

УДК 004.89

**СТЕПЕНЬ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОДАЧИ БЕТОННОЙ СМЕСИ
УНИВЕРСАЛЬНЫМ ШЛАНГОВЫМ БЕТОНОНАСОСОМ КАК ФУНКЦИЯ
ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА**

Доктора техн. наук И. А. Емельянова, П. Н. Андренко, асп. Д. О. Чайка

**СТУПІНЬ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОДАЧІ БЕТОННОЇ СУМІШІ УНІВЕРСАЛЬНИМ
ШЛАНГОВИМ БЕТОНОНАСОСОМ ЯК ФУНКЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧОГО
ПРОЦЕСУ**

Доктори техн. наук І. А. Ємельянова, П. М. Андренко, асп. Д. О. Чайка

**THE DEGREE OF NON-UNIFORMITY OF CONCRETE MIX SUPPLY UNIVERSAL
HOSE CONCRETE PUMP AS FUNCTION WORKFLOW SETTINGS**

Doct. of techn. Sciences I. A. Emeljanova, P. N. Andrenko, graduate student D. O. Chayka

Рассматривается конструкция беспоршневого шлангового бетононасоса с позиции подачи им бетонных смесей в трубопровод. Указаны цель и задачи исследований. Предлагается физическая модель движения смеси по шлангу внутри корпуса бетононасоса, на основании которой найдены зависимости для определения мгновенной подачи смеси насосом в трубопровод с учетом имеющей место её возврата, определены зависимости для определения коэффициента неравномерности подачи смеси бетононасосом при гидравлическом и механическом приводах. Показаны преимущественные стороны гидравлического привода, уменьшающие пульсации подачи смеси по трубопроводу на 30 %.

Приведены графические зависимости коэффициента неравномерности подачи от диаметра шланга в бетононасосе, перепада давлений в его рабочей зоне, высоты щели между стенками шланга, сжимаемого роликами бетононасоса, и частоты вращения ротора.

Ключевые слова: универсальный шланговый бетононасос, коэффициент неравномерности, пульсации потока бетонной смеси, перепад давлений, диаметр шланга, высота щели, частота вращения.

Розглядається конструкція безпоршневого шлангового бетононасоса з позиції подачі ним бетонних сумішей в трубопровід. Вказані мета і завдання досліджень. Пропонується фізична модель руху суміші по шлангу всередині корпусу бетононасоса, на підставі якої знайдені залежності для визначення миттєвої подачі суміші насосом в трубопровід з урахуванням такої, що має місце її повернення, визначені залежності для визначення коефіцієнта нерівномірності подачі суміші бетононасосом при гідравлічному і механічному приводах. Показані переважні сторони гідравлічного привода, що зменшують пульсації подачі суміші по трубопроводу на 30 %.

Наведено графічні залежності коефіцієнта нерівномірності подачі від діаметра шланга в бетононаосі, перепаду тиску в його робочій зоні, висоти щілини між стінками шланга, що стискається роликами бетононасоса, і частоти обертання ротора.

Ключові слова: универсальный шланговый бетононасос, коефіцієнт нерівномірності, пульсації потоку бетонної суміші, перепад тисків, діаметр шланга, висота щілини, частота обертання.

We consider the construction of a concrete pump with the not pistons hose feeding position they mix concrete in the pipeline. It specifies the purpose and objectives of research. It is proposed to model the physical motion of the mixture inside the concrete pump hose on the case, on the basis of which are found in the dependence for determining the instantaneous pumping the mixture into the pipeline taking into account existing as its return, defined according to the definition of the coefficient of uneven supply concrete pump with a mixture of hydraulic and mechanical drives. Showing advantageous side hydraulic actuator, reducing pulsations supplying the mixture through conduit at 30 %.

Is a graphical dependence of the non-uniformity of flow from the hose diameter in concrete pump, pressure drop in its operating area, the height of the gap between the wall of the hose, compressed concrete pump rollers and rotor speed.

Keywords: *universal hose concrete pump, non-uniformity coefficient, pulsation flow of the concrete mix, differential pressure, hose diameter, the gap height, speed.*

Вступление. В условиях строительных площадок при возведении зданий и сооружений из монолитного железобетона наравне с двухпоршневыми бетононасосами с гидравлическим приводом успешно могут использоваться беспоршневые шланговые бетононасосы, которые перед поршневыми обладают целым рядом достоинств. Это прежде всего компактность конструкции при упрощенной принципиальной схеме, пониженная металлоемкость и при аналогичной производительности меньше энергозатраты и пульсации подачи бетонной смеси по трубопроводу. Универсальный шланговый бетононасос [1] рассматривается как один из вариантов улучшенной конструкции существующих машин соответствующего назначения [2]. Новизна конструкции новой машины объясняется возможностью её использования для работы шлангов различных диаметров ($d = 32, 50, 75$ мм) и соответственно довольно широким диапазоном производительностей ($P_{\text{техн}} = 5,0 \dots 15$ м³/ч). Однако принцип создания таких бетононасосов позволяет создавать машины и более высокой производительности.

Эффективность работы гидравлического шлангового бетононасоса зависит от условий его эксплуатации и взаимодействия конструктивных параметров машины с технологическими особенностями рабочего процесса.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследование давления подачи бетонных смесей в трубопровод, зависящее от реологических свойств смеси и диаметра трубопровода, представлено в статье [3]. Проблема неравномерности подачи бетонных смесей бетононасосом в трубопровод, которая зависит от параметров рабочего процесса бетононасоса, в данном источнике не рассматривается. Принцип действия и возможности управления перистальтических насосов представлены в статье [4], также в данном материале отмечена проблема пульсаций потока жидкости на выходе насоса. Но в этой работе не рассматривается неравномерность подачи бетонной смеси шланговым бетононасосом. Вопросы пульсации потока жидкости и оптимизация его параметров рассмотрены в работе [5], эти проблемы рассматриваются относительно микронасосов перистальтического действия, как и в выше указанных источниках, материалы статьи не несут в себе проблемы пульсаций потока бетонной смеси, перекачиваемой шланговым бетононасосом. Известны исследования условий работы бетононасоса при использовании эластичных трубопроводов, по которым происходит стабилизация движения бетонных смесей при полном отсутствии в них автоколебательных явлений [6]. С позиции определения степени неравномерности подачи смеси в

трубопроводы проведенных исследований в настоящее время не известно. В связи с этим одной из задач проведения исследований беспоршневого шлангового бетононасоса является определение вышеуказанного показателя, анализирующего работу таких машин.

Определение цели и задачи исследования. Целью проведенных исследований является определение степени неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом при использовании механического и гидравлического приводов.

Задачи исследования:

- определение условий подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом;

- определение коэффициента неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом;

- определение степени неравномерности подачи бетонной смеси бетононасосом с гидравлическим и механическим приводом;

- анализ графических зависимостей коэффициента неравномерности подачи от параметров рабочего процесса универсального шлангового бетононасоса.

Во время подачи строительной смеси по шлангу принято допущение: под действием центрального ролика верхняя стенка шланга сжимается таким образом, что между стенками шланга образуется щель, высота которой равна $h_{щ}$ при принятой длине $l = \frac{\pi}{2} d_{шл}$, где $d_{шл}$ – диаметр шланга, по которому подается смесь. При этом преодолевается сопротивление, обусловленное жесткостью материала шланга.

Мгновенная подача на выходе из бетононасоса $Q_{нм}$ определяется исходя из его производительности $Q_{бн}$ при условии движения смеси по шлангу во время вращения его ротора и возможного появления при этом обратного движения смеси по шлангу через образующуюся

щель ($S = h_{щ} \frac{\pi}{2} d_{шл}$). При движении смеси по шлангу внутри бетононасоса под воздействием ролика в результате перепада давлений $\Delta p_{щ}$ возникает противоток смеси с подачей $Q_{возвр}$.

Соответственно, согласно принятой физической модели движения смеси по шлангу бетононасоса мгновенная подача на его выходе при пренебрежении сопротивлением по длине шланга может быть определена как

$$Q_{нм} = Q_{бн} - Q_{возвр} \quad (1)$$

Подача смеси бетононасосом, обусловленная её движением по шлангу благодаря вращению ротора, определяется из уравнения

$$Q_{бн} = S_{мш} v_l \quad (2)$$

где $S_{мш}$ – мгновенная площадь шланга бетононасоса; v_l – линейная скорость движения смеси по шлангу, уложенному в корпусе машины соответствующего радиуса R .

При этом линейная скорость определяется как

$$v_l = 2\pi nR \quad (3)$$

где n – частота вращения ротора бетононасоса, мин^{-1} ; R – радиус шланга, уложенного в корпусе бетононасоса.

Мгновенная площадь шланга бетононасоса, определяется как:

$$S_{мш} \approx \frac{\pi d_{шл}^2}{4} \quad (4)$$

Погрешность от принятого допущения не превышает 3%. В таком случае зависимость (2) выглядит следующим образом:

$$Q_{\text{бн}} = 2\pi \frac{\pi d_{\text{шл}}^2}{4} nR^* = \frac{\pi^2 d_{\text{шл}}^2}{2} nR. \quad (5)$$

Возврат смеси через щель в шланге площадью $S_{\text{м щ}}$ в результате перепада давлений $\Delta p_{\text{щ}}$ можно представить как

$$Q_{\text{возвр}} = k_{\text{щ}} h_{\text{щ}} \frac{\pi}{2} d_{\text{шл}} \sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p_{\text{щ}}}, \quad (6)$$

где ρ_0 – средняя плотность бетонной смеси; $k_{\text{щ}}$ – коэффициент расхода щели (для шлицевых щелей $k_{\text{щ}} = 0,62$ [7]).

Перепад давлений в области щели, исходя из зоны нагнетания смеси n -ым количеством роликов, определяется как $\Delta p_{\text{щ}} = \frac{\Delta p_{\text{н}}}{z}$, где $\Delta p_{\text{н}}$ – перепад давления в насосе относительно начала всасывания смеси; z – количество траверс с роликами, обеспечивающих нагнетание смеси по шлангу.

Зависимость (6) можно представить как

$$Q_{\text{возвр}} = k_{\text{щ}} h_{\text{щ}} \frac{\pi}{2} d_{\text{шл}} \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{н}}}{z\rho_0}}. \quad (7)$$

Следует отметить, что зависимость (7) правомерно использовать для местных сопротивлений, которые используют ролики, расположенные на больших расстояниях друг от друга. Для местных сопротивлений роликов, расположенных последовательно на небольшом расстоянии друг от друга, что имеет место в предлагаемом нами универсальном бетононасосе, для расчета $Q_{\text{возвр}}$, можно воспользоваться следующей формулой [8]

$$Q_{\text{возвр}} = k_{\text{п д}} h_{\text{щ}} \frac{\pi}{2} d_{\text{шл}} \sqrt{\frac{2}{\rho_0} \Delta p_{\text{н}}}, \quad (8)$$

где $k_{\text{п д}}$ – эквивалентный коэффициент расхода, учитывающий расход смеси при последовательно расположенных роликах, который определяется согласно зависимости

$$k_{\text{эпр}} = k \frac{k_i}{\sqrt{z}}, \quad (9)$$

где k – эмпирический коэффициент, учитывающий потери на трение и взаимное влияние участков в щелевом пространстве, ($k \approx 1,27$); k_i – коэффициент расхода смеси через одну щель, $k_i = k_{\text{щ}} = 0,62$; z – в данном случае – количество траверс с роликами, участвующих в процессе нагнетания смеси.

При этом количество траверс с роликами z , которые рассматриваются со стороны нагнетания смеси, находится в зависимости от конструктивных особенностей ротора насоса. Для данного бетононасоса [1] ($z = 3 \dots 4$).

Неравномерность подачи бетонной смеси предлагаемым бетононасосом определяется коэффициентом неравномерности подачи [9]

$$\delta_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{бн max}}}{Q_{\text{бн ср}}}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{бн max}}$ и $Q_{\text{бн ср}}$ – соответственно максимальная и средняя подачи бетонной смеси бетононасосом.

Максимальная подача смеси бетононасосом, с учетом зависимостей, приведенных выше, определяется при максимальном значении количества траверс с роликами, работающими в зоне нагнетания смеси бетононасосом z .

$$Q_{\text{бн max}} = \frac{\pi}{2} d_{\text{шл}} (d_{\text{шл}} \pi n R^* - k_{\text{эпр}} h_{\text{щ}} \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{н}}}{\rho_0}}). \quad (11)$$

Среднее значение подачи смеси бетононасосом определяется при $v = v_{cp}$.

$$Q_{бн\text{ ср}} = \frac{\pi d_{шл}^2}{4} \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right), [6], \quad (12)$$

где v_{cp} – средняя скорость движения бетонной смеси по шлангу.

Средняя скорость движения смеси по шлангу при гидравлическом приводе бетононасоса определяется как

$$v_{cp} = \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right), \quad (13)$$

где v_1 – максимальная окружная скорость вращения ротора, при подаче бетонной смеси по гибкому шлангу; v_2 – минимальная скорость вращения ротора, при подаче бетонной смеси по гибкому шлангу.

$$v_1 = \frac{\tau_{сдв} R_{1шл}}{4\mu} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{сдв}} \right),$$

где $R_{1шл}$ – минимальный радиус по торцевой поверхности бокового ролика относительно сжимаемого шланга; τ_0 – предельное напряжение сдвига; $\tau_{сдв}$ – сдвиговое напряжение на внутренней стенке шланга, которое испытывает транспортируемая смесь; μ – динамическая вязкость бетонной смеси.

$$v_2 = \frac{\tau_{сдв} R_{2шл}}{4\mu} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{сдв}} \right),$$

где $R_{2шл}$ – максимальный радиус по торцевой поверхности центрального ролика относительно сжимаемого шланга.

В итоге формула (13) может быть представлена в виде

$$v_{cp} = \frac{\tau_{сдв} \left(1 - \frac{\tau_0}{\tau_{сдв}} \right)}{4\mu} (R_{1шл} + R_{2шл}). \quad (14)$$

В конечном итоге коэффициент неравномерности подачи смеси определяется так:

- при гидравлическом приводе

$$\delta_{бн\text{ г}} = \frac{4(d_{шл} \pi n R^* - k_{эпр} h_{шл} \sqrt{\frac{2\Delta p_{бн}}{\rho_0}})}{d_{шл} (v_1 + v_2)}; \quad (15)$$

- при механическом приводе

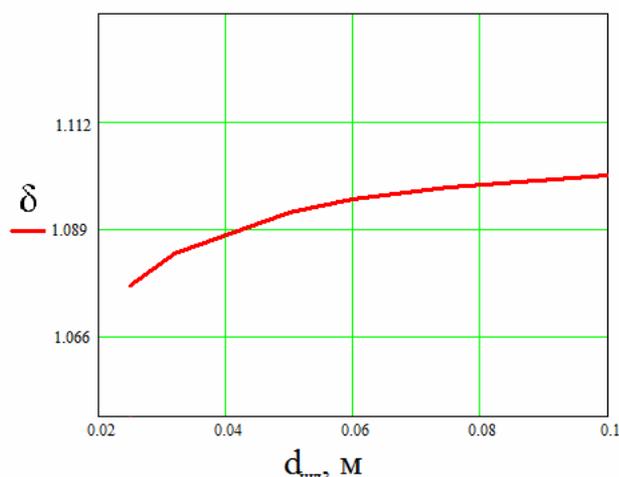
$$\delta_{бн\text{ м}} = \frac{4(d_{шл} \pi n R^* - k_{эпр} h_{шл} \sqrt{\frac{2\Delta p_{бн}}{\rho_0}})}{d_{шл} v_l}. \quad (16)$$

При принятых конструктивных параметрах спроектированного универсального шлангового бетононасоса: $d_{шл} = 58$ мм; $R = 262$ мм; $n = 45$ мин⁻¹; $h_{шл} = 1$ мм; $\rho_0 = 1800$ кг/м³; $\Delta p_{бн} = 1,5$ МПа, коэффициент неравномерности подачи определяется следующим образом:

$$\delta_{бн\text{ г}} = \frac{4(0,058 \cdot \pi \cdot 0,262 - 0,787 \cdot 0,001 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^6}{1800}})}{0,058(1,348 + 1,46)} = 1,093;$$

$$\delta_{бн\text{ м}} = \frac{4(0,058 \cdot \pi \cdot 0,262 - 0,455 \cdot 0,001 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^6}{1800}})}{0,058 \cdot 1,23} = 1,286.$$

Определение $\delta_{\text{бнг}}$ и $\delta_{\text{бнм}}$ показало, что бетононасос с гидравлическим приводом, по сравнению с механическим, позволяет уменьшить пульсации подачи смеси по трубопроводу на 15 %.



На рис. 1 представлена зависимость показателя степени неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом от диаметра шланга в рабочем пространстве бетононасоса.

$$\text{const} \begin{cases} h_{\text{щ}} = 0,0001 \text{ м} \\ \Delta p = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \\ n = 45 \text{ мин}^{-1} \end{cases}$$

Рис. 1. Зависимость коэффициента неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом от диаметра шланга, находящегося в корпусе насоса

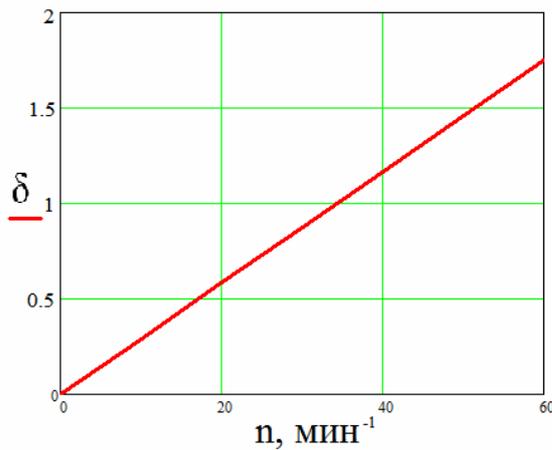
При постоянных параметрах $h_{\text{щ}}$, Δp , n и при изменении диаметра шланга в диапазоне 0,025...0,1 м получена зависимость $\delta = f(d_{\text{шл}})$. Характер кривой на рис. 1 свидетельствует о незначительном росте пульсаций бетонной смеси на выходе из трубопровода с увеличением диаметра шланга в исследуемом диапазоне.

Характер зависимости $\delta = f(n)$ на рис. 2 свидетельствует о прямо пропорциональном росте коэффициента неравномерности с увеличением частоты вращения ротора. Это говорит о том, что при высокой частоте вращения шланг не успевает должным образом заполняться бетонной смесью до момента очередного захвата её новой порции, что приводит к увеличению пульсаций бетонной смеси на выходе из трубопровода.

Анализ зависимости (рис. 3) показывает, что с увеличением перепада

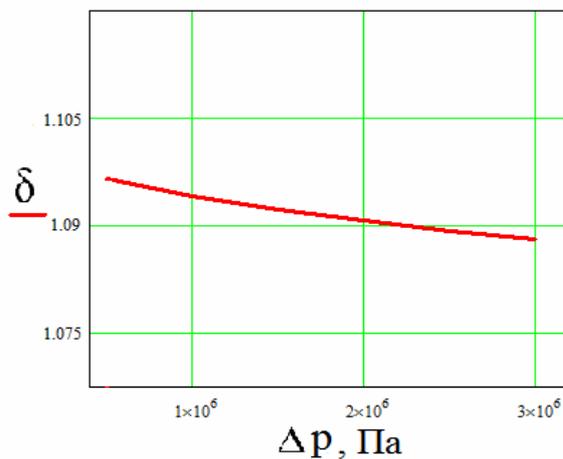
давлений, под которым находится бетонная смесь перед роликом и давлением, под которым происходит начало всасывания бетонной смеси, смесь по шлангу будет двигаться с возрастающей скоростью. Соответственно будет осуществляться более полное заполнение шланга по всему его сечению, что приведет к снижению пульсаций смеси на выходе из трубопровода.

Приняв постоянными параметры n , Δp , $d_{\text{шл}}$ и используя величину высоты щели между стенками пережатого шланга в диапазоне 0,0001...0,00035 м, полученная зависимость $\delta = f(h_{\text{щ}})$ свидетельствует о существенном уменьшении коэффициента неравномерности с увеличением расстояния между стенками сжимаемого роликами насоса шланга (рис. 4).



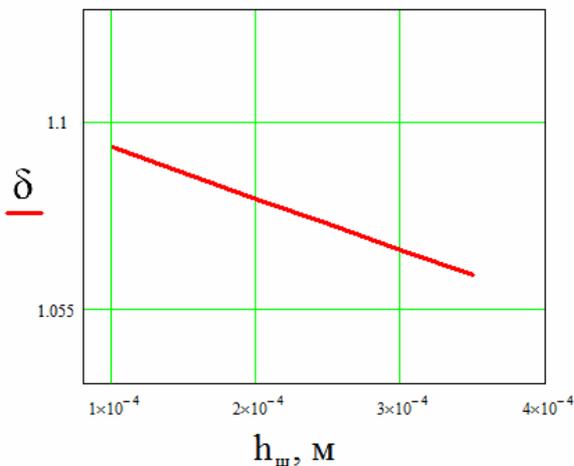
$$\text{const} \begin{cases} h_{\text{щ}} = 0,0001 \text{ м} \\ \Delta p = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \\ d_{\text{шл}} = 0,05 \text{ м} \end{cases}$$

Рис. 2. Зависимость коэффициента неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом от частоты вращения ротора бетононасоса



$$\text{const} \begin{cases} h_{\text{щ}} = 0,0001 \text{ м} \\ n = 45 \text{ мин}^{-1} \\ d_{\text{шл}} = 0,05 \text{ м} \end{cases}$$

Рис. 3. Зависимость коэффициента неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом от перепада давлений в его рабочей зоне



$$\text{const} \begin{cases} n = 45 \text{ мин}^{-1} \\ \Delta p = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \\ d_{\text{шл}} = 0,05 \text{ м} \end{cases}$$

Рис. 4. Зависимость коэффициента неравномерности подачи бетонной смеси универсальным шланговым бетононасосом от высоты щели между стенками сжимаемого роликами бетононасоса шланга

Таким образом, исследования зависимости коэффициента неравномерности δ как функции от $d_{шл}$, n , Δp , $h_{шл}$ показали, что при работе рассматриваемого бетононасоса для обеспечения стабильных условий подачи бетонных смесей такими машинами необходимо соблюдать согласованность между следующими параметрами технологического процесса: подвижностью бетонной смеси, соответствующим перепадом давлений и размерами образовавшейся щели в шланге под сжимающим усилием роликов ротора бетононасоса.

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении:

1. Впервые получены аналитические зависимости для определения подачи бетонной смеси универсальным шланговым

бетононасосом, на основании которых получены формулы.

2. Получена аналитическая зависимость для определения коэффициента неравномерности подачи универсального шлангового бетононасоса.

3. Расчетным путем установлено $\delta_{бнг}$ и $\delta_{бнм}$, их сравнение показывает, что бетононасос с гидравлическим приводом, по сравнению с механическим, позволяет уменьшить пульсации подачи смеси по трубопроводу на 15 %.

4. Приведены графические зависимости коэффициента неравномерности подачи от параметров рабочего процесса универсального шлангового бетононасоса, на основании которых можно определить рациональные конструктивные и рабочие параметры предлагаемого шлангового бетононасоса.

Список использованных источников

1. Универсальный шланговый бетононасос [Текст]: заявка на пат. № а201413692 Україна / Ємельянова І.А. (UA); Задорожний А.О. (UA); Клименко М.В. (UA); Чайка Д.О. (UA); Власник: Харківський національний університет будівництва та архітектури (UA); заявл. 22.12.2014; опубл. 26.09.2016, Бюл. № 18, 2016.

2. Емельянова, И. А. Беспоршневые универсальные бетононасосы нового конструктивного решения с гидравлическим приводом для условий строительной площадки [Текст] / И.А. Емельянова, Д.О. Чайка // 36. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 159. – 125 с.

3. Dimitri Feys, Kamal H., Khayat, Rami Khatib. How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?/ Cement and Concrete Composites, Volume 66, February 2016, P. 38–46.

4. József klespitz, levente kovács. Peristaltic pumps – a review on working and control possibilities/ SAMI 2014, IEEE 12th international symposium on applied machine intelligence and informatics, January 23-25, 2014, Herl'any, Slovakia, p. 191–194

5. P. Dhananchezhiyan, Somashekhar S., Hiremath. Optimization of multiple micro pumps to maximize the flow rate and minimize the flow pulsation/ 1st global colloquium on recent advancements and effectual researches in engineering, science and technology - raerest 2016 on april 22nd & 23rd april 2016, volume 25, p. 1226–1233

6. Меленцов, Н. А. Создание растворобетононасоса с повышенной пропускной способностью клапанных узлов и стабильной подачей бетонных смесей [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.05.02 / Меленцов Николай Алексеевич. – Харьков, 2014. – 176 с.

7. Данилов, Ю. А. Аппаратура объемных гидроприводов: Рабочие процессы и характеристики [Текст] / Ю.А. Данилов, Ю.Л. Кирилловский, Ю.Г. Колпаков. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.

8. Гамынин, Н. С. Гидравлический привод систем управления [Текст] / Н.С. Гамынин. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.

9. Кононенко, А. П. Об'ємні гідравлічні машини гідроприводів [Текст] / А.П. Кононенко. – Донецьк: ДВНЗ “ДонНТУ”, 2011. – 292 с.

Смельянова Инга Анатоліївна, д-р техн. наук, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-17-84.

E-mail: emeljanova-inga@rambler.ru.

Андренко Павло Миколайович, д-р техн. наук, професор кафедри гідропневмоавтоматики і гідропривода Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". E-mail: andrenko47@mail.ru.

Чайка Денис Олегович, аспірант, кафедра механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури. E-mail: d_chayka93@mail.ua.

Emeljanova Inga A. Ph.D., Professor Department of mechanization of construction processes Kharkov National University of Construction and Architecture. Tel. : (057) 700-17-84. E-mail: emeljanova-inga@rambler.ru.

Andrenko Pavlo M. doctor of technical sciences, professor department of hydro-and-pneumatic and hydraulic drive National Technical University "Kharkiv polytechnic institute". E-mail: andrenko47@mail.ru.

Chayka Denys O. graduate student, department of mechanization of construction processes Kharkov National University of Construction and Architecture. E-mail: d_chayka93@mail.ua.

Стаття прийнята 30.09.2016 р.