

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*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ПО ТРУБОПРОВОДАМ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ РАСТВОРОБЕТОНОНАСОСОВ (БЕТОНОНАСОСОВ)**

*Выполнен анализ процесса движения бетонной смеси по трубопроводу и предложена зависимость для определения производительности растворобетононасосов (бетононасосов). Приведены расчетные данные технологических параметров процесса транспортирования бетонных смесей с учетом производительности машин и диаметров трубопроводов.*

**Ключевые слова:** бетононасос, бетонная смесь, транспортный трубопровод, средняя скорость, вязкость, подвижность.

УДК 666.983

*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*

## **ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТРАНСПОРТУВАННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ПО ТРУБОПРОВОДАХ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ РОЗЧИНОБЕТОНОНАСОСІВ (БЕТОНОНАСОСІВ)**

*Виконано аналіз процесу руху бетонної суміші по трубопроводу й запропоновано залежність для визначення продуктивності розчинобетононасосів (бетононасосів). Наведено розрахункові дані технологічних параметрів процесу транспортування бетонних сумішей з урахуванням продуктивності машин і діаметрів трубопроводів.*

**Ключові слова:** бетононасос, бетонна суміш, транспортний трубопровід, середня швидкість, в'язкість, рухливість.

UDC 666. 983

*I.A. Emeljanova, ScD, Professor  
A.A. Zadorozhny, PhD, Associate Professor  
Kharkov National University Construction and Architecture  
N.A. Melencov, main engineer  
ООО «Stalikonstrukciya», Kharkov*

## **INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PROCESS OF PORTAGE OF CONCRETE MIXTURES ON PIPELINES ON THE PRODUCTIVITY OF SOLUTION A CONCRETE PUMPS (CONCRETE PUMPS)**

The analysis of process of motion of concrete mixture is executed on a pipeline and dependence is offered for determination of the productivity of solution is a concrete pump (concrete pumps).

Calculation data over of technological parameters of process of portage of concrete mixtures are brought taking into account the productivity of machines and diameters of pipelines.

**Keywords:** concrete pump, concrete mixture, transport pipeline, middle speed, viscosity, mobility.

**Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными или практическими задачами.** Транспортирование бетонных смесей в условиях строительной площадки, как правило, осуществляется с помощью двухпоршневых гидравлических бетононасосов и автобетононасосов. В зависимости от максимального размера крупного заполнителя и производительности бетононасоса радиус сечения необходимого транспортного трубопровода будет различным.

Предварительные исследования позволяют подойти к определению производительности растворобетононасосов и бетононасосов с учётом конкретных условий их работы [1, 2, 3].

**Изложение основного материала исследования с полным обоснованием научных результатов.** Движение бетонной смеси по трубопроводу радиусом  $R$  осуществляется со скоростью  $\vartheta$  вдоль оси  $x$ . При этом распределение скоростей  $\vartheta_x$  по сечению трубопровода будет изменяться в зависимости от расстояния до оси  $\vartheta_x = \vartheta_{(r)}, r = \sqrt{y^2 + z^2}$ . Используя уравнение Навье – Стокса [1, 2] для течения вязких жидкостей, получили зависимость

$$\rho \cdot \left[ \frac{d\vec{\vartheta}}{dt} + (\vec{\vartheta} \cdot \nabla \vec{\vartheta}) \right] = -\vec{\nabla} p + \mu \cdot \Delta \vec{\vartheta}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность бетонной смеси;

$\vec{\vartheta}$  – скорость движения бетонной смеси, м/с;

$P$  – давление в трубопроводе, МПа;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$T$  – время, с;

$\vec{\nabla}$  – оператор Гамильтона,  $\vec{\nabla} = \left( \frac{d}{dx}; \frac{d}{dy}; \frac{d}{dz} \right)$ ;

$\Delta$  – оператор Лапласа,  $\Delta = \left( \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2} \right)$ .

После разложения компонентов уравнение имеет вид

$$-\frac{dp}{dx} + \mu \cdot \Delta \cdot \vartheta = 0, \quad \frac{dp}{dy} = 0, \quad \frac{dp}{dz} = 0. \quad (2)$$

В первом равенстве при  $\vartheta = \vartheta_{(r)}$   $-\frac{dp}{dx} = b = const$ . Оператор Лапласа  $\Delta$  в цилиндрически-симметричном случае  $[\vartheta = \vartheta_{(r)}]$  имеет вид  $\Delta = \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot \left( r \cdot \frac{d}{dr} \right)$ .

Тогда первое равенство уравнения (2) примет вид

$$\frac{d}{dr} \cdot \left( r \cdot \frac{d}{dr} \right) = -\frac{br}{\mu}, \quad (3)$$

где  $b$  – градиент давления в трубопроводе  $p$ ;  
 $r$  – текущее значение радиуса трубопровода.

Тогда

$$r \cdot \frac{d\vartheta}{dr} = -\frac{br^2}{2\mu} + A, \quad \frac{d\vartheta}{dr} = -\frac{br}{2\mu} + \frac{A}{r}, \quad (4)$$

где  $\frac{d\vartheta}{dr}$  – градиент скорости;

$A$  – постоянная, зависящая от градиента скорости движения бетонной смеси по трубопроводу.

При условии, что величина  $\frac{d\vartheta}{dr}$  всюду конечна и  $A=0$ , после повторного интегрирования скорость движения бетонной смеси по трубопроводу может быть представлена как

$$\vartheta = -\frac{br^2}{4\mu} + B. \quad (5)$$

При  $r = R$   $\vartheta = 0$ , следовательно,  $B = \frac{bR^2}{4\mu}$ . Тогда в окончательном виде скорость движения бетонной смеси в трубопроводе можно представить как

$$\vartheta = \frac{b}{4\mu} \cdot (R^2 - r^2) = -\frac{1}{4\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot (R^2 - r^2). \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что профиль распределения скоростей бетонной смеси по сечению трубопровода имеет параболический характер.

Предварительные исследования позволяют подойти к определению производительности растворобетонасосов и бетононасосов с учётом конкретных условий их работы. Среднюю скорость движения частиц смеси по сечению трубопровода можно определить, пользуясь зависимостью

$$\vartheta = \frac{1}{\pi R^2} \cdot \int_0^R \int_0^{2\pi} \vartheta \cdot r \cdot dr \cdot d\phi = \frac{b}{2R^2\mu} \cdot \int_0^R (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr = \frac{bR^2}{8\mu}. \quad (7)$$

Зависимость (7) при подстановке истинного значения величины  $b$  позволяет получить формулу для определения производительности бетононасоса

$$Q = \pi R^2 \cdot \vartheta_{mp} = \frac{\pi b R^4}{8\mu} = \frac{\pi}{8\mu} \cdot \left| \frac{dp}{dx} \right| \cdot R^4. \quad (8)$$

Таким образом, формула (8) после подстановки вместо градиента давления  $\frac{dp}{dx}$  начального  $p_1$  и конечного  $p_2$  давления в трубопроводе определенной длины  $L$  рассматривается как формула Пуазейля для определения расхода бетонной смеси, транспортируемой за единицу времени по трубопроводу длиной  $L$ .

Такой подход к анализу работы растворобетононасоса (бетононасоса) позволяет найти полную силу, действующую на единичной длине трубопровода, которая рассматривается с учетом градиента давления

$$F_e = 2\pi R_{mp} f_x = -\pi R_{mp}^2 \cdot \left( \frac{dp}{dx} \right), \quad (9)$$

где  $f_x$  – элементарная сила, действующая на единице длины трубопровода, уравновешенная градиентом давления,

$$f_x = b \cdot \frac{R_{mp}}{2} = - \left( \frac{dp}{dx} \right) \cdot \frac{R_{mp}}{2}, \quad (10)$$

где  $\vec{n}$  – вектор нормали, направлен противоположно  $r$ .

При этом коэффициент сопротивления  $C_D$ , возникающего при движении бетонной смеси по трубопроводу, может быть найден с помощью числа Рейнольдса

$$C_D = \frac{2f_x}{Q\vartheta_{mp}^2} = \frac{8\nu}{(\vartheta_{mp} \cdot R_{mp})} = \frac{16}{Re}, \quad (11)$$

где  $Re = \frac{2\vartheta_{mp} \cdot R_{mp}}{\nu}$  – число Рейнольдса;

$\nu$  – кинематическая вязкость бетонной смеси,  $\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}$ .

На основании проведенных исследований в таблице 1 представлены основные показатели и технологические параметры работы растворобетононасосов на бетонных смесях различной подвижности.

**Таблица 1 – Показатели и технологические параметры работы растворобетононасосов**

Подвижность П, см	П, м <sup>3</sup> /с (Q)	$\mu, \text{Па} \cdot \text{с}$	Re	$\vartheta_{mp}, \text{м/с}$	CD	$f_x, \text{Па}$	Fe, Н/м
3,5	0,775*10 <sup>-3</sup>	4,14*10 <sup>3</sup>	0,0114	0,395	1403,5	261452,1	41068,8
4	0,835*10 <sup>-3</sup>	3,49*10 <sup>3</sup>	0,0146	0,425	1095,9	237466,3	37301,1
5	0,895*10 <sup>-3</sup>	2,93*10 <sup>3</sup>	0,0187	0,456	855,6	213688,3	33566,1
6	0,91*10 <sup>-3</sup>	2,78*10 <sup>3</sup>	0,02	0,463	800,0	206146,6	32381,4
7	0,92*10 <sup>-3</sup>	2,69*10 <sup>3</sup>	0,0209	0,469	765,6	201664,8	31677,4
8	0,93*10 <sup>-3</sup>	2,59*10 <sup>3</sup>	0,0219	0,474	730,6	196278,5	30831,4

Примечание: расчетные данные приведены для бетонных смесей со средней плотностью  $\rho_0=2400\text{кг/м}^3$  и трубопровода диаметром  $D = 50$  мм.

Полученные данные в определенной мере согласуются с изменением вязкостей в диапазоне, указанном Л.И. Дворкиным и О.Л. Дворкиным [3].

В таблице 2 приведены расчетные данные для различных диаметров трубопроводов  $D$  и наибольшей величины заполнителя  $d$ .

**Таблица 2 – Расчетные данные**

Диаметр трубопровода $D$ , м	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$\vartheta_{mp}$ , м/с	Re	$C_D$	$f_x$ , Па	$F_e$ , Н/м	Наибольшая величина заполнителя $d$ , м	
							при затратах цемента > 300 кг/м <sup>3</sup>	при затратах цемента ≤ 300 кг/м <sup>3</sup>
7,5*10 <sup>-3</sup>	1,25*10 <sup>-3</sup>	0,3	0,016	1000	93559,5	22044,4	20*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>
7,5*10 <sup>-3</sup>	2,22*10 <sup>-3</sup>	0,6	0,029	551,7	166161,7	39150,9	20*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>
7,5*10 <sup>-3</sup>	3,89*10 <sup>-3</sup>	0,9	0,051	313,7	291157,3	68602,3	20*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>
7,5*10 <sup>-3</sup>	5,0*10 <sup>-3</sup>	1,2	0,066	242,4	374238,1	88177,8	20*10 <sup>-3</sup>	20*10 <sup>-3</sup>
0,1	2,5*10 <sup>-3</sup>	0,3	0,025	640,0	78940,9	24800,0	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,1	5,0*10 <sup>-3</sup>	0,6	0,049	326,5	157881,7	49600,0	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,1	7,5*10 <sup>-3</sup>	0,9	0,074	216,2	236888,6	74400,0	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,1	0,01	1,2	0,099	161,6	315763,4	992000,0	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,2	9,72*10 <sup>-3</sup>	0,3	0,048	333,3	38365,3	24105,6	70*10 <sup>-3</sup>	70*10 <sup>-3</sup>
0,2	19,7*10 <sup>-3</sup>	0,6	0,097	164,9	77835,7	48905,6	70*10 <sup>-3</sup>	70*10 <sup>-3</sup>
0,125	3,89*10 <sup>-3</sup>	0,3	0,031	516,1	62889,97	24696,8	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,125	7,78*10 <sup>-3</sup>	0,6	0,061	262,3	125779,9	49393,66	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,125	0,0114	0,9	0,090	177,8	184304,8	72,376,32	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,125	0,0153	1,2	0,121	132,2	247356,4	97136,64	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,15	5,56*10 <sup>-3</sup>	0,3	0,037	432,4	52019,1	24513,42	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,15	0,01111	0,6	0,073	219,2	103944,6	48982,76	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,15	16,7*10 <sup>-3</sup>	0,9	0,110	145,5	155963,7	73496,18	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,15	22,2*10 <sup>-3</sup>	1,2	0,146	109,6	207889,3	97965,51	40*10 <sup>-3</sup>	40*10 <sup>-3</sup>
0,175	6,94*10 <sup>-3</sup>	0,3	0,039	410,3	40889,06	22479,93	70*10 <sup>-3</sup>	70*10 <sup>-3</sup>
0,175	13,9*10 <sup>-3</sup>	0,6	0,078	205,1	81837,04	44992,26	70*10 <sup>-3</sup>	70*10 <sup>-3</sup>
0,175	20,6*10 <sup>-3</sup>	0,9	0,116	137,9	121135,3	66597,62	70*10 <sup>-3</sup>	70*10 <sup>-3</sup>

### Выводы из данного исследования.

Выполнен анализ работы растворобетонасосов (бетонасосов) с целью определения основных показателей и технологических параметров процесса транспортирования бетонных смесей по трубопроводам.

Приведены табличные расчетные данные для смесей различной подвижности и трубопроводов различных диаметров.

### Литература

1. Мартынов В.Д. Строительные машины и монтажное оборудование / В.Д. Мартынов, Н.И. Алешин, Б.П. Морозов. – Москва: Машиностроение, 1990. – 352 с.
2. Бреховских Л.М. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн) / В.В. Гончаров. – М.: Наука, 1982. – 336 с.
3. Дворкин Л.И. Правило постоянства водопотребности бетонных смесей. Бетон и железобетон в Украине / Дворкин О.Л. // Научно технический и производственный журнал. – №1 2002 (11).

Надійшла до редакції 20.03.2014

©И.А. Емельянова, А.А. Задорожний, Н.А. Меленцов