

УДК 666.983

И.А. Емельянова, д.т.н., профессор
А.А. Задорожный, к.т.н., доцент

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

Н.А. Меленцов, главный инженер

ООО «Стальконструкция» г. Харьков

ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПО ТРУБОПРОВОДАМ С ПОМОЩЬЮ ДВУХПОРШНЕВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ БЕТОНОНАСОСОВ

Проанализированы существующие модели движения вязкопластичных жидкостей. Определены условия для построения модели движения бетонной смеси по трубопроводу.

Ключевые слова: вязкопластичная среда, реологическая модель, гидравлический бетононасос.

Введение. Процесс транспортирования по трубопроводам бетонных смесей с позиций сохранения их первоначальных свойств после качественного приготовления в смесителях всегда является актуальной проблемой.

Учитывая, что бетонная смесь является вязкопластичной средой, ее движение по трубопроводу развивается только после преодоления некоторого начального напряжения сдвига. Механическое поведение таких смесей и характер протекания в них процессов массопереноса отличаются особыми своеобразием и спецификой, которые необходимо учитывать при построении моделей рабочих процессов.

Обзор последних исследований и публикаций. Для разработки модели вышеуказанного процесса следует взять во внимание результаты исследований, проведенные З. П. Шульманом [1]. Им была предложена удобная, получившая в последствии широкое распространение реологическая модель жестко-вязкопластичной среды, которая обобщила большинство классических уравнений реологического состояния текучих сред:

$$\tau_{ij} = 2 \cdot \left[\frac{\tau_0^{1/n}}{A^{1/m}} + \mu^{1/m} \right] A^{n/m-1} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}, \quad (1)$$

где

$$A^2 = \left[2 \cdot \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy} \right)^2 + \left(\frac{dv}{dz} + \frac{dw}{dy} \right)^2 + \left(\frac{du}{dz} + \frac{dw}{dx} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где τ_{ij} – компоненты тензора напряжений сдвига; $\dot{\epsilon}_{ij}$ – тензор скоростей деформации; $u(x, y, z)$, $v(x, y, z)$, $w(x, y, z)$ – компоненты перемещения частиц бетонной смеси; (x, y, z) – пространственные координаты; A – интенсивность скоростей деформаций; τ_0 – предельное напряжение сдвига смеси; n – реологический параметр, m – параметр пластичности.

Модель (1) гибко сочетает пластические и вязкие свойства бетонной смеси.

Принимая бетонную смесь за вязкопластичную среду с линейной кривой течения (кривая 1, рис. 1) следует также брать во внимание, что такие смеси следует рассматривать как жидкости Шведова – Бингама. При этом, величину μ_p для вязкопластичных жидкостей следует рассматривать как функцию скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

Если привести бетонную смесь к одномерному течению, то следует обратить внимание на следующие модели:

– среда Шведова – Бингама

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma}; \quad (3)$$

– среда Шульмана

$$\tau = [\tau_0^n + (\mu_p \cdot \dot{\gamma})^m]^{\frac{1}{n}}. \quad (4)$$

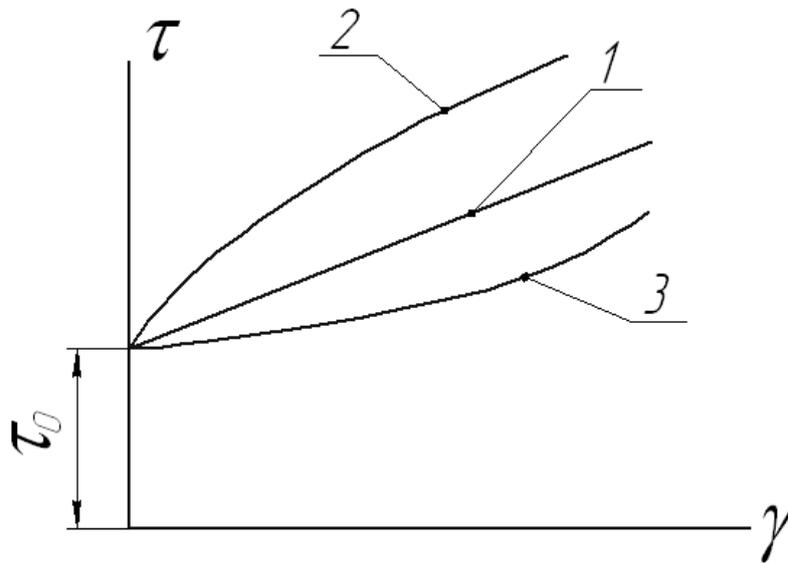


Рисунок 1 – Кривые одномерного течения вязкопластичных смесей:
1 – линейно-вязкопластичная смесь; 2, 3 – нелинейно-вязкопластичные смеси

При этом, в расчетно-конструкторской и инженерной практике получим распространенные эмпирические кривые течения для цилиндрических труб, связывающие между собой интегральные характеристики – напор и расход:

$$\frac{\Delta P \cdot D}{4 \cdot L} = f\left(\frac{8 \cdot u}{D}\right) = f\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3}\right), \quad (5)$$

где ΔP – напор (перепад давления); L – длина и диаметр трубы ($D = 2R$); u – осредненная по объемному расходу Q течения скорость, $u = \left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^2}\right)$.

Отношение $\frac{8 \cdot u}{D}$ для бетонной смеси, как неньютоновской жидкости, в трубе круглого сечения в точности совпадает со скоростью сдвига на стенке трубы. Это отношение для движения бетонной смеси по трубопроводу круглого сечения отвечает скорости сдвига частиц смеси относительно стенок внутреннего сечения трубопровода.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В конечном итоге, для построения модели движения бетонной смеси по трубопроводу, которая подается двухпоршневым гидравлическим бетононасосом, с учетом конкретных условий, беря во внимание физико-механические свойства смеси за основу, может быть принята обобщенная модель нелинейно-вязкопластичной жидкости (модель З. П. Шульмана), которая, после ряда преобразований и упрощений модели (1), имеет вид:

$$\tau^n = \tau_0^n + (\mu \cdot \dot{\gamma})^m. \quad (6)$$

Эта модель обобщает наиболее используемые в настоящее время модели: Ньютона ($\tau_0 = 0$; $m = 0$), Сен-Венана, Шведова – Бингама ($m = n = 1$), Балки – Гершеля ($n = 1$), Брауна, Оствальда – Де Виля ($\tau_0 = 0$), Кэссона ($m = n = 2$) и др.

Цель исследований. Определить условия для построения модели движения бетонной смеси по трубопроводу при использовании гидравлических бетононасосов.

Изложение основного материала. Так как бетонная смесь рассматривается, как жидкость Шведова – Бингама ($m = n = 1$) представляет интерес серия графиков на рисунке 2.

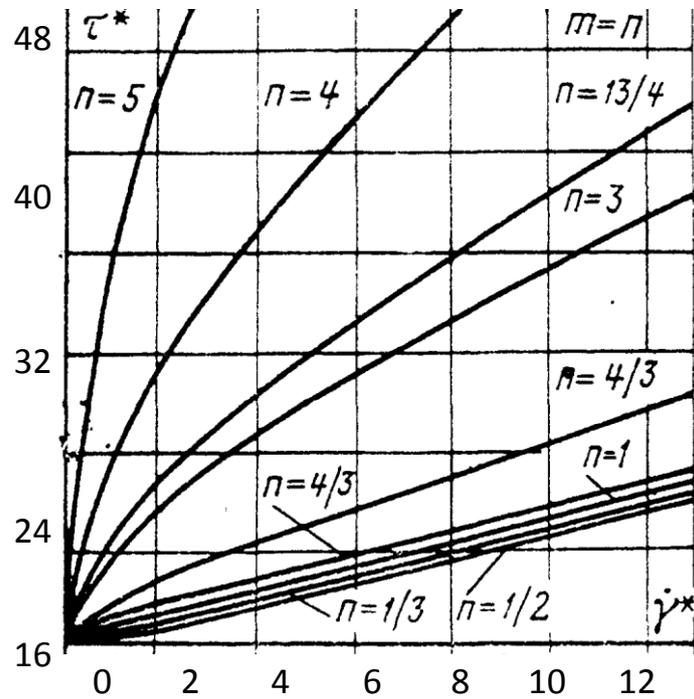


Рисунок 2 – Зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига $m = n$

Следует отметить, что для бетонных смесей m и n лежат в пределах (2...3):

$m = 2$; $n = 2$ – при наличии крупных фракций щебня;

$m = 3$; $n = 3$ – при наличии мелкого заполнителя.

В соответствии с приведенными графиками, для всех $n = m$ кривые вначале нарастают нелинейно, и, начиная с некоторых величин $\dot{\gamma}^*$, выходят на прямую линию.

При $\tau^* = \frac{\tau}{\tau_0}$ и $\dot{\gamma}^* = \frac{\mu \cdot \dot{\gamma}}{\tau_0}$ зависимость (6) примет вид:

$$\tau^* = \left(1 + \alpha \cdot [\dot{\gamma}^*]^m \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (7)$$

Согласно З. П. Шульману, для решения задач пограничного слоя рекомендуется использовать безразмерные комплексы [3]:

$$\underline{W}_\tau = \left(\frac{\tau \cdot L^{\frac{n}{m}}}{\mu^{\frac{n}{m}} \cdot U^{\frac{n}{m}}} \right) \cdot \text{Re}^{-\frac{n}{n+m}}; \quad W = \left(\frac{\tau_0 \cdot L^{\frac{n}{m}}}{\mu^{\frac{n}{m}} \cdot U^{\frac{n}{m}}} \right) \cdot \text{Re}^{-\frac{n}{n+m}}. \quad (8)$$

Здесь Re – число Рейнольдса.

В таком случае уравнение реологического состояния (6) можно выразить как:

$$\underline{W}_\tau^{\frac{1}{m}} = W^{\frac{1}{m}} + \left(\frac{du}{dy} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (9)$$

где

$$n = \frac{u'}{U}; \quad y = \frac{y'}{L} \cdot \operatorname{Re}^{\left(\frac{1}{1+\frac{n}{m}}\right)}, \quad (10)$$

где u – безразмерная скорость; y – поперечная координата пограничного слоя (штрихом обозначены размерные величины).

С помощью метода Прагера – Гогенэмзера [2, 4, 5] зависимость (6) можно обобщить на случай пространственного движения бетонной смеси и привести к виду зависимости (1):

$$\tau_{ij} = 2 \cdot \left[\frac{\frac{1}{\tau_0^n} + \mu^{\frac{1}{m}}}{A^{\frac{1}{m}}} \right]^n \cdot A^{\frac{n-1}{m}} \cdot \dot{\epsilon}_{ij}. \quad (11)$$

Зная эффективное значение пластической вязкости по аналогии с моделью

Шведова – Бингама: $\eta_{эфф} = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}} = \mu \cdot \frac{(\tau - \tau_0)}{\left(\tau^n - \tau_0^n\right)^{\frac{1}{m}}}$, можно вычислить величину

параметра n для случая $m = n$.

В таком случае, логарифмирование и последующее дифференцирование зависимости (6) позволяют получить формулу для определения параметра n :

$$n = \log_{10} \cdot \left[\frac{\frac{1}{\tau^n - \tau_0^n}}{\frac{d(\log_{10} \tau)}{d(\log_{10} \dot{\gamma})}} \right]^{-1} \cdot \log_{10} \tau. \quad (12)$$

Таким образом, обобщенная модель З. П. Шульмана при рассмотрении бетонной смеси как вязкопластичной жидкости (подобной жидкости Шведова – Бингама) позволяет обоснованно подойти к построению уточнённой модели транспортирования бетонной смеси по трубопроводам с помощью гидравлических бетононасосов.

Выводы:

1. Проведен анализ известных моделей движения вязкопластичных жидкостей.
2. Определены условия для построения модели движения бетонной смеси по трубопроводу при использовании гидравлических бетононасосов.

Литература

1. Смольский, Б.М. Реодинамика и теплообмен нелинейно-вязкопластичных материалов / Б.М. Смольский, З.П. Шульман, В.М. Гориславец. – Минск: Наука и техника, 1970. – 240 с.
2. Прагер, В. Введение в механику сплошных сред / В. Прагер. – М.: Изд-во иностр. л-ры, 1963. – 406 с.
3. Шульман, З.П. Одно феноменологическое обобщение кривой течения вязкопластичных реостабильных дисперсных систем / З.П. Шульман // Тепло- и массоперенос. – Минск: Наука и техника, 1968. – Т. 10. – С. 42 – 64.
4. Кутателадзе, С.С. К гидродинамике жидкостей с переменной вязкостью / С.С. Кутателадзе, В.И. Попов, Е.М. Хабахнашева // Прикладная механика и техническая физика. – 1966. – №1. – С. 14 – 21.

Надійшла до редакції 12.12. 2011

© І.А. Ємельянова, А.О. Задорожний, М.О. Меленцов

І.А. Ємельянова, д.т.н., професор
А.О. Задорожний, к.т.н., доцент

Харківський національний університет будівництва та архітектури

М. О. Меленцов, головний інженер

ТОВ “Стальконструкція” м. Харків

**ПЕРЕДУМОВИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ
ТРАНСПОРТУВАННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ПО
ТРУБОПРОВОДАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ДВОПОРШНЕВИХ
ГІДРАВЛІЧНИХ БЕТОНОНАСОСІВ**

Проаналізовані існуючі моделі руху в'язкопластичних рідин. Визначені певні умови для побудови моделі руху бетонної суміші по трубопроводу.

***Ключові слова:** в'язкопластичне середовище, реологічна модель, гідравлічний бетононасос.*

I.A. Emeljanova, Prof., Dr. Sc.

A.A. Zadorozhny, Ph. D.

National Construction and Architectures University of Harkov

N.A. Melencov, main engineer

JSC "Stalkonstruksiya" Harkov

**PREREQUISITES FOR RESEARCH OF CONCRETE MIX
PIPELINE TRANSPORTATION BY DOUBLE-PISTON
HYDRAULIC CONCRETE PUMPS**

The existent models of viscoplastic fluids motion are analyzed. The problem situations for modeling of concrete mix pipeline transportation are determined.

***Keywords:** viscoplastic fluid, rheology model, hydraulic concrete pump.*