

И.А. Емельянова, д-р техн. наук,
А.А. Задорожный, канд. техн. наук,
А.С. Непорожнев, канд. техн. наук

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков, Украина

Н.А. Меленцов

ООО “Стальконструкция”, Харьков, Украина

АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ ПО ТРУБОПРОВОДАМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДВУХПОРШНЕВЫХ РАСТВОРОБЕТОНОНАСОСОВ СОГЛАСНО МОДЕЛИ ШВЕДОВА–БИНГАМА

THE ANALYSIS OF MOVEMENT OF CONCRETE MIXTURE IN THE PIPELINE WITH THE USE OF TWO-RECIPROCATION CONCRETE SOLUTION PUMP ACCORDING MODEL SHVEDOVA–BINGAMA

Приведены зависимости для описания рабочего процесса движения бетонной смеси по трубопроводам с использованием модели Шведова–Бингама при акценте на “пробковом” режиме модели и Ньютона при ламинарном режиме движения. Приведен анализ движения бетонной смеси в трубопроводе по расчетным данным ее секундного расхода. Показана недопустимость “пробкового” режима.

Ключевые слова: секундный расход бетонной смеси, динамическая сдвиговая вязкость, трубопровод, градиент скорости, касательное напряжение.

Основная часть

Бетонная смесь является неньютоновской жидкостью [1] и может быть рассмотрена как бингамовская жидкость. Ее движение по трубопроводу после подачи растворобетононасосом или бетононасосом будет иметь место только после приложения начального напряжения сдвига или предела текучести τ_0 .

В таком случае $\tau - \tau_0 = \mu \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dz} \right)$, откуда

$$f(\tau) = \frac{(\tau - \tau_0)}{\mu}, \text{ при } \tau_0 < \tau < \tau_{cm}, \quad (1)$$

где τ — напряжения сдвига, возникающие между слоями транспортируемой смеси по трубопроводу, $\frac{d\vartheta}{dz}$ — градиент скорости движения смеси, $1/c$.

Причем, $f(\tau) = 0$, при $0 < \tau < \tau_0$.

Из ранее проведенных исследований известно, что

$$\tau_{cm} = \frac{1}{2} \Delta p \cdot \frac{R_{mp}}{l}, \quad (2)$$

где τ_{cm} — сдвиговое напряжение на стенке трубопровода, которое испытывает транспортируемая бетонная смесь, Δp , l — длина исследуемого участка трубопровода, Δp — перепад давления на концах трубопровода длиной l , Δp , R_{mp} — радиус трубопровода, m .

Объемный расход смеси, проходящей через участок трубопровода радиусом r , определяется как

$$dQ_{сек} = \vartheta \cdot 2\pi r \cdot dr. \quad (3)$$

В окончательном виде получим

$$Q_{сек} = \frac{\pi R_{mp}^3 \cdot \tau_{cm}}{4\mu} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \right)^4 \right], \quad (4)$$

После подстановки в уравнение (4) зависимости (2) секундный расход смеси может быть найден согласно формулы

$$Q_{сек} = \frac{\pi R_{mp}^4 \cdot \Delta p}{8\mu \cdot l} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{2 \cdot l_{mp} \cdot \tau_0}{\Delta p \cdot R_{mp}} + \frac{1}{3} \left(\frac{2 \cdot l_{mp} \cdot \tau_0}{\Delta p \cdot R_{mp}} \right)^4 \right], \quad (5)$$

При $r/R=0,5$, $r = r_j$, где r_j — радиус ядра потока, можно отбросить последний член уравнения (5).

В таком случае приближенное уравнение для определения расхода смеси будет иметь вид [2]

$$Q_{сек} = \frac{\pi R_{mp}^3}{4\mu} \cdot \left(\frac{\Delta p \cdot R_{mp}}{2l_{mp}} - \frac{4}{3} \tau_0 \right).$$

Согласно рисунку 1, а профиль скоростей описывается уравнением

$$\vartheta = \frac{1}{\mu} \int_0^R \left(\frac{\Delta p r}{2l_{mp}} - \tau_0 \right) dr, \quad (6)$$

после интегрирования которого получим

$$\vartheta = \frac{\Delta p}{4l_{mp} \cdot \mu} (R - r_j)^2 \text{ при } 0 < r < r_j \text{ и}$$

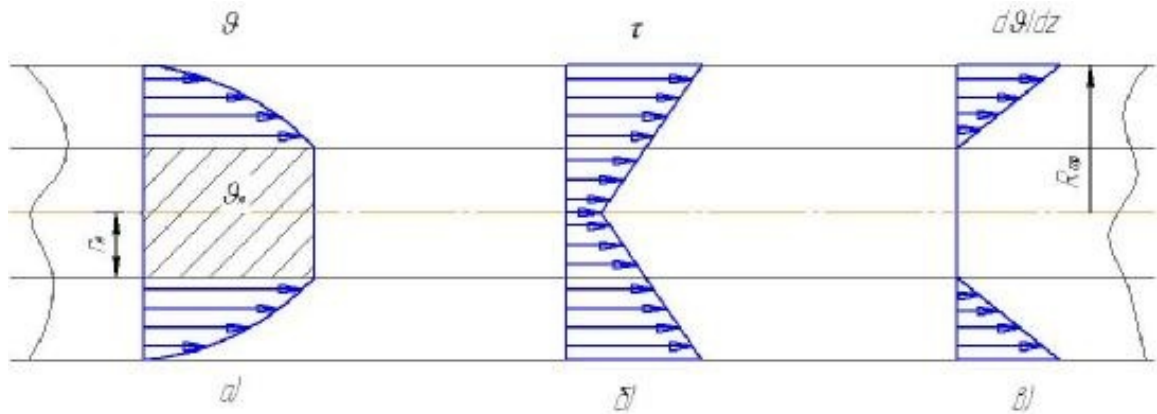


Рисунок 1 — Эпюры распределения:
а) скоростей, б) касательных напряжений, в) градиента скорости

$$v = \frac{\Delta p}{4l_{mp} \cdot \mu} (R_{mp}^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_{mp} - r) \text{ при } r_a < r < R_{mp}, \quad (7)$$

градиент скорости при этом у стенки трубопровода может быть представлен как

$$\frac{dv}{dz} = \frac{\Delta p \cdot R_{mp}}{2l_{mp} \cdot \mu} - \frac{\tau_0}{\mu}, \quad (8)$$

Таким образом, зависимости (1), (6), (7), (8) позволяют построить эпюры распределения, представленные на рисунках 1, а, б, в для конкретных условий транспортирования бетонных смесей по трубопроводу определенной динамической вязкости.

При ламинарном режиме движения бетонной смеси как бингамовской жидкости по трубопроводу распределения скоростей, касательных напряжений и градиента скорости в ее потоке представлены на рисунке 1, откуда видно, что напряжение τ падает до 0 в центре трубопровода, но вблизи осевой линии существует зона, в которой отсутствует скорость сдвига. В этой зоне смесь движется как твердый поршень.

Исходя из условия $r_a < r < R_{mp}$ и беря во внимание зависимость (6), скорость потока смеси по трубопроводу определяется как

$$v = \frac{\Delta p}{4l_{mp} \cdot \mu} (R_{mp}^2 - r^2) - \frac{\tau_0}{\mu} (R_{mp} - r). \quad (9)$$

Приравняв формулы (7) и (8) с учетом указанных условий, определяющих их справедливость, получим

$$r_a = \frac{2\Delta l}{\Delta p \cdot R_{mp}} \cdot \tau_0 \cdot R_{mp} = \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \cdot R_{mp}, \quad (10)$$

В таком случае при $r_a < r < R_{mp}$, беря во внимание систему уравнений (7),

$$v = \frac{\Delta p}{4\Delta l_{mp} \cdot \mu} \cdot [R - r_a]^2 = \frac{\Delta p}{4\Delta l_{mp} \cdot \mu} \cdot \left[R_{mp} - \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \cdot R_{mp} \right]^2 = \frac{\Delta p \cdot R^2}{4\Delta l_{mp} \cdot \mu} \cdot \left[1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \right]^2 = \frac{\tau_{cm} \cdot R_{mp}}{2\mu} \cdot \left[1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \right]^2 \quad (11)$$

Поскольку в модели Шведова–Бингама при $v = 0$ $r = R_{mp}$, $v/r = R_{mp} = 0$ v_{cp} в диапазоне $r_a < r < R_{mp}$ может быть найдена как

$$v_{cp} = \frac{\Delta p \cdot R_{mp}^2}{8\Delta l_{mp} \cdot \mu} \cdot \left[1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \right]^2 \text{ или } v_{cp} = \frac{1}{2} \cdot v_a. \quad (12)$$

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволили рекомендовать следующие зависимости для расчета реологической модели Шведова–Бингама при анализе процесса транспортирования бетонных смесей по трубопроводам.

$$Q_{сек} = \frac{\pi R_{mp}^3 \cdot \tau_{cm}}{\mu} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \right)^4 \right],$$

$$v_a = \frac{\tau_{cm} \cdot R_{mp}}{2\mu} \cdot \left[1 - \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \right]^2, v_{cp} = \frac{1}{2} \cdot v_a, r_a = \frac{\tau_0}{\tau_{cm}} \cdot R_{mp}, \quad (13)$$

В таблице 1 приведены параметры движения бетонной смеси по трубопроводу согласно реологической модели Шведова–Бингама при наличии ламинарного режима.

При движении бетонной смеси по трубопроводу следует учитывать существование двух областей: движение вне пограничного слоя (τ) и движение смеси в пограничном слое (τ_{cm}), где наблюдается торможение ее движения за счет существования сил трения. Такой пограничный слой можно назвать “смазочным” слоем и определить его как

$$\delta_{cm} = R_{mp} - r_a, \quad (14)$$

Для различных параметров в таблице 2 приведены значения “смазочного” слоя для модели Шведова–Бингама. При этом не учитывались эффекты структурообразования бетонной смеси. В рамках модели Шведова–Бингама при условии сдвигового движения бетонной смеси вообще не существует: движется только твердое, квазитвердое ядро при незначительной скорости “смазочного” слоя. В таком случае, секундный расход смеси рас-

Таблиця 1 — Расчетные показатели процесса движения бетонных смесей по трубопроводам согласно модели Шведова-Бингама

D, м	R, м	Горизонтальный трубопровод				Вертикальный трубопровод	
		$\Delta p = 8 \cdot 10^6$ Па		$\Delta p = 1,5 \cdot 10^7$ Па		$\Delta p = 86,87 \cdot 10^5$ Па	$\Delta p = 156,87 \cdot 10^5$ Па
		$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 50$ м	$\Delta l = 50$ м
$5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$\tau_{cm} = 500$ Па	$\tau_{cm} = 400$ Па	$\tau_{cm} = 937,5$ Па	$\tau_{cm} = 750$ Па	$\tau_{cm} = 2000$ Па	$\tau_{cm} = 3750$ Па
		$\vartheta_{я} = 1 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 3,1 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 5,4 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 3,4 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,018$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,04$ м/с
		$r_{я} = 15 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 19 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 8 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 0,01$ м	$r_{я} = 3,8 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 2 \cdot 10^{-3}$ м
		$Q_{сек} = 6 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 3,1 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 2,7 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,75 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 7,9 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,64 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с
$7,5 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$\tau_{cm} = 750$ Па	$\tau_{cm} = 600$ Па	$\tau_{cm} = 1406,3$ Па	$\tau_{cm} = 1125$ Па	$\tau_{cm} = 3000$ Па	$\tau_{cm} = 5625$ Па
		$\vartheta_{я} = 5,1 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 16 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 11,3 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 45,6 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,095$ м/с
		$r_{я} = 15 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 0,019$ м	$r_{я} = 8 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 0,01$ м	$r_{я} = 3,75 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 2 \cdot 10^{-3}$ м
		$Q_{сек} = 5,9 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,67 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,2 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 4,31 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 9,15 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с
10^{-1}	$5 \cdot 10^{-2}$	$\tau_{cm} = 1000$ Па	$\tau_{cm} = 800$ Па	$\tau_{cm} = 1875$ Па	$\tau_{cm} = 1500$ Па	$\tau_{cm} = 4000$ Па	$\tau_{cm} = 7500$ Па
		$\vartheta_{я} = 0,012$ м/с	$\vartheta_{я} = 7,8 \cdot 10^{-3}$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,033$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,024$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,086$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,17$ м/с
		$r_{я} = 0,015$ м	$r_{я} = 0,019$ м	$r_{я} = 8 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 0,01$ м	$r_{я} = 3,75 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 2 \cdot 10^{-3}$ м
		$Q_{сек} = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,6 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 5,8 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 4,3 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 2,8 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с
$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$\tau_{cm} = 2500$ Па	$\tau_{cm} = 2000$ Па	$\tau_{cm} = 4687,5$ Па	$\tau_{cm} = 3750$ Па	$\tau_{cm} = 10000$ Па	$\tau_{cm} = 18750$ Па
		$\vartheta_{я} = 0,121$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,09$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,26$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,20$ м/с	$\vartheta_{я} = 0,59$ м/с	$\vartheta_{я} = 1,13$ м/с
		$r_{я} = 0,015$ м	$r_{я} = 0,019$ м	$r_{я} = 8 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 0,01$ м	$r_{я} = 3,75 \cdot 10^{-3}$ м	$r_{я} = 2 \cdot 10^{-3}$ м
		$Q_{сек} = 0,013$ м ³ /с	$Q_{сек} = 9,8 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,026$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,021$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,059$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,11$ м ³ /с

Примечание: 10^3 Па·с, 300 Па.

смазывается как $Q_{сек} = 2\pi R_{mp}^2 \cdot \vartheta_{я}$, где $\vartheta_{я}$ — скорость движения этого ядра. Скорость ядра может быть вычислена по ранее приведенным формулам [зависимость (13)] либо взята такой, как и скорость “смазочного” слоя, вовлекающей квазитвердое ядро бетонной смеси в движение по трубопроводу за счет введения пластификаторов, ПАВ. Величину скорости U_c “смазочного” слоя смеси возле стенок трубопровода можно увеличить, что в свою очередь увеличит скорость движения квазитвердого ядра. При этом можно рассмотреть вариант $U_c = \vartheta_{я}$. Тогда $Q_{сек} = 2\pi R_{mp}^2 \cdot \tilde{\vartheta}_{я}$.

Рассматривается “пробковый” режим движения квазитвердого ядра, при котором сдвигового движения слоев смеси в трубопроводе нет. В этом случае $\tilde{\vartheta}_{я}$ определяется соотношением

$$\vartheta_{я} = \frac{R_{mp}^2 \cdot \Delta p}{4\mu} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{я}}{R_{mp}} \right)^2 \right] + \frac{R_{mp} \cdot \tau_0}{\mu} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_{я}}{R_{mp}} \right)^2 \right], \quad (15)$$

$$r_{я} = \frac{2 \cdot \tau_0}{\frac{\Delta p}{\Delta l}}, \quad (16)$$

Таблиця 2 — Расчетные значения толщины “смазочного” слоя.

D, м	R, м	Горизонтальный трубопровод				Вертикальный трубопровод	
		$\Delta p = 8 \cdot 10^6$ Па		$\Delta p = 1,5 \cdot 10^7$ Па		$\Delta p = 86,87 \cdot 10^7$ Па	$\Delta p = 156,87 \cdot 10^7$ Па
		$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 50$ м	$\Delta l = 50$ м
$5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$\delta_{см} = 0,01$ м	$\delta_{см} = 6 \cdot 10^{-3}$ м	$\delta_{см} = 0,017$ м	$\delta_{см} = 0,015$ м	$\delta_{см} = 0,02$ м	$\delta_{см} = 0,023$ м
$7,5 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$\delta_{см} = 0,023$ м	$\delta_{см} = 0,019$ м	$\delta_{см} = 0,03$ м	$\delta_{см} = 0,028$ м	$\delta_{см} = 0,034$ м	$\delta_{см} = 0,036$ м
10^{-1}	$5 \cdot 10^{-2}$	$\delta_{см} = 0,035$ м	$\delta_{см} = 0,031$ м	$\delta_{см} = 0,042$ м	$\delta_{см} = 0,04$ м	$\delta_{см} = 0,046$ м	$\delta_{см} = 0,048$ м
$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$\delta_{см} = 0,11$ м	$\delta_{см} = 0,106$ м	$\delta_{см} = 0,117$ м	$\delta_{см} = 0,115$ м	$\delta_{см} = 0,12$ м	$\delta_{см} = 0,123$ м

Таблиця 3 — Расчетные параметры процесса движения бетонных смесей по трубопроводам согласно модели Шведова-Бингама

D, м	R, м	Горизонтальный трубопровод				Вертикальный трубопровод	
		$\Delta p = 8 \cdot 10^6$ Па		$\Delta p = 1,5 \cdot 10^7$ Па		$\Delta p = 86,87 \cdot 10^5$ Па	$\Delta p = 156,87 \cdot 10^5$ Па
		$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 50$ м	$\Delta l = 50$ м
$5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$Q_{сек} = 1,9 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 5,7 \cdot 10^{-7}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,1 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 6,6 \cdot 10^{-6}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 3,1 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 7,8 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с
$7,5 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$Q_{сек} = 2,2 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,2 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 7,5 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 5 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 2,0 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 4,3 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с
10^{-1}	$5 \cdot 10^{-2}$	$Q_{сек} = 9,6 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 6,0 \cdot 10^{-5}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 2,6 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,9 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 6,6 \cdot 10^{-4}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с
$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$Q_{сек} = 5,9 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 4,4 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,013$ м ³ /с	$Q_{сек} = 9,7 \cdot 10^{-3}$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,028$ м ³ /с	$Q_{сек} = 0,056$ м ³ /с

С учетом вышеуказанных зависимостей при условии, что $r_y \rightarrow R_{mp}$, весь расход смеси, проходящей по трубопроводу, можно определить согласно зависимости:

$$Q_{сек} = 2\pi R_{mp}^2 \cdot \tilde{G}_y = \frac{1}{4\mu} \cdot \pi R_{mp}^2 \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l_{mp}} \cdot \delta_{см}^2 \quad (17)$$

При учете особенностей структурообразования бетонной смеси, когда $\delta_{см} \rightarrow 0$ и во внимание берется фактор времени, оказывающий влияние на динамическую вязкость [зависимость (17)] наблюдается снижение секундного расхода смеси, который с этим параметром находится в обратной пропорциональности.

В таблице 3 приведены расчетные значения секундного расхода бетонной смеси, определяемого согласно зависимости (16) при наличии “смазочного” слоя и при “пробковом” режиме для модели Шведова-Бингама.

В таблице 4 приведены расчетные значения секундного расхода бетонной смеси, которая транспортируется по трубопроводу и которая представлена вязкой моделью Ньютона.

Расчет секундного расхода в данном случае определяется согласно зависимости:

$$Q_{сек} = \frac{\pi R_{mp}^3 \cdot (R_{mp} \cdot \Delta p)}{2 \cdot \mu \cdot \Delta l_{mp}} \quad (18)$$

Таблиця 4 — Расчетные значения секундного расхода бетонной смеси, транспортируемой по трубопроводу, представленные вязкой моделью Ньютона.

D, м	R, м	Горизонтальный трубопровод				Вертикальный трубопровод	
		$\Delta p = 8 \cdot 10^6$ Па		$\Delta p = 1,5 \cdot 10^7$ Па		$\Delta p = 86,87 \cdot 10^5$ Па	$\Delta p = 156,87 \cdot 10^5$ Па
		$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 200$ м	$\Delta l = 250$ м	$\Delta l = 50$ м	$\Delta l = 50$ м
$5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$Q_{сек} = 2,454 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 1,963 \cdot 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 4,602 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 3,682 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 1,066 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 1,925 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$
$7,5 \cdot 10^{-2}$	$3,75 \cdot 10^{-2}$	$Q_{сек} = 1,243 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 9,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 2,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 1,864 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 5,397 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 9,746 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$
10^{-1}	$5 \cdot 10^{-2}$	$Q_{сек} = 3,927 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 3,142 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 7,363 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 5,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 1,706 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 3,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$
$2,5 \cdot 10^{-1}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$Q_{сек} = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 0,012 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 0,029 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 0,023 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 0,067 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{сек} = 0,12 \text{ м}^3/\text{с}$

Сопоставление данных таблиц 3 и 4 показывает, что по сравнению с режимом ламинарного движения смеси (таблица 4), согласно вязкой модели Ньютона когда у стенок трубопроводов имеется сдвиговое смещение слоев смеси $\tau_{см} > \tau_0$, при “пробковом” режиме согласно модели Шведова–Бингама (таблица 3) секундный расход изменяется в 2,5–5 раз. В связи с этим, следует констатировать, что при процессе транспортирования бетонных смесей по трубопроводам “пробковый” режим не допустим.

Выводы

1. Приведены зависимости для расчета реологической модели Шведова–Бингама при анализе процесса транспортирования бетонных смесей по трубопроводам с учетом наличия “смазочного” слоя и при “пробковом” режиме.

2. Приведены расчетные данные по секунднему расходу бетонной смеси который определяется по формулам моделей Шведова–Бингама и Ньютона.

3. Обоснована недопустимость наличия “пробкового” режима при транспортировании бетонных смесей по трубопроводам.

Литература

- 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.
- Гидромеханические процессы химической технологии / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. — Л.: Химия, 1982. — 288 с.

References

- Smolskiy B.M. Reodinamika i teploobmen nelineino-viazkoplasticheskikh materialov / B.M. Smolskiy, Z.P. Shulman, V.M. Gorislavets. — Minsk: Nauka i tekhnika, 1970. — 240 s.
- Gidromekhanicheskie protsessy himicheskoi tehnologii / P.G. Romankov, M.I. Kurochkina. — L.: Himia, 1982. — 288 s.

Надійшла 23.12.2013

УДК 666.983

**АНАЛІЗ РУХУ БЕТОНОЇ СУМІШІ
ПО ТРУБОПРОВОДАХ З ВИКОРИСТАННЯМ
ДВОПОРШНЕВИХ РОЗЧИНОБЕТОНОНАСО-
СІВ ЗГІДНО МОДЕЛІ ШВЕДОВА–БІНГАМА**

**І.А. Ємельянова, А.А. Задорожний,
А.С. Непорожнєв, Н.А. Меленцов**

Наведено залежності для опису робочого процесу руху бетонної суміші по трубопроводах з використанням моделі Шведова–Бінгама при акценті на “пробковому” режимі моделі Ньютона при ламінарному режимі руху. Наведено аналіз руху бетонної суміші в трубопроводі за розрахунковими даними її секундної витрати. Доведено неприпустимість “пробкового” режиму.

Ключові слова: секундна витрата бетонної суміші, динамічна зсувна в'язкість, трубопровід, градієнт швидкості, дотичне напруження.

UDC 666.983

**THE ANALYSIS OF MOVEMENT
OF CONCRETE MIXTURE IN THE PIPELINE
WITH THE USE OF TWO-RECIPROCATION
CONCRETE SOLUTION PUMP ACCORDING
MODEL SHVEDOVA–BINGAMA**

**I.A. Yemelianova, A.A. Zadopozniy,
A.S. Neporoznev, N.A. Melentsov**

Contains dependencies for the description of the working process of the movement of concrete mixture on pipelines with the use of a model Shvedova–Bingama with its emphasis on “colonial” mode and Newton in the laminar flow regime. The analysis of movement of concrete mixture in the pipeline according to the calculated value of its second flow. Shows the inadmissibility of “cork” mode.

Key words: second flow of concrete mixture, dynamic shear viscosity, pipeline, the gradient of velocity, shear stress.