



РАБОТА БЕТОНОНАСОСОВ В СЕТИ

Н.Л. Великанов¹, В.А. Наумов², С.И. Корягин³

^{1,3}*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. Канта), 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14;*

²*Калининградский государственный технический университет (КГТУ), 236000, г. Калининград, Советский пр., 1*

В статье представлен усовершенствованный алгоритм расчета перекачиваемой бетонной смеси в рамках ранее разработанного авторами метода гидравлического расчета насосных установок. В качестве примера рассматривается расчет перекачиваемой бетонной смеси в условиях возведения небоскреба. Представлена диаграмма производительности бетононасоса Putzmeister BSA 14000 SHP-D в трех видах: экспериментальные данные, полученные при строительстве небоскреба; теоретическая диаграмма, предоставленная производителем насоса; зависимость потерь давления от расхода, рассчитанная по предложенному авторами алгоритму.

Ключевые слова: бетонная смесь, гидравлический расчет, бетононасос

OPERATION OF CONCRETE PUMPS IN THE NETWORK

N. L. Velikanov, V. A. Naumov, S. I. Koryagin

The Baltic federal university of Immanuel Kant (BFU of Kant), 236041, Kaliningrad, st. A. Nevsky, 14; Kaliningrad State Technical University (KSTU), 236000, Kaliningrad, Sovetsky Ave., 1

The article presents an improved algorithm for calculating the pumped concrete mixture in the framework of the previously developed method of hydraulic calculation of pumping units. As an example, the calculation of the pumped concrete mixture in the conditions of construction is considered. The performance diagram of Putzmeister BSA 14000 SHP-D concrete pump in three types is presented: experimental data obtained during the construction of a skyscraper; theoretical diagram provided by the pump manufacturer; dependence of pressure losses on the flow calculated according to the algorithm proposed by the authors.

Keywords: concrete mix, hydraulic calculation, concrete pump

Разработка эмпирических зависимостей для расчетов характеристик бетононасосов, работающих в различных сетях (строительная площадка, завод, удаленный объект) является актуальной задачей [1-6].

В работе [7] рассматривается проблема интеграции планирования производства товарного бетона и диспетчеризации автотранспорта и насосов на заводе с несколькими бетонными узлами. Предложена пространственно-временная модель сети, объединяющая производство и диспетчеризацию транспортных средств. Для решения этой проблемы разработан эвристический алгоритм с восемью наборами совместных правил приоритета для планирования производства, диспетчеризации грузовых автомобилей и насосов, планирования работы бетонных узлов/

Для изучения возможности использования смешанных строительных отходов в качестве засыпного заполнителя, который может быть помещен под землей в шахте, были проведены физико-химические оценки, испытания и эксперименты по прокачиваемости получаемой бетонной смеси [8].

Обширные полевые наблюдения показывают [9], что при доставке и размещении готового бетона зачастую происходит потеря информации о сроках его укладки. Это создает проблемы в контроле качества бетона.

Промышленное производство товарного бетона является одним из лидеров в строительной отрасли. Статистика показывает, что использование и спрос на бетон увеличиваются наряду с количеством производителей и рабочих [10].

¹*Великанов Николай Леонидович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроения и технических систем, БФУ им. И. Канта, тел. 8 (4012) 595 585; e-mail: monolit8@yandex.ru;*

²*Наумов Владимир Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования, КГТУ, тел. 8 (4012) 99 53 37; e-mail: vladimir.naumov@klgtu.ru;*

³*Корягин Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, директор инженерно – технического института, БФУ им. И. Канта, тел. 8 (4012) 595 585; e-mail: SKoryagin@kantiana.ru*

В работе [11] изучались реологические свойства цементных паст при различных дозировках добавляемых полимеров. Критерием являлась достаточная текучесть с течением времени для смешивания, транспортировки, нагнетания и отливки в форму бетона на строительных площадках.

В работе [12] представлены результаты систематических исследований применения бетононасосов при транспортировке бетона на большие расстояния. Описаны полномасштабные полевые испытания для проверки поведения бетона, насоса, их взаимодействия и работы персонала. Установлено, что погода, а именно температура окружающей среды, существенно влияют на свойства бетона.

Среди современных бетононасосов наибольшую популярность завоевали поршневые бетононасосы с гидравлическим приводом. Для подбора и эффективного использования бетононасосов важно иметь надежный инженерный метод их расчета. Особенно это актуально для супермощных агрегатов. Авторами был разработан метод гидравлического расчета насосных установок, включающий стационарные бетононасосы и бетоноводы [13]. Моделировались зависимости подачи Q от давления P , оказываемого на смесь плунжерным насосом, по диаграммам, представляемым производителями: $P = f(Q)$. Для расчета гидравлических потерь использовалась эмпирическая зависимость [14]:

$$P = \Delta P + \gamma \cdot g \cdot H, \quad \Delta P = \frac{4L}{d} \cdot (\tau_0 + b \cdot V),$$

где ΔP – потери давления на транспортирование смеси по бетоноводу, Па;

L – приведенная (расчетная) длина трубопровода, м;

d – внутренний диаметр бетоновода, м;

γ – объемная масса бетонной смеси, кг/м³;

V – средняя (по расходу) скорость движения смеси, м/с;

τ_0 – предельное напряжение сдвига бетонной смеси, Па;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H – высота подачи бетонной смеси, м; b – коэффициент скорости, Па·с/м.

По рекомендации [14] для определения L к фактической длине трубопровода L_0 прибавляется по 1 м горизонтальной подачи смеси на каждые 10° поворота бетоновода. В [15, 16] на основе экспериментальных данных о реологических характеристиках была получена регрессионная модель зависимости предельного напряжения сдвига τ_0 и коэффициента скорости b от осадки конуса. Ограниченность такой статистической модели заключается в том, что расчеты можно проводить для ограниченного ряда исследованных бетонных смесей.

Чтобы была возможность более широкого использования метода расчета, в том числе для модифицированных бетонных смесей, требуется использовать реологическую модель. Известно несколько моделей, используемых для расчета расхода для перекачиваемых бетонных смесей.

Одна из них – формула Букингама-Рейнера (Buckingham-Reiner) (см., например, [17]):

$$Q = \frac{\pi d^4}{128\eta} \cdot \frac{\Delta P}{L} \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{4\tau_0}{\Delta P/L} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{4\tau_0}{\Delta P/L} \right)^4 \right]. \quad (1)$$

В формуле (1) предельное напряжение сдвига τ_0 и пластическая (структурная) вязкость η определяются при стандартном реологическом изучении бетонной смеси с помощью вискозиметра.

В [18] предложены формулы

$$\Delta P = \frac{4L}{d} \cdot \left(\tau_t + \frac{4Q}{\pi d^2} \cdot \frac{\eta_t}{k} \right), \quad (2)$$

$$\Delta P = \frac{4L}{d} \cdot \left(\tau_t + \frac{\frac{4Q}{\pi d^2} \cdot \frac{\eta_t}{k} - \frac{d \cdot \tau_t}{8\eta_t} + \frac{d \cdot \tau_0}{6\eta}}{1 + \eta_t \cdot d / (8\eta)} \cdot \eta_t \right), \quad (3)$$

где k – коэффициент заполнения, в первом приближении можно принять равным единице. Для использования формул (2), (3), кроме указанных ранее величин, требуется определить с помощью приборов параметры τ_t (Па) и η_t (Па·с/м) на поверхности между внутренним цилиндром и бетонной смесью.

Обращает на себя сходство формул (1) и (2). Поэтому в оценочных расчетах по формуле (2) заменим τ_t на τ_0 , а для параметра η_t воспользуемся рекомендацией [11]:

$$\eta_t \approx \frac{\eta}{\delta} = \frac{\eta}{r - r_0} = \frac{\eta}{0,5d - 2\tau_0 / (\Delta P / L)}, \quad (4)$$

где δ – толщина пристеночного слоя в модели Бингама.

Тогда расход и градиент давления по расходу придется находить из уравнений

$$\frac{\Delta P \cdot d}{4L} - \tau_0 - \frac{4Q}{\pi d^2} \cdot \frac{\eta}{0,5d - 2\tau_0 / (\Delta P / L)} = 0, \quad (5)$$

$$Q \approx \frac{\pi d^2}{4\eta} \cdot \left(\frac{d}{2} - \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot L}{\Delta P} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P \cdot d}{4L} - \tau_0 \right). \quad (6)$$

В работе [19] была проверена возможность использования формулы (1) для расчета расхода перекачиваемой бетонной смеси. В результате расчетов получалось от 20 до 40 % измеренных значений расхода, т.е. ε , относительно

ная ошибка расчета по формуле (7), составляла от 60 до 80 %:

$$\varepsilon = (1 - Q_{расч} / Q_{измер}) \cdot 100\% . \quad (7)$$

Проверим возможность использования формулы (6). В табл. 1 представлены результаты измерений характеристик перекачиваемых бетонных смесей, приведенные в [19]. Во всех опытах неизменными оставались $\tau_0 = 0,1$ Па; $d = 0,125$ м. Обращает на себя внимание завышенное значение измеренного расхода в 5-м опыте.

Расчет по одним и тем же данным по формуле (1) здесь и в [19] должен давать одинаковые результаты. В табл. 2 получено, что в условиях опыта 3 и, особенно, опыта 5, получаются разные значения расхода. Если результат расчета по 3-му опыту не отклонился от

других результатов, то 5-й имеет признаки ошибки. Возможно, это опечатка в значении расхода в табл. 1. В дальнейшем строку 5 в табл. 2 исключим из рассмотрения.

Таблица 1 – Результаты измерений характеристик перекачиваемых бетонных смесей [19]

№ пп	L_0 , м	η , Па·с	P , МПа	Q , м ³ /час
1	400	107,0	10,7	18,9
2	400	71,9	12,4	31,4
3	700	49,3	8,8	23,7
4	700	143,0	12,0	11,9
5	1000	96,0	17,8	29,1
6	1000	126,0	18,1	12,7
7	1000	71,4	17,1	18,6

Таблица 2 – Результаты расчета расхода бетонных смесей при условиях опытов [19]

№ пп	в [13]	по формуле (1)		по (6), $L = L_0$		по (6), $L = 1,07 \cdot L_0$	
	Q , м ³ /час	Q , м ³ /час	ε , %	Q , м ³ /час	ε , %	Q , м ³ /час	ε , %
1	5,4	5,39	-71,5	21,6	14,1	29,2	6,6
2	9,3	9,30	-70,4	37,2	18,5	34,8	10,7
3	2,8	5,50	-76,8	22,0	-7,2	20,6	-13,3
4	2,6	2,59	-78,3	10,3	-13,1	9,7	-18,8
5	12,5	4,01	-86,3	16,0	-45,0	14,9	-48,6
6	3,1	3,10	-75,6	12,4	-2,4	11,6	-8,8
7	5,2	5,17	-72,2	20,7	11,1	19,3	3,8

Вначале был выполнен расчет по формуле (6) при длинах бетоновода из табл. 1 ($L = L_0$). Относительная ошибка расчетного значения расхода по модулю оказалась в пределах 19%, что значительно лучше, чем при расчете по формуле (1). Можно еще уменьшить ε , если учесть местные гидравлические потери в коленах бетоновода, как в последнем столбце табл. 2, где принято $L = L_0$.

Далее формула (6) была использована при расчетах перекачиваемой бетонной смеси в условиях возведения небоскреба Бурдж-Халифа (табл. 3). Во всех опытах длина бетоновода $L_0 = 659$ м; внутренний диаметр $d = 0,15$ м; высота, на которую поднималась бетонная смесь $H = 576$ м. P – это давление на выходе насоса. Гидравлические потери в бетоноводе рассчитаны по формуле

$$\Delta P = P - \gamma \cdot g \cdot H . \quad (8)$$

Результаты расчета расхода по формуле (1) здесь и в [19], практически, совпали (табл. 4). Следовательно, ошибок измерений или опечаток таблица результатов измерений не содержит. Как и в предыдущем случае, применение

формулы (6) значительно снижает относительную ошибку расчета расхода.

Таблица 3 – Результаты измерений характеристик перекачиваемых бетонных смесей при строительстве небоскреба Бурдж-Халифа [19]

№ пп	τ_0 , Па	η , Па·с	Q , м ³ /час	P , МПа	ΔP , МПа
1	0,1	44,1	21,3	17,1	5,13
2	29,4	73,6	21,8	18,0	5,71
3	32,5	70,5	18,8	17,9	5,49
4	29,3	75,5	19,4	17,6	6,18

В [20] описан процесс подачи бетонной смеси на большую высоту на строительстве небоскреба. Были использованы 3 супермощных бетононасоса немецкой компании Putzmeister серии BSA 14000. Производителем представлены упрощенные диаграммы производительности бетононасосов [15], в том числе BSA 14000 SHP-D.

Таблица 4 – Результаты расчета расхода бетонных смесей при строительстве небоскреба Бурдж-Халифа

№ пп	По (1) и в [13]		По (6), $L = L_0$		По (6), $L = 1,07 \cdot L_0$	
	Q , м ³ /час	ε , %	Q , м ³ /час	ε , %	Q , м ³ /час	ε , %
1	7,9	-62,9	31,6	48,3	29,5	38,5
2	5,1	-76,6	17,4	-20,1	16,0	-26,4
3	5,1	-72,9	17,0	-9,8	15,6	-17,0
4	4,5	-76,8	15,1	-22,2	13,9	-28,4

На рис. 1 линия 1 состоит из горизонтальной прямой, дуги гиперболы и вертикальной прямой. Экспериментальные точки, полученные при сравнительно небольших расходах, говорят о том, что давление $P = f(Q)$ при уменьшении Q не остается постоянным, а уменьшается.

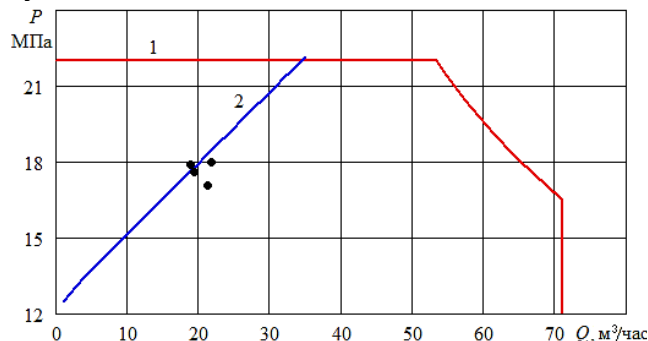


Рисунок 1 – Диаграмма производительности бетононасоса Putzmeister BSA 14000 SHP-D: точки – экспериментальные данные, полученные при строительстве небоскреба Бурдж-Халифа [19]; 1 – теоретическая диаграмма, предоставленная производителем [20], 2 – зависимость потерь давления от расхода, рассчитанная по уравнению (5)

На рис. 2 показаны результаты расчета гидравлических потерь в бетоноводе насоса Putzmeister BSA 14000 SHP-D при горизонтальном участке длиной 83 м (как в [20]) и различной высоте подачи. На наклонном участке диаграммы производительность приводит затрачиваемую мощность бетононасоса $N = 470$ кВт [9]. Полезную мощность на указанном участке можно рассчитать по диаграмме: $N_{\text{п}} = Q \cdot P = 326$ кВт, что соответствует коэффициенту полезного действия 69 %. По рис. 3 такой КПД будет при высоте подачи от 275 м примерно до 455 м. При $H > 455$ м КПД начнет падать. При $H < 275$ м использовать данный бетононасос нецелесообразно, его работа может быть неустойчивой.

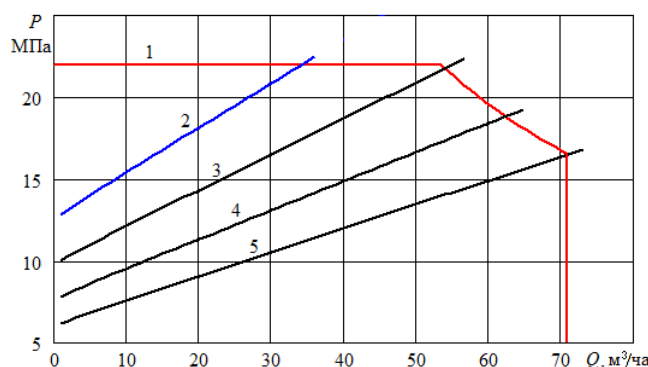


Рисунок 2 – Расчет гидравлических потерь в бетоноводе насоса Putzmeister BSA 14000 SHP-D: 1 – теоретическая диаграмма; 2 – зависимость потерь давления от расхода, рассчитанная по уравнению (5)

при $H = 576$ м; 3 – $H = 450$ м; 4 – $H = 350$ м; 5 – $H = 275$ м

На рис. 3, 4 показаны результаты расчета гидравлических потерь в бетоноводе насоса Putzmeister BSA в зависимости от плотности бетонной смеси, и от ее пластической вязкости.

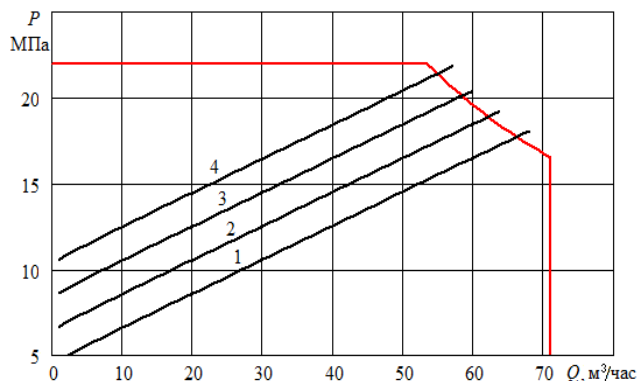


Рисунок 3 – Расчет гидравлических потерь в бетоноводе насоса Putzmeister BSA в зависимости от плотности бетонной смеси при $H = 400$ м; $\eta = 73,6$ Па·с: 1 – $\rho = 1000$ кг/м³; 2 – $\rho = 1500$ кг/м³; 3 – $\rho = 2000$ кг/м³; 4 – $\rho = 2500$ кг/м³

Описанные выше этапы расчета насосной установки можно представить в виде алгоритма. Алгоритм расчета включает в себя четыре этапа.

1. Экспериментальное определение следующих характеристик бетонной смеси: плотности, $[\rho] = \text{кг/м}^3$; пластической вязкости, $[\eta] = \text{Па·с}$; предельного напряжения сдвига $[\tau_0] = \text{Па}$.

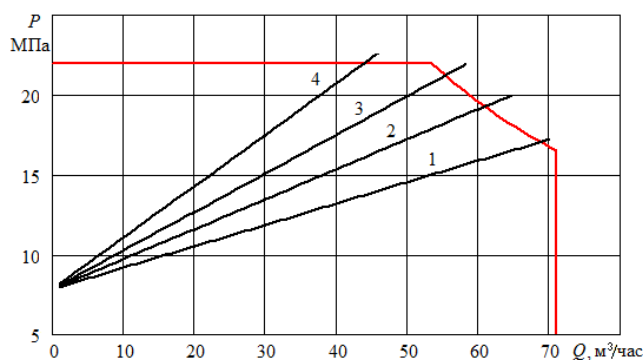


Рисунок 4 – Расчет гидравлических потерь в бетоноводе насоса Putzmeister BSA в зависимости от пластической вязкости бетонной смеси при $H = 400$ м; $\rho = 2000$ кг/м³: 1 – $\eta = 50$ Па·с; 2 – $\eta = 70$ Па·с; 3 – $\eta = 90$ Па·с; 4 – $\eta = 120$ Па·с

2. Определение зависимости гидравлических потерь в бетоноводе ΔP от расхода Q по его длине L и внутреннему диаметру d с помощью уравнения (5) с учетом потерь в коленах. Потребный напор насоса

$$P_L(Q) = \Delta P(Q) + \gamma g H. \quad (9)$$

3. Уточнение диаграммы бетононасоса, предоставляемой производителем

$$P_H(Q) = f(Q). \quad (10)$$

Требует нахождения контрольных точек диаграммы P–Q, особенно в области низких расходов, где точность диаграммы невысока.

4. Совместное решение уравнений (9)–(10) для расчета расхода в рабочей точке насосной установки.

Пересечение графика зависимости потерь давления с диаграммой производительности отличается от рабочей точки центробежного насоса. После определения расхода в указанной точке необходимо подобрать соответствующую этому расходу частоту вращения коленвала бетононасоса.

Нецелесообразно использовать бетононасос, если график зависимости потерь давления в сети расхода пересекает горизонтальную линию диаграммы производительности (4 на последнем рис. 4). Так как будет срабатывать предохранительный клапан, КПД насосной установки упадет.

Литература

1. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Анализ характеристик плунжерных насосов.-Вестник машиностроения. 2018. № 3. С. 25-27.
2. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Определение производительности поршневого бетононасоса.-Технико-технологические проблемы сервиса. 2018. № 2 (44). С. 8-11.
3. Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A. Characteristics of plunger pumps.-Russian Engineering Research. 2018. T. 38. № 6. С. 428-430.
4. Naumov V., Velikanov N. Consideration of the characteristics of the concrete mix when choosing concrete pump.- В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. С. 032017.
5. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Расчет характеристик трехплунжерных насосов.-Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 11 (704). С. 60-67.
6. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Определение дальности подачи смеси бетононасосом при работе в сети.-Технико-технологические проблемы сервиса. 2018. № 4 (46). С. 7-10.
7. Liu Z.Y., Zhang Y.K., Yu M.H., Zhou X.L. Heuristic algorithm for ready-mixed concrete plant scheduling with multiple mixers. - Automation in construction. 2017. V. 84. Pp. 1-13. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.08.013.
8. Chen Q.S., Zhang Q.L., Xiao C.C., Chen X. Backfilling behavior of a mixed aggregate based on construction waste and ultrafine tailings. - Plos one. 2017. V. 12. I. 6. Article number e0179872. DOI: 10.1371/journal.pone.0179872.

9. Moon S., Zekavat P.R., Bernold L.E. Dynamic Quality Control of Process Resource to Improve Concrete Supply Chain. - Journal of construction engineering and management. 2017. V. 143. I. 5. Article number 04016130. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001270.
10. Akboga O., Baradan S. Safety in ready mixed concrete industry: descriptive analysis of injuries and development of preventive measures. - Industrial health. 2017. V. 55. I.1. Pp. 54-66.
11. Erzenegin S.G., Bodur A., Ozkorucuklu S.P., Yildirim G., Coban O. Applications of sulfonate-carboxylate copolymers in cement. - Advances in cement research. 2016. V. 28. V. 10. Pp. 630-642. DOI: 10.1680/jadcr.15.00134.
12. Hazaree C.V., Mahadevan V. Single-Stage Pumping of Concrete up to 2.432 km (1.51 miles): Admixture, Mixture, and Full-Scale Trials. - Journal of materials in civil engineering. 2016. V. 28. I. 11. Article number 05016002. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001446.
7. Великанов, Н.Л. Определение рабочей точки бетононасоса / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, Л.В. Примак // Механизация строительства. – 2015. – № 9. – С. 42-44.
13. Руководство по укладке бетонных смесей бетононасосными установками ЦНИИОМТП / Под ред. Г.А. Захарченко. – М.: Стройиздат, 1978. – 144 с.
14. Великанов, Н.Л. Основные этапы выбора стационарного бетононасоса / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, Л.В. Примак // Механизация строительства. – 2016. – № 9. – С. 44-49.
15. Великанов, Н.Л. Совершенствование методики гидравлического расчета потерь в бетоноводе / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, Л.В. Примак // Механизация строительства. – 2015. – № 10. – С. 22-25.
16. Jacobsen S., Mork J.H., Lee S.F., Haugan L. Pumping of concrete and mortar – State of the art. COIN Project report 5. – 2008. – 46 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2388633/COIN%2Breport%2Bno%2B5.pdf?sequence=3&isAllowed=y> (дата обращения: 15.10.2019).
17. Kaplan D., de Larrard F., Sedran T. Design of concrete pumping circuit, ACI Mater. Journal. – 2005. Vol. 102, pp. 110–117.
18. Jo S.D., Park C.K., Jeong J.H., Lee S.H., Kwon S.H. A Computational approach to estimating a lubricating layer in concrete pumping. C. Mater. Contin. – 2012. Vol. 27, pp. 189–210.
19. Aldred J. Burj Khalifa – a new high for high-performance concrete. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Civil Engineering. – 2010. – Vol. 163(2), pp. 66–73.
20. Putzmeister Holding. Stationary Concrete Pumps [Электронный ресурс]. – URL: <http://putzmeister.com/enu/index.htm> (дата обращения: 15.10.2019).