

УДК 666.983

*И.А. Емельянова, д.т.н., профессор
А.А. Задорожний, 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 ϑ вдоль оси x . При этом распределение скоростей ϑ_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 ρ – плотность бетонной смеси;

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

P – давление в трубопроводе, МПа;

μ – динамическая вязкость, Па·с;

T – время, с;

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

Δ – 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 Δ 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

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

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 растворобетононасосов 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;

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

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 ³ /с (Q)	$\mu, Па \cdot с$	Re	$\vartheta_{mp}, м/с$	CD	$f_x, Па$	Fe, Н/м
3,5	0,775*10 ⁻³	4,14*10 ³	0,0114	0,395	1403,5	261452,1	41068,8
4	0,835*10 ⁻³	3,49*10 ³	0,0146	0,425	1095,9	237466,3	37301,1
5	0,895*10 ⁻³	2,93*10 ³	0,0187	0,456	855,6	213688,3	33566,1
6	0,91*10 ⁻³	2,78*10 ³	0,02	0,463	800,0	206146,6	32381,4
7	0,92*10 ⁻³	2,69*10 ³	0,0209	0,469	765,6	201664,8	31677,4
8	0,93*10 ⁻³	2,59*10 ³	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 ³ /с	ϑ_{mp} , м/с	Re	C_D	f_x , Па	F_e , Н/м	Наибольшая величина заполнителя d , м	
							при затратах цемента $> 300 \text{ кг/м}^3$	при затратах цемента $\leq 300 \text{ кг/м}^3$
7,5*10 ⁻³	1,25*10 ⁻³	0,3	0,016	1000	93559,5	22044,4	20*10 ⁻³	20*10 ⁻³
7,5*10 ⁻³	2,22*10 ⁻³	0,6	0,029	551,7	166161,7	39150,9	20*10 ⁻³	20*10 ⁻³
7,5*10 ⁻³	3,89*10 ⁻³	0,9	0,051	313,7	291157,3	68602,3	20*10 ⁻³	20*10 ⁻³
7,5*10 ⁻³	5,0*10 ⁻³	1,2	0,066	242,4	374238,1	88177,8	20*10 ⁻³	20*10 ⁻³
0,1	2,5*10 ⁻³	0,3	0,025	640,0	78940,9	24800,0	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,1	5,0*10 ⁻³	0,6	0,049	326,5	157881,7	49600,0	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,1	7,5*10 ⁻³	0,9	0,074	216,2	236888,6	74400,0	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,1	0,01	1,2	0,099	161,6	315763,4	992000,0	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,2	9,72*10 ⁻³	0,3	0,048	333,3	38365,3	24105,6	70*10 ⁻³	70*10 ⁻³
0,2	19,7*10 ⁻³	0,6	0,097	164,9	77835,7	48905,6	70*10 ⁻³	70*10 ⁻³
0,125	3,89*10 ⁻³	0,3	0,031	516,1	62889,97	24696,8	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,125	7,78*10 ⁻³	0,6	0,061	262,3	125779,9	49393,66	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,125	0,0114	0,9	0,090	177,8	184304,8	72,376,32	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,125	0,0153	1,2	0,121	132,2	247356,4	97136,64	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,15	5,56*10 ⁻³	0,3	0,037	432,4	52019,1	24513,42	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,15	0,01111	0,6	0,073	219,2	103944,6	48982,76	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,15	16,7*10 ⁻³	0,9	0,110	145,5	155963,7	73496,18	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,15	22,2*10 ⁻³	1,2	0,146	109,6	207889,3	97965,51	40*10 ⁻³	40*10 ⁻³
0,175	6,94*10 ⁻³	0,3	0,039	410,3	40889,06	22479,93	70*10 ⁻³	70*10 ⁻³
0,175	13,9*10 ⁻³	0,6	0,078	205,1	81837,04	44992,26	70*10 ⁻³	70*10 ⁻³
0,175	20,6*10 ⁻³	0,9	0,116	137,9	121135,3	66597,62	70*10 ⁻³	70*10 ⁻³

Выводы из данного исследования.

Выполнен анализ работы растворобетонасосов (бетононасосов) 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