механики бетонных смесей. М.: ПКТИпромстрой, 1992. - с. 49. (совместно с Гусевым В.В.).

42. УДК 666.97.033+539.215; 691.32+693.546.4. Технологическая механика бетонных смесей (совместно с Гусевым В.В.). Инженерная академия РФ. М.: 1992. - 442 с.: ил. - Библиогр.: 174. - Рус. - Деп. N 166-В93.

43. Файвусович А.С. Определение давлений бетонной смеси на опалубку. //Строительное производство. К.: Будівельник, 1992. - N 32. - с. 42-50.

Подписано в печать 13. 10. 93. Формат 60x84/16.  
Бумага тип. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100.  
Заказ 6850.  
Областная типография. 348040, Луганск. ул. Вату-  
тина, 89а.

1860

AB 28956

**AB 28.956**