

Министерство высшего и среднего специального  
образования СССР



ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

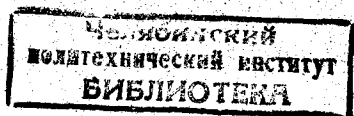
На правах рукописи

ЛОЖКОВ Евгений Федорович

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОТРАНСПОРТНЫХ УСТАНОВОК С  
ГИДРОЭЛЕВАТОРАМИ

Специальность 05.23.04 - "Водообеспечение и  
канализация"

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Челябинск  
1974

Работа выполнена на кафедре "Гидравлика и гидравлические машины" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель -

доцент, канд. техн. наук В.К.Темнов.

Официальные оппоненты:

профессор, докт. техн. наук А.И.Борохович,

канд. техн. наук В.И.Васильев.

Ведущее предприятие - трест "Челябспецотрой".

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " 1974 г.

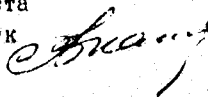
Защита диссертации состоится " 2 " октября 1974 г., в 15 час., в 428 аудитории на заседании Совета по присуждению ученых степеней инженерно-строительного факультета Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Просим Вас и Ваших сотрудников, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Совета или прислать свои отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью Вашего учреждения, по адресу: 454044, г. Челябинск-44, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЧПИ, Ученый Совет.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета

доцент, канд. техн. наук

 В.В.КАПРАНОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Гидротранспорт различных материалов с каждым годом находит все большее применение в различных областях народного хозяйства. Дальнейшее совершенствование гидравлических машин, уменьшение их абразивного износа от твердых частиц и выбор наиболее экономичных режимов работы представляет в настоящее время одну из главных задач в исследованиях систем напорного гидротранспорта.

В системах напорного гидротранспорта наряду с грунтовыми насосами и эрлифтами используются струйные насосы (гидроэлеваторы). В гидротранспортных установках с гидроэлеваторами центробежные насосы работают на чистой воде и не подвергаются абразивному износу от твердых частиц. Тем самым частично решается одна из главных проблем — уменьшение абразивного износа основного гидравлического оборудования и повышение надежности его эксплуатации.

Благодаря простоте конструкции, небольшому весу и габаритам, надежности и простоте в обслуживании, высокому коэффициенту использования рабочего времени гидроэлеваторы находят применение в различных областях народного хозяйства и в том числе при строительстве и эксплуатации водопроводно-канализационных систем.

Одним из основных недостатков гидроэлеваторов принято считать их низкий КПД в сравнении с грунтовыми насосами. Это ошибочное мнение обусловлено неправильным выбором оптимальных режимов работы гидроэлеваторов и схем их использования. Кроме того, при выборе оптимальных режимов работы гидроэлеватора не учитывается режим движения гидросмеси в напорном трубопроводе. В литературе отсутствуют надежные рекомендации по выбору оптимального режима транспортирования гидросмеси и методика расчета всей системы, что затрудняет выбор наиболее экономичных условий работы гидроэлеваторных установок.

Разрешение проблемы повышения эффективности гидротранспортных установок с гидроэлеваторами и разработка более совершенной методики их расчета является современной и актуальной задачей исследования.

**Ц е л ь р а б о т ы.** Основной задачей настоящей диссертационной работы является повышение экономичности гидротранспорти-

ных установок с гидроэлеваторами путем выбора оптимальных режимов и геометрических размеров системы и разработка инженерной методики ее расчета. В связи с этим в диссертационной работе были поставлены и решались следующие задачи:

1. Определение экстремальных напорных характеристик и оптимальных геометрических размеров аппарата при различной плотности гидросмеси, выявление предельной всасывающей способности и предельных (по условиям кавитации) напоров.

2. Определение оптимальных режимов системы: центробежный насос - гидроэлеватор - напорный трубопровод для гидротранспортных установок различного назначения.

3. Разработка инженерной методики расчета оптимальных гидротранспортных систем с гидроэлеваторами, используемых при строительстве и эксплуатации водопроводно-канализационного хозяйства.

Методика выполнения исследований. При определении экстремальных режимных характеристик и оптимальных геометрических размеров гидроэлеватора использовались основные уравнения, описывающие процесс смешения потоков в проточной части аппарата: уравнение энергий, количества движения и неразрывности потока.

За меру эффективности работы системы центробежный насос - гидроэлеватор - напорный трубопровод при выборе оптимальных режимов принимались затраты энергии на гидротранспорт  $I \text{ м}^3$  твердого материала и стоимость единицы продукции транспортируемого грунта. Эти же параметры были приняты и при сравнительной оценке эффективности работы гидроэлеваторов с грунтовыми насосами.

Экспериментальные исследования гидроэлеваторов проводились на крупномасштабной и малой установках на воде и гидросмеси вплоть до сухой засыпки грунта. В процессе опытов снимались энергетические характеристики гидроэлеваторов в широком диапазоне изменения относительной площади сопла, положений сопла, крупности твердой фракции. Экспериментами подтверждены основные теоретические зависимости гидроэлеватора, принятые при анализе его работы.

При разработке методики расчета установок с гидроэлеваторами на оптимальные условия работы использовались графические зависимости между основными режимными и геометрическими ха-

ра характеристиками гидроэлеватора, а также напорного трубопровода, которые позволили существенно упростить расчет гидротранспортных систем.

**Н а у ч н а я н о в и з н а.** Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено, что одной из основных причин низкой эффективности работы гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта является либо нерациональное использование гидроэлеватора в данной системе, либо неправильное определение оптимальных режимов. При рациональном использовании гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта их КПД может быть достаточно высоким ( $\eta > 50\%$ ).

В работе обоснованы области наиболее эффективного использования гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта.

При разработке методики расчета рассматривалась комплексно вся гидротранспортная установка: центробежный насос - гидроэлеватор - напорный трубопровод, что позволило обосновать оптимальный режим работы всей системы.

Расчет оптимальных гидротранспортных систем различного назначения: при сухой засыпке грунта, подводной разработке грунта для удаления осадка из песколовок, нефтеловушек, водоприемных камер, промывке фильтров и удаления золошлаковых остатков доведен до простых инженерных вычислений.

**П р а к т и ч е с к а я ц е н н о с т ь.** Обоснование возможности существенного повышения эффективности гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта представляет основную практическую ценность работы. Технико-экономический анализ эффективности работы гидроэлеваторных установок, используемых для сортировки гравия и песка в тресте "Уралсибгидромеханизация" показал, что за счет улучшения геометрии гидроэлеватора и выбора наиболее экономичного режима затраты энергии на укладку готовых продуктов снижаются со 180-250 квт до 70-86 квт.

При удалении золошлаковых остатков затраты энергии снижаются в 1,7-2,1 раза.

При удалении осадка из песколовок, нефтеловушек и водоприемных камер за счет увеличения консистенции пассивного потока с помощью всасывающих наконечников затраты энергии на единицу транспортируемого осадка возможно снизить в 3-4 раза. Причем с увеличением консистенции осадка улучшается эксплуата-

тация песковых площадок и сокращаются затраты на возврат воды.

**А п р о б а ц и я р а б о т ы.** Основные положения диссертации и отдельные ее разделы докладывались и обсуждались:

1. На Всесоюзном совещании по гидрозолоудалению на тепловых электростанциях. Юж.СРГРЭС, Львов, 1967.
2. На научно-технической конференции по вопросам очистки природных и сточных вод. Челябинск, 1968.
3. На II научно-технической конференции УПИ им. С.М.Кирова, строительный факультет, Свердловск, 1968.
4. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола. Челябинск, 1967-70, 1972.
5. На XXXI научно-технической конференции МИСИ им. В.В.Куйбышева, гидротехнический факультет, Москва, 1972.

**П у б л и к а ц и я.** По результатам выполненных исследований опубликовано 9 печатных работ.

**О б ъ е м р а б о т ы.** Диссертация содержит 144 страницы машинописного текста, 33 рисунка и 20 таблиц и состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка использованной литературы из 159 наименований.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**П е р в а я г л а в а** посвящена краткому историческому обзору литературы по исследуемому вопросу, анализу рекомендуемых режимов работы и форм проточной части гидрозелваторов, а также анализу основных методов расчета этих машин, предлагаемых различными исследователями.

В первой главе обоснованы актуальность проблемы и основные задачи исследования.

Работы Г.Н.Абрамовича, Л.Д.Бермана, П.Н.Каменев, Е.А.Сokolova и Н.М.Зингера, Г.А.Аронса, Б.Э.Фридмана, Б.В.Канторовича, Л.Г.Подвидза и Ю.Л.Кирилловского, Х.Ш.Мустьфина, Г.И.Ефимочкина, Б.А.Москалькова, Б.Д.Тиховидова и Н.С.Болотских, Л.К.Темнова и других исследователей способствовали развитию теории струйных насосов, совершенствованию методики и конструктивных форм проточной части этих машин. Все это позволило более эффективно использовать струйные насосы в различных областях народного хозяйства.

Однако до настоящего времени принято считать, что струй-

ные насосы (гидроэлеваторы) имеют низкий КПД в сравнении с грунтовыми насосами. Например, К.К.Баулин, Г.Н.Абрамович, С.А.Коржаев, Б.Д.Тиховидов, Н.С.Болотских и другие исследователи низкое значение КПД эжекторов и гидроэлеваторов определяют природой самого процесса эжекции. Это ошибочное заключение сдерживает более широкое использование гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта.

Характерной особенностью работы гидроэлеваторов является то, что активный поток при сменении отдает лишь часть своей энергии пассивному потоку, а оставшая часть этой энергии остается у активного потока на выходе из гидроэлеватора. Это остаточная энергия активного потока. В.К.Темнов впервые показал, что при обеспечении оптимальной консистенции гидросмеси в напорном трубопроводе остаточная энергия активного потока полностью используется в технологическом процессе и эффективность гидроэлеваторов существенно повышается. Неучет остаточной энергии приводит к неоправданному занижению КПД гидроэлеватора по сравнению с действительным его значением. Эти выводы В.К.Темнова были положены в основу настоящей работы.

Эффективная работа гидроэлеваторов с использованием остаточной энергии активного потока в некоторых системах водоснабжения, отопления и обогащения отмечались и ранее в работах Г.А.Аронса, П.Н.Каменева и Б.Э.Фридмана. Однако выбор оптимальных режимов и геометрических размеров гидроэлеваторов производился на основе неправильного выражения КПД и не позволяя получить действительно эффективный аппарат.

Исследования, выполненные на кафедре гидравлики и гидромеханики ЧПИ им. Ленинского комсомола, показали, что поскольку расчет гидроэлеваторов производится, как правило, на максимальное значение КПД, то способ вычисления последнего имеет принципиальное значение. Различный подход в оценке эффективности гидроэлеваторов приводит и к различным рекомендациям по выбору оптимальных режимов их работы. В настоящее время при расчете гидроэлеваторов для систем напорного гидротранспорта оптимальные режимы рекомендуются при относительно расходе активного потока (отношение расхода активного потока к общему расходу гидросмеси)  $Q_* = Q_0 / Q_r = 0,3-0,6$ . В действительности при рациональном использовании гидроэлеваторов оптимальные режимы соответствуют большим значениям  $Q_*$ , - это режимы с сухой засыпкой грунта в гидроэлеватор.

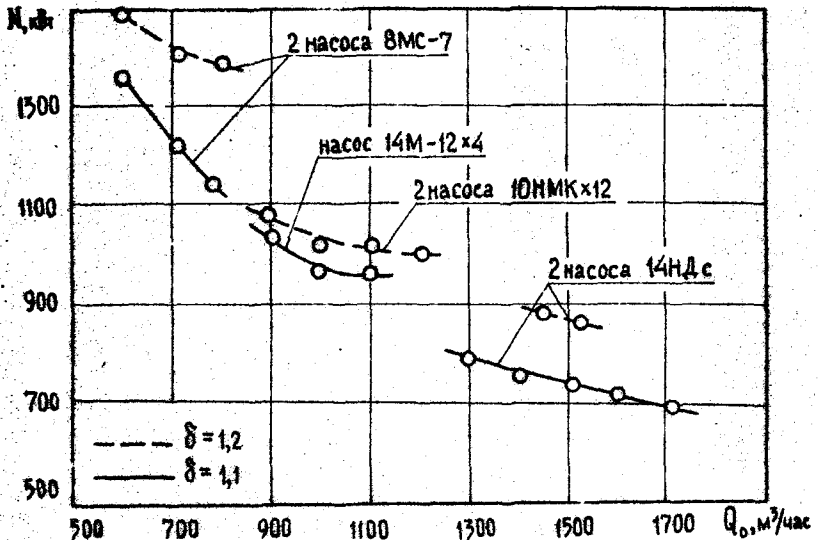


Рис. 1. Затраты энергии в зависимости от расхода активного потока при работе гидроэлеватора

На рис. 1 приведен график зависимости потребной мощности на валу центробежных насосов от расхода активного потока при неизменном режиме движения гидросмеси в напорном трубопроводе: общий расход гидросмеси  $Q_0 = 1900 \text{ м}^3/\text{час} = \text{const}$ , напор на выходе из гидроэлеватора  $H = 60 \text{ м} = \text{const}$ , относительная плотность гидросмеси  $\delta = 1,1 \text{ и } 1,2 = \text{const}$  и относительная плотность твердой фракции  $\delta_s = 2,0 = \text{const}$ . Исходные данные по расходу и напору соответствуют параметрам грунтового насоса ЗГМ-2М. Видно, что уменьшение расхода активного потока от  $Q_0 = 1710 \text{ м}^3/\text{час}$  (режим с сухой засыпкой грунта) до  $600 \text{ м}^3/\text{час}$  вызывает увеличение потребной мощности на валу центробежного насоса в два раза. На режимах с сухой засыпкой грунта в гидроэлеватор потребная мощность на валу центробежного насоса, обеспечивающего работу гидроэлеватора, соответствует мощности на валу грунтового насоса при его  $\eta = 50\%$ .

В первой главе анализируются также методы расчета гидроэлеваторов Б.Э.Фридмана, П.Н.Каменева, Государственного проектного института "Совхозоканалпроект", И.Л.Монгайта и И.Д.Родзиллера, Е.Я.Соколова и Н.М.Эингера, Л.Г.Подвидза и Ю.Л.Кириллов-



ского и других исследователей. Отмечаются недостатки методов расчета гидроэлеваторов для систем напорного гидротранспорта. При расчете оптимальных режимов работы гидроэлеваторов используется, как правило, трудоемкий и громоздкий метод подбора. Анализ примеров расчета, приведенных в работах П.Н.Каменева, Е.А.Соколова и Н.М.Зингера, показал, что при тех же исходных данных, но при правильно выбранных оптимальных режимах работы гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта затраты энергии возможно уменьшить в 1,7-2 раза.

Вывод Б.Э.Фридмана о наиболее экономичных режимах работы гидроэлеватора при больших напорах активного потока и соответственно при малых значениях относительной площади сопла следует считать ошибочным. Это наиболее неэкономичные режимы работы гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта.

Большинство исследователей при выборе оптимальных режимов работы гидроэлеватора не учитывают режим движения гидроемеси в напорном трубопроводе. Поэтому рекомендуемые оптимальные режимы не всегда являются таковыми для всей системы.

Отмечается также, что в учебной литературе по гидромеханике и в справочной литературе по водоснабжению и канализации нет удовлетворительного метода расчета гидроэлеваторов для систем напорного гидротранспорта. Практически отсутствует методика расчета всей гидротранспортной установки с гидроэлеватором на оптимальный режим работы.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям гидроэлеваторов. В ней приводится основное уравнение гидроэлеватора, рассмотрены предельные режимы его работы по условиям кавитации, выполнен анализ режимов работы гидроэлеваторов в системах гидроозонудаления, исследованы режимы с сухой засыпкой грунта с целью определения среди них наиболее экономичного, приведено сравнение эффективности работы гидроэлеваторов и грунтовых насосов.

Основное уравнение гидроэлеватора дается в следующем виде:

$$H_r = 1 - \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_0}\right) \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2 - 2\Omega \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_0}\right) \frac{\delta - 1}{\delta} - \delta \left[ \tau_1 + \varphi_0 \left(1 - \frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2 \right] \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2, \quad (I)$$

где  $H_r = \frac{H}{H_c}$  - относительный напор гидроэлеватора (отношение напора на выходе из гидроэлеватора  $H$  к скорост-

ному напору струи активного потока на выходе из сопла  $H_c$ );

$\Omega = \frac{\omega_c}{\omega_k}$  - относительная площадь сопла (отношение площади сопла  $\omega_c$  к площади камеры смешения  $\omega_k$ );

$Q = \frac{Q_c}{Q_r}$  - относительный расход активного потока (отношение расхода активного потока  $Q_c$  к общему расходу гидросмеси  $Q_r$ );

$\delta = \rho_r / \rho_0$  - относительная плотность гидросмеси (отношение плотности гидросмеси на выходе из гидроэлеватора  $\rho_r$  к плотности воды  $\rho_0$ );

$\varphi_r, \varphi_0$  - коэффициент сопротивления трения рабочей камеры и коэффициент полноты удара в диффузоре;

$\omega_r$  - площадь живого сечения напорного трубопровода.

Изменение относительного расхода  $Q$  при неизменных характеристиках потока в конце диффузора изменяет относительные размеры сопла  $\Omega$ , а, следовательно, и соотношение площадей живых сечений камеры смешения и напорного трубопровода. Взаимосвязь этих величин представлена в следующем виде:

$$\frac{\omega_c}{\omega_r} = \beta \frac{Q_r}{\Omega} \sqrt{H_c}; \quad \beta = \frac{Q_r}{\omega_r \sqrt{2gH}} \quad (2)$$

где  $\beta$  - безразмерная характеристика потока в начале напорного трубопровода (наиболее вероятный диапазон изменения  $\beta = 0-0,2$ ).

Подставляя в основное уравнение гидроэлеватора (1) обобщенную характеристику режима движения гидросмеси в напорном трубопроводе (2), получим:

$$H_c = 1 - 1 - \frac{Q}{1 - Q} \left( 1 - \frac{Q}{Q} H_c - 2\Omega \left( 1 - \frac{Q}{Q} \right) \frac{Q}{Q} - \delta \left( \frac{Q}{Q} \right)^2 + \right. \\ \left. + \varphi_0 \left( \frac{Q}{Q} - \beta \sqrt{H_c} \right)^2 \right) \quad (3)$$

При исследовании на экстремум основного уравнения гидроэлеватора (3) находились оптимальные соотношения размеров сопла и рабочей камеры, а также максимальные значения относительного напора при  $Q_c = \text{const}$  и неизменных характеристиках потока за гидроэлеватором ( $Q_r, H, \delta, \omega_r$ ).

При  $H = H_{\text{max}}$  
$$\frac{\partial H_c}{\partial \Omega} = 0. \quad (4)$$

Система уравнений (3) и (4) решалась графо-аналитически. Результаты решения уравнений приведены на рис. 2 и 3. Полученные эк-

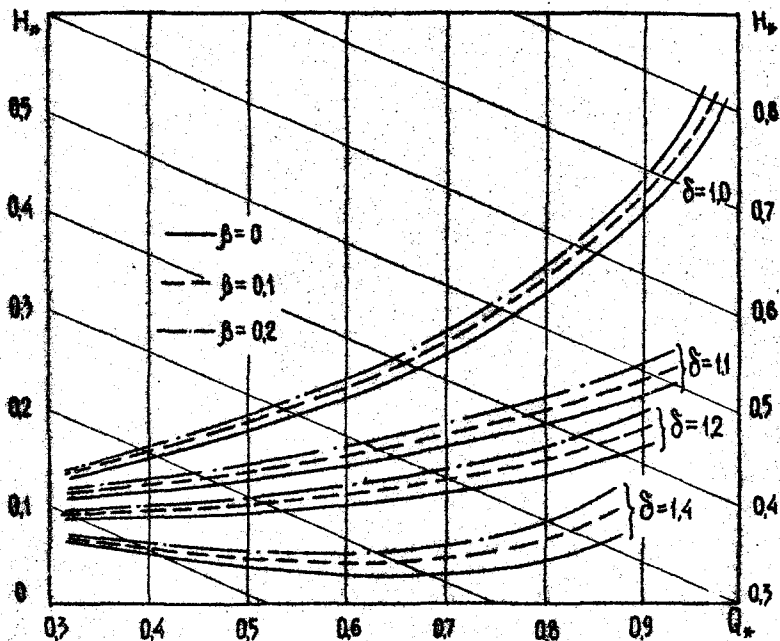


Рис. 2. Максимальные значения относительного напора гидроэлеватора

стремальные характеристики гидроэлеваторов в графической форме существенно упрощают расчет этих машин, сводя его к простым вычислениям.

Некоторые исследователи (Б.Э.Фридман, А.П.Юфин) расчет гидроэлеваторов для систем напорного гидротранспорта основывают на зависимости

$$H_*/\Omega = 1, \quad (5)$$

которая оправдана лишь для однородных потоков. При неоднородных потоках эта зависимость может дать ошибку до 40-50%.

На рис. 2 и 3 приведены характеристики гидроэлеватора при условии обеспечения бескавитационной работы аппарата. При достаточно больших напорах активного потока возможно появление зоны кавитации в начале "рабочей" камеры, что отрицательно сказывается на работе аппарата.

Предельный (критический) расход эжектируемого потока при наличии парообразования в начале камеры смешения определяется

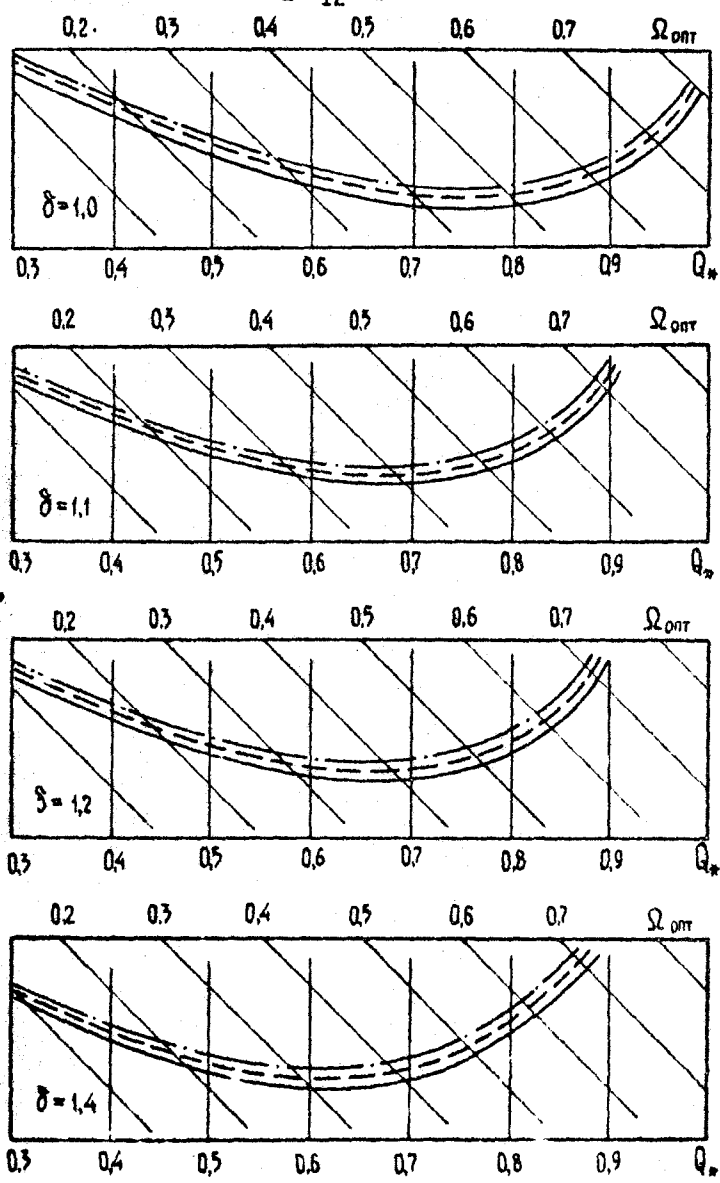


Рис. 3. Оптимальное соотношение размеров сопла и рабочей камеры

соотношением:

$$d_{кр} = \left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)_{кр} = \left(\frac{1}{Q_0} - 1\right)_{кр} = \mu_1 \frac{1-\Omega}{\Omega} \sqrt{\frac{2(P_0' - P_n)}{\rho_1 v_{c,кр}^2}}, \quad (6)$$

из которого следует выражение

$$v_{c,кр} = \mu_1 \frac{1-\Omega}{\Omega} \sqrt{\frac{2(P_0' - P_n)}{\rho_1}} : \left(\frac{1}{Q_0} - 1\right)_{кр}. \quad (7)$$

Здесь  $Q_1$  - расход пассивного (засасываемого) потока;  
 $\mu_1$  - коэффициент расхода кольцевого канала, образованного активной струей и входными стенками рабочей камеры;  
 $P_0'$  - абсолютное давление в бункере гидроэлеватора;  
 $P_n$  - абсолютное давление парообразования в начале камеры смешения при данной температуре.

По критической скорости на выходе из сопла были определены предельные напоры активного потока на срезе сопла и потока смеси в выходном сечении гидроэлеватора:

$$H_{c,кр} = \frac{v_{c,кр}^2}{2g}; \quad H_{кр} = H_{c,кр} \cdot H_{0, макс} \quad (8)$$

Приведенные в работе зависимости  $H_{c,кр} = f(Q_0)$  и  $H_{кр} = f(Q_0)$  позволяют в первом приближении установить область бескавитационной работы гидроэлеватора при различной плотности гидро-смеси.

При напорах больше предельных, во избежание кавитации, приходится уменьшать относительную площадь сопла по сравнению с оптимальной ( $\Omega < \Omega_{опт}$ ). Уменьшение относительной площади сопла при  $Q_0 = const$  и  $\delta = const$  ведет к уменьшению относительного напора  $H_*$  и, как следствие, приводит к снижению КПД гидроэлеватора.

С учетом кавитации произведен анализ работы гидроэлеваторов в системах канализации (удаления) золошлаковых остатков целью выбора наиболее экономичных режимов. Для этих систем В.А.Мелентьев и Е.Э.Нагли (ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева) рекомендуют режимы:  $Q_0/Q_1 = 0,7-1,5$  ( $Q_0 = 0,41-0,6$ ),  $H_c/H = 7-16$  ( $H_0 = 0,143-0,0625$ ) и размеры:  $d_n/d_c = 3-3,5$  ( $\Omega = 0,088-0,110$ ), как оптимальные. Практически на указанных режимах рекомендуется постоянное соотношение размеров сопла и рабочей камеры, что не соответствует теории гидроэлеваторов. Установлено, что при консистенции пассивного потока  $T:Х=1:3-1:6$  (по объему) относи-

тельная площадь сопла  $\Omega$  на наиболее экономичных режимах должна быть в 2-3 раза больше рекомендуемых значений, а соотношение напоров  $H_c/H$  в 2-3 раза меньше. Как показали расчеты, при правильном выборе режимов работы и геометрических размеров гидроэлеваторов удельные затраты энергии могут быть снижены в 1,7-2,1 раза.

Установлено, что в системах гидрозолоудаления, как и в других системах напорного гидротранспорта, наиболее экономичными режимами работы гидроэлеваторов являются режимы с сухой засыпкой грунта, при которых наиболее эффективно используется подводимая к гидроэлеватору энергия струи активного потока жидкости.

В работе приводится анализ режимов работы гидроэлеваторов при сухой засыпке грунта с целью определения среди них наиболее экономичного. За показатель экономичности приняты затраты энергии на гидротранспорт  $1 \text{ м}^3$  твердого материала. На различных режимах работы гидроэлеватора при сухой засыпке грунта определялись потребная мощность на валу центробежных насосов и удельные затраты электроэнергии:

$$N = 9,8 \frac{Q_s H_s}{3600 \eta}, \quad \varepsilon = \frac{N}{Q_s} \quad (9)$$

Расчеты были выполнены при различных напорах на выходе из гидроэлеватора. Относительная плотность твердой фракции изменялась в пределах  $\delta_r = 2-4$ . По полученным данным в работе приведены графики зависимости  $\varepsilon = f(Q_s)$  и  $\varepsilon = f(\delta_r)$ .

Анализ графиков позволил выявить некоторые закономерности:

1. Каждому значению относительной плотности твердой фракции соответствует вполне определенная оптимальная консистенция гидросмеси, при которой удельные затраты электроэнергии оказываются минимальными. Например, для грунтов с относительной плотностью твердой фракции  $\delta_r = 2,65$  оптимальная относительная плотность гидросмеси равна  $\delta_{opt} = 1,4$ .

2. Оптимальные режимы при заданной относительной плотности грунта  $\delta_r = \text{const}$  останутся неизменными при всех напорах на выходе из гидроэлеватора при условии обеспечения бескавитационного режима работы. Для этих условий при постоянном значении  $Q_s = \text{const}$  относительный напор гидроэлеватора  $H_{*max} = \text{const}$ . Поэтому при изменении напора на выходе из гидроэлеватора будет изменяться лишь абсолютное значение удельных затрат элект-

роэнергии, а характер изменения зависимости  $\xi=f(Q_2)$  остается прежним.

Во второй главе приведено также сравнение эффективности работы гидроэлеваторов и грунтовых насосов, построены графики зависимости коэффициента эффективности по грунту  $K=f(Q_2)$ . За полезную работу грунтового насоса и гидроэлеватора были приняты затраты энергии на транспортирование только твердого материала.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований гидроэлеваторов. Необходимость эксперимента диктовалась приближенным характером теории гидроэлеватора. Экспериментальных исследований гидроэлеваторов при работе с большой консистенцией гидросмеси сравнительно мало. Режимы с сухой засыпкой грунта практически совсем не исследовались.

Экспериментальные исследования проводились на крупномасштабной и малой установках на воде и гидросмеси вплоть до режимов с сухой засыпкой грунта.

Крупномасштабная опытная установка имела следующие геометрические размеры: диаметр рабочей камеры  $d_k = 69,3$  мм и 68,2 мм, диаметры сопел:  $d_s = 48,44; 44,75; 30,25; 27,6$  мм и другие. Установка позволяла изменять положение сопла относительно входа в рабочую камеру от 0 до  $7d_k$ . Производительность по твердому материалу составляла 2,14-12 т/час.

Поскольку в строительстве и в системах водоснабжения и канализации наиболее распространенным материалом для гидравлического транспорта являются песчаные и гравийные грунты, а также щебень и кусковые породы, то при экспериментах использовались аналогичные грунты: песок различной крупности, песок плюс мелкий щебень с галькой, а крупнокусковые материалы были представлены мраморной крошкой.

Малая экспериментальная установка имела размеры: диаметр камеры смешения  $d_k = 16$  мм; диаметры центрального сопла:  $d_s = 8,5; 10,35$  и  $12,78$  мм; дополнительные боковые сопла:  $d'_s = 4,08; 4,35; 6,31$  и  $6,36$  мм.

В процессе опытов:

1) снималась характеристика гидроэлеватора  $K_k=f(Q_2)$ , а при работе на гидросмеси  $K_k=f(\delta)$  при различной крупности твердой фракции;

2) определялся КПД гидроэлеватора и строилась характеристика  $\eta = f(Q_w)$ ;

3) снималась пьезометрическая линия для потока в рабочей камере гидроэлеватора на различных режимах его работы;

4) определялась максимальная всасывающая способность гидроэлеватора при различных размерах относительной площади сопла, положении сопла относительно входа в рабочую камеру, равной крупности твердой фракции; исследовалось влияние дополнительных (боковых) сопел на максимальную всасывающую способность гидроэлеватора;

5) определялись предельные размеры твердой фракции, при которой еще наблюдается нормальная работа гидроэлеватора.

При расчете КПД гидроэлеватора в качестве полезной энергии принималась энергия, полученная пассивным потоком, плюс остаточная энергия активного потока, а в качестве затраченной - энергия струи активного потока перед соплом. Поэтому на режимах с сухой засыпкой грунта КПД гидроэлеватора определялся зависимостью

$$\eta = \frac{\rho_a Q_a H + \rho_0 Q_0 H}{\rho_0 Q_0 H_0} = \eta_* \varphi^2 \left[ 1 + \delta_T \left( \frac{1 - Q_0}{Q_*} \right) \right], \quad (10)$$

а для однородной жидкости

$$\eta = \frac{\rho_a Q_a H + \rho_0 Q_0 H}{\rho_0 Q_0 H_0} = \frac{\eta_* \varphi^2}{Q_*} \quad (11)$$

Анализ экспериментальных исследований гидроэлеваторов показал следующее.

Наблюдается удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей  $H_* = f(\delta)$  и  $\eta = f(Q_w)$  (рис. 4), что позволяет в первом приближении использовать основное уравнение гидроэлеватора и для расчета режимов с большой консистенцией пассивного потока вплоть до сухой засыпки грунта.

Отмечено, что устойчивая работа гидроэлеватора наблюдается при относительной крупности всей твердой фракции, равной  $(1/3 - 1/4) d_{*1}$  и положении сопла относительно входа в рабочую камеру не менее  $(2 - 4) d_{*c}$ . При  $S_c < 0,2$  и достаточно крупной твердой фракции принимается большее расстояние.

Хорошее совпадение теоретических и экспериментальных напорных характеристик гидроэлеватора  $H_* = f(Q_w)$  наблюдается лишь при положении сопла вблизи сечения рабочей камеры  $l_c = (0 - 5 \text{ мм})$ .



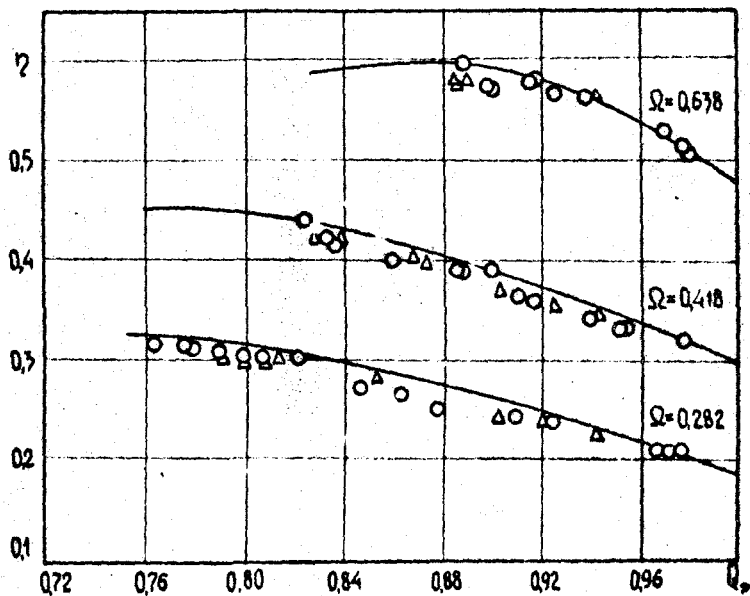
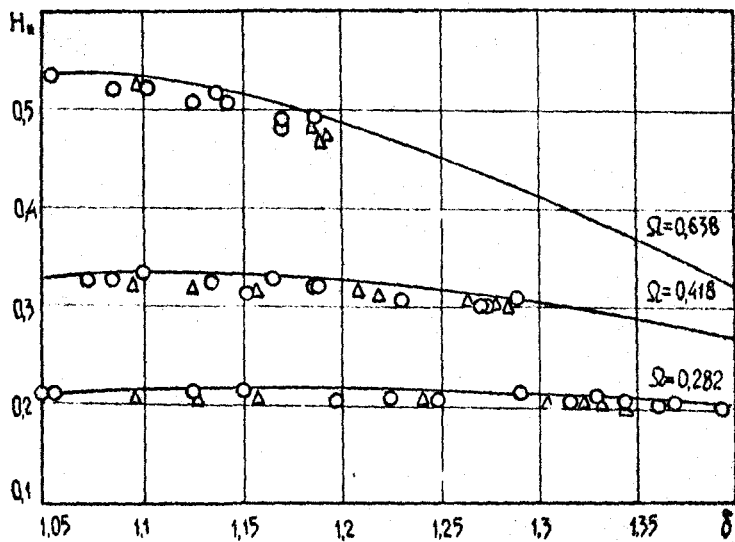


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные характеристики гидроэлеватора

Выдвижение сопла в приемную камеру гидроэлеватора приводит к изменению характеристики гидроэлеватора. Причем характер отклонения экспериментальных точек от теоретической кривой зависит от коэффициента эжекции, относительной площади сопла и положения сопла.

Пьезометрические линии, снятые при работе гидроэлеватора на воде и гидросмеси при различной относительной площади сопла и разных положениях сопла позволили установить длину рабочей камеры, на которой заканчивается процесс смешения потоков.

В работе приводятся рекомендации по продольным размерам рабочей камеры в зависимости от перечисленных выше факторов.

Установлено, что дополнительные (боковые) сопла не увеличивают производительность гидроэлеватора по грунту, а лишь улучшают условия подвода твердого материала в рабочую камеру. При малых углах конусности целесообразно использовать сопла с цилиндрическим участком на выходе.

В четвертой главе приводится анализ работы системы центробежный насос - гидроэлеватор - напорный трубопровод с целью выбора оптимальных режимов. Дана методика расчета гидротранспортных установок с гидроэлеваторами при сухой засыпке грунта, подводной разработке грунта, для удаления осадка из песколовков, нефтеловушек, водоприемных камер, при промывке фильтров и канализации (удалении) золошлаковых остатков. Приведено экономическое сравнение гидротранспортных установок с гидроэлеваторами и грунтовыми насосами.

Одним из недостатков существующих методов расчета гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта является то, что все исследователи, как правило, рассматривают работу гидроэлеваторов изолированно от напорного трубопровода. Поэтому рекомендуемые оптимальные режимы работы гидроэлеваторов не всегда являются таковыми для всей системы.

Изучением напорного гидротранспорта различных материалов занимались многие исследователи: В.С.Кнороз, А.П.Климентов, А.Е.Иванов, А.П.Юфин, М.А.Дементьев, Н.Д.Вьодкимов, Г.И.Роер, В.В.Трайнис, Н.А.Силин и С.Г.Хоберник, А.М.Смолярев, Л.С.Животовский, А.Г.Джваршеишвили, И.Г.Хаскельберг, С.А.Коржаев и другие.

Исследованию гидротранспорта ила и осадков сточных вод

посвящены работы М.М.Дворецкого, А.В.Евилевича, А.А.Карпинского, А.С.Козака, Н.Ф.Федорова, С.В.Яковлева и Ю.М.Ласкова.

Проблемами абразивного износа трубопроводов и гидравлического оборудования систем напорного гидротранспорта занимались В.В.Трайнис, А.И.Борохович, С.П.Турчанинов, В.Н.Покровская, В.В.Ляшевич, В.С.Подкорытова и другие исследователи.

Основная задача гидравлического расчета трубопроводов в системах напорного гидротранспорта сводится к определению наиболее экономичных скоростей движения гидросмеси, потерь напора и оптимальной консистенции гидросмеси.

В работе приводится обоснование оптимальной скорости движения гидросмеси в напорных трубопроводах. Полные затраты энергии на транспортирование грунта по горизонтальному трубопроводу без учета КПД насоса и электродвигателя равны:

$$N = \gamma Q H, \quad (12)$$

а удельные затраты электроэнергии на транспортирование единицы объема грунта на единичное расстояние составят:

$$z = \frac{\gamma Q H}{Q \epsilon} = \frac{\gamma H}{\epsilon}. \quad (13)$$

По формуле (13) были рассчитаны удельные затраты энергии при гидротранспорте песчаных материалов средней крупностью  $d_s = 0,29-0,42$  мм в трубопроводах диаметром  $D = 200, 400, 600$  и  $800$  мм. Расчеты выполнены при различных скоростях движения гидросмеси и разной ее консистенции ( $\epsilon_s = 0,06; 0,12$  и  $0,18$ ). Гидравлический уклон и критические скорости определялись по экспериментальным данным Н.А.Силина и С.Г.Коберника. По результатам расчетов построены графики зависимости  $z = f(v)$ .

При анализе графиков отмечено следующее.

1. При скоростях движения гидросмеси больше критических удельные затраты энергии возрастают. Минимальные удельные затраты энергии наблюдаются при скоростях меньше критических, то есть при частичном заилении трубопроводов. Режим с критической скоростью движения гидросмеси является наиболее экономичным режимом при работе напорного трубопровода без заилиения.

2. Удельные затраты энергии существенно уменьшаются с увеличением консистенции гидросмеси в напорном трубопроводе.

Таким образом, режим движения гидросмеси при скоростях значительно больше критических, рекомендуемый В.Н.Покровской, не является экономичным. Причиной ошибочных рекомендаций явля-

ется неправильная оценка энергоемкости процесса гидротранспорта.

Режим движения гидросмеси с частичным заилиением имеет ряд практических ограничений: трудность поддержания постоянного слоя заилиения в производственных условиях, возможность образования пробок и так далее. Поэтому при анализе совместной работы системы: центробежный насос - гидроэлеватор - напорный трубопровод режим движения гидросмеси принят критическим.

Критические скорости и потери напора определялись в соответствии с инструкцией по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта грунтов.

Для выбора наиболее экономичного режима работы установки с гидроэлеватором были определены удельные затраты энергии при различной консистенции гидросмеси на критических режимах транспортирования. При расчете диаметры трубопроводов принимались  $D = 200, 400, 600, 800$  и  $1000$  мм, длина транспортирования  $l = 1000$  м = const, состав грунта: песок средней крупностью  $d_0 = 0,76$  мм, гравийный грунт  $d_0 = 6,5$  мм и крупнообломочный грунт с  $d_0 = 30$  и  $70$  мм.

Установлено, что наименьшие затраты электроэнергии на гидротранспорт  $1 \text{ м}^3$  грунта наблюдаются при консистенции гидросмеси в напорном трубопроводе  $c_0 = 0,18$  ( $\delta = 1,3$ ).

Известно, что затраты энергии составляют лишь часть от суммарных затрат на транспортирование грунта. Поэтому обоснование оптимальной консистенции гидросмеси выполнено и по удельным затратам. В таблице приведены результаты экономического расчета при работе гидроэлеваторной установки на гравийном грунте ( $d_0 = 6,5$  мм), диаметр трубопровода  $D = 400$  мм, длина транспортирования  $l = 1000$  м.

Консистенция гидросмеси, $c_0$	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30
Удельные затраты, руб/м <sup>3</sup>	0,246	0,216	0,204	0,228	0,263

Видно, что минимальные удельные затраты соответствуют консистенции гидросмеси в напорном трубопроводе  $c_0 = 0,18$ . Установлено также, что удельные затраты энергии составляют в среднем 50% от суммарных затрат. Увеличение удельных затрат при консистенции  $c_0 > 0,18$  происходит в основном за счет увеличе-

ния стоимости электроэнергии. При консистенции  $C_0 < 0,18$  увеличение удельных затрат объясняется сравнительно малой производительностью установки.

Поэтому при расчете гидротранспортной установки с гидроэлеватором режим движения гидросмеси в напорном трубопроводе принят критическим с оптимальной консистенцией гидросмеси  $C_{0 \text{ опт}} = 0,18$ .

За исходные параметры при расчете системы приняты: расход твердой фракции  $Q_T$ , плотность  $\rho_T$  и гранулометрический состав грунта, длина транспортирования  $L$ , геодезическая высота подъема гидросмеси  $Z$ , расстояние от источника водоснабжения до гидроэлеватора  $L_0$  и геодезическая высота подъема воды  $Z_0$ . По исходным данным определяются режимные параметры системы и ее основные геометрические размеры при оптимальном режиме работы.

В системах напорного гидротранспорта большой объем работ выполняется при подводной разработке грунта, например, при намыве различных земляных сооружений, при добыче нерудных строительных материалов, при проходке траншей для укладки трубопроводов через водные преграды, при сооружении опускных колодцев в пльвинных грунтах и высоком залегании грунтовых вод.

Исследованиями С.П.Огородникова и ВНИИ Неруда установлено, что оснащение грунтовых насосов при подводной разработке грунта кольцевыми инжекторами или всасывающими эжекторными накопечниками позволяет существенно увеличить консистенцию гидросмеси в напорном трубопроводе за счет повышения эффективности грунтозабора. Однако такая комбинированная установка имеет существенный недостаток: абразивному износу подвергается и эжектор, и грунтовый насос. Поэтому в работе был исследован вопрос о возможности полной замены грунтового насоса гидроэлеватором с кольцевым подводом струи активного потока.

Установлено, что при одинаковой консистенции гидросмеси в напорном трубопроводе удельные затраты электроэнергии на гидротранспорт твердого материала с помощью гидроэлеватора только на 30% больше по сравнению с грунтовым насосом, а по суммарным затратам на единицу продукции установка с гидроэлеватором оказывается более экономичной. Менее экономичная работа установки с грунтовым насосом объясняется в основном большими затратами, связанными с заменой дорогостоящих деталей машины в результате их абразивного износа.

Поскольку установка с гидроэлеватором позволяет в 2 раза увеличить консистенцию гидросмеси в напорном трубопроводе за счет увеличения эффективности грунтозабора, то при этих условиях и по удельным затратам электроэнергии она оказывается более экономичной.

При эксплуатации водопроводно-канализационных систем гидроэлеваторы находят широкое применение при удалении осадка из песколовок, нефтеловушек, водоприемных камер и промывке фильтров. Эксплуатационные преимущества гидроэлеваторных установок привели к преобладающему их использованию в этих системах по сравнению с другими гидравлическими машинами.

Отсутствие надежной методики расчета гидроэлеваторов для удаления осадка приводит к неправильному выбору оптимальных режимов и геометрических размеров системы, что сказывается на эффективности работы этих машин. Кроме того, рекомендуемые конструкции гидроэлеваторов для удаления осадка не позволяют засасывать гидросмесь с высокой консистенцией. При малой консистенции гидросмеси затраты энергии на перемещение единицы объема осадка оказываются очень большими. Поступление гидросмеси с малой консистенцией на песковые площадки значительно усложняет их эксплуатацию особенно в зимнее время. Возврат большого количества воды с песковых площадок связан также со значительными затратами. Для улучшения условий всасывания осадка из приемков песколовок в работе рекомендуется заменить существующие конструкции гидроэлеваторов подвижными всасывающими наконечниками с кольцевым подводом струи активного потока. Приводится анализ работы гидроэлеваторов при различной консистенции гидросмеси и дана методика расчета системы на оптимальные режимы работы.

В работе приводится также методика расчета гидротранспортных установок с гидроэлеваторами для удаления золошлаковых остатков.

Разработанные методики расчета установок с гидроэлеваторами различного назначения позволят сравнительно просто рассчитать систему на оптимальный режим работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Одной из основных причин низкой эффективности работы гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта является неправильное определение оптимальных режимов и нерациональный выбор схем использования.

2. При рациональном использовании гидроэлеваторов в системах напорного гидротранспорта их КПД может быть достаточно высоким ( $\eta > 50\%$ ).

3. Установлено, что оптимальные режимы и размеры гидроэлеваторов существенно отличаются от многих рекомендаций, принятых за основу проектирования и расчета этих машин в настоящее время.

Экономически неоправдано использование гидроэлеваторов с высоконапорной струей активного потока при малых размерах относительной площади сопла, так как с уменьшением относительных размеров сопла резко возрастает потеря напора и снижается КПД гидроэлеватора.

4. Правильный выбор режимов работы и геометрических размеров гидроэлеватора позволяет при прочих равных условиях уменьшить затраты электроэнергии на единицу транспортируемого грунта в среднем в 1,7-2,1 раза даже при относительно малой коноистенции пассивного потока.

5. Режимы с сухой засыпкой грунта являются наиболее экономичными режимами работы гидротранспортных установок с гидроэлеваторами. На этих режимах при условии обеспечения оптимальной коноистенции гидросмеси в напорном трубопроводе остаточная энергия активного потока на выходе из гидроэлеватора полностью используется в технологическом процессе в соотношении полезной энергии, создаваемой гидроэлеватором, и затраченной оказывается максимальным.

6. Основные теоретические зависимости гидроэлеватора, использованные при анализе его работы, подтверждены экспериментами. Опытным путем определена достижимая коноистенция гидросмеси в гидроэлеваторе при широком диапазоне изменения относительной площади сопла, положении сопла относительно входа в рабочую камеру и разной крупности твердой фракции. Даны рекомендации по продольным размерам аппарата и по крупности загружаемого материала, при которой наблюдается устойчивая работа гидроэлеватора.

7. При анализе работы системы - центробежный насос- гидроэлеватор - напорный трубопровод установлено, что как по удельным затратам энергии, так и по стоимости единицы транспортируемого материала для грунтов с относительной плотностью  $\delta_1 = 2,65$  оптимальной консистенцией гидросмеси в напорном трубопроводе является  $c_{opt} = 0,18$  ( $\delta = 1,3$ ).

8. Разработана методика гидравлического расчета гидротранспортных установок с гидроэлеваторами различного назначения: при сухой засыпке грунта, подводной разработке грунта, для удаления осадка из песколовок, нефтешовушек, водоприемных камер, промывке фильтров и для удаления золошлаковых остатков. С использованием графических зависимостей между основными режимными и геометрическими характеристиками гидроэлеватора, а также напорного трубопровода предлагаемая методика позволяет сравнительно просто рассчитать систему на оптимальный режим работы.

9. Для крупных гидротранспортных систем проведено сравнение эффективности работы установок с гидроэлеваторами и грунтовыми насосами. Установлено, что при одинаковой консистенции гидросмеси в напорном трубопроводе удельные затраты энергии для установок с гидроэлеваторами только на 20-30% больше по сравнению с грунтовыми насосами, а по суммарным затратам на единицу продукции достаточно абразивного твердого материала гидроэлеваторная установка оказывается более экономичной.

10. При работе гидроэлеваторной установки с консистенцией гидросмеси, превышающей консистенцию гидросмеси установки с грунтовым насосом в 1,5 раза при сухой засыпке и в 1,8-2 раза при подводной разработке грунта, удельные затраты энергии для обеих установок оказываются одинаковыми.

Выполненные исследования гидроэлеваторов позволили выделить следующие наиболее рациональные области их использования в системах напорного гидротранспорта: при сухой засыпке грунта или при большой консистенции пассивного потока, при подводной разработке грунта, в установках малой производительности или периодического действия, при гидротранспорте высокоабразивного твердого материала и в системах дальнего гидротранспорта в качестве насосов первой ступени.

В работе дано обоснование эффективного использования гидроэлеваторов в этих системах.



Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Темнов В.К., Ложков Е.Ф. Оптимальные условия работы гидроэлеваторов в системе напорного гидротранспорта. "Гидротехническое строительство", № 5, 1970.
2. Ложков Е.Ф. Оптимальные условия работы гидроэлеватора на режимах сухой засыпки. Материалы XXIII научно-технической конференции ЧПИ им. Ленинского комсомола, Челябинск, 1970.
3. Ложков Е.Ф. Наиболее экономичные режимы работы гидроэлеваторов в системах гидроволоудаления. "Теплоэнергетика", № II, 1971.
4. Темнов В.К., Ложков Е.Ф. Упрощенный способ расчета гидроэлеваторов. "Гидротехническое строительство", № I, 1972.
5. Ложков Е.Ф. Работа гидроэлеваторов на режимах с сухой засыпкой грунта. "Гидротехническое строительство", № I, 1972.
6. Темнов В.К., Ложков Е.Ф. К выбору оптимального струйного насоса. Известия ВУЗов "Машиностроение", № 12, 1972.
7. Ложков Е.Ф. Исследования гидроэлеваторов на режимах с сухой засыпкой грунта. Известия ВУЗов, "Горный журнал", № 8, 1972.
8. Ложков Е.Ф. Оптимальная схема гидротранспортной установки с гидроэлеватором. Тезисы докладов XXIII научно-технической конференции МИСИ им. В.В.Куйбышева, Гидротехнический факультет, Москва, 1972.
9. Темнов В.К., Ложков Е.Ф. К использованию гидроэлеваторов в системах дальнего гидротранспорта. Материалы Всесоюзной конференции "Дальний трубопроводный гидротранспорт сыпучих материалов", Тбилиси, 1974.