

6
А48

Госстрой СССР
Научно-исследовательский институт бетона и железобетона
"НИИЖБ"

На правах рукописи

Инженер Л. В. Березницкий

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФОРМОВАНИЯ
БЕЗНАПОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО
ДИАМЕТРА В ФОРМАХ С НАВЕСНЫМИ ВИБРАТОРАМИ**

(Специальность № 487 – технология и механизация
строительного производства)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва – 1971



ГОССТРОЙ СССР

НАУЧНО - ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ БЕТОНА И ЖЕЛЕЗОБЕТОНА
"НИИЖБ"

На правах рукописи

Инженер Л.В.Березницкий

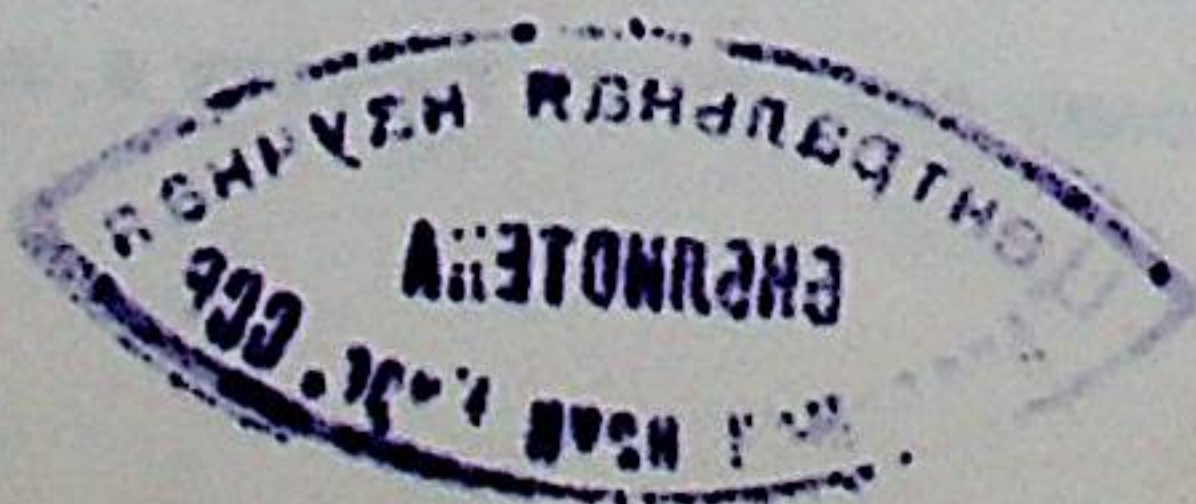
ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ТЕХНОЛОГИИ ФОРМОВАНИЯ БЕЗНАПОРНЫХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА В ФОРМАХ С
НАВЕСНЫМИ ВИБРАТОРАМИ

/Специальность № 487 - технология и механизация
строительного производства/

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва - 1971 г.



Работа выполнена в лаборатории технологии производства инженерных конструкций и труб ВНИИ Железобетона Министерства промышленности строительных материалов СССР и в лаборатории железобетонных труб НИИЖБ Госстроя СССР

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ — кандидат технических наук
А.Н. ПОПОВ

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Доктор технических наук, профессор

В.В. МИХАЙЛОВ

кандидат технических наук, доцент

В.Р. КРУПЕНЧЕНКО

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ — ЦКБ ИНДУСТРОЙПРОЕКТ Министерства промышленности строительных материалов СССР

Автореферат разослан " " _____ 1971г.

Ученый Совет направляет Вам для ознакомления данный автореферат и просит Ваши отзывы и замечания направить в адрес Ученого Совета "НИИЖБ" г. Москва, Ж - 389, 2-я Институтская ул., д. 6.

Дата защиты будет опубликована в газете "ВЕЧЕРНЯЯ МОСКВА".

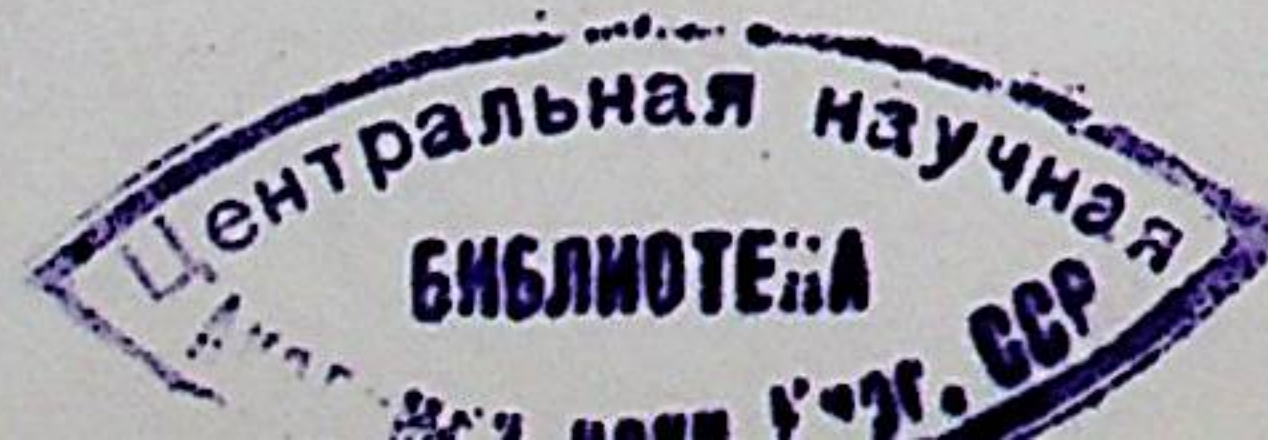
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЖБ

Ученый секретарь

Ученого Совета НИИЖБ

кандидат технических наук

Д.С. Кисилевич



В практике промышленного и гражданского строительства железобетонными трубами большого диаметра принято считать трубы внутренним диаметром более 1500 мм. Такие трубы используются для сооружения трубопроводов различного назначения при транспортировании вод, неагрессивных в отношении бетона.

При использовании в безнапорных трубопроводах большого диаметра железобетонные трубы не имеют конкуренции со стороны труб из других материалов, что обусловлено их относительно более низкой стоимостью, их долговечностью, меньшей, чем у стальных труб, теплопроводностью и электропроводностью и др. преимуществами. По данным ВНИИ Железобетона потребность народного хозяйства нашей страны в таких трубах возрастет с 420 тыс. м³ в 1967г. до 800 тыс. м³ в 1971г.

Уплотнение бетонной смеси при производстве труб большого диаметра осуществляется вибрированием с использованием виброформ или центрифугированием. В СССР применяется только вибрационный способ, оборудование для которого отличается меньшими стоимостью, весом и сложностью по сравнению с оборудованием для формирования труб центрифугированием. Основными элементами виброформ являются внутренняя и наружная обечайки поддон. Источником колебаний в таких формах служит один вибровозбудитель, встроенный во внутреннюю обечайку, или несколько несинхронизированных электромеханических или пневматических вибраторов, укрепляемых /навешиваемых/ на обечайках.

При использовании единичного вибратора одним из необходимых условий получения качественных труб является равенство амплитуд колебаний всех точек внутренней обечайки, которая, в связи с этим, должна колебаться как твердое целое. Для обеспечения последнего требования необходимо использовать обечайки большой жесткости, что приводит к значительному весу последних и необходимости применения мощных вибровозбудителей. Этих недостатков лишены формы с навесными вибраторами, в которых уплотнение смеси осуществляется при изгибных

колебаниях обечаек. Такие обечайки имеют меньшие вес и жесткость, чем обечайки со встроенными вибраторами, и более просты в изготовлении. Поэтому обечайки с единичным вибратором используются значительно реже, чем с навесными вибраторами, и только при изготовлении труб диаметром до 2 м. Формы с навесными вибраторами получили преимущественное распространение и за рубежом.

Отсутствие конкретных данных по расчету колебаний изгибаемых обечаек с бетонной смесью обусловили актуальность проведения настоящей работы. Содержанием ее является исследование закономерностей, которым подчиняются колебания обечаек с бетонной смесью, с целью усовершенствования оборудования и определения технологических приемов управления режимом уплотнения смеси для повышения качества изготавливаемых труб.

В первой главе диссертации приводятся данные о режимах уплотнения и однородности бетона труб и результаты исследования влияния технологических факторов на параметры колебаний обечаек.

Отличительной особенностью форм с навесными вибраторами является различие размаха колебаний отдельных участков их обечаек, вызванное изгибным характером колебаний последних. Чтобы оценить влияние, оказываемое этой неравномерностью колебаний на качество бетона, была определена прочность и степень уплотнения бетона I4 труб диаметром 2 и 2,5 м на заводах ЖБИ-23 Главмоспромстройматериалов и ЖБИ-5 Главстройиндустрии Узбекской ССР. Для исследований трубы изготавливались по технологии, принятой на упомянутых заводах. Определение прочности бетона проводилось ультразвуковым импульсным методом, а степени уплотнения бетона — радиоизотопным методом с применением широкого пучка гамма-лучей. В качестве источника последних был использован радиоактивный изотоп Co^{60} активностью в 8 милликюри. Детектором излучения служил газоразрядный счетчик типа МС-4, а регистрация интенсивности излучения осуществлялась

при помощи промышленной пересчетной установки типа Б-2.

Полученные данные позволили определить коэффициенты изменчивости прочности и степени уплотнения бетона труб, которые составляли, соответственно, 0,202–0,252 и 0,049–0,062 по отдельным поясам труб завода №23 и 0,224 и 0,056 для труб в целом. Коэффициенты изменчивости прочности по поясам труб завода ЖБИ-5 были равны 0,184–0,520 и 0,360 для этих труб в целом. Если изменчивость прочности и степени уплотнения бетона труб в целом может быть объяснена различием состава бетонной смеси отдельных замесов и различием условий твердения труб по их высоте, то значительная изменчивость прочности в каком-то одном горизонтальном сечении трубы, где укладывалась бетонная смесь только одного замеса и условия твердения были примерно равными, этими причинами объяснить нельзя. Это дало нам право принять, что одной из основных причин, обусловивших изменчивость характеристик бетона труб, является отмеченная выше неравномерность вибрирования участков обечаек, что подтверждается значительной изменчивостью степени уплотнения бетона.

Указанные опыты подтвердили актуальность проведения работ, направленных на совершенствование формовочного процесса и, в частности, на получение данных, необходимых для управления режимом вибрирования при изготовлении труб. Решение последней задачи целесообразно было начать с определения факторов, оказывающих влияние на колебания обечаек с бетонной смесью. В качестве основных факторов были рассмотрены конструктивные характеристики обечаек и эффект действия на обечайки бетонной смеси.

В диссертации описаны конструкции обечаек ряда промышленных форм, которые, помимо размеров, отличаются количеством ребер поперечной и продольной жесткости, величиной момента инерции продольного сечения, массой и наличием разъемов. В зависимости от габаритов и жесткости обечаек количество устанавливаемых на обечайке вибраторов ко-

леблется от 4 до 12. Для изучения вибрационных характеристик обечаек были определены эпюры их колебаний, которые свидетельствовали об изгибном характере колебаний обечаек в режиме биений и значительном отличии амплитуд колебаний отдельных участков обечаек одна от другой, что приводит к отмеченной выше неравномерности уплотнения бетонной смеси. Установлено, что при значительном расстоянии между поперечными ребрами обечаек колебания последних характерны появлением продольных изгибных колебаний. У обечаек, в которых эти ребра находятся на расстоянии менее 40-50 см одно от другого, эта форма колебаний отсутствует. Для оценки влияния массы и жесткости обечаек на параметры их колебаний были рассчитаны эффективные амплитуды³ и интенсивность колебаний четырех обечаек диаметров от 2,5 до 3,0 м с моментом инерции продольного сечения от 95 до 90500 см⁴, количеством укрепленных вибраторов от 4 до 20 и частотой их колебаний 48-100 гц.

Расчеты показали, что эффективность использования вибраторов и вибрационные характеристики обечаек улучшаются с понижением жесткости, веса обечаек и количества используемых вибраторов. Эффективные амплитуды колебаний обечаек оказались равными 0,12-0,36 мм, интенсивность их колебаний - 18 - 163 см²/сек³.

Проведенные эксперименты позволили установить, что конструктивные особенности обечаек /характер распределения ребер жесткости, величина момента инерции продольного сечения обечаек и их вес, количество укрепленных на обечайках вибраторов/ оказывают значительное влияние на параметры их колебаний. Вместе с тем выявилось,

³Под эффективной здесь понимается такая постоянная во времени амплитуда, при колебаниях о которой интенсивность воздействия виброэлемента на бетонную смесь будет равна интенсивности воздействия при переменном размахе колебаний виброэлемента.

что колебания обечаек, являющихся в сущности замкнутыми круговыми оболочками, носят изгибный характер.

Существенное влияние на параметры колебаний обечаек оказывает и реакция бетонной смеси, находящейся в форме. Это показали эксперименты, как проведенные В.Р. Крупенченко и Фу-Чжень-Юи, так и автором настоящей работы, в которых изучались колебания обечаек с бетонной смесью и без нее. Эксперименты свидетельствуют, что реакция бетонной смеси на колебания обечаек в большой мере зависит от состава смеси. С целью выявления на величину этой реакции таких технологических факторов, как толщина уплотняемого слоя смеси, наличие арматурного каркаса и жесткость обечайки, противоположной вибрируемой, были поставлены специальные опыты. Для их проведения была изготовлена прямоугольная форма кассетного типа, моделирующая взаимодействие обечайки с бетонной смесью. При этом были составлены и соблюдены в экспериментах критерии подобия, определяющие указанные взаимодействия. В процессе экспериментов толщина уплотняемого слоя варьировала в пределах 100-200 мм. Использовались два арматурных каркаса, сечения стержней которых и расстояния между ними соответствовали обычно применяемым в каркасах труб. Момент инерции сечения продольных стенок составлял 3,3 и 430 см⁴. В опытах использовались бетонные смеси с расходом цемента от 292 до 480 кг/м³, песка от 360 до 790 кг/м³, щебня от 1090 до 1460 кг/м³ и В/Ц от 0,30 до 0,60. Жесткость смесей составляла 30-100 сек. При изготовлении смесей применялись цемент завода "Тигант", песок Тучковского карьера и известняковый щебень Вяземского карьера.

Влияние изучаемых факторов на колебания стенки формы оценивалось статистически. Достоверным считалось влияние с надежностью более 0,95. Помимо расчетного определения достоверности влияния указанных факторов были построены соответствующие эпюры колебаний стенки формы.

Обработка данных 50 экспериментальных формовок показала, что влияние толщины уплотняемого слоя бетонной смеси в пределах 100-200 мм, арматурного каркаса и жесткости внутренней стенки на параметры колебаний наружной стенки формы и, следовательно, на реакцию бетонной смеси на колебания стенки не существенно. Этот вывод, подтверждаемый также незначительным отличием сравниваемых эпюр колебаний стенки формы, в дальнейшем был распространен и на колебания обечаек форм для труб в виду аналогичности процесса вибрирования смеси в формах для труб и в описанной экспериментальной форме. Таким образом оказалось, что при расчете параметров колебаний обечаек следует, кроме конструктивных характеристик самой обечайки, учитывать только реакцию бетонной смеси, зависящую от ее состава. Это привело к необходимости получения более глубоких представлений о механизме влияния бетонной смеси на колебания обечаек, что связывалось с изучением реологических свойств смеси.

Последние рассмотрены во второй главе диссертации, в которой предложена реологическая модель смеси и выведены уравнения колебаний обечаек с бетонной смесью.

В этой главе проанализированы результаты научно-исследовательских работ по изучению свойств бетонных смесей, выполненных В.В. Стольниковым, А.Е. Десовым, Н.В. Михайловым, Г.И. Горчаковым, автором настоящих исследований и др. Ими установлено, что до некоторого напряжения - предела текучести бетонная смесь может рассматриваться как упругая среда; при больших напряжениях - это упруго-вязкая среда с аномалией вязкости. Кроме того, в смесях со значительной концентрацией твердой фазы следует ожидать появления сухого трения. Силу аномального вязкого сопротивления бетонной смеси можно рассматривать как состоящую из демпфирующей силы с постоянным коэффициентом, равным вязкости смеси с практически неразрушенной структурой, и силы $k\dot{x}/\dot{x}$, где k - коэффициент линейного снижения вязкости с увеличением

скорости деформирования смеси $\dot{x}$. В диссертации определено уравнение отгибающей собственных колебаний системы, находящейся под действием упругой силы, силы аномального вязкого сопротивления и силы сухого трения, и показано, что при выводе уравнений колебаний обечаек с бетонной смесью нелинейные составляющие реакции смеси можно учесть как обобщенную силу сухого трения.

Далее в гл. II рассмотрены реологические модели, предложенные рядом исследователей для иллюстрации реологических свойств бетонных смесей, - ньютонова жидкость, тело Шведова-Бингама, тело Бургерса, тело Шофилда-Скотт-Блера. Показано, что эти модели могут быть использованы в случае, когда весь объем смеси испытывает однородное напряженное состояние. В противном случае применить их нельзя, поскольку в явном виде ими не отражается аномалия вязкости смесей. Кроме того, сен-венановый элемент в последних трех моделях исключается из работы при напряжениях, больших предела текучести σ_0 , что противоречит данным ряда экспериментов, которыми обнаружено наличие сухого трения для смесей определенного состава и при напряжениях, больших σ_0 . Показано, что поведение смесей, вибрируемых в нестационарном режиме, может быть описано реологической моделью, полученной последовательным соединением гукера упругого элемента и сен-венанова тела и параллельно соединенными телами Кельвина, Сен-венана и элементом, отражающим инерционные свойства смесей. Аномалия вязкости учитывается в этой модели сопротивлением движению поршня в коническом сосуде, инерционность - сопротивлением, оказываемом перемещению поршня в двух последовательно соединенных цилиндрических сосудах. При напряжениях, больших σ_0 , предложенная модель вырождается в модель с реологическим уравнением

$$q\ddot{x} + v\dot{x} + cx = P - F \operatorname{sign} \dot{x}, \quad /1/$$

где q - коэффициент инерционности смеси; v - вязкость смеси с практически неразрушенной структурой; c - коэффициент упругости

смеси; $x, \dot{x}, \ddot{x}$ - перемещение, скорость и ускорение движения смеси;
 F - обобщенная сила сухого трения; P - действующая сила.

Уравнение /1/ было использовано для описания реакции смеси на колебания обечаек при выводе уравнений этих колебаний. Обечайки рассчитывались как замкнутые тонкостенные цилиндрические оболочки со свободными краями. А.П.Филлипов, Лэмб, Бассет, Рэлей, рассматривавшие колебания таких оболочек, пришли к выводу о том, что их срединная поверхность не должна испытывать растяжения. Поэтому колебательные движения каждой точки такой оболочки по взаимно перпендикулярным направлениям u, v, w будут составляющими следующих основных состояний оболочки:

- продольных и поперечных изгибных колебаний, характерных образованием волн колебаний на поверхности оболочки;
- колебаний оболочки как твердого целого.

Анализ уравнений собственных частот изгибных колебаний цилиндрических оболочек, полученных В.Флюгге, А.П.Филлиповым, О.Д.Ониашвили и др., показал, что при частоте вынужденных колебаний 50-100 Гц существенными будут колебания с отсутствием продольных волн, т.е. колебания оболочки при таких частотах будут аналогичны плоским изгибным колебаниям кругового кольца. При этом, в соответствии с данными А.И.Меньшова и В.С.Гонткевича, обечайки, подкрепленные поперечными ребрами, могут быть заменены эквивалентными им по жесткости гладкими конструктивно ортотропными оболочками^{*}.

При расчете колебаний обечаек как плоских круговых колец радиальные u и касательные v перемещения точек обечайки можно представить уравнениями

$$u = \sum_{i=1}^n a_i \cos i\theta + b_i \sin i\theta; \quad v = \sum_{i=1}^n a_i \frac{\sin i\theta}{i} - b_i \frac{\cos i\theta}{i}, \quad /2/$$

^{*}Колебания обечаек со значительно отстоящими друг от друга ребрами оказываются подобными колебаниям оболочек с закрепленными краями. Такие оболочки не могут быть рекомендованы для использования при формировании труб и в дальнейшем не рассматривались.

где a_i, b_i - функции времени; θ - угол, определяющий положение точки на осевой линии кольца-обечайки.

Выражения для a_i и b_i были найдены с помощью уравнений Лагранжа. Потенциальная энергия колебаний определялась как сумма потенциальной энергии изгиба обечаек и энергии действия упругих составляющих реакции бетонной смеси; кинетическая энергия - как сумма кинетической энергии движений точек обечайки и энергии действия инерционных составляющих реакции смеси. Обобщенная сила получена суммированием возмущающей силы и силы вязкого сопротивления реакции смеси. Обобщенное сухое трение при расчетах заменялось эквивалентным ему по расходу энергии вязким сопротивлением.

После составления и решения исходных дифференциальных уравнений было найдено, что a_i и b_i определяются выражениями:

$$a_i = A_i \sin(\omega t - \varphi_i) = \frac{-m + \sqrt{m^2 + (M - \Delta^2)K}}{K} \sin(\omega t - \varphi_i); \quad /3/$$

$$b_i = B_i \cos(\omega t - \varphi_i) = \frac{-m + \sqrt{m^2 + (M - \Delta^2)K}}{K} \cos(\omega t - \varphi_i); \quad /4/$$

$$\text{где } \Delta = 4\alpha/N + c; \quad \alpha = \frac{F\ell}{N + c}; \quad N = \frac{FE}{R^4} \frac{1 - i^2/2}{1 + \frac{i^2/2}{1 - i^2/2}};$$

$$m = 4\omega b\Delta; \quad M = \frac{P_0^2}{R^2(1 + \frac{i^2/2}{1 - i^2/2})}; \quad K = \rho_i^2 + \omega^2 b^2;$$

$$P_i = N + c - \frac{\omega^2/4\ell + S\gamma}{g}; \quad \varphi_i = \arctg \frac{1}{b\omega} + \frac{\Delta}{K A_i} / \frac{1}{P_i}; \quad /5/$$

$$\varphi_{i2} = \arctg \frac{1}{b\omega} + \frac{\Delta}{K B_i} /;$$

ω - частота вынужденных колебаний, Гц; c - упругая составляющая реакции смеси; b - вязкая составляющая; g - инерционная составляющая; F - обобщенная сила сухого трения; P_0 - амплитудное значение возмущающей силы; R - радиус срединного сечения оболочки; E - модуль упругости материала обечайки; S - площадь продольного сечения обечайки; J - момент инерции этого сечения; γ - удельный вес материала обечайки.

Уравнения /2/ - /4/ связывают колебания обечаек с их конструктивными параметрами и реологическими характеристиками смеси, определяемыми составом последних. Чтобы воспользоваться полученными уравнениями необходимо было не только количественно определить

составляющие реакции смеси, но и выявить их связь с составом смесей.

Исследования, направленные на установление закономерностей влияния состава бетонных смесей на их реологические характеристики, описаны в третьей главе диссертации.

Прежде всего были установлены параметры состава смесей, изменение которых приводит к изменению реологических характеристик последних. С этой целью были проанализированы данные о влиянии состава дисперсных сред на их вязкость, а также результаты исследований влияния состава бетонных смесей на их жесткость, т.к. величина последней обусловлена реологическими характеристиками смеси.

Были рассмотрены зависимости, полученные А.Покетинно, В.И.Вандом, Е.Ф.Кургаевым, В.В.Михайловым, М.П.Воляровичем и др., и в результате показано, что скорость течения и расход дисперсных сред являются функцией вязкости их жидкой фазы ν , размеров δ и площади поверхности каналов F , образованных частицами твердой фазы. В общем виде это может быть записано как

$$\nu = f / \nu, \delta, F / \quad /6/$$

Для бетонной смеси в соответствии с уравнением /6/ можно ожидать, что ее жесткость также должна зависеть от вязкости жидкой фазы смеси, от расстояния между частицами ее твердой фазы и их поверхности. К подобным выводам привело и рассмотрение данных экспериментальных исследований влияния состава смесей на их жесткость, полученных Д.Я.Штаерманом, Б.Г.Скрамтаевым, А.Е.Десовым, Н.С.Завриевым и др. В результате было найдено, что влияние состава может быть сведено к влиянию трех факторов - водоцементного отношения, количества цементного теста и количества раствора в смеси. К подобным выводам пришли в своих работах и Н.С.Завриев, М.З.Симонов, С.С.Гордон.

Содержание цементного теста и раствора в смеси может быть выражено с помощью известных уравнений для коэффициентов избытка це-

ментного теста и раствора в смеси $K'_{цт}$ и $K'_р$:

$$K'_{цт} = \frac{V_{цт}}{V_{пн}} ; \quad K'_р = \frac{P}{V_{пн}} ; \quad /7/$$

или предложенными автором уравнениями

$$K_{цт} = 100 \frac{V_{цт} - V_{пн}}{\Pi / \gamma_{об.п}} ; \quad K_p = 100 \frac{P - V_{пн}}{\Pi / \gamma_{об.п}} ; \quad /8/$$

в которых $K_{цт}$ - коэффициент относительного избытка цементного теста; K_p - коэффициент относительного избытка раствора; $V_{пн}$ - измеренные объемы пустот в песке и крупном заполнителе, л/м³; $V_{цт}$ и P - объемные содержания цементного теста и раствора в смеси, л/м³; Π, Π - содержание песка и крупного заполнителя, кг/м³.

Таким образом, выделенными независимыми параметрами, характеризующими влияние состава на жесткость и реологические характеристики бетонных смесей, являлись параметры $K'_{цт}$ и $K'_р$ или $K_{цт}, K_p$ и V/Π . Чтобы установить с помощью каких коэффициентов избытка - $K_{цт}$ и K_p или $K'_{цт}$ и $K'_р$ полнее отражается влияние состава на жесткость смесей, были вычислены и сопоставлены величины корреляционных отношений связи жесткости с этими коэффициентами избытка. Затем были получены частные и на их основе общая зависимость жесткости от состава смесей, и с помощью этого выражения определены для ряда смесей расчетные величины жесткости, сравнение которых с фактическими величинами жесткости этих смесей должно было показать исчерпывается ли найденными выражениями связь жесткости с составом смесей или нет.

В использованных смесях /примерно 300 составов/ V/Π колебалось от 0,30 до 0,75, расход цемента - от 240 до 800 кг/м³, песка - от 230 до 710 кг/м³, щебня - от 860 до 1460 кг/м³. Для изготовления основной серии замесов использовались песок Тучковского карьера, Воскресенский портландцемент, гранитный щебень Татаровского и Ленинградского карьеров, известняковый щебень Вяземского и Пятковского карьеров. Модуль крупности использованных песков составлял 1,0-3,46, их объемный вес 1,37-1,58 т/м³, максимальная крупность щебня была 10 и 20 мм, его объ-

емный вес - $1,44 + 1,58 \text{ т/м}^3$. Применение заполнителей различных карьеров было обусловлено желанием проверить общность полученных зависимостей. С этой же целью ряд смесей был приготовлен на БТЦ завода "Тигант" и на однофракционных песках, полученных рассевом по фракциям 0,15-0,30 мм, 0,30-0,60 и 0,60-5 мм песка Тучковского карьера.

Для обработки экспериментальных данных был использован усовершенствованный автором метод множественной нелинейной корреляции Брандона.

Обработка показала, что величина связи жесткости смесей с K_p больше, чем жесткости с K'_p . Это означало, что жесткость смесей зависит от относительного избытка их жидкой фазы, вызвавшего раздвижку зерен твердой фазы, и дало право принять для выражения содержания цементного теста и раствора в смеси формулы /8/.

В логарифмических координатах экспериментальные линии регрессии жесткости смесей по В/Ц, $K_{цт}$ и K_p оказались близки к прямым, что позволило описать эти регрессии степенными уравнениями. Общая статистическая зависимость жесткости от состава бетонных смесей получена в виде:

$$K = K_0 \cdot \text{В/Ц}^{-2,77} \cdot K_{цт}^{0,494} \cdot K_p^{-0,452} \quad /9/$$

где K_0 - коэффициент, величина которого зависит от характеристик составляющих смеси /н.г. цементного теста, характеристика поверхности заполнителей и др./.. В каждом конкретном случае K можно рассчитать по формуле /9/, предварительно определив жесткость смеси известного состава.

Сравнение фактических величин жесткости смесей, полученных автором а также приведенных в работах С.С.Гордона, А.И.Конопленко и др., с рассчитанными по формуле /9/ величинами жесткости показало незначительное отличие расчетных данных от фактических. Это свидетельствует о том, что В/Ц, $K_{цт}$ и K_p действительно являются параметрами, характеризующими влияние состава смесей на их свойства.

Для разработки методики количественного определения реологических характеристик были рассмотрены особенности приборов и методов, используемых для изучения реологических свойств дисперсных сред. Выяснилось, что при исследовании грубодисперсных сред типа бетонной смеси, обрабатываемых в нестационарных режимах, целесообразно изучать свойства сред по характеру вынужденных и собственных колебаний рабочего органа, взаимодействующего со средой. Подобный метод и был использован в описываемых ниже экспериментах.

Для проведения исследований была изготовлена экспериментальная форма, конструктивно моделирующая промышленные формы для изготовления труб. Диаметр ее наружной обечайки был равен 1660 мм, внутренней - 1420 мм. Высота обечаек составляла 600 мм. Между поддоном и обечайками находился слой листовой резины в 10 мм. На наружной обечайке был закреплен вибратор С-414. Для записи колебаний использовался комплекс приборов КООИ с датчиками типа ИООИВ и ИООИГ, регулятором увеличения РООЗ и интегрирующими гальванометрами МООЗ. Запись показаний датчиков производилась на ленте осциллографа Н-700. Для определения эмпор вынужденных колебаний обечайки использовался также виброграф ВР-1.

Реакция поддона на колебания обечаек учитывалась как состоящая из упругих, демпфирующих сил и сухого трения. Нахождение этих сил и составляющих реакции смеси осуществлялось решением систем уравнений, связывающих неизвестные с определяемыми экспериментально параметрами собственных и вынужденных колебаний обечаек /период, частота, параметры экспоненциальной и линейной составляющих отгибающих собственных колебаний, амплитуды вынужденных колебаний/. Решение уравнений проводилось на ЦВМ "Наир".

С целью определения влияния состава, возраста и высоты столба бетонной смеси на ее характеристики собственные и вынужденные колебания обечаек записывались при различной степени загрузки формы смесью, в различные периоды времени. Состав смесей в экспериментах менялся таким образом, чтобы была охвачена вся область обычно используемых

расходов цемента, заполнителей и воды и, соответственно, вся используемая область значений V/C , $K_{цт}$ и K_p . При этом часть смесей имела содержание раствора меньшее, чем было необходимо для полного заполнения пустот в крупном заполнителе. Жесткость используемых смесей составляла 35-300 сек. Для изготовления смесей были применены гранитный щебень Ленинградского карьера, песок Тучковского карьера и портландцемент завода "Тигант".

В результате обработки экспериментальных данных были получены стохастические аналитические и графические выражения зависимостей характеристик бетонных смесей от их состава, возраста и от высоты столба смеси в форме.

Найденные значения коэффициента вязкого сопротивления η колебались от $1,58 \cdot 10^3$ до $13,32 \cdot 10^3$ г/см²сек. Подтвердилось, что вязкость смесей падает с увеличением содержания жидкой фазы в бетонной смеси. Отмечено также падение вязкости в смесях, в которых содержание раствора недостаточно для полного заполнения пустот между зернами крупного заполнителя. В общем виде полученная зависимость от состава смеси может быть с достаточной надежностью описана уравнением

$$\eta = V / 4,26 - \sqrt{V/C} / 2,55 + V/C / 0,079 + 1000 K_{цт}^{2,145} / x + 0,59 + K_p^{1,25} / 10$$

Значение коэффициента V для использованных смесей оказалось равным $12,4 \cdot 10^3$ г/см²сек. Результаты экспериментов свидетельствуют также о нарастании вязкости смесей со временем; темп роста тем выше, чем меньше V/C .

Величина коэффициента упругости рассмотренных смесей составляла 0,37-1,76 кг/см³. По результатам экспериментов статистическая зависимость C от состава смесей имеет вид:

$$C = \sqrt{325} + \sqrt{V/C} / 4,96 + 0,03 + K_{цт}^{1,07} / 0,01 + K_p^2 / 11$$

где $\sqrt{\quad}$ - коэффициент, значение которого получено равным 3,7 кг/см³.

Величина C снижается при повышении V/C , $K_{цт}$ и K_p , но для V/C , больших 0,46, $K_{цт}$ - 120 и K_p - 20 это снижение незначительно. При переходе к смесям с содержанием раствора, недостаточным для заполнения пустот между зернами крупного заполнителя, от смесей с избыточным его содержанием величина C уменьшается.

Изменение C со временем носит сложный характер. На фоне общего увеличения величины C отмечается ее падение для смесей в возрасте 1,5 часов с последующим повышением. Темп развития упругих свойств смесей зависит от V/C , увеличиваясь с уменьшением последнего.

Величина коэффициента q инерционности использованных смесей колебалась от 0,047 до 0,16 кг/см², увеличиваясь при снижении количества жидкой фазы в смеси, т.е. при уменьшении V/C , $K_{цт}$ и K_p . Однако, в случае, когда количества жидкой фазы не достаточно для заполнения пустот между частицами твердой фазы, величина q падает. По полученным данным зависимость q от состава смесей аппроксимируется выражением:

$$q = M / 16,2 + \sqrt{V/C} / 2,47 + 0,01 - 0,036 K_{цт} + 0,036 K_p^{1,45} / 12$$

где M - коэффициент, значение которого оказалось равным 0,07 кг/см². Характер изменения q со временем зависит от V/C . С уменьшением V/C нарастание инерционности, особенно в первый час, увеличивается.

Величина обобщенного коэффициента F сухого трения, с помощью которого учитывались нелинейная демпфирующая составляющая и сухое трение в реакции бетонной смеси, составляла для рассмотренных смесей - 1,72 / + 1,10 г/см². Значение F , равное 0, делит бетонные смеси на 2 области. При F , больших 0, смеси можно рассматривать как упруго-вязкие с сухим трением и постоянной вязкостью; остальные смеси - как упруго-вязкие с аномалией вязкости и без сухого трения. Полученные по экспериментальным данным зависимости влияния V/C , $K_{цт}$ и K_p на величину F с достаточной надежностью могут быть описаны степенными уравнениями второго и третьего порядков. Кривые,

описывающие эти зависимости, проходят, в основном, в области отрицательных значений F . Они обладают экстремумами при V/C , равном 0,38, $K_{цт} - 120$, $K_p - 15$. Влево и вправо от экстремумов кривые приближаются к линиям абсцисс и при $K_{цт}$, равном 55, и K_p , близким к 0, пересекают эти линии, выходя в область положительных F . Последние значения являются, таким образом, пограничными величинами $K_{цт}$ и K_p , делящими бетонные смеси на 2 отмеченные выше области. Характерно, что при V/C , $K_{цт}$ и K_p , меньших, соответственно, 0,38, 55 и 15 начинается и относительно более резкое повышение жесткости смесей. В общем виде влияние состава смесей на величину F может быть описано уравнением:

$$F = -D / (V/C)^3 - 1,47 / (V/C)^2 + 0,068 V/C - 0,097 / K_{цт}^2 - 262 K_{цт} + 10290 / K_p^2 - 70,2 K_p - 1150 / I_3$$

в котором D - коэффициент, значение которого в данных экспериментах получено равным $-1,02 \cdot 10^{-6} \text{ кг/см}^2$.

Существование двух различных областей цементных сред экспериментально обнаружено рядом исследователей и, в частности, Г.И. Горчаковым и Т. Пауэрсом. В диссертации показано соответствие полученных зависимостей современным представлениям о строении дисперсных сред.

В таблице I приведены фактические и расчетные амплитуды колебаний обечайки экспериментальной формы в точках, расположенных у вибратора $\theta = 0$ и в точках с радианными углами, равными $\frac{\pi}{2}$ и π . При расчетах были использованы уравнения /2/ - /5/ и /10/ - /13/. Данные таблицы показывают хорошую сходимость расчетных и фактических амплитуд, что свидетельствует о возможности использования указанных уравнений при расчетах колебаний обечайки.

Изучение зависимости реологических характеристик бетонной смеси от высоты столба смеси в форме показало, что с достоверностью 0,95 коэффициент вязкости смеси, заполняющей форму на $1/2$ ее высоты, составляет $0,0 + 1,64$, коэффициент упругости смеси - $0,18 + 1,22$, коэффициент инерционности смеси - $0,25 + 1,09$, коэффициент обобщенного сухого трения - $0,25 + 2,03$ от соответствующих величин реоло-

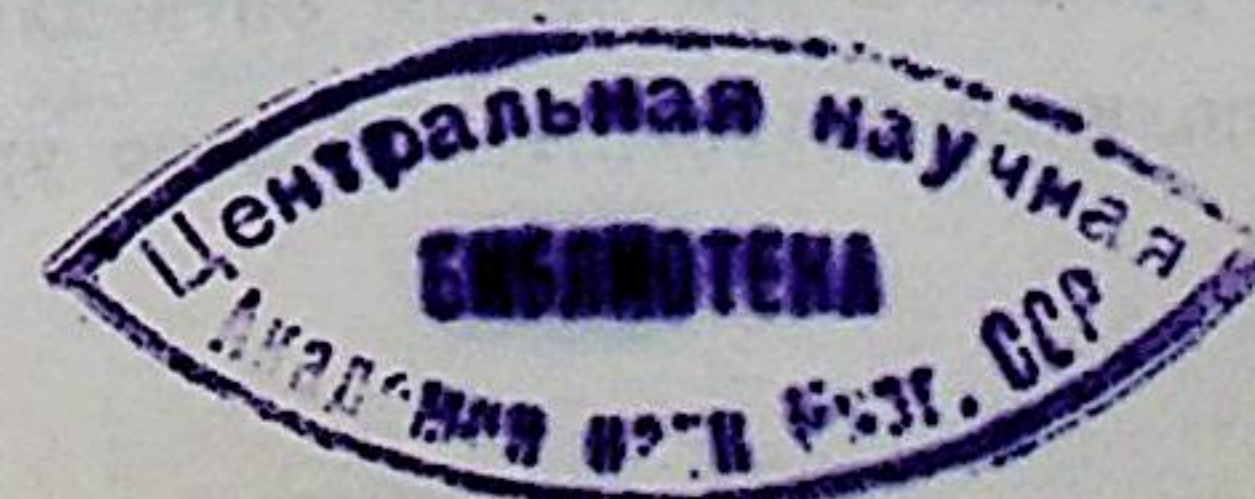
гических характеристик смеси, полностью заполняющей форму. Это дало право в первом приближении предположить отсутствие существенного влияния высоты столба смеси на ее реологические характеристики, т.е. линейное возрастание реакции смеси на колебания обечайки с увеличением высоты заполнения формы бетонной смесью.

Таблица I

Параметры состава смеси			Коэффициенты реакции смеси				Амплитуды, мм, расчетные фактические		
V/C	$K_{цт}$	K_p	$\frac{B}{10^{-3} \Gamma}$ $\frac{10^{-3} \Gamma}{\text{см}^2 \text{сек}}$	$\frac{q}{\Gamma}$ $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	$\frac{F}{\Gamma}$ $\frac{\Gamma}{\text{см}^2}$	$\frac{c}{\Gamma}$ $\frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$	$\theta = 0$	$\theta = \frac{\pi}{2}$	$\theta = \pi$
0,47	165	9,3	7,90	0,074	-0,95	0,92	$\frac{0,57}{0,57}$	$\frac{0,066}{0,060}$	$\frac{0,11}{0,12}$
0,30	170	18,1	4,86	0,170	-1,22	1,08	$\frac{0,50}{0,54}$	$\frac{0,06}{0,04}$	$\frac{0,04}{0,10}$
0,63	114	18,1	7,14	0,155	-0,01	1,29	$\frac{0,35}{0,32}$	$\frac{0,08}{0,03}$	$\frac{0,14}{0,20}$
0,60	197	17,3	1,76	0,049	0,50	0,44	$\frac{1,10}{1,30}$	$\frac{0,34}{0,32}$	$\frac{0,36}{0,32}$
0,46	153	-0,3	5,00	0,049	-0,18	0,68	$\frac{1,10}{1,10}$	$\frac{0,14}{0,14}$	$\frac{0,23}{0,25}$

Для проверки этой гипотезы были определены амплитуды колебаний двух промышленных форм диаметром 2,5 и 3,0 м, имеющих различную жесткость и вибрирующих с частотой 2800 и 5000 $\frac{\text{кол}}{\text{мин}}$. Расчет колебаний производился по формулам /2/ и /5/, коэффициенты реакции бетонной смеси определялись по уравнениям /10/ - /13/, предполагалось линейное возрастание реакции смеси с увеличением площади соприкосновения смеси с обечайкой. Полученное в результате хорошее приближение расчетных к фактическим эпюрам колебаниям подтвердило возможность использования исходных уравнений при расчете колебаний обечайки и правильности сделанного предположения о линейном возрастании реакции смеси.

Проведенные исследования позволили в четвертой главе диссертации изложить ряд рекомендаций по вопросам технологии изготовления труб.



Для облегчения использования зависимостей /9/ - /13/ при подборах состава бетонных смесей были разработаны номограммы, которые позволяют:

- определить жесткость и коэффициенты вязкости, упругости, инерционности и обобщенное сухое трение бетонной смеси конкретного состава при известных их значениях для смеси другого состава на тех же заполнителях и цементе;

- проследить изменение жесткости и реологических характеристик смесей при изменении их состава;

- изменить в определенных пределах коэффициенты вязкости, упругости, инерционности, трения смесей при сохранении их жесткости неизменной и решить другие задачи, требующие знания связи жесткости и реологических характеристик с составом смесей.

Площадь и величина момента инерции продольного сечения обечаек должны определяться из условия обеспечения необходимой устойчивости обечаек, ограничения деформаций обечаек в процессе формования труб и при транспортировке форм. Ориентировочно, исходя из имеющегося опыта эксплуатации обечаек диаметром 2,0 - 3,5 м, величину момента инерции продольного их сечения предложено принимать равной $200 - 400 \text{ см}^4$. При этом расстояние между ребрами поперечной жесткости обечаек должно быть не более 40-50 см. Ограничение деформаций обечаек возможно и при отсутствии у них ребер поперечной жесткости /1/. Промышленная форма с такими обечайками спроектирована Гипростроммашем и изготовлена Главсредазирсовхозстроем, проведено ее испытание в промышленных условиях. Формы подобной конструкции намечено использовать и при изготовлении труб диаметром 3,5 м для III Бакинского водовода.

При определении конструкции обечаек целесообразно рассчитать параметры колебаний обечаек для каждого из имеющихся вариантов конструкции и при выборе оптимального производить сравнительный анализ полученных эпюр. Расчеты по уравнениям /2/ - /5/ облегчаются при

использовании приведенного в диссертации примера табличного расчета параметров колебаний обечаек.

Количество укрепляемых на обечайках вибраторов рекомендовано определять в зависимости от величины амплитуд и характера эпюры колебаний, вызываемых каждым вибратором. Если максимальная амплитуда колебаний обечайки при работе одного вибратора достаточна для уплотнения бетонной смеси заданного состава, все вибраторы крепятся в одном горизонтальном поясе обечайки, на 5 - 10 см ниже половины ее высоты. В противном случае на одной образующей по высоте устанавливают 2 вибратора, учитывая, что при этом максимальный размах колебаний удваивается, или же подбирается вибратор, обладающий при той же частоте колебаний большей возмущающей силой.

Расстановку вибраторов по периметру обечаек рекомендовано производить в следующем порядке:

- определить эпюру колебаний обечайки от одного вибратора;
- образующие для установки второго и последующих вибраторов /второй и последующей пары вибраторов/ выбрать таким образом, чтобы наложение эпюр колебаний работающих вибраторов дало максимально выровненную общую эпюру колебаний обечайки во времени.

В случае, когда вибраторы размещаются на обеих обечайках формы, расстояние между вибраторами, определенное указанным выше образом, можно удвоить. При этом в плане вибраторы одной обечайки необходимо размещать между вибраторами другой, что позволяет оказать необходимое уплотняющее воздействие на бетонную смесь, расположенную в зоне, где амплитуды колебаний одной из обечаек ослаблены. Вибраторы следует укреплять таким образом, чтобы оси их были параллельны образующим обечаек.

Проверка эффективности сделанных предложений была проведена на Московском заводе железобетонных труб /МЗЖБТ/ при формовании цилиндров железобетонных колодцев и на заводах ЖБИ-23 Главмоспромст-

ройматериалов, комбинате ЖБИ в г. Янгйере и ЖБИ-5 в г. Алмалык при формировании железобетонных труб большого диаметра. На последнем заводе в формах диаметром 2,5 м для снижения жесткости обечаек был прорезан паз в ребрах их поперечной жесткости, вибраторы были поставлены на консоли и была изменена конструкция узла их крепления. Схема расстановки вибраторов определялась указанным выше образом. Это позволило, в частности, увеличить минимальные и максимальные амплитуды колебаний наружной обечайки с 0,05 и 0,24 мм до 0,10 и 0,84 мм при уменьшении количества вибраторов с 20 до 8. В среднем амплитуды колебаний точек обечаек были равны 0,35 мм, отклоняясь в отдельных точках на $\pm 0,05$ мм, т.е. были достаточно близки. По результатам работ на МЗБТ были разработаны и переданы заводу "Рекомендации по расстановке навесных вибраторов на формах и технологии формирования цилиндров железобетонных колодцев". На основе сделанных предложений составлены технические задания на проектирование форм для изготовления труб диаметром 3,0 м для Главсредазирсовхозстроя и диаметром 3,5 м для Главводопроводстроя АзССР, Гипростроммашем выпущены чертежи форм по этим заданиям.

ВЫВОДЫ

1. Улучшение качества железобетонных труб большого диаметра, изготавливаемых в формах с навесными вибраторами затрудняет отсутствие данных по расчету колебаний обечаек с бетонной смесью, требуемых для рационального проектирования форм. Задачей диссертации является исследование зависимостей, определяющих эти колебания.

2. Плотность, прочность и однородность бетона труб, изготавливаемых в указанных формах в значительной мере обусловлены режимом виброформования, оцениваемым степенью равномерности и интенсивностью колебаний обечаек форм. Увеличение количества вибраторов на обечайках не приводит к пропорциональному росту интенсивности и равномерности колебаний последних.

3. Параметры колебаний обечайки зависят от величины возмущающей силы и частоты колебаний обечайки, от размеров последней, от реологических характеристик бетонной смеси и степени заполнения формы смесью. Изменение толщины уплотняемого слоя смеси в пределах 10-20 см, наличие арматурного каркаса и жесткость одной из обечаек формы не оказывают существенного влияния на параметры колебаний другой обечайки формы.

4. Колебания обечаек форм, используемых для изготовления труб больших диаметров, могут рассматриваться как плоские изгибные колебания кругового кольца. При этом обечайки, подкрепленные ребрами, заменяются эквивалентными им по жесткости гладкими, конструктивно ортотропными оболочками.

5. Бетонные смеси обладают упругостью, аномальной вязкостью, инерционностью и сухим трением. Эти свойства смесей отражаются реологической моделью, состоящей из последовательно соединенных гукера элемента и сен-венанова тела с параллельно соединенными телами Кельвина, Сен-Венана с элементом, отражающим инерционные свойства среды. Нелинейные составляющие реакции смеси при расчетах могут быть учтены введением обобщенного сухого трения.

6. В работе получены уравнения собственных и вынужденных колебаний обечаек с бетонной смесью, описываемой указанной моделью, связывающие параметры колебаний обечаек с реологическими характеристиками смеси. На основе этих уравнений экспериментально определены стохастические зависимости жесткости и реологических характеристик бетонных смесей от их состава и возраста.

7. Влияние состава смесей на их жесткость и реологические характеристики определяется зависимостью последних от $B/C, K_{\text{пл}}, K_p$.

Жесткость, вязкость, инерционность смесей снижаются с увеличением содержания жидкой фазы в смеси, а также в смесях, в которых жидкой фазы недостаточно для полного заполнения межзерновых пустот в твердой фазе.

8. Бетонные смеси с $K_{дт}$, меньшими 55, и K_p , меньшими 0-2, могут рассматриваться как вязко-упругие с постоянной вязкостью, равной вязкости смеси с неразрушенной структурой, и сухим трением; остальные смеси как упруго-вязкие с аномальной вязкостью. Величина коэффициентов вязкости, упругости, инерционности, обобщенного сухого трения в бетонных смесях растет со временем и существенно не зависит от высоты столба смеси в форме.

При подборе состава бетона для труб могут быть использованы составленные в работе номограммы.

9. При проектировании обечаек необходимо стремиться к снижению их жесткости. Момент инерции продольного сечения обечаек диаметром 2,0-3,5 м должен быть равен, соответственно, 200-400 см², расстояние между поперечными ребрами не должно превышать 50 см.

10. Количество и места крепления на обечайках навесных вибраторов должны определяться величиной амплитуд и характером эпюры колебаний обечайки, вызываемых одним вибратором.

В работе разработана схема расстановки вибраторов на обечайках формы.

11. Проверка эффективности данных в диссертации рекомендаций проведена на заводе железобетонных труб и ЖБИ-23 Главмоспромстройматериалов, ЖБИ-5 в г. Алма-Ата и комбинате ЖБИ в г. Янгиев при формировании труб диаметром 2 + 3 м. Их использование позволяет обоснованно проектировать оборудование для формирования труб и определяет возможность планового регулирования режима уплотнения бетонной смеси при формировании.

12. На основе сделанных предложений разработаны "Рекомендации по расстановке навесных вибраторов на формах и технологии формирования цилиндров железобетонных колодцев" для МЗЖБТ и технические задания на проектирование форм, по которым Гипростроммашем выпущены чертежи форм для Главсредазирсовхозстроя и Главводопроводстроя АзССР. Голов-

ной образец формы диаметром 3,0 м Главсредазирсовхозстроя изготовлен и прошел производственные испытания.

Основные положения диссертационной работы были доложены на секции технологии и усовершенствования железобетонных конструкций Ученого Совета ВНИИЖелезобетона; на II, III и IV научно-технических конференциях молодых научно-технических работников ВНИИЖелезобетона в 1964, 1966, 1968 г., на Всесоюзном совещании по технологии производства железобетонных напорных труб в Минске в 1964 г., на семинаре "Рациональные методы формирования железобетонных конструкций" в Московском доме научно-технической пропаганды им. Ф. Э. Дзержинского в январе 1969 г. и на научной сессии НИИЖБ по теории формирования бетона в 1970 г. и опубликованы в следующих работах:

1. Рабинович Д. Л., Березницкий Л. В. Авторское свидетельство на изобретение "Форма для изготовления полых изделий типа труб" по заявке № II03635/29-14.

2. Березницкий Л. В., Рабинович Д. Л. Авторское свидетельство на изобретение "Способ формирования трубчатых железобетонных конструкций" по заявке № II03636/29-33.

3. Рабинович Д. Л., Березницкий Л. В., Сигалов В. С. "Оборудование для формирования железобетонных труб большого диаметра", Оргэнергострой, М., 1965 г.

4. Березницкий Л. В. Некоторые вопросы формирования железобетонных труб диаметром более 1,5 м и длиной до 5 м в вертикальных формах с навесными вибраторами. Сб. трудов ВНИИЖелезобетона, вып. 12, Стройиздат, 1966 г.

5. Березницкий Л. В. Расчетно-экспериментальный метод определения жесткости бетонной смеси. Материалы III научно-технической конференции молодых научных работников, ВНИИЖелезобетон, М., 1966 г.

6. Березницкий Л. В. Исследование влияния состава бетона на жесткость бетонной смеси. Исследования по технологии сборного железобетона, Стройиздат, М., 1968 г.

7. Рабинович Д. Л., Белоцерковский М. С., Березницкий Л. В. Усовершенствование технологии производства железобетонных колодцев. Сб. трудов ВНИИЖелезобетона, вып. 15, Стройиздат, М., 1968 г.

