

де z — кількість точок контакту, для пари циліндричних роликів $z = 4$;

T — сила, що витрачається на подолання тертя у точці контакту ролика й поліпропіленової ниті, Н,

$$T = F_n \mu_2 \quad (11)$$

F_n — сила нормального тиску контактуючої поверхні ролика на нить, Н;

μ_2 — коефіцієнт тертя ковзання між контактуючими поверхнями тягнутих роликів і поліпропіленовою ниткою.

Потужність, Вт, приводу механізму різання поліпропіленової ниті

$$P_2 = \pi d^2 z r \tau_{3p} \omega_n k_u \sin \alpha_1 / (4 \eta_2), \quad (12)$$

де d — діаметр поліпропіленової ниті, ($d = 20-50$ мкм) м;

r — радіус кола, описаного шатуном, на якому закріплена ножева пластина, м;

z — кількість ниток, що протягуються;

τ_{3p} — границя міцності поліпропіленової ниті на зріз;

σ_b — границя міцності при розтяганні, Па;

ω_n — кутова швидкість ножових дисків, рад/с;

k_u — коефіцієнт циклічності;

α_1 — кут стискання ножів із джгутом;

η_2 — ККД передачі приводу ножів.

Загальна потужність автомата-різчика:

$$P_{пр} = F_n v_b / \eta_1 + \pi d^2 z r \tau_{3p} \omega_n k_u \sin \alpha_1 / (4 \eta_2)$$

Таким чином, запропонована методика визначенням необхідної потужності для забезпечення роботи автоматів-різчиків фібрових елементів.

Література

1. Емельянова И.А., Блажко В.В., Непорожнев А.С., Шевченко В.Ю. Новые технологические комплекты оборудования для работы в условиях строительной площадки на фибробетонных смесях // Новые материалы и технологии в машиностроении. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Вып. 13-Брянск: БГТИ, 2011.-с.155-157;
2. І. А. Ємельянова, А. М. Баранов, В. М. Нечипоренко, П. М. Калинин, О. В. Доброходова Привід автомата-різчика фібрових елементів з можливим отриманням широкого їх довжини при виробництві // Сб. трудов міжнародної конференції "Ресурси і енергосберегаючі технології будівельних матеріалів, изделий і конструкцій". Тезиси докладов. - Белгород, 1995. - с.48-49.
3. Нечипоренко В.М. Розробка технологічного обладнання для виробництва набризк-сталефібробетону // Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук.

УДК 621.928

Запривода А.В., Ручинський М.М.¹

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ ВІБРАЦІЙНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

АНОТАЦІЯ. Стаття присвячена вибору та обґрунтуванню математичної моделі робочого процесу ущільнення бетонної суміші. Визначені основні параметри процесу ущільнення за умов формування горизонтальних поверхонь пружно-в'язкопластичних сумішей.

Ключові слова: математична модель, бетонна суміш, пружно-в'язкопластична суміш.

АННОТАЦИЯ. Статья посвящена выбору и обоснованию математической модели рабочего процесса уплотнения бетонной смеси. Определены основные параметры процесса уплотнения при условии формирования горизонтальных поверхностей упруго-вязкопластических смесей.

Ключевые слова: математическая модель, бетонная смесь, упруго-вязкопластическая смесь.

ANNOTATION. The article is devoted to the selection and substantiation of the mathematical model of concrete mixture workflow compaction. The main parameters of horizontal surfaces of elastic-plastic mixtures compaction under conditions of formation were determined.

Key words: mathematical model, concrete mixture, elastic-plastic mixtures.

Вступ. Динамічний розрахунок елементів вібраційних пристроїв і форм пов'язаний з дослідженням взаємопов'язаних деформацій пружних конструкцій і обмежених обсягів ущільнюючих середовищ. Досить суворе рішення подібних завдань можна

отримати, якщо відомі властивості бетонної суміші в напрямку нормальної сили, а також при вібраційному зуви.

Мета статті. Вибір та обґрунтування математичної моделі бетонної суміші при формуванні гори-

зонтальних поверхонь та визначення основних параметрів.

Аналіз досліджень. Аналіз реологічних рівнянь однофазних середовищ на основі зіставлення з відповідними двофазними дозволяє оцінити область їх застосування і встановити фізичний зміст використаних коефіцієнтів, які виражаються через більш прості константи, в ряді випадків піддаються розрахунку на основі даних про вихідний склад суміші [1,2].

Подібний підхід використовується при формуванні рівнянь для опису властивостей бетонних сумішей при вібраційному зсуві. Причому останнє може бути отримано тільки із залученням аналізу фізичних особливостей процесу взаємодії двофазного середовища з границею при вібраційному зсуві [3].

Методика та результати досліджень. З метою вибору реологічного рівняння для характеристики властивостей суміші у разі вібраційного зсуву додатково необхідно прийняти такі припущення: при напружених, менших граничного напруження зсуву, коли взаємні переміщення частинок виключені, скелет підпорядковується закономірностям лінійно-пористих середовищ;

замість локальних значень в'язкості, пов'язаних зі структурою пористого простору, можна використовувати значення, усереднені по всьому об'єму; Розглянемо надалі одновимірний процес деформації. Дотичні напруження при зсувних деформаціях можна прийняти пропорційними зсувам скелета і швидкості зміщень рідкої фази.

Тому, при переході до моделей однофазних середовищ вихідне рівняння може бути прийнято у вигляді рівняння лінійної в'язкопружності, за умови його сумісності з рівнянням для нормальних напруг.

При цих припущеннях (без урахування нелінійних ефектів) зв'язок між напруженнями та деформаціями при вібраційному зсуві можна описати стандартним рівнянням в'язкопружності:

$$\tau_{xy} = G \cdot \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} + \mu \cdot \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial t \partial y}, \quad (1)$$

де G -модуль зсуву; μ -коефіцієнт непружного опору коливанням (модуль втрат); $u(x, y)$ -зсув. Відомі методи дослідження властивостей бетонних сумішей при вібраційному зсуві мають ряд недоліків: обмежується розмір часток великого заповнювача, при виведенні розрахункових залежностей не враховуються інерційні члени.

На відміну від однофазної для двофазного середовища типу бетонної суміші необхідно роздільно враховувати граничні умови для кожної з фаз. Передбачається, що для кожної з фаз дотримується умова прилипання. Насправді, при вібрації умова прилипання для скелета заповнювачів може не виконуватися, а саме рифлення робочих поверхонь опалубки та робочого органу вібромашини може вносити гідродинамічне обурення типу турбулентності, не враховується розрахунком. Тому для вибору моделі розрахунку треба розглянути коливання бетонної суміші в

зоні контакту з робочим органом. Можна прийняти, що при вібраційному зсуві сили тертя в зоні контакту визначаються силами тертя скелета, що передаються в окремих точках, і силами тертя, що виникають біля вузького пристінного шару суміші.

Причому силами тертя скелета можна врахувати лише найбільш істотну їх частину, пов'язану з його поперечною деформацією:

$$\tau_b = f_0 \cdot \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \mu \cdot \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial t \partial y} \Big|_{y=-b}, \quad (2)$$

де $f_0 = f_1 \cdot \sigma \cdot \frac{E}{1-\sigma}$; f_1 -коефіцієнт тертя скелета в зоні контакту;

σ -коефіцієнт Пуассона; E -модуль пружності скелета заповнювачів.

Відомо[4], що при

$$Re_b = \frac{D^2 \cdot \omega}{\nu} \gg 1$$

(ν -кінематична в'язкість рідкої фази) текучість рідини відбувається з утворенням приграничного шару, товщина якого має порядок

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}; D$$

-характерний розмір (наприклад, товщина шару ущільненої суміші або діаметр частинок заповнювача суміші).

При наявності скелета утворюється пристінний шар, що має товщину приблизно того ж порядку.

Таким чином, двофазні середовища з урахуванням властивостей на кордоні що коливається можна представити у вигляді двошарових середовищ. У цьому випадку основою для визначення констант бетонної суміші при вібраційному зсуві і для цілей моделювання процесу віброформування бетонних підлог може служити гладка пластина, занурена в шар бетонної суміші що коливається.

Зазвичай, при визначенні динамічних параметрів власне вібромашин для ущільнення бетонних сумішей їх моделюють системами, в яких маса, пружність і опір враховуються окремо. Такі моделі цілком виправдані при вивченні руху вібромашин, оскільки їх робочий орган є твердим тілом. Всі точки робочого органу при цьому переміщуються у фазі з однаковою амплітудою коливань. Тому поточне значення переміщення робочих органів вібромашин (у горизонтальному і вертикальному напрямках) залежить від єдиної змінної часу, а їх рух описується системою звичайних диференціальних рівнянь. Однак в рух приводиться не тільки робочий орган, а й сама формуема суміш, яка під впливом вібрації ущільнюється. Отже, динамічні параметри машини повинні бути визначені з урахуванням бетонної суміші. Проведені дослідження на віброплощині [5], також поверхневої [6] і глибинної вібромашини [6] показують, що бетонна суміш робить істотний вплив не тільки на величину, а й на сам характер зміни амплітуди переміщення робочого органу. Процес руху такої моделі бетонної суміші зводиться до наступного фізичного механізму. Робочий орган вібромашини є джерелом енергії для бетонної суміші, а шар її в контактній з робочим органом зоні

втягується таким чином в коливально – хвильовий процес і передає енергію коливань подальшим верствам бетонної суміші, розташованим в її глибині. Однак існує ще один механізм у горизонтальному напрямку. Енергія від шару до шару бетонної суміші може передаватися в наслідок тертя контактуючих між собою сусідніх шарів бетонної суміші. При цьому в бетонній суміші поряд з поетапним стисненням і розтягненням шарів у вертикальному напрямку виникають т.зв. зсувні переміщення і деформації. Процес залучення шарів бетонної суміші в коливання (поздовжні або зсувні) відбуватиметься не миттєво, а з запізненням по відношенню до попередніх верств бетонної суміші внаслідок їх інертності. Поступово всі версти бетонної суміші (якщо загасання або дисипація в бетонній суміші невеликі), обмежені геометричними контурами ущільнювального середовища (жорсткими кордонами формами, стінками опалубки і т. п.), перейдуть в коливання (з тією чи іншою поляризацією), а потім коливання почне поширюватися за обсягом.

Отже, технологічний процес ущільнення бетонної суміші зводиться (при влаштуванні формуванні горизонтальних поверхонь до руху шарів останньої, як в'язкої нестисливої рідини, а коливально-хвильові процеси в цій рідині обумовлені гармонійними коливаннями плоскої безмежної стінки (модель робочого органу віброформувальної машини для ущільнення бетонної підлоги) ц своєю площині.

Розглянемо основні особливості та характеристики такої моделі технологічного процесу ущільнення бетонної суміші при формуванні горизонтальних поверхонь.

Нехай необмежена плоска поверхня (площина ху) стикається з заспокоєною в цілому нестисливою в'язкою рідиною (бетонною сумішшю), і нехай ця поверхня здійснює гармонійні (горизонтальні) коливання в своїй площині з частотою ω в напрямку y . Питається, який при цьому виникає в рідині ($z > 0$) рух, якщо рідина (бетонна суміш) в цілому спочиває? Використовуючи граничні умови, згідно з якими швидкість рідини (бетонної суміші) у поверхні збігається зі швидкістю поверхні (тобто робочого органу вібромашини)

$v = v_y = v_0 \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t)$, умова нестискаємості рідини (бетонної суміші) $\text{div} \vec{v} = 0$ і геометрію завдання, неважко показати, що в розглянутому випадку $(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = 0$, $p = \text{const}$ (де p – тиск в бетонній суміші) і рівняння руху Нав'є-Стокса зводиться до лінійного одновимірного рівняння типу рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\eta}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Тут η -коефіцієнт динамічної в'язкості бетонної суміші, а ρ -ї щільність. Відшукаючи періодичне рішення у вигляді

$$v = v_0 \cdot \exp[-i \cdot (\omega \cdot t - k_B \cdot z)],$$

де k_B -хвильове число, знайдемо, використовуючи граничні умови при $z = 0$,

$$i \cdot \omega = \frac{\eta}{\rho} \cdot k_B^2 = \tilde{v} \cdot k_B^2, i = \sqrt{-1}, \tilde{v} = \frac{\eta}{\rho}. \quad (4)$$

Звідси, оскільки $\sqrt{i} = \pm(1+i)/\sqrt{2}$, отримуємо:

$$k_B = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_B} = \sqrt{\frac{i \cdot \omega \cdot \rho}{\eta}} = \pm \frac{(1+i)}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{\eta}} \cdot \rho. \quad (5)$$

Тоді

$$v = v_0 \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \eta}} \cdot \rho \cdot z\right) \cdot \exp\left(-i \cdot \left(\omega \cdot t - \sqrt{\frac{\omega}{2 \cdot \eta}} \cdot \rho \cdot z\right)\right), \quad (6)$$

Тут у уявній частині k_B узятий знак «+», інакше швидкість при $z > 0$ в бетонній суміші зростала б. Отриманий результат показує, що в в'язкій нестисливій рідині (бетонній суміші) в своїй площині пластина, що коливається (робочий орган вібромашини, контактує з ущільнюваною бетонною сумішшю) випромінює поперечні хвилі з хвильовим числом k_B , які прийнято називати в'язкими або зсувними хвилями, іноді хвилями Стокса.

Ці хвилі поширюються зі швидкістю:

$$c_B = \sqrt{2 \cdot \eta \cdot \omega / \rho}, \quad (7)$$

І мають довжину:

$$\frac{\lambda_B}{2 \cdot \pi} = \sqrt{\frac{2 \cdot \eta}{\omega \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \tilde{v}}{\omega}}. \quad (8)$$

Коефіцієнт загасання в'язкої хвилі α_B , згідно (6), має значення:

$$\alpha_B = \sqrt{\frac{\omega \cdot \rho}{2 \cdot \eta}}. \quad (9)$$

В'язка хвиля практично затухає на відстані, рівному довжині хвилі; в деякому тонкому граничному шарі, товщина якого близького λ_B , вона все ж поширюється.

Оскільки між вібратором і бетонною сумішшю, що формується, існує досить складний характер взаємодії (у ряді випадків носить характер відривних коливань), то неможливо встановити детермінований (чітко визначений) зв'язок (або взаємозв'язок) між характеристиками коливань вібратора і бетонної суміші. У рамках т.зв. умовної, середньої, ефективної вібров'язкості [6] виробничі умови при влаштуванні підлог найбільш адекватно враховуються разом з характером перебігу суміші, власне геометрією виробу, характером контакту вібратора з бетонною сумішшю, величиною чинного статичного тиску. Зазвичай середню, ефективну в'язкість η бетонної суміші можна застосовувати для вирішення завдань формозміни суміші при влаштуванні підлог. Кількісна оцінка віб-

ров'язкості дається на основі законів руху в'язких гомогенних середовищ:

$$\eta = \eta_0 + \frac{\beta}{U}; \quad (10)$$

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{\beta'}{U}\right). \quad (11)$$

Тут U - критерій інтенсивності вібравання бетонної суміші; β, β' - коефіцієнти тиксотропії; η_0 - в'язкість бетонної суміші за відсутності вібрацій.

Для вибору U -критерію при ущільненні бетонної суміші в процесі формування горизонтальних поверхів використовується наступна сукупність робочих параметрів вібратора і суміші:

$$U = \frac{A^* \cdot \omega^2}{h}, \quad (12)$$

де A^* - амплітуда коливань вібратора в умовах взаємодії з бетонною сумішшю; ω - кругова частота його коливань; h - товщина ущільнюючої бетонної суміші. Використовуючи уявлення про пружні властивості бетонних сумішей, можна встановити критерій, що

дозволяє реалізувати в процесі формування горизонтальних поверхонь величину амплітуди коливань:

$$A_l \leq \delta = h \cdot \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{P_0}{P_0 + P_{st}}\right), \quad (13)$$

де δ - пружна осадка обмежувача коливань вібратора під дією його ваги;

P_0, P_{st} - атмосферний і статичний тиск;

ε - пористість суміші.

У таблиці 1 наведені значення A^* і A_l для різних висот.

Таблиця 1.

Залежність амплітуди безвідривних коливань A^* і її граничного значення A_l від висоти стовпа бетонної суміші (h).

$h, \text{м}$	$A^*, \text{м}$	$A_l, \text{м}$
0,1	$6,24 \cdot 10^{-5} \dots 2,01 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-5} \dots 1,02 \cdot 10^{-4}$
0,15	$6,86 \cdot 10^{-5} \dots 2,26 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-5} \dots 1,53 \cdot 10^{-4}$
0,2	$7,48 \cdot 10^{-5} \dots 2,52 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-5} \dots 2,04 \cdot 10^{-4}$

Висновки

1. Визначена математична модель та отримані рівняння руху пружно-в'язко-пластичної суміші при формуванні горизонтальних поверхонь.
2. Встановлені аналітичні залежності для визначення основних параметрів ефективного ущільнення бетонної суміші в межах прийнятих передумов та допущень.
3. Сформульовано критерій забезпечення раціонального руху системи «вібратор-суміш» та отримані числові значення амплітуд коливань робочого органу.

Література

1. Гусев Б.В., Деминов А.Д., Крюков Б.И., Литвин Л.М., Логвиненко Е.А. Ударно - вибрационная технология уплотнения бетонных смесей. – М.: Стройиздат, 1982. – 152 с.
2. Савинов О.А., Лавринович Е.В. Вибрационная техника уплотнения и формирование бетонных смесей. – Л.: Стройиздат, 1986. 280 с.
3. Овчиников П.Ф. Виброреология / П.Ф. Овчинников. – К.: Наук.думка., 1983. – 272 с.
4. Жермен П. Курс механики сплошных сред.теория: Пер. с фр. В.В.Федулова. – М.: Высш.шк., 1983. – 399 с.
5. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем: начальний посібник (2-е видання) / І.І. Назаренко. – К.: Слово, 2010. – 440 с.
6. Чубук Ю. Ф., Назаренко И.И., Гарнец В.Н. Вибрационные машины для уплотнения бетонных смесей. – К.: Выща шк., 1985. – 168 с.