



В. П. Дробащенко
д-р техн. наук
МГРИ¹
кафедра геотехнологических способов
и физических процессов горного производства
профессор
drobadenko@mail.ru



И. Н. Салахов
МГРИ¹
аспирант
salahovin@mgi.ru

Особенности определения расходно-напорных характеристик грунтососов при работе на гидросмеськах различных плотности и грансостава

¹Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

В статье излагается анализ различных методов пересчета паспортных расходно-напорных характеристик землесосов, устанавливаемых обычно для грунтососов при заводских испытаниях на воде, на перекачиваемую гидросмесь определенной объемной концентрации и средневзвешенного диаметра. Проведено сравнение полученных расчетных результатов с данными тестирования грунтососов в производственных условиях при разработке россыпного месторождения золота с использованием средств гидромеханизации. Даются сопоставления установленных данных с предлагаемыми методиками, аппроксимированы уравнения, наиболее близкие с расчетными результатами, которые предложены для пересчета расходно-напорных характеристик агрегата с воды на гидросмесь для средневзвешенных диаметров 1,0; 9,3 и 24,0 мм и концентраций 10 и 20%

Ключевые слова: грунтосос; расходно-напорная характеристика; гидросмесь; режимы работы; концентрация; средневзвешенный диаметр твердого компонента; гидромеханизированные работы; опытно-промышленные испытания; тестирование; методики пересчета; гидротранспортирование; землесос

Гидравлический трубопроводный транспорт твердых материалов, который применяется не только внутри замкнутых производственных участков, но и для гидротранспортирования с целью соединения отдельных горно-обогатительных (металлургических) объектов в единый технологический комплекс, зарекомендовал себя эффективным видом транспорта, вполне отвечающим современному уровню развития техники. Это обусловлено общепризнанными преимуществами гидромеханизации, основными из которых являются поточность технологических процессов, попутное обогащение транспортируемого материала, возможность высокой степени механизации и автоматизации процессов, постоянное и равномерное потребление мощности, малочисленный обслуживающий персонал, экологичность, особенно в крупных городах или вблизи них, и др. [1]. Основным видом силового оборудования при этом являются центробежные грунтовые насосы различных модификаций, которые используются при:

- разработке и переработке осадочных, в том числе россыпных месторождений;
- разработке обводненных песчаных и песчано-гравийных месторождений земснарядным способом;
- переработке песчано-гравийных смесей;
- дноуглубительных работах на реках и озерах, в портах;
- очистке водоемов и малых рек в черте города;
- разработке обводненных сапропелевых месторождений;
- намыве гидротехнических сооружений (плотин; дамб; перемычек и т.д.);
- намыве площадей, полотна автомобильных и железных дорог в труднодоступных (обводненных) местах для других видов оборудования (экскаваторно-автомобильных, экскаваторно-железнодорожных и экскаваторно-конвейерных комплексов);
- гидротранспортировании вскрышных пород в отвал и отходов с обогатительных фабрик в хвостохранилища.

Центробежные насосы для гидросмесей – землесосы, грунтовые насосы, углесосы – в связи с абразивностью гидросмесей, включающих твердые частицы (различные по крупности), имеют свои конструктивные особенности в форме и размерах поточных каналов по сравнению с водяными насосами такого типа. Например, проходное отверстие у них увеличено и определяется максимальным размером транспортируемого материала в гидросмеси. Рабочее колесо состоит из 2–4 лопаток и имеет большую

ширину, что обеспечивает пропуск крупных кусков породы.

Прообразом современных отечественных грунтовых насосов является ЗГМ-1, сконструированный известным конструктором В.А. Морозом. Его модификации – грунтовые насосы ЗГМ-2 и ЗГМ-2М – получили наиболее широкое распространение на горных работах, в том числе на угольных карьерах (Кузбасс), железорудных (КМА) и других. Затем на базе усовершенствования их конструкций были созданы грунтовые насосы марок ГРУ, Гр, ГрТ, ГрК, отличающиеся применением более износостойких материалов, футеровкой проточной части, упрощением сборки и разборки агрегатов.

Для снижения энергоемкости гидротранспортирования центробежными грунтонасосами (землесосами), необходимо устанавливать режимы работы с оптимальными рабочими характеристиками этих установок. Они представляют собой функциональные зависимости развиваемого напора $H = f(Q)$, расходуемой мощности $N = f(Q)$, допустимой высоты всасывания $H_{вс}^{доп} = f(Q)$, коэффициента полезного действия $\eta = f(Q)$ от расхода гидросмеси (Q).

При проектировании гидромеханизированных работ, на стадии выбора грунтового насоса обычно учитывают следующие факторы: рабочие характеристики агрегата, параметры гидросмеси (объемная концентрация, а также гранулометрический состав твердого), геометрические размеры рабочего колеса, количество оборотов двигателя и др.

В настоящее время существует достаточное количество заводов, которые производят технику для гидромеханизированных работ, в том числе и грунтонасосных агрегатов различных модификаций с расходно-напорными характеристиками от 85/40 до 4000/71 и др.

Заводские испытания с целью определения рабочих характеристик грунтонасосов обычно проводятся на воде и принимаются в качестве стандарта или эталона, которые затем пересчитываются для работы на гидросмеси с учетом возможного изменения режимов гидротранспортирования в зависимости от объемной концентрации и гранулометрического состава транспортируемого материала. Однако, как показывает производственный опыт, они существенно отличаются между собой вследствие разного числа лопастей и оборотов рабочего колеса, а также физико-технических свойств гидросмеси. Поэтому при проектировании и эксплуатации трубопроводного транспорта горной массы важны оценка и выбор методики расчета расходно-напорной характеристики грунтонасоса с учетом параметров гидросмеси (ее грансо-

става, средневзвешенного диаметра, объемной концентрации), а также конструктивных особенностей установки.

Впервые характеристики землесосов на гидросмеси были составлены О'Брайеном и Фолсомом, которые, рассматривая движение в рабочем колесе воды и грунта, сделали вывод, что наличие грунта в потоке обуславливает уменьшение касательной скорости на некоторую величину, а следовательно, и напора.

При постоянном расходе напор грунтонасоса (землесоса) при работе на гидросмеси, выраженный в метрах столба смеси, меньше напора, развиваемого агрегатом при работе на воде. Это можно объяснить с помощью теории центробежного насоса, основное уравнение которой было предложено Л. Эйлером. Как известно, к рабочему колесу центробежного насоса со скоростью V_0 жидкость подводится аксиально, затем направления струй жидкости изменяется от осевого до радиального, а скорость, благодаря центробежной силе, увеличивается от значения V_1 в пространстве между лопастями до значения V_2 на выходе из колеса.

В каналах рабочих колес скорости движения частиц гораздо выше, чем сила тяжести. Из-за ускорений происходит интенсивное расслоение потока, т.е. часть твердых частиц движется не вместе с потоком, а относительно него. При этом возникает лобовое сопротивление в виде дополнительных гидравлических потерь. Поэтому потери напора в рабочем колесе можно представить как сумму потерь при подаче воды и дополнительных потерь, возникающих за счет лобовых сопротивлений твердых частиц, движущихся в колесе относительно потока жидкости. При этом мелкие частицы гидросмеси вследствие турбулентного примешивания продолжают оставаться во взвешенном состоянии и перемещаются вместе с потоками жидкости [2].

В технической литературе предлагаются различные методики (уравнения) для пересчета значений паспортных характеристик грунтовых насосов с воды на гидросмесь. Анализ и оценка известных функциональных зависимостей $H = f(Q)$ учитывают в той или иной степени наличие в напорном потоке твердых частиц, а также конструктивных особенностей грунтонасосов и их влияние на гидродинамику процесса. Однако в большинстве из них не приводится не только опытных данных, но и обоснований (доводов) послуживших основанием для их выводов.

В результате исследования различных методов расчета расходно-напорных характеристик они были систематизированы на две группы по критерию использования гранулометрического состава.

В *первой* – представлены уравнения, в которых не учитывают гранулометрический состав твердого транспортируемой гидросмеси [А.Е. Смолдырев; Л.С. Животовский; Б.М. Шкундин; А.И. Чернов; Б.Э. Фридман; А.О. Спиваковский; В.Н. Покровская; Б.Е. Романенко; А.С. Буттов; Н.Д. Холин; В.М. Карасик; Ю.Т. Борщевский; Дж. Вокалдо; К.Е. Буржес].

Во *второй* – уравнения, учитывающие гранулометрический состав минеральных частиц [ВНИИ им. Веденеева; Л.С. Животовский; А.И. Харин; ВНИИ Гидромаш; Г.А. Нурок; А.П. Юфин; Л.А. Фазербэнк]. Они также разделены на две подгруппы:

– уравнения, которые не включают конструктивные параметры грунтонасосов [ВНИИ Гидромаш, Г.А. Нурок];

– учитывающие конструктивные параметры грунтовых насосов (диаметр рабочего колеса, количество оборотов двигателя и др.) [Л.С. Животовский; А.И. Харин; ВНИИ Гидромаш].

Для примера проанализируем некоторые из них. Для удобства расчетов все условные обозначения в уравнениях приведены к единому виду.

Наибольшее распространение для пересчета напора с воды на гидросмесь получила зависимость, приведенная в работе Н.Д. Холина, С.О. Славутского, Г.П. Никонова:

$$H_3 = H_0 \cdot \rho_3 \cdot (1 - 0,25 \cdot k) \quad (1)$$

где: H_3 – напор на гидросмеси, м. вод. ст.; H_0 – напор на воде, м. вод. ст.; ρ_3 – плотность гидросмеси, кг/м³;

$$k = \frac{\rho_T - \rho_G}{\rho_T - 1}$$

ρ_T – плотность твердого компонента, кг/м³.

Эта зависимость рекомендуется в работах многих авторов. Однако никто из них не приводит не только опытных данных, но и сообщений, послуживших основанием для ее вывода. Поэтому остается не совсем ясным, для каких конкретных условий можно применять это уравнение. Авторами введен коэффициент k , который зависит от плотности гидросмеси. Также было замечено, что при каждом увеличении концентрации на 5% напор также возрастает на 5%.

По зависимости [3] при увеличении концентрации расчетные значения напора сначала повышаются при увеличении плотности гидросмеси, но при концентрации 20% и выше напор начинает снижаться. Данные результаты связа-

ны с тем, что значение в скобках уменьшается с увеличением концентрации, которая также включена в уравнение. Максимальное значение напора грунтонасоса, работающего на гидросмеси, не превышает 8% относительно его работы на воде:

$$H_3 = H_0 \cdot \frac{\rho_3}{\rho_0} \cdot \left(1 - 0,57 \cdot \frac{\rho_3 - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (2)$$

В уравнении [4] не учитывается плотность гидросмеси в отличие от всех других методик. С другой стороны, в уравнении учитывается фракционный состав твердого компонента, который выражается через средневзвешенный коэффициент транспортабельности. Как отмечает А.И. Харин [5], данное уравнение не удовлетворяет граничным условиям, т.к. при малых значениях средней крупности транспортируемого грунта, когда значение транспортабельности стремится к нулю, величина в скобках стремится к бесконечности, что противоречит реальным данным.

$$H_3 = H_0 \cdot k_0 \cdot \left[1 + \frac{S_0^{1,2}}{\sqrt{\psi_{cp}}} \right] \quad (3)$$

где: k_0 – безразмерный коэффициент, который принимается равным 1 для всех грунтонасосов, кроме 20P-11; ψ_{cp} – средневзвешенный коэффициент транспортабельности:

| | | | | | |
|--------------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| Фракция грунта, мм | 0,05–0,1 | 0,1–0,25 | 0,25–0,5 | 0,5–1,0 | 1,0–2,0 |
| ψ | 0,02 | 0,2 | 0,4 | 0,8 | 1,2 |
| Фракция грунта, мм | 2,0–3,0 | 3,0–5,0 | 5,0–10,0 | > 10 | |
| ψ | 1,5 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | |

S_0 – концентрация.

В методике [6] отмечается, что напор насоса при работе на гидросмеси всегда меньше напора насоса при работе на воде H_0 вследствие дополнительных потерь напора, связанных с наличием твердого в жидкости, что, по нашему мнению, справедливо:

$$H_3 = \frac{H_0 \cdot \rho_{\Gamma} \cdot k'}{\rho_0} \quad (4)$$

k' – коэффициент для пересчета рабочих характеристик насоса (табл. 1).

Несмотря на то, что напор грунтонасоса, выраженный в метрах столба гидросмеси, как правило, ниже, чем при работе на воде, давление, развиваемое насосом при работе на гидросмеси (измеряемое манометром), всегда выше, чем давление, развиваемое насосом при работе на воде. По данному уравнению расчетный напор снижается как с увеличением концентрации твердого, так и с увеличением средневзвешенного диаметра. Автором установлены гарантированные пределы использования этого уравнения.

По методике [7] большее значение на изменение напора играет средневзвешенный диаметр, а не концентрация гидросмеси. Этот фактор обычно нехарактерен для уравнений пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов. С нашей точки зрения, это достаточно логично, ведь гидросмесь – это неоднородная жидкость, включение твердых частиц создает дополнительные гидравлические сопротивления. В отличие от других методов, гранулометрический состав выражается через парциальную плотность, которая рассчитывается для каждой i -той фракции отдельно:

$$H_{\Gamma} = H_0 \cdot \left[1 - \sum K_H^i \cdot \frac{\rho_{\Gamma}^i - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \right] \quad (5)$$

где: K_H^i – коэффициенты снижения напора для каждого диаметра:

$$K_H^i = 0,15 \cdot \left(\frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_0} - 1 \right) + 0,56 \cdot \lg 10 \cdot d_{icp}$$

d_{icp} – средний размер частиц каждой итой фракции, м;

ρ_{Γ}^i – парциальная плотность гидросмеси, кг/м³:

$$\rho_{\Gamma}^i = \frac{q_i \cdot S_0}{100 \cdot 100} \cdot (\rho_{\Gamma} - \rho_0) + \rho_0$$

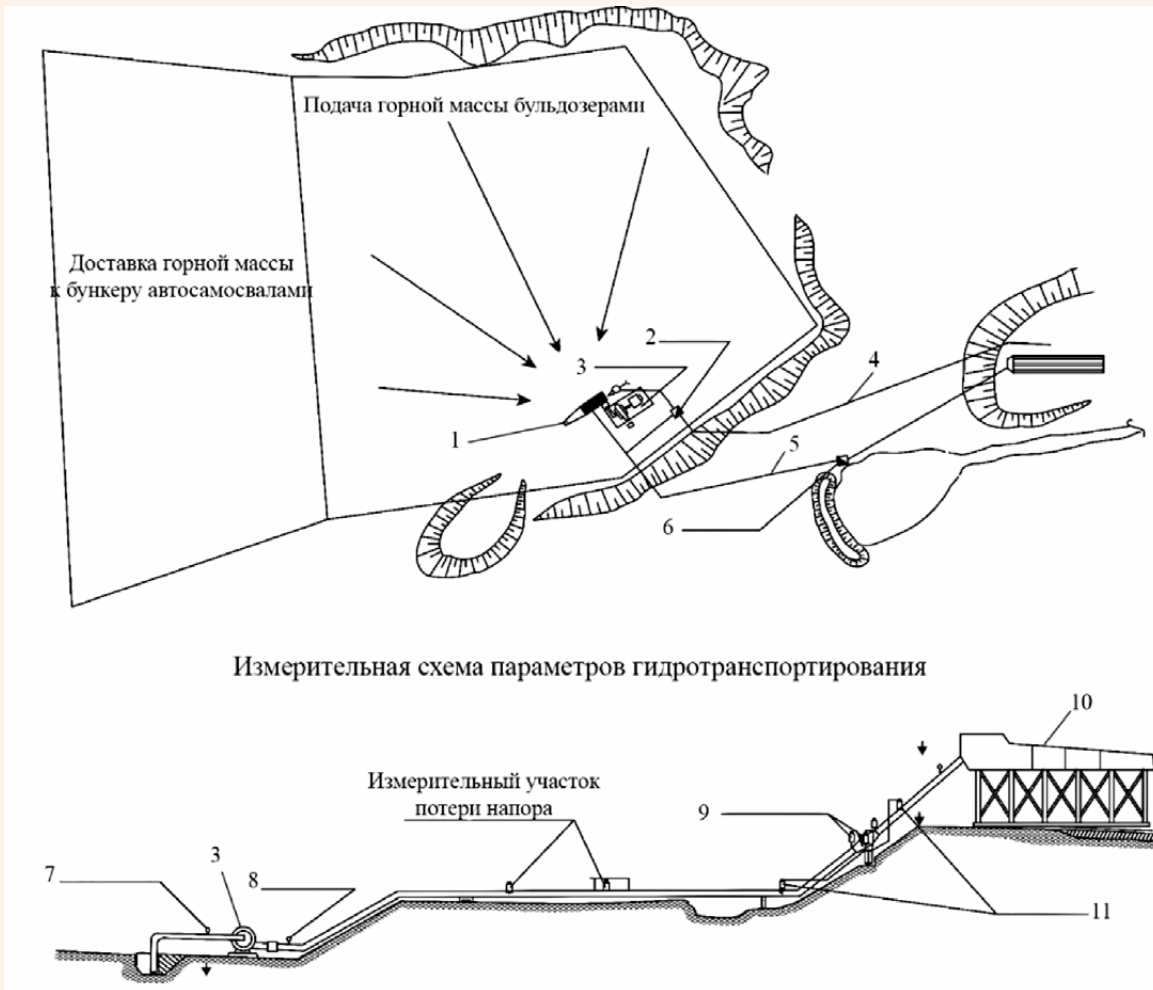
q_i – содержание частиц i -той фракции/

В работе [8] по установлению зависимости между напором землесоса на воде и гидросмеси автор основывается на том, что касательные скорости при выходе из рабочего колеса твердых частиц и жидкости, составляющих гидро-

Таблица 1.

Коэффициенты для пересчета рабочих характеристик насоса

| S | d_{cp} , мм | | | | |
|----|---------------|------|------|------|------|
| | | 0,3 | 0,5 | 1,0 | 9,3 |
| 10 | | 0,97 | 0,95 | 0,91 | 0,79 |
| 15 | | 0,95 | 0,93 | 0,88 | 0,7 |
| 20 | | 0,95 | 0,91 | 0,86 | 0,64 |



Измерительная схема параметров гидротранспортирования

Рис. 1.

Технологическая схема отработки полигона № 124: 1 – гидравлигерд, 2 – насос 12 НДС, 3 – землесос ЗГМ-2М, 4 – пульповод $\varnothing 425$ мм, $L=125$ м, 5 – водовод $\varnothing 530$ мм, $L=130$ м, 6 – насос 16 НДС, 7 – вакуумметр, 8 – манометр, 9 – расходомер, 10 – промприбор, 11 – плотинер

смесь, не одинаковы. По его мнению, принятое им допущение дает возможность теоретическим путем построить характеристики землесосов на гидросмеси, исходя из характеристик, составленных на воде. В результате чего можно избавиться от опытного определения таких характеристик.

$$H_{\Gamma} = \frac{H_0 \cdot \rho_{\Gamma}}{\rho_0} \cdot \left[1 - 0,05 \cdot \frac{\rho_{\Gamma} - \rho_0}{\rho_{\Gamma}} \cdot \left(\frac{n \cdot D_{pk}^3}{Q_0 \cdot C_{\varphi}^{0,75}} \right) \right] \quad (6)$$

где: n – частота вращения двигателя, об/с; D_k – наружный диаметр рабочего колеса, м; Q_0 – расход землесоса на воде, соответствующий максимальному КПД, м³/сек; C_{φ} – коэффициент лобового сопротивления грунта:

$$C_{\varphi} = \frac{g \cdot d_{cp}}{u^2}$$

u – гидравлическая крупность частиц, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; d_{cp} – средневзвешенный диаметр частиц, м

По результатам расчетов данного уравнения вне зависимости от гранулометрического состава (мелких фракций) напор не изменяется, т.е. он одинаков как для средневзвешенного диаметра 0,3 мм, так и для 1,0 мм. Вероятно, это связано с тем, что диаметр частиц достаточно мал и создает незначительные гидравлические сопротивления. Однако в зависимости от типа грунтонасоса значение H_z может иметь большой интервал (до 70%). При расчетах грунтонасоса ГрТ-1600/25 его напор на гидросмеси (выраженный в м. ст. гидросмеси), превышает напор грунтонасоса, работающего на воде, что по вышеописанным доводам не может считаться логичным. Кроме того, для некоторых грунтовых насосов напор на гидросмеси получается ниже, чем напор насоса, работающего на однородной жидкости той же плотности, что и гидросмесь.

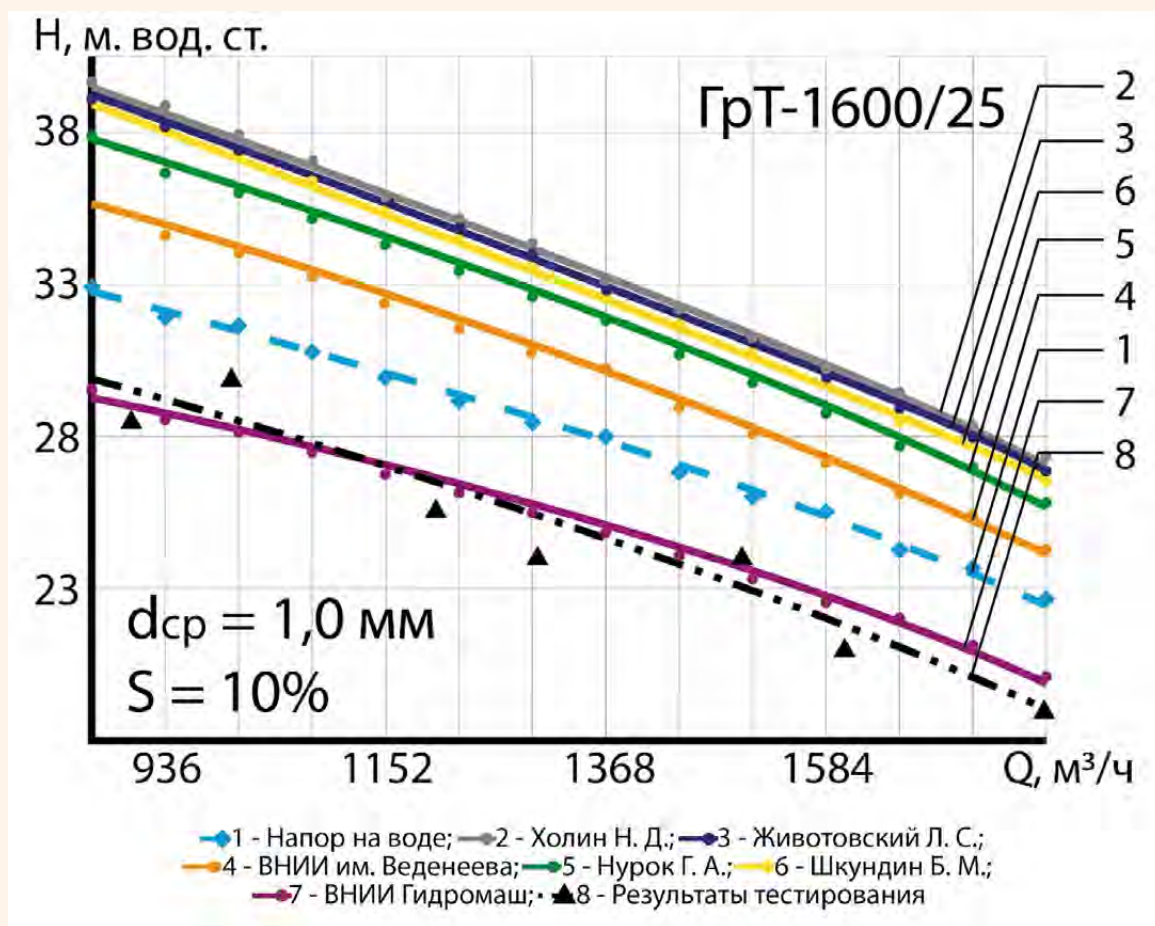


Рис. 2. Сравнение расчетных и тестируемых расходно-напорных характеристик Грунтонасоса ГрТ-1600/25 при средневзвешенном диаметре 1,0 мм с концентрацией 20%

В уравнении учитывается не фракционный состав твердого, а средневзвешенный диаметр.

Анализируя уравнения пересчета расходно-напорных характеристик грунтонасосов различных авторов и сравнительные данные, полученные в результате расчета, можно сделать вывод о значительных расхождениях их значений (до 94%), а также в принципиальном подходе к предложенным функциональным зависимостям. Развиваемый напор многими авторами предлагается измерять в метрах водяного столба, а некоторыми – в метрах столба гидросмеси, что неоднозначно влияет на конечные результаты. Кроме того, большинство авторов не приводят обоснование предлагаемых методик расчетов и условий их применения. Поэтому с целью установления конкретных параметров гидротранспортирования при проектировании гидрокомплексов и оценки предлагаемых методов пересчета нами было проведено тестирование при эксплуатации некоторых агрегатов ЗГМ-2М и ГрТ-1600/25 в производственных условиях.

Исследования проводились на прииске «Экспериментальный» (полигон 124) при раз-

работке террасовой россыпи на р. Куранах, на котором вскрыша была проведена в зимнее время с рыхлением мерзлых торфов БВР, погружкой взорванной породы экскаватором ЭКГ-4,6 в самосвалы БелАЗ-540 и вывоз ее во внешние отвалы (рис. 1).

Для разработки горной массы в летнее время применялись бульдозеры и экскаватор ЭКГ-4,6. Доставка песков к гидровашгерду землесоса осуществлялась по различным технологическим схемам. Первоначально, на площадях, непосредственно примыкающих к бункеру землесоса, пески подавались бульдозерами различных марок (Д-494, Д-572, Д-9Н); расстояния при этом изменялись от 40 до 80 м. Затем горная масса от экскаватора ЭКГ-4,6 транспортировалась самосвалам БелАЗ-540 к зумпфу землесоса и подавалась на решетку гидровашгерда бульдозерами. Применялся также вариант непосредственной подачи песков самосвалом на грохот гидровашгерда.

Размыв горной массы на грохоте и удаление надрешетного материала по наклонному лотку гидровашгерда в галечный отвал осуществля-

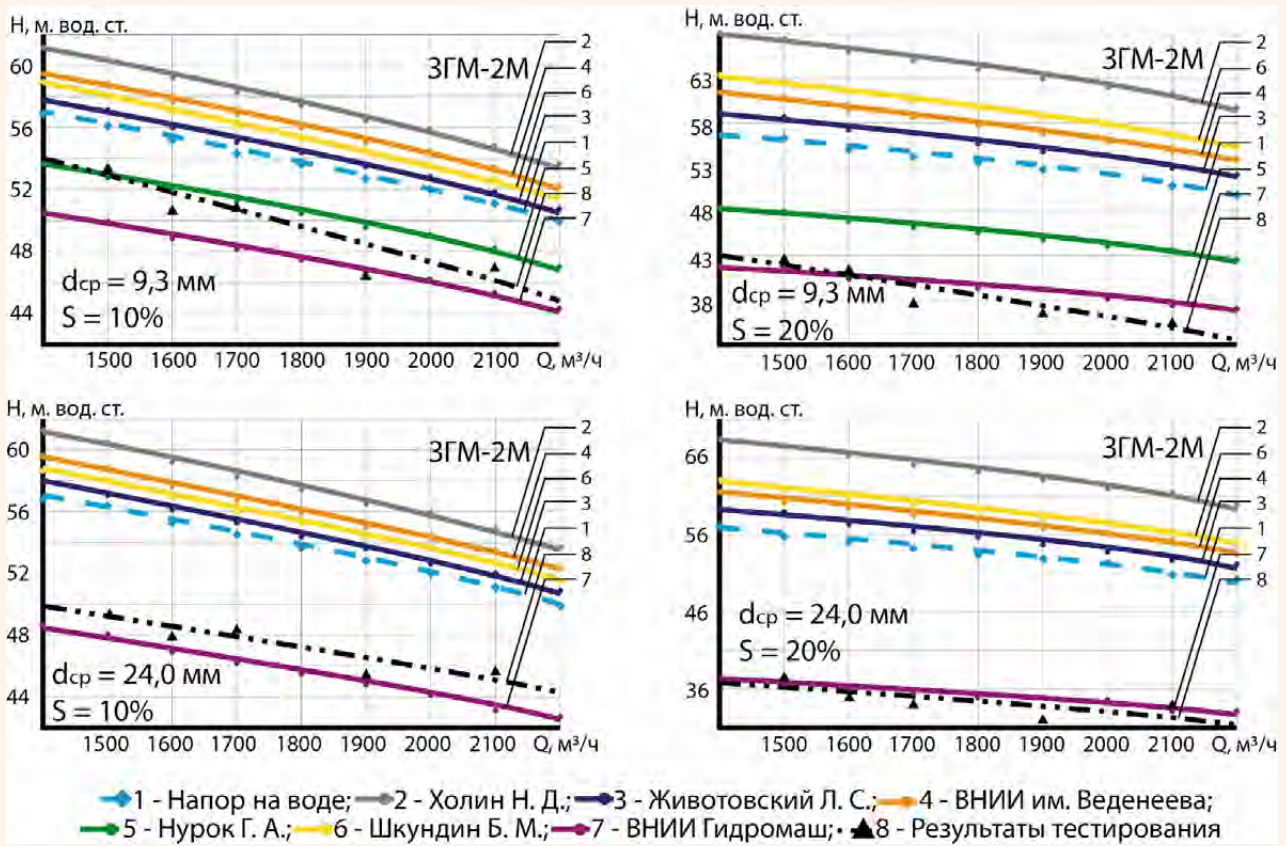


Рис. 3.

Сравнение расчетных и тестируемых расходно-напорных характеристик землесоса ЗГМ-2М при средневзвешенных диаметрах 9,3 и 24,0 мм с концентрациями 10 и 20%. Таким образом, проведенный сравнительный анализ различных эмпирических зависимостей с результатами тестирования дает основание считать базовой для пересчета расходно-напорной характеристики грунтонасосов ЗГМ-2М и ГрТ-1600/25 с воды на гидросмесь методику, разработанную ВНИИ Гидромаш.

лись струей гидромонитора ГМН-250С. Уборка галечного отвала производилась бульдозером. Гидросмесь транспортировалась на обогащательную установку землесосом ЗГМ-2М по пульповоду диаметром 426 мм на расстояние $L_{тр}=125$ м, высота подъема $H = 5,5$ м.

Вода к землесосу подавалась насосом 16-НДН по трубопроводу диаметром 530 мм. При этом часть воды подавалась на гидромонитор, а остальная поступала непосредственно в зумпф. С целью создания у насадки гидромонитора давления, необходимого для размыва песков и выгонки валунов, использовался дополнительный насос 12НДС.

Методическое сопровождение производственных исследований обеспечивалось контрольно-измерительной аппаратурой (расходомер, плотномер), работа которых основана на принципе переменного перепада давления, разработанной специалистами института гидромеханики академии наук Украины [9]. Испытания оперативной системы контроля режима и параметров работы землесосной установки подтвердили ее надежность и достаточную точ-

ность показаний по учету объема переработанной горной массы, не выходящую за пределы маркшейдерского замера.

Гидродинамический расходомер гидросмеси состоял из расширяющегося устройства (труба Антивентури), двух отборников давления с эластичными разделителями, системы импульсных трубок, мембранного дифманометра ДМ модели 23573, вторичного прибора – самописца, а также системы электросвязи дифманометра со вторичным прибором.

Принцип действия расходомера основан на зависимости расхода гидросмеси от перепада давления, образующегося в результате преобразования части кинетической энергии потока, протекающего по трубопроводу в потенциальную.

Измерения расхода гидросмеси осуществляется по следующей схеме. При движении гидросмеси через трубу Антивентури в расширенной части расходомера создается избыточное давление по сравнению с напором в пульповоде с износостойкой вставкой. Избыточное давление из расширяющегося устройства передается через

| Расход, м ³ /ч | Напор, м. вод. ст. | | Разница, % |
|---|--------------------|--------|------------|
| | Тестирование | Расчет | |
| 1. | 2. | 3. | 4. |
| <i>ЗГМ-2М, d_{ср} = 9,3 мм и S = 0,073</i> | | | |
| 1500 | 53,4 | 52,8 | 1,1 |
| 1600 | 50,6 | 51,4 | 1,6 |
| 1700 | 50,8 | 50,2 | 1,2 |
| 1900 | 46,3 | 48,0 | 3,7 |
| 2100 | 47,0 | 46,0 | 2,1 |
| <i>ЗГМ-2М, d_{ср} = 9,3 мм и S = 0,2</i> | | | |
| 1500 | 42,5 | 41,9 | 1,4 |
| 1600 | 40,8 | 40,3 | 1,2 |
| 1700 | 37,6 | 39,1 | 4 |
| 1900 | 36,4 | 36,7 | 1 |
| 2100 | 35,2 | 34,5 | 2 |
| <i>ЗГМ-2М, d_{ср} = 24,0 мм и S = 0,073</i> | | | |
| 1500 | 49,3 | 46,4 | 6 |
| 1600 | 47,9 | 45,5 | 5 |
| 1700 | 48,3 | 44,6 | 7,7 |
| 1900 | 45,3 | 43,2 | 4,7 |
| 2100 | 45,6 | 41,7 | 8,5 |
| <i>ЗГМ-2М, d_{ср} = 24,0 мм и S = 0,2</i> | | | |
| 1500 | 37,0 | 36,5 | 1,5 |
| 1600 | 35,7 | 35,0 | 1,1 |
| 1700 | 34,1 | 34,8 | 2 |
| 1900 | 32,0 | 33,4 | 4,5 |
| 2100 | 33,2 | 32,1 | 3,3 |
| <i>ГрТ-1600/25, d_{ср} = 1,0 мм и S = 0,2</i> | | | |
| 900 | 28,5 | 29,4 | 3,2 |
| 1000 | 30,0 | 28,3 | 6 |
| 1200 | 25,5 | 25,9 | 1,5 |
| 1300 | 24,0 | 24,9 | 4 |
| 1500 | 24,0 | 22,6 | 6 |
| 1600 | 21,0 | 21,5 | 2,5 |
| 1800 | 19,0 | 18,8 | 1 |

Таблица 2.
Сравнительные результаты расчетов по уравнениям и тестирования

отборники давления с эластичными разделителями и систему импульсных трубок в рабочие камеры дифманометра. В последнем полученная разность давления с помощью дифтрансформаторной системы преобразуется в унифицированный электрический сигнал, который по кабелю передается на вторичный прибор – самописец.

Принцип действия гидростатического плотнометра основан на измерении дифманометром перепада давления, вызванного весом столба гидросмеси, движущейся по наклонному трубопроводу. Он включал в себя шаровый датчик давления конструкции К.В. Деминского, два отборника давления, систему импульсных трубок, дифманометр, вторичный прибор – самописец и устанавливался на подъеме пульповода к промывочному прибору.

Аналогичный контрольно-измерительный комплекс использовался при тестировании грунтового насоса ГрТ-1600/25 при его эксплуатации на полигоне 44. Технологическая схема разработки полигона была следующей. Пески разрабатывались бульдозерами и подавались на гидровашгерд гидроэлеваторной установки ГЭП, где осуществлялся процесс пульпоприготовления напорной струей гидромонитора ГМН-250С. Затем ГЭПом гидросмесь по трубопроводу $D_v = 400$ мм и длиной $L = 91$ м подавалась в 12ГРУЛ-12 (ГрТ-1600/25). Разница геодезических отметок при этом составила 9,5 м. Далее гидросмесь транспортировалась грунтовым насосом к обогательному оборудованию на высоту 14 м.

Пульповод грунтового насоса был смонтирован из труб диаметром 426 мм; $L = 110$ м; и труб диаметром 375 мм; $L = 45$ м, общая высота подачи песков составила 23,5 м, длина транспортирования $L_{тр} = 135$ м.

Проведенный анализ по определению расходно-напорной характеристики грунтовых насосов (землесосов) показывает, что большинство методик не имеют аналитического или экспериментального обоснования, поскольку результаты формул не соответствуют полученным данным [10]. Сопоставление расчетных показателей по различным уравнениям, представленным на рис. 2 и 3 с результатами опытных исследований, позволяет сделать вывод о значительных отклонениях значений $H = f(Q)$ от экспериментальных. Большинство расчетных показателей отличаются от фактических в некоторых случаях вдвое.

Однако для более корректного вычисления величин H_2 необходимо ввести в это уравнение поправочные коэффициенты $K_{попр}$. В результате аппроксимации расчетной и тестируемой функциональной зависимостей $H = f(Q)$, полученные значения поправочных коэффициентов для:

$$ЗГМ-2М, d_{cp}=9,3 \text{ мм и } S=10\% - K_{попр}=(6,5 \times \ln(Q)-50,8)$$

$$ЗГМ-2М, d_{cp}=9,3 \text{ мм и } S=20\% - K_{попр}=(10,4 \times \ln(Q)-76,6)$$

$$ЗГМ-2М, d_{cp}=24,0 \text{ мм и } S=10\% - K_{попр}=(1,0 \times \ln(Q)-6,1)$$

$$ЗГМ-2М, d_{cp}=9,3 \text{ мм и } S=10\% - K_{попр}=(2,8 \times \ln(Q)-20)$$

$$ГрТ-1600/25, d_{cp}=1,0 \text{ мм и } S=20\% - K_{попр}=(2 \times \ln(Q)-14,4)$$

В итоге расходно-напорную характеристику можно определять по уравнению:

$$H_{Г} = H_0 \cdot \left[1 - \sum K_H^i \cdot \frac{\rho_{Г}^i - \rho_0}{\rho_{Г}} \right] - K_{попр} \quad (7)$$

Сравнительные результаты тестирования грунтонасосов и тестирования представлены в табл. 2.

Результаты исследований показывают хорошую сходимость уравнения (7) с опытно-промышленными данными. Отклонения не превышают 9% (максимальное) и 1–3% (среднее), что находится в пределах маркшейдерского замера и позволяет рекомендовать его для пересчета расходно-напорных характеристик с воды на гидросмесь.

Испытания, проведенные при эксплуатации землесоса ЗГМ-2М и грунтонасоса ГрТ-1600/25, также показали, что с увеличением концентрации транспортируемой гидросмеси уменьшается развиваемый грунтонасосом напор, повышается потребляемая мощность и уменьшается КПД. При этом изменяется расход гидросмеси, что увеличивает возможность образования зоны кавитации, когда агрегат работает недостаточно устойчиво и может прекратить подачу вследствие срыва вакуума (разрыва сплошности потока) во всасывающей трубе.

В заключении можно отметить, что несмотря на большое количество параметров, которые теоретически могут влиять на напор, развиваемый землесосом (конструктивные особенности грунтонасосов, свойства твердого компонента), ключевыми являются гранулометрический состав и концентрация гидросмеси, в то время как другими параметрами можно пренебречь. ■

Литература

1. Ялтанец И.М. Гидромеханизированные и подводные горные работы. М.: Горная книга. 2012. 716 с.
2. Нормы технологического проектирования предприятий промышленности нерудных материалов. Л.: Издательство литературы по строительству. 1968. 359 с.

3. Шкундин Б.М. Машины для гидромеханизации земляных работ. М.: Стройиздат. 1974. 184 с.
4. Инструкция по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов / Под редакцией И.А. Гиршкана. Л.: Энергия. 1972. 32 с.
5. Харин А.И., Новиков М.Ф. Гидромеханизация земляных работ в строительстве. М.: Стройиздат. 1989. 191 с.
6. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. М.: Недра. 1985. 471 с.
7. Центробежные насосы для абразивных гидросмесей. Каталог / Под редакцией Д.С. Сомойловича. М.: Цинтихимнефтемаш. 1989. 25 с.
8. Животовский Л.С. Нормы технологического проектирования предприятий промышленности нерудных строительных материалов. Л.: Издательство литературы по строительству. 1968. 366 с.
9. Силян Н.А., Пищенко И.А., Диминский К.В., Кондаков В.Н., Стовбун И.И. Приборы для измерения параметров гидротранспортирования твердых материалов. Киев: Издательство Академии наук. 198 с.
10. Дробаденко В.П., Малухин Г.Н., Салахов И.Н. К вопросу пересчета паспортных характеристик грунтонасоса с воды на гидросмесь / Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 7 тт. 2019. С. 178–181.

UDC 622.271.6

V.P. Drobadenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of Geotechnological Methods and Physical Processes of Mining, MGRI¹, drobadenko@mail.ru

I.N. Salakhov, Post-graduate Student, MGRI¹, salahovin@mgri.ru

¹Russia, 117997, Moscow, st. Miklukho-Maclay, 23.

Determination of Head-capacity Characteristics of Dredge Pumps Working with Slurry of Different Density and Grain-size Distribution

Abstract. This paper presents an analysis of various methods of converting the head–capacity characteristics of dredge pumps usually set for dredge pumps in factory tests with water, into a pumped slurry having certain volume density and weighted average diameter. The calculation results obtained are compared with the results of dredge pump field testing in the development of a placer gold deposit with the use jetting equipment. Comparison of the established data with the proposed methods is presented; the equations closest to the calculated results are approximated, which are proposed to convert the head–capacity characteristics from water to slurry for weighted average diameters of 1.0, 9.3, and 24.0 mm and concentration of 10 and 20%.

Keywords: dredge pump; head–capacity characteristic; slurry; working conditions; concentration; weighted average diameter of solid component; jetting operations; pilot works; testing; conversion methods; hydraulic transportation; hydraulic dredge.

References

1. Ialtanets I.M. *Gidromekhanizirovannyye i podvodnyye gornyye raboty* [Hydromechanized and underwater mining]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2012, 716 p.
2. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya predpriyatii promyshlennosti nerudnykh materialov* [Standards for technological design of nonmetallic materials industry enterprises]. Leningrad, Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu Publ., 1968, 359 p.
3. Shkundin B.M. *Mashiny dlia gidromekhanizatsii zemlianykh rabot* [Machines for hydromechanization of earthworks]. Moscow, Stroizdat Publ., 1974, 184 p.
4. *Instruktsiia po gidravlicheskomu raschetu sistem napornogo gidrotransporta gruntov* [Instructions for the hydraulic calculation of pressure hydrotransport systems of soils]. Edited by I.A. Girshkan. Leningrad, Energiia Publ., 1972, 32 p.
5. Kharin A.I., Novikov M.F. *Gidromekhanizatsiia zemlianykh rabot v stroitel'stve* [Hydromechanization of earthworks in construction]. Moscow, Stroizdat Publ., 1989, 191 p.
6. Nurok G.A. *Protsessy i tekhnologiya gidromekhanizatsii otkrytykh gornykh rabot* [Processes and technology of hydromechanization of open pit mining]. Moscow, Nedra Publ., 1985, 471 p.
7. *Tsentrobeznyye nasosy dlia abrazivnykh gidrosmesi. Katalog* [Centrifugal pumps for abrasive slurries. Catalog]. Edited by D.S. Somoilovich. Moscow, Tsintikhimneftemash Publ., 1989, 25 p.
8. Zhivotovskii L.S. *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya predpriyatii promyshlennosti nerudnykh stroitel'nykh materialov* [Standards for technological design of enterprises in the industry of nonmetallic building materials]. Leningrad, Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu Publ., 1968, 366 p.
9. Silin N.A., Pishchenko I.A., Diminskii K.V., Kondakov V.N., Stovbun I.I. *Pribory dlia izmereniia parametrov gidrotransportirovaniia tverdykh materialov* [Instruments for measuring parameters of hydrotransportation of solid materials]. Kiev, Izdatel'stvo Akademii nauk Publ., 198 p.
10. Drobadenko V.P., Malukhin G.N., Salakhov I.N. *K voprosu perescheta pasportnykh kharakteristik gruntonasosa s vody na gidrosmes'* [On the issue of recalculation of the passport characteristics of the ground pump from water to slurry]. *Novyye idei v nauках o Zemle* [New ideas in earth sciences]. Materials of the XIV International Scientific and Practical Conference. In 7 volumes. 2019, pp. 178–181.