

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

УДК 666.972.053-047.58

П. Г. АНОФРИЕВ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, эл.почта anofriev@mail.ru, ORCID 0000-0001-7997-3523

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ БЕТОННОЙ СМЕСИ В БЕТОНОВОДЕ АВТОБЕТОНОНАСОСА

Цель. В современном строительстве укладка бетона зачастую выполняется с помощью распределительного оборудования бетононасосов. Повышение производительности и качества этого вида строительных работ требует совершенствования, как бетононасосов, так и их технологической оснастки. В состав оснастки бетононасосов входят стандартизированные бетоноводы и соединительные колена радиусом до 2 м. Перспективным направлением улучшения оснастки является снижение сопротивления движению смеси по бетоноводу за счет увеличения радиуса колен. Целью исследования является определение целесообразности разработки и внедрения соединительных колен радиусом более 2 м. **Методика.** Критерием эффективности использования в соединительных бетоноводах колен радиусом более 2 м принято снижение сопротивления движению бетонной смеси по бетоноводу, обеспечивающее повышение производительности бетононасосов. Исследования сопротивления движению бетонной смеси в бетоноводах выполнены на имитационных математических моделях. **Результаты.** На предложенных моделях выполнены расчеты сопротивления движению бетонной смеси в бетоноводах автобетононасосов с трехсекционной распределительной стрелой. Снижение сопротивления движению смеси получено для четырех основных схем положения секций распределительной стрелы автобетононасоса. **Научная новизна.** Разработаны две имитационные математические модели для расчета удельного сопротивления движению бетонной смеси в коленах бетоноводов в зависимости от радиуса колен. **Практическая значимость.** Предложенные автором имитационные модели позволяют рассчитать удельное сопротивление движению бетона в коленах бетоновода и общее сопротивление движению смеси в бетоноводу автобетононасоса с тремя секциями распределительной стрелы. В процессе исследования установлено уменьшение на 10,3–75,5 % сопротивления движению бетона в бетоноводу с соединительными коленами увеличенного радиуса. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения колен бетоноводов с радиусом более 2 м.

Ключевые слова: бетононасос; бетонная смесь; бетоновод; вязкость; подвижность; сопротивление движению; математическая модель; имитационная модель

Введение

Интенсификация выполнения бетонных работ в современном строительстве немыслима без применения бетононасосов. Укладка бетона

с помощью распределительного оборудования бетононасосов осуществляется на сотни метров с высокой производительностью и хорошим качеством работ; сокращаются трудозатраты и сроки строительства.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

Исследованию работы бетононасосов и движению бетонных смесей по бетоноводам посвящены работы Алексева С. Н. [1], Баженова Ю. М. [3], Барляева К. М. [4], Бреховского Л. М. [5], Васильева В. М. [6]. Производительность бетононасосов определяется технологическими параметрами процесса транспортирования бетонных смесей по трубопроводам [10], физико-механическими свойствами бетона и характеристиками оснастки бетоноводов (диаметр, длина, радиус колен, материал). Проектирование составов бетона с рациональными физико-механическими свойствами рассмотрено в работах [11–13]. Реологические характеристики движущегося под действием высокого давления свежего бетона у стенки бетоновода анализируются в статье Deng Shou-chang (邓寿昌) [14].

Поведение бетонной смеси при транспортировании по трубкам с помощью бетононасосов описывают уравнением Шведова – Бингама [3], моделируют с использованием метода дискретных элементов [15] и исследуют на экспериментальных стендах.

Фактически, аналитические и экспериментальные исследования направлены на определение сопротивления движению смеси в бетононасосе и бетоноводом.

При выборе типа бетононасоса по его основной характеристике – величине давления на бетонную смесь, следует выполнить расчет потерь давления при движении смеси по бетоноводу.

Потери в трубопроводе P зависят от величины удельных сопротивлений движению бетонной смеси, общей длины бетоновода и величины его вертикального участка, а также от местных потерь напора в переходном конусе и коленах [13]:

$$P = \Delta P l + P_k + 0,024h,$$

где ΔP – удельное сопротивление движению бетонной смеси на 1 м горизонтального участка бетоновода, МПа/м; l – общая длина бетоновода, м; P_k – местные потери напора в переходном конусе и коленах бетоновода, МПа; $0,024h$ – потери напора, равные величине гидростатического давления бетонной смеси объемной массой равной 2 400 кг/м³ на вертикальном участке бетоновода высотой h м, МПа.

Цель

С целью определения целесообразности внедрения в комплект оснастки автобетононасосов колен радиусом более 2 м, были выполнены расчеты сопротивления движению смеси со штатными коленами радиусом 2 м и комплектом предлагаемых колен с радиусом большим 2 м для четырех возможных положений секций распределительной стрелы автобетононасоса (рис. 1).

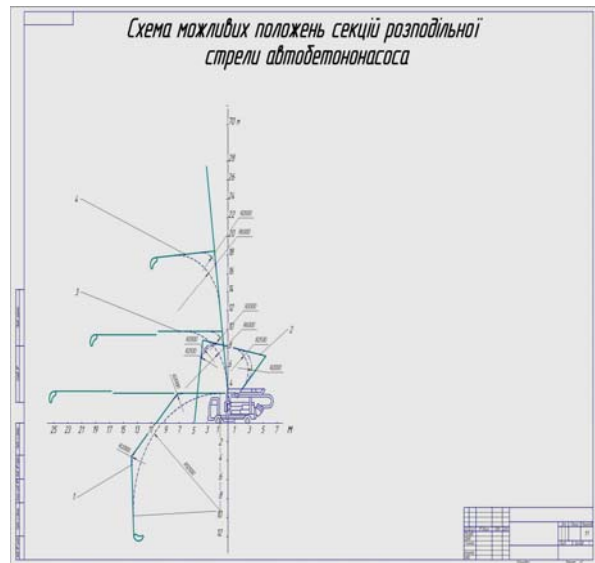


Рис. 1. Схемы возможных положений секций распределительной стрелы автобетононасоса

Fig. 1. Possible positions scheme of the distributor boom sections in a concrete pump

Методика

Исследование зависимости сопротивления движению бетонной смеси по колену бетоновода от радиуса колен выполнено на нескольких имитационных моделях в пакете Simulink [8,9] системы MATLAB [7].

Результаты

Имитационная модель сопротивления движению бетонной смеси по колену бетоновода (рис. 2), аппроксимированная показательной функцией [2] позволяет получить таблицу удельных значений падения давления в колене в зависимости от его радиуса при скорости движения смеси 0,5 м/с.

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

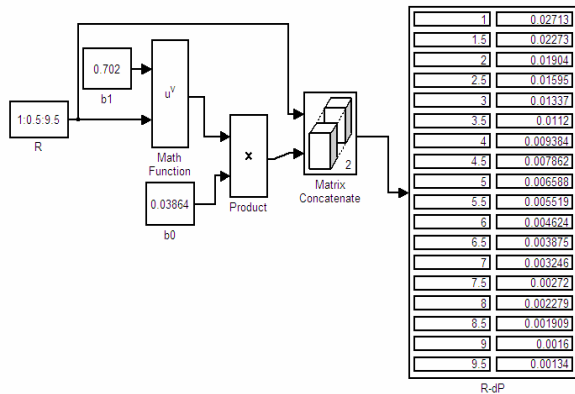


Рис. 2. Имитационная модель расчета удельных значений падения давления в колене в зависимости от его радиуса

Fig. 2. A simulation model for calculating the specific values of the pressure drop in the knee depending on its radius

Следующая имитационная модель сопротивления движению бетонной смеси по колену бетоновода (рис. 3), позволяет визуализировать результаты исследований в виде графиков удельных значений падения давления в колене в зависимости от его радиуса при скорости движения смеси 0,5; 1 и 2 м/с.

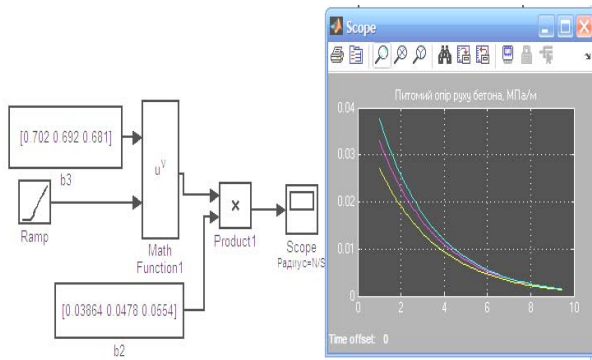


Рис. 3. Имитационная модель и расчетные графики удельных значений падения давления в колене в зависимости от его радиуса

Fig. 3. The simulation model and design graphs of specific values of pressure drops in the knee depending on its radius

Исследование общего сопротивления движению бетонной смеси по бетоноводу со штатными и новыми коленами проведено с помощью маскированной имитационной модели (рис. 4). Под маской «колена» находятся имитационные подсистемы полиномиальной

(рис. 5) или показательной (рис. 6) функций расчета сопротивлений в коленах бетоновода; под маской «пакет труб» – удельное сопротивление движению бетонной смеси горизонтального участка бетоновода; под маской «сосуд жидкости» – потери гидростатического давления бетонной смеси на 1 м вертикального участка бетоновода.

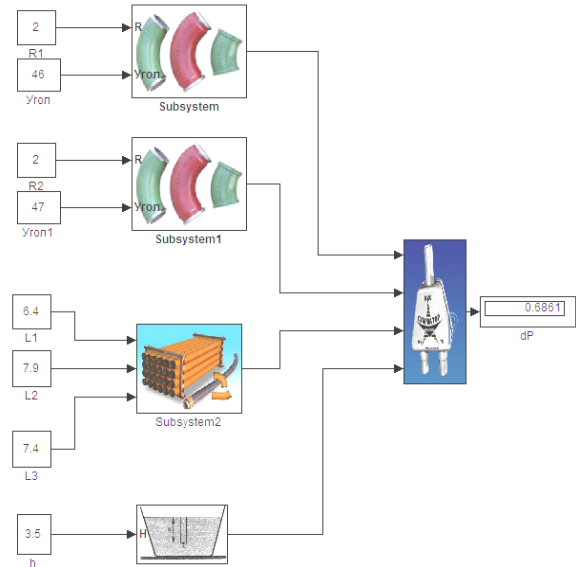


Рис. 4. Имитационная модель расчета сопротивления движению смеси в бетоновод с трехсекционной распределительной стрелой

Fig. 4. A simulation model for calculating the resistance to concrete movement in a concrete conveying pipe with a three-section distributor boom

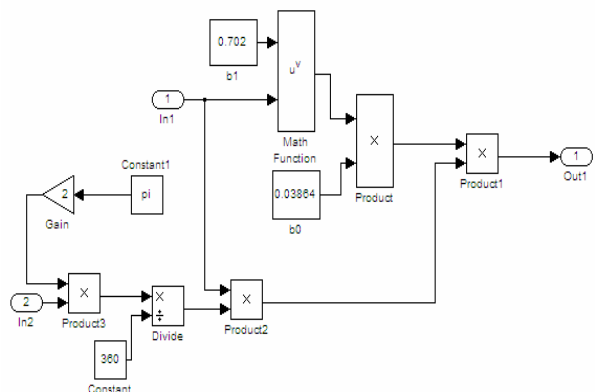


Рис. 5. Подсистема расчета сопротивлений в коленах по полиномиальной функции

Fig. 5. Subsystem of resistances calculation in the knees by a polynomial function

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

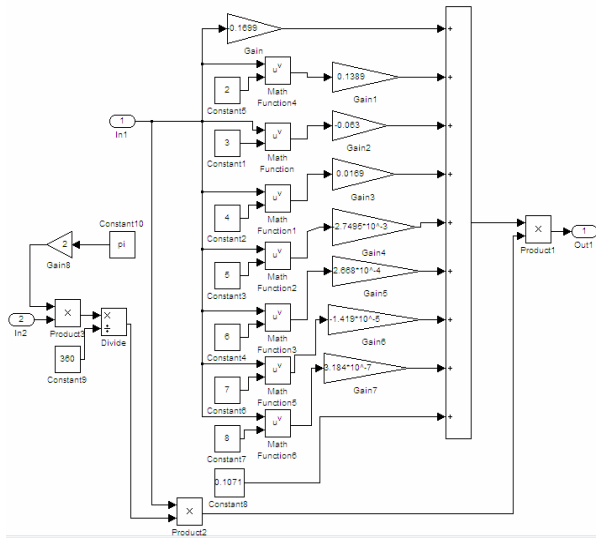


Рис. 6. Подсистема расчета сопротивлений в коленах по показательной функции

Fig. 6. Subsystem of resistances calculation in the knees by the exponential function

Результаты расчета сопротивления движению смеси в бетоноводе с трехсекционной распределительной стрелой сведены в таблицу и визуализированы диаграммами (рис. 7).

Таблица 1

Параметры бетоновода и сопротивление движению смеси в бетоноводе

Table 1

Parameters of the concrete conveying pipe and resistance to concrete movement in a concrete conveying pipe

№ схем		№ секции стрелы						
		1			2		3	
		R_1 , м	φ_1^0	L_1 , м	R_2 , м	φ_2^0	L_2 , м	L_3 , м
1	штат.	2	46	6,4	2	47	7,9	7,4
	новая	12,5	92	1	∞	0	0	2
2	штат.	2	123	1,7	2	92	3,4	6,7
	новая	2,5		0,75	2,5		1,95	6,2
3	штат.	2		4,9	∞	0	7,4	
	новая	6	82	1,4			3,9	8,8
4	штат.	∞	0	6,7	2	87	6,8	6,5
	новая				6		3	2,6

Окончание табл. 1

End of table 1

№ схем		h , м	$P_{\text{пок}}$, МПа	$P_{\text{пол}}$, МПа
1	штат.	3,5	0,686	0,678
	новая		0,168	-
2	штат.	8,5	0,641	0,623
	новая		0,575	0,564
3	штат.	10	0,82	0,813
	новая		0,631	0,7
4	штат.	19	1,012	1,05
	новая		0,804	0,878

Научная новизна и практическая значимость

Разработаны имитационные математические модели для расчета удельного сопротивления движению бетонной смеси в коленах бетоноводов в зависимости от радиуса колен.

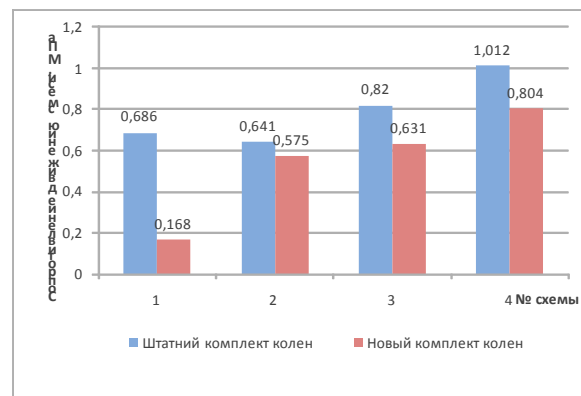


Рис. 7. Диаграммы потерь давления в бетоноводе

Fig. 7. Graphs of pressure loss in concrete conveying pipe

Анализ диаграмм (см. рис. 7) показывает снижение потерь давления в бетоноводе с коленами увеличенного радиуса по сравнению с потерь давления в бетоноводе со штатными коленами самого большого – 2-метрового радиуса. Снижение потерь давления в бетоноводе с коленами увеличенного радиуса для четырех

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

схем положений распределительной стрелы составляют:

- по первой схеме – 75,5 %;
- по второй схеме – 10,3 %;
- по третьей схеме – 23 %;
- по четвертой схеме – 20,5 %.

Снижение потерь давления в бетоноводе обеспечивает улучшение эксплуатационных характеристик автобетононасосов, повышается производительность и снижается себестоимость укладки бетонных смесей.

Полученные результаты исследований зависимости сопротивления движению смеси бетона по бетоноводу позволяют предложить к внедрению в эксплуатацию на автобетононасосах расширенный комплект колен бетоновода с радиусами 2,5–12 м.

Выводы

1. Построены имитационные модели, определяющие удельное сопротивление движению бетона в коленах бетоновода.

2. Построены имитационные модели, определяющие сопротивление движению бетона в бетоноводе автобетононасоса с тремя секциями распределительной стрелы.

3. Исследовано сопротивление движению бетона в бетоноводе автобетононасоса с тремя секциями распределительной стрелы со штатными и новыми коленами увеличенного радиуса.

4. Целесообразно расширить штатный комплект соединительных колен бетоновода, так как для четырех основных возможных схем положения распределительной стрелы автобетононасоса с коленами увеличенного радиуса установлено уменьшение на 10,3–75,5 % сопротивления движению бетона в бетоноводе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, С. Н. Насосный транспорт бетонной смеси / С. Н. Алексеев // Всесоюз. науч.-исслед. ин-т оснований и фундаментов. – Москва : Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1952. – 40 с.
2. Анофриев, П. Г. Математические модели сопротивления движению бетонной смеси в коленах бетоноводов / П. Г. Анофриев, И. Ю. Хрупалов, В. С. Буров // Стр-во. Материаловеде-

- ние. Машиностроение. Сер. Подъемно-трансп., строител. и дорож. машины и оборудование. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 79. – С. 253–260.
3. Баженов, Ю. М. Технология бетона : учебник / Ю. М. Баженов. – Москва : АСВ, 2002. – 500 с.
4. Барляев, К. М. Бетононасосы / К. М. Барляев, С. Н. Алексеев. – Москва : Машгиз, 1953. – 147 с.
5. Бреховских, Л. М. Введение в механику сплошных сред (в приложении к теории волн) / Л. М. Бреховских, В. В. Гончаров. – Москва : Наука, 1982. – 336 с.
6. Васильев, В. М. Режим движения бетонной смеси по бетонопроводу / В. М. Васильев // Строит. пром-сть. – 1963. – № 7. – С. 42–44.
7. Гультяев, А. К. MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows : практ. пособие / А. К. Гультяев. – Санкт-Петербург : Корона, 1999. – 288 с.
8. Дьяконов, В. Simulink 4. Специальный справочник / В. Дьяконов. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 528 с.
9. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / В. Дьяконов, В. Круглов. – Санкт-Петербург : Питер, 2002. – 528 с.
10. Емельянова, И. А. Влияние технологических параметров процесса транспортирования бетонных смесей по трубопроводам на производительность растворобетононасосов (бетононасосов) / И. А. Емельянова, А. О. Задорожный, М. О. Меленцов // 36. наук. пр. Серія : галузеве машинобуд., буд-во / Полтав. нац. тех. ун-т. – Полтава, 2014. – № 1 (40). – С. 3–8.
11. Нетеса, Н. И. Проектирование составов бетонов с рациональным зерновым составом компонентов / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 22. – С. 101–105.
12. Пшінько, О. М. Вплив суперпластифікатора С-3 на основні властивості бетонної суміші і бетону / О. М. Пшінько, Т. І. Афанасьева // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2008. – Вип. 25. – С. 102–104.
13. Руководство по укладке бетонных смесей бетононасосными установками / ЦНИИОМТП ГОССТРОЯ СССР ; Народ. предприятие стрит.-монтаж. комбинат «ОСТ» Минстроя ГДР. – Москва : Стройиздат, 1978. – 144 с.
14. Rheological characteristic of cement clean paste and flowing behavior of fresh mixing concrete

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

- with pumping in pipeline / Deng Shou-chang (邓寿昌), Zhang Xue-bing (张学兵), Qin Ying-hui (覃银辉), Luo Guan-xiang (罗冠祥) // J. of Central -South University of Technology. – 2007. – Vol. 14. – Iss. 1. – P. 462–465. doi: 10.1007/s11771-007-0307-6.
15. Simulation of Fresh Concrete Flow Using Discrete Element Method (DEM) / V. Mechtcherine, A. Gram, K. Krenzer [et al.] // Simulation of Fresh Concrete Flow. – 2014. – Vol. 15. – P. 65–98. doi: 10.1007/978-94-017-8884-7_3.

П. Г. АНОФРІЄВ^{1*}

^{1*}Каф. «Прикладна механіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 18, ел. пошта anofriev@mail.ru, ORCID 0000-0001-7997-3523

ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ОПОРУ РУХУ БЕТОННОЇ СУМІШІ В БЕТОНОВОДІ АВТОБЕТОНОНАСОСА

Мета. У сучасному будівництві укладання бетону найчастіше виконується за допомогою розподільного обладнання бетононасосів. Підвищення продуктивності та якості цього виду будівельних робіт вимагає вдосконалення, як бетононасосів, так і їх технологічної оснастки. До складу оснастки бетононасосів входять стандартизовані бетоноводи та сполучні коліна радіусом до 2 м. Перспективним напрямом поліпшення оснастки є зниження опору руху суміші по бетоноводу за рахунок збільшення радіусу колін. Метою дослідження є визначення доцільності розробки та впровадження сполучних колін радіусом більше 2 м. **Методика.** Критерієм ефективності використання в сполученнях бетоноводів колін радіусом більше 2 м прийнято зниження опору руху бетонної суміші по бетоноводу, що забезпечує підвищення продуктивності бетононасосів. Дослідження опору руху бетонної суміші в бетоноводах виконані на імітаційних математичних моделях. **Результати.** На запропонованих моделях виконані розрахунки опору руху бетонної суміші по бетоноводу автобетононасоса з трьохсекційною розподільною стрілою. Зниження опору руху суміші отримано для чотирьох основних схем положення секцій розподільної стріли автобетононасоса. **Наукова новизна.** Розроблено дві імітаційні математичні моделі для розрахунку питомого опору руху бетонної суміші в колінах бетоноводів в залежності від радіуса колін. **Практична значимість.** Запропоновані автором імітаційні моделі дозволяють розрахувати питомий опір руху бетону в колінах бетоновода та загальний опір руху суміші в бетоноводі автобетононасоса з трьома секціями розподільної стріли. У процесі дослідження встановлено зменшення на 10,3–75,5 % опору руху бетону в бетоноводі зі з'єднувальними колінами збільшеного радіусу. Отримані результати підтверджують доцільність застосування колін бетоноводів із радіусом більше 2 м.

Ключові слова: бетононасос; бетонна суміш; бетоновод; в'язкість; рухливість; опір руху; математична модель; імітаційна модель

Р. G. ANOFRIEV^{1*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 18, e-mail anofriev@mail.ru, ORCID 0000-0001-7997-3523

SIMULATION MODELS OF RESISTANCE TO CONCRETE MOVEMENT IN THE CONCRETE CONVEYING PIPE OF THE AUTOCONCRETE PUMP

Purpose. In modern construction the placing of concrete is often performed using distribution equipment of concrete pumps. Increase of productivity and quality of this construction work requires improvement of both concrete pumps and their tooling. The concrete pumps tooling consists of standardized concrete conveying pipes and connector bends radius of up to 2 m. A promising direction of tooling improvement is the reduce of resistance to

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

movement of the concrete in the concrete conveying pipe by increasing the radius of the bend. The aim of this study is to determine the feasibility of developing and implementing connector bends with radius greater than 2 m. **Methodology.** The criterion of efficiency in using bends with radius of more than 2 m in connector concrete pipes is reduction of resistance to movement of the concrete, enhancing the productivity of concrete pumps. Studies of resistance to movement of concrete in the concrete conveying pipe are performed on the mathematical simulations. **Findings.** On the proposed models are calculated the resistance to movement of concrete in the concrete conveying pipe of the autoconcrete pump with a three-section distribution boom. Reduction of the resistance to concrete movement was obtained for the four major sections of the provisions of the distribution boom in the autoconcrete pump. **Originality.** Two mathematical simulations were developed to calculate the resistivity to concrete movement in the bends of concrete conveying pipe depending on the radius of the bend. **Practical value.** The proposed by the author simulations allow us to calculate resistivity to the concrete movement in the concrete conveying pipe and general resistance to the concrete movement in the concrete pipe of the autoconcrete pump with three sections of the distribution boom. The study found a decrease of 10.3–75.5% of the resistance to concrete movement in the concrete conveying pipe with connector bends of an increased radius. These results confirm the usefulness of the bends application in the concrete conveying pipe with a radius of more than 2 m.

Keywords: concrete pump; concrete; concrete conveying pipe; viscosity; agility, resistance to movement; mathematical model; simulation

REFERENCES

1. Alekseyev S.N. Nasosnyy transport betonnoy smesi [Pump transport of concrete mixtures]. *Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut osnovaniy i fundamentov* [All-Union Scientific Research Institute of Bases and Foundations]. Moscow, Gosudarstvennoye izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1952. 40 p.
2. Anofriev P.G., Khrupalov I.Yu., Burov V.S. Matematicheskiye modeli soprotivleniya dvizheniyu betonnoy smesi v kolenakh betonovodov [Mathematical models of resistance to concrete movement in the bends of concrete conveying pipe]. *Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroeniye. Seriya Podemno-transportnyye, stroitelnyye i dorozhnyye mashiny i oborudovaniye* [Building. Materials Science. Mechanical Engineering. Series Lifting transport, building and road machines and equipment]. Dnepropetrovsk, PGASA Publ., 2014, issue 79, pp. 253-260.
3. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Technology of concrete]. Moscow, ASV Publ., 2002. 500 p.
4. Barlyayev K.M., Alekseyev S.N. *Betononasosy* [Concrete pumps]. Moscow, Mashgiz Publ., 1953. 147 p.
5. Brekhovskikh L.M., Goncharov V.V. *Vvedeniye v mekhaniku sploshnykh sred (v prilozhenii k teorii voln)* [Introduction to continuum mechanics (in application to wave theory)]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 336 p.
6. Vasilev V.M. Rezhim dvizheniya betonnoy smesi po betonoprovodu [The mode of movement of the concrete mix for the concrete wire]. *Stroitel'naya promyshlennost – Construction Industry*, 1963, no. 7, pp. 42-44.
7. Gulyayev A.K. *MATLAB 5.2. Imitatsionnoyye modelirovaniye v srede Windows* [MATLAB 5.2. Imitation modeling in Windows environment]. Saint-Petersburg, Korona Publ., 1999. 288 p.
8. Dyakonov V. *Simulink 4* [Simulink 4]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002. 528 p.
9. Dyakonov V., Kruglov V. *Matematicheskiye pakety rasshireniya MATLAB* [Mathematical extension package MATLAB]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002. 528 p.
10. Yemlyanova I.A., Zadorozhnyy A.O., Melentsov M.O. Vliyaniye tekhnologicheskikh parametrov protsessa transportirovaniya betonnykh smesey po truboprovodam na proizvoditelnost rastvorobetononasosov (betononasosov) [The influence of technological parameters of the transport process of concrete through pipelines on the productivity of mortar concrete pumps (concrete pumps)]. *Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo* [Proc. Series: Industrial Engineering, Construction], 2013, vol. 1, no. 1 (36), pp. 3-8.
11. Netesa N.I., Palanchuk D.V. Proyektirovaniye sostavov betonov s ratsionalnym zernovym sostavom komponentov [The concrete structures design with rational grain structure components]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 22, pp. 101-105.
12. Pshinko O.M., Afanasieva T.I. Vplyv superplastyfikatora C-3 na osnovni vlastyvoli betonnoi sumishi i betonu [The influence of superplasticizer C-3 on the properties of concrete mixes and concrete]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of

НЕТРАДИЦІЙНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ. МАШИНИ ТА МЕХАНІЗМИ

- Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 25, pp. 102-104.
13. *Rukovodstvo po ukladke betonnykh cmesey betononasosnymi ustanovkami* [Manual of laying the concrete mixtures by the concrete-pumping stations]. Moscow, Stroyisdat Publ., 1978. 144 p.
 14. Deng Shou-chang (邓寿昌), Zhang Xue-bing (张学兵), Qin Ying-hui (覃银辉), Luo Guan-xiang (罗冠祥). Rheological characteristic of cement clean paste and flowing behavior of fresh mixing concrete with pumping in pipeline. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, vol. 14, issue 1, pp. 462-465. doi: 10.1007/s11771-007-0307-6.
 15. Viktor Mechtcherine, Annika Gram, Knut Krenzer Simulation of Fresh Concrete Flow Using Discrete Element Method (DEM). *Simulation of Fresh Concrete Flow*, 2014, vol. 15 of the series RILEM State-of-the-Art Reports, pp. 65-98. doi: 10.1007/978-94-017-8884-7_3.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. С. В. Ракишой (Украина); д.т.н., проф. С. В. Шатовым (Украина)

Поступила в редколлегию 11.06.2015

Принята к печати 17.08.2015