

# ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВИБРИРУЕМОЙ БЕТОННОЙ СМЕСИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ

**В. В. Губа**

Кандидат технических наук, доцент\*

**В. Г. Герасименко**

Кандидат технических наук, доцент\*

**А. Н. Мастепан**

Инженер

Кафедра транспортных технологий\*\*

**А. В. Городничий\***

**Р. В. Кротов\***

\*Кафедра строительства и эксплуатации автомобильных дорог\*\*

\*\*Автомобильно-дорожный институт

Государственного высшего учебного заведения

„Донецкий Национальный технический университет”

ул. Кирова, 51, г. Горловка, Украина, 84646

Контактный тел.: (0624) 55-20-26

E-mail: inst@adi.gorlovka.net

*Розглянуто питання впливу здвигових і нормальних коливань на стадії ущільнення бетонної суміші при накладенні відносно слабких вібрацій. При вібруванні опір зсуву зникає. Дана модель вібрируємої бетонної суміші здобуває нову якість*

*Ключові слова: коливання, вібрація, опір, ущільнення, бетон, деформації*

*Рассмотрены вопросы влияния сдвиговых и нормальных колебаний на стадии уплотнения бетонной смеси при наложении относительно слабых вибраций. При вибрировании сопротивление сдвигу исчезает. Данная модель вибрируемой бетонной смеси приобретает новое качество*

*Ключевые слова: колебания, вибрация, сопротивление, уплотнение, бетон, деформация*

*The questions of shift and normal fluctuations influence on the stage of concrete mixture compression under comparatively weak vibration imposition are considered. At a vibration, resistance a change disappears. This vibrating model of concrete mixture acquires new quality*

*Key words: fluctuation, vibration, resistance, compression, concrete, deformation*

## 1. Введение

Построение эффективной сдвиговой реологической модели вибрируемой бетонной смеси на завершающей стадии уплотнения. Наложение установившихся вибраций не приводит к существенному изменению характеристик упругости  $G_1$  и  $G_2$  и поглощения модели, определяющего эффект внутреннего трения, снижает истинный коэффициент внутреннего трения смеси. Рассмотрим отдельно случаи влияния сдвиговых и нормальных колебаний.

## 2. Цель

Исследование модели вибрационного разжижения бетонной смеси, которая позволит определить зако-

номерности перехода смеси в разжиженное состояние и установить параметры динамического состояния, которые обеспечивают этот переход.

## 3. Возможные колебания бетонной смеси на стадии уплотнения

Начнем с рассмотрения деформаций сдвига. Предположим, что бетонная смесь представляет собой квазиоднородную зернистую среду. Тогда в качестве исходной статической основы используем реологическую модель Шофилда-Скотта-Блера. Эта модель соединяет между собой модели Бингама и Кельвина, достаточно полно отражает главные механические свойства невибрируемой бетонной смеси – ее упругость. Упругость характеризуется модулями сдвига  $G_1$  и  $G_2$ , предель-

ным сопротивлением сдвигу  $\tau_0$ , коэффициентом вязкости  $\eta_1, \eta_2$ .

Переходя к построению эффективной сдвиговой реологической модели вибрируемой бетонной смеси, воспользуемся известным фактом наложения установившихся вибраций. Такое наложение не приводит (по крайней мере на завершающих стадиях уплотнения) к существенному изменению характеристик упругости  $G_1$  и  $G_2$  и поглощения коэффициента вязкости  $\eta_2$  модели. Рассмотрение сводим к изменению характеристики узла А определяющего эффект внутреннего трения при вибрировании (рис. 1, а).

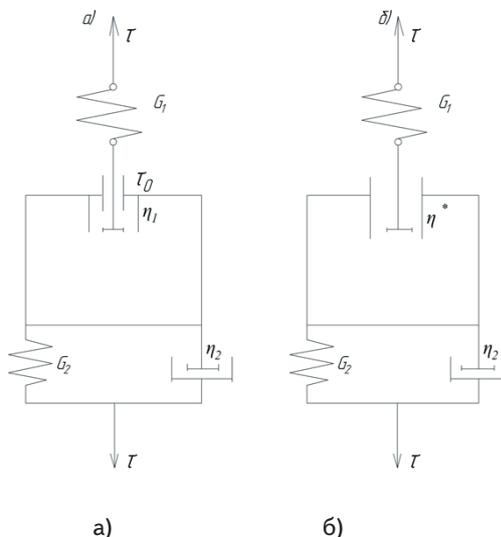


Рис. 1. Реологическая модель бетонной смеси при сдвиговых деформациях: а – исходная; б – для вибрируемой бетонной смеси

Поскольку величина  $\tau_0$  прямо зависит от напряженного состояния смеси, которое существенно меняется при наложении даже относительно слабых вибраций, можно предположить, что на эффективную характеристику трения способен влиять именно этот фактор. Не исключено, что под действием интенсивных вибраций может происходить некоторое снижение истинного коэффициента внутреннего трения смеси (из-за отсутствия экспериментальных данных такую возможность принимать во внимание не будем).

Учитывая сказанное, рассмотрим отдельно случаи влияния сдвиговых и нормальных колебаний. В любом из этих случаев при достаточно интенсивном вибрировании эффективное предельное сопротивление сдвигу исчезает, вследствие чего реологическая модель вибрируемой бетонной смеси приобретает новое качество. Узел А сухого и вязкого трения с характеристиками  $\tau_0$  и  $\eta_1$  заменяется узлом чисто вязкого трения с некоторым коэффициентом эффективной (вибрационной) вязкости  $\eta^*$ .

Пусть в этом узле, кроме статических напряжений  $\tau_c$  и  $\sigma_c$  действуют пульсирующие напряжения  $\tau_1 = \tau_g \sin \omega t$  ( $\omega$  - частота вибрирования). Если  $\tau_c \leq \tau_0 - \tau_g$ , в системе сохраняется эффект проявления предельного сопротивления сдвигу, но при  $\tau_c > \tau_0 - \tau_g$  система придет в движение. В зависимости от соотношения между параметрами  $\tau, f, \sigma_c$ , и  $\tau_c$  следует различать случаи, когда в узле сдвиговые деформации будут развиваться в одном направлении (совпадающем с направлением

действия сдвигового статического напряжения  $\tau_c$ ) или в обоих направлениях.

Условия реализации того или иного типа движения имеют вид:

– для сдвигов в одном направлении:

$$f - \tau_c / \sigma_c \leq \tau_g / \sigma_c \leq f + \tau_c / \sigma_c \tag{1}$$

– для сдвигов в обоих направлениях

$$\tau_c / \sigma_c + f < \tau_g / \sigma_c < +\infty \tag{2}$$

Определим величину сдвиговых деформаций в узле А. Деформации в остальных элементах модели определяются просто, а потому на них останавливаться не будем. Дифференциальное уравнение движения в узле А можно записать следующей формулой

$$\eta_1 \cdot d\gamma / dt = \tau_c - f\sigma_c + \tau_g \cos \omega t, \tag{3}$$

где  $\gamma(t)$  - величина сдвиговой деформации.

Уравнение (3) справедливо для интервалов времени  $[0; t_1], t_2$  и  $2\pi / \omega$ . Для определения моментов переключения  $t_1$  и  $t_2$  воспользуемся соотношением

$$\tau + \tau_g \cos \omega t = f\sigma_c \tag{4}$$

После подстановки в уравнение (3) получаем выражение для сдвиговых деформаций за период колебаний

$$\gamma(2\pi / \omega) = \frac{2}{\eta_1 \omega} \left[ (\tau - f\sigma_c) \arccos \left( \frac{f\sigma_c - \tau}{\tau_g} \right) + \tau_g \sin \arccos \left( \frac{f\sigma_c - \tau}{\tau_g} \right) \right] \tag{5}$$

Заменим узел А эквивалентным вязким демпфером, причем наличие того же вида вибрационного воздействия сдвиг в эквивалентном демпфере будет равен сдвигу в узле А. Сдвиг за период в вязком демпфере представлен следующим выражением

$$\gamma(2\pi / \omega) = 2\pi\tau / (\eta^* \omega) \tag{6}$$

Сравнивая выражения (5) и (6), легко определить безразмерную вязкость  $\eta^* / \eta_1$  характеризующую эффект снижения сил сопротивления в данной реологической модели. Данная характеристика выражается формулой

$$\eta^* / \eta_1 = \pi / \left[ \left( 1 - f \frac{\sigma_c}{\tau} \right) \arccos \left( \frac{f\sigma_c - \tau}{\tau_g} \right) + \frac{\tau_g}{\tau} \sin \arccos \left( \frac{f\sigma_c - \tau}{\tau_g} \right) \right] \tag{7}$$

Формула (7) справедлива в диапазоне изменения  $\tau_g / \sigma_c$  в соответствии с условием (1). В случае выполнения условия (2) в узле А реализуются сдвиговые деформации в обоих направлениях. Моменты переключений  $t_3$  и  $t_4$  определяются в данном случае соотношениями

$$\left. \begin{aligned} t_3 &= \frac{1}{\omega} \left[ \pi - \arccos \left( \frac{f\sigma_c + \tau}{\tau_g} \right) \right] \\ t_4 &= \frac{1}{\omega} \left[ \pi + \arccos \left( \frac{f\sigma_c + \tau}{\tau_g} \right) \right] \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

Теперь необходимо определить сдвиговую деформацию в сторону, противоположную направлению  $\tau$  (движение в интервале  $[t_3, t_4]$ ). Дифференциальное уравнение движения в узле А будет иметь вид

$$\eta_1 \frac{dy}{dt} = \tau + f\sigma_c + \tau_g \cos \omega t \tag{9}$$

Интегрируя уравнения (9) и учитывая выражение (8), определим сдвиг в отрицательном направлении за период колебаний

$$\gamma(2\pi / \omega) = \frac{2}{\eta_1 \omega} \left[ (\tau + f\sigma_c) \arccos \left( \frac{f\sigma_c + \tau}{\tau_g} \right) - \tau_g \sin \arccos \left( \frac{f\sigma_c + \tau}{\tau_g} \right) \right] \tag{10}$$

Определяя суммарный сдвиг за период и используя выражение (6), определим безразмерную вязкость

$$\eta^* / \eta_1 = \pi / \left[ \left( 1 - \frac{f\sigma_c}{\tau} \right) \arccos \left( \frac{f\sigma_c - \tau}{\tau_g} \right) + \left( 1 + \frac{f\sigma_c}{\tau} \right) \arccos \left( \frac{f\sigma_c + \tau}{\tau_g} \right) \right] + \frac{\tau_g}{\tau} \left[ \sin \arccos \left( \frac{f\sigma_c - \tau}{\tau_g} \right) - \sin \arccos \left( \frac{f\sigma_c + \tau}{\tau_g} \right) \right] \tag{11}$$

Формулы (7) и (11) позволяют построить графики функции  $\eta^* / \eta_1$  при различных значениях параметров  $\tau / \sigma_c$ ,  $f = \text{tg}\varphi$ . Кривые вивровязкости  $\eta^* / \eta_1$  имеют вертикальные асимптоты в точках

$$\sigma_g / \sigma_c = f - \tau / \sigma_c \tag{12}$$

По такой же методике был рассмотрен случай, когда направление вибрации перпендикулярно направлению действия статического сдвигового напряжения. Отметим, что выкладки здесь также выполнены для случая, когда вибрационное воздействие описывается синусоидальной функцией времени.

На рис. 2 и 3 приведены графики функции  $\eta^* / \eta_1$  при нормальных и сдвиговых колебаниях. Первый график соответствует случаю, когда направление действия вибраций перпендикулярно направлению сдвигающего усилия, второй - когда оно совпадает с ним.

Вивровязкость зависит не только от соотношения статической и динамической составляющих напряжений, но и от отношения статических сдвигающего и нормального напряжений. Однако при  $\tau_g / \sigma_c \gg 1$  или  $\sigma_g / \sigma_c \gg 1$  эта зависимость настолько ослабевает, что при интенсивном вибрировании ее можно не принимать во внимание.

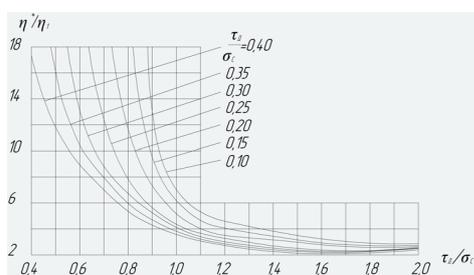


Рис. 2. Зависимость отношения  $\eta^* / \eta_1$  от соотношения между динамической и статической составляющими нормального напряжения при различных статических сдвигающих напряжениях

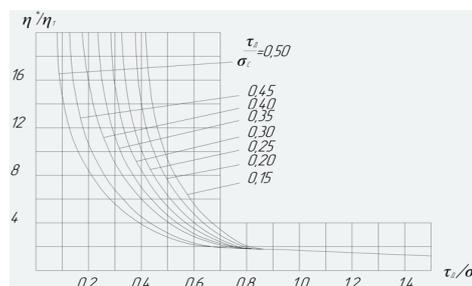


Рис. 3. Зависимость отношения  $\eta^* / \eta_1$  от соотношения между динамическим сдвигающим и статическим нормальным напряжением

Предлагаемая реологическая модель объясняет механизм разжижения зернистой среды без привлечения каких-либо физико-химических или иных представлений, выходящих за рамки теории виброперемещения. Об этом, свидетельствуют результаты опытов, произведенные не только с водосодержащими, но и безводными смесями.

В данном опыте на одном и том же вискозиметре при одинаковых режимах работы вибровозбудителя определялась вивровязкость сухой (безводной) и водонасыщенной бетонной смеси на мелком гранитном щебне и среднезернистом песке в соотношении 1:2:3. Вискозиметр, состоящий из цилиндрического сосуда диаметром 30 см и всплывающего пластмассового шарика диаметром 3,6 см, устанавливался на виброплощадку, совершавшую колебания с частотой 3000 кол/мин и амплитудой 0,65 мм.

В первом цикле опытов измерялась скорость всплытия шарика, положенного перед началом опыта на дно сосуда, при вибрировании без пригруза - сперва в безводной смеси, а затем в водонасыщенной смеси (из расчета  $V = 130 \text{ л/м}^3$ ). В сухой смеси, обладающей весьма значительным внутренним трением и не способной находиться в состоянии физического разжижения, шарик или вовсе не должен был всплывать или должен всплывать медленнее. В действительности же было наоборот: скорость всплытия шарика в сухой смеси оказалось в 10 раз больше (следовательно, коэффициент вивровязкости в 10 раз меньше), чем в водонасыщенной.

Во втором цикле те же опыты были повторены, но при дополнительном безинерционном пригрузе. До известного предела скорость всплытия шарика продолжала оставаться в сухой смеси более высокой, чем в водонасыщенной. По мере увеличения пригруза положение изменилось, при давлении 0,007 МПа, соответствующем случаю  $\sigma_c = \tau_g$ , в сухой смеси шарик вовсе перестал всплывать, тогда как в водонасыщенной скорость его всплытия почти не изменилась.

Приведенные результаты легко объясняются с позиций теории виброперемещения. В обоих случаях было достигнуто полное вибрационное разжижение, однако в сухой смеси истинная вязкость практически отсутствует, скорость всплытия шарика была высокой (как это следует и из уравнения (11)). В водонасыщенной смеси растворяющая составляющая обладает истинной вязкостью, что и проявляется в опытах. При возрастании пригруза в сухой смеси всплытие шарика прекращается немедленно, как только нарушается условие  $\sigma_c - \sigma_g < 0$ , тогда как водонасыщенная

смесь сохраняет состояние разжижения в промежутках между циклами воздействия. Время релаксации последнего ничтожно, но все же оно сравнимо с периодом колебаний. Поэтому смесь может поддерживаться в разжиженном состоянии и тогда, когда указанные выше условия разжижения для неводонасыщенной зернистой среды нарушены из-за превышения пригрузом определенного предела, при котором разжижение возникнуть не может.

Результаты описанного выше опыта никак не могут быть объяснены с позиций физикохимии, но полностью соответствуют представлениям теории виброперемещения (на это же указывают и некоторые данные натуральных наблюдений). На рис. 4 приведен график, полученный по результатам непосредственных измерений вязкости малоподвижной вибрируемой смеси в зоне действия мощного плоскостного виброизлучателя с помощью многоместного шарикового вибровискозиметра.

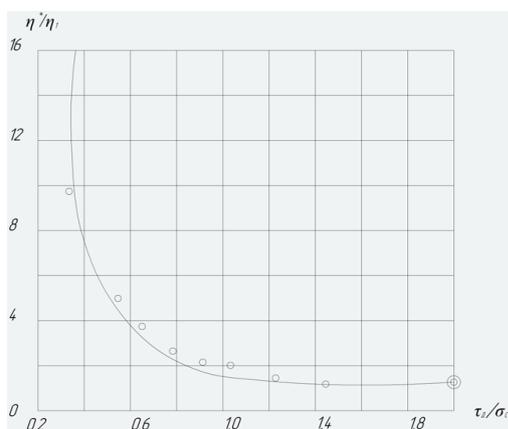


Рис. 4. Зависимость вибровязкости бетонной смеси в зоне действия плоскостного уплотнителя

Сплошная кривая построена по уравнению (11), а опытные значения нанесены кружками. График был построен исходя из двух допущений:

– в области наиболее интенсивных вибраций около плиты уплотнителя (этот результат обозначен на графике двойным кружком) вибровязкость близка к истинной;

– формы вынужденных колебаний смеси во всех створах погружения вискозиметрических тел (располагавшихся на одном уровне по линии, перпендикулярной плоскости плиты уплотнителя) идентичны, различаются только амплитуды.

Другой эксперимент был поставлен при уплотнении бетонной смеси на виброплощадке. Для проведения использовалась лабораторная виброплощадка с переменными параметрами (момент небалансов менялся ступенями по 5,5 даН.см от нуля до 50 даН.см, частота – от нуля до 50 Гц). На виброплощадку устанавливалась

форма с сечением 30x30 см и высотой 1 м. Умеренно жесткая бетонная смесь укладывалась слоем 60 см. Изменением частоты вызывался второй вид колебаний (с одним узлом в пределах высоты столба смеси) при моментах дебалансов 7,5; 15 и 30 даН.см. В каждом из этих трех опытов измерялась скорость всплытия шарика вискозиметра на разной высоте столба и по формуле Стокса вычислялась вибровязкость смеси. Величины динамических давлений определялись расчетом по данным измерений ускорения колебаний. Результаты одного из опытов представлены в виде графика на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость вибровязкости бетонной смеси уплотненной на виброплощадке

График показывает, что характер зависимости вибровязкости от отношения  $\sigma_g/\sigma_c$  на рис. 5 и на рис. 1 один и тот же.

#### 4. Вывод

Рассмотренные нами реологические модели объясняют механизм вибрационного разжижения бетонной смеси. Позволяют определить закономерности перехода последней в разжиженное состояние и установить параметры динамического напряженного состояния, которые обеспечивают такой переход.

#### Литература

1. Васильев А.П. Состояние дорог и безопасность движения автомобилей в сложных погодных условиях. М.: Транспорт, 1976. – 224 с.
2. Немчинов М.В. Сцепные качества дорожных покрытий и безопасность движения автомобилей. М.: Транспорт, 1985. – 231 с.
3. Некрасов В.К. Строительство автомобильных дорог / Под ред. В.К. Некрасова. М.: Транспорт, 1979. – 320 с.
4. Бочин В.А. Строительство автомобильных дорог. Справочник инженера дорожника / Под ред. В.А. Бочина. М.: Транспорт, 1980. – 512 с.