

УДК 622

Ю.А. Попов, В.С. Лаптев, Е.В. Лизунов, В.А. Седов

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ
ПРОЕКТНОЙ ГРУНТОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ЗЕМСНАРЯДОВ ПРИ ГИДРОМЕХАНИЗИРОВАННОМ
СПОСОБЕ ПРОИЗВОДСТВА ЗЕМЛЯНЫХ РАБОТ**

Описан нетрадиционный подход к решению актуальных научно-технических задач проблемы научного обоснования технологии гидромеханизации земляных работ на примере возведения Северного обхода г. Новосибирска Федеральной автомобильной дорогой Омск-Новосибирск. Результаты решения практически реализованы на указанном строительном объекте.

Ключевые слова: гидромеханизация земляных работ, нормативная и проектная грунтопроизводительность земснарядов, штатные и нештатные ситуации в режимах работы грунтонасосов, реализация кавитационного запаса в штатных ситуациях, вывод грунтонасосов из нештатных ситуаций (кавитация, дефицит напора, работа гидравлической системы на левой рабочей точке, разорванные рабочие характеристики).

Семинар № 21

**J.A. Popov, V.S. Laptev,
E.V. Lizunov, V.A. Sedov
SYSTEMS APPROACH TO A
SUBSTANTIATION PROJECT OF A
GROUND-PRODUCTIVITY OF
DREDGERS AT THE
HYDROMECHANICAL METHOD OF
PRODUCTION OF EARTH-WORKS**

In paper the non-traditional approach to a solution of actual technological tasks of a problem of a scientific justification of technology of a hydro-mechanization of earth-works on an instance of raising of Northern bypass road of Novosibirsk by the Federal highway Omsk-Novosibirsk is featured. Problems are not simply successfully decided by authors of paper, results of a solution are efficiently practically realized on the pointed construction object.

Key words: hydro-mechanization of earth-works, normative and project ground-productivity of a dredgers, Nominal and unnominal situations in the modes of works of the ground-pumps, realization of a positive suction head in nominal situations, deduce ground-pumps from unnominal situations (cavitation, deficit of a pressure, activity of a

hydraulic system on the left-hand operating point, the chipped operating characteristics).

Гидромеханизированный способ производства массовых земляных работ находит широкое применение в промышленном, транспортном, гидротехническом и мелиоративном строительстве, а также при разработке природных месторождений нерудных строительных материалов (НСМ). Это обусловлено общепризнанными преимуществами гидромеханизации, основными из которых являются: неразрывность технологических процессов от подводной разработки грунта до его укладки в сооружение; высокая степень механизации и автоматизации всех процессов; постоянное и равномерное потребление мощности; малочисленный обслуживающий персонал; экологичность, особенно в крупных городах или вблизи них (при замыве городских оврагов, добыче и переработке

НСМ и др.); относительно низкие энерго- и трудозатраты и др.

Однако одно из указанных выше преимуществ гидромеханизации (неразрывность технологических процессов) создаёт весьма серьёзные трудности при разработке ППР в части аргументированного обоснования проектной грунтопроизводительности земснарядов.

В [1-3] авторами обоснован и в [4] практически реализован системный подход к аргументированному определению проектной грунтопроизводительности земснарядов в последовательности: расчет **нормативной** грунтопроизводительности земснарядов $Q_{ГР}^H$ с учётом нормативной группы карьерного грунта по трудности его разработки земснарядами → при наличии вариантов **штатной** ситуации: а) *при отсутствии кавитационного запаса* проектная грунтопроизводительность земснаряда $Q_{ГР}^{ПП}$ принимается равной **нормативной** ($Q_{ГР}^{ПП} = Q_{ГР}^H$); б) *при наличии кавитационного запаса* по результатам экспертной оценки выбирают способ его реализации: при реализации кавитационного запаса за счёт увеличения грунтопроизводительности земснаряда сверх $Q_{ГР}^H$ проектную грунтопроизводительность $Q_{ГР}^{ПП}$ принимают такой, при которой величина кавитационного запаса становится близкой к нулю; при реализации кавитационного запаса увеличением глубины подводной разработки грунта сохраняется равенство $Q_{ГР}^{ПП} = Q_{ГР}^H$ → при наличии одной из **нештатных** ситуаций (рис. 1) при нормативной плотности гидросмеси ρ_H («Кавитация ГН», «Дефицит напора ГН», «Работа системы на левой рабочей точке» или «Ра-

зорванные рабочие характеристики») выбор способа вывода ГН из нештатной ситуации на основании экспертной оценки и нахождения величины проектной грунтопроизводительности земснаряда после вывода ГН из нештатной ситуации.

Понятие нормативной грунтопроизводительности земснарядов с использованием нормативной классификации грунтов по трудности их разработки земснарядами впервые введено Ю.А. Поповым в 1976 г. [1]. В 1988 г. В.И. Глевицким [5] это понятие (через нормативную объемную консистенцию S_H и нормативную плотность гидросмеси ρ_H) было включено в справочное пособие для проектировщиков и производственников. Вполне очевидно, что нормативная грунтопроизводительность земснарядов $Q_{ГР}^H$ – их грунтопроизводительность при нормативной плотности гидросмеси, равной $\rho_H = \rho_0 + S_H(\rho_{ТВ} - \rho_0)$, (1) где ρ_0 и $\rho_{ТВ}$ – плотность соответственно воды и грунта в абсолютно плотном сложении ($\rho_{ТВ} = 2,6 \div 2,7 \text{ т/м}^3$); S_H – нормативная объемная консистенция гидросмеси, равная $S_H = (1 - n)/(q + 1 - n)$, (2) где n – пористость карьерного грунта в долях единицы; q – нормативный удельный расход воды на разработку, гидравлический транспорт и укладку 1 м^3 грунта.

Рассмотрим кратко схемы практической реализации штатных и нештатных ситуаций, приведенных на рис. 1, с помощью программного продукта «ЗЕМСНАРЯД» [4], основными и вспомогательными блоками которого являются:

1. Нормативная база данных распределения грунтов по трудности их разработки земснарядами.

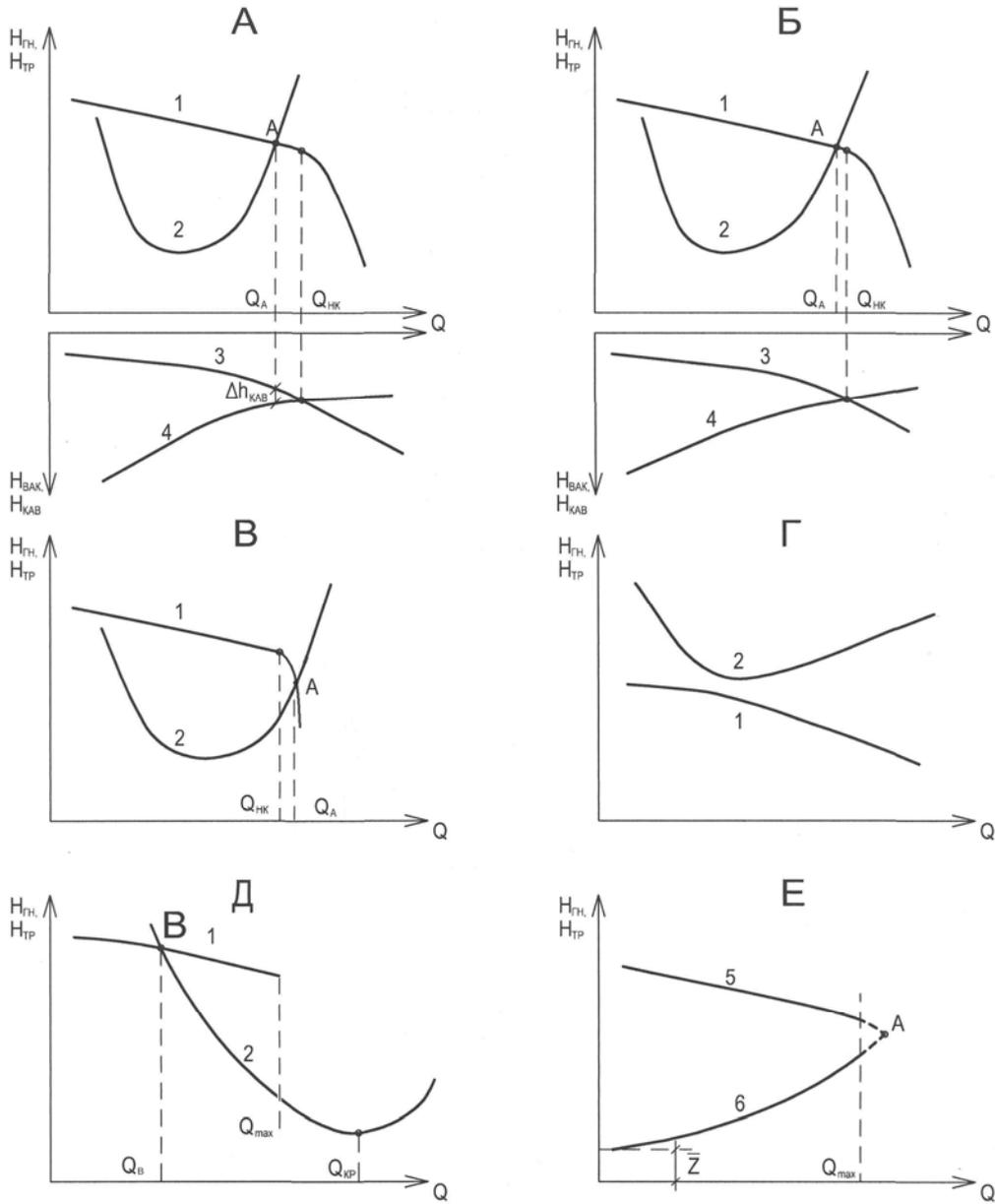


Рис. 1. Штатные (А, Б) и нештатные (В, Г, Д и Е) ситуации в режимах работы ГН: 1 и 2 – соответственно напорная характеристика ГН и гидравлическая характеристика гидротранспортной системы земснаряда на нормативной плотности гидросмеси; 3 и 4 – соответственно вакуумметрическая и кавитационная характеристики на нормативной плотности гидросмеси; 5 и 6 – соответственно напорная характеристика ГН и гидравлическая характеристика гидротранспортной системы земснаряда на воде; Δh_{KAB} – кавитационный запас

на нормативной плотности гидросмеси; \bar{Z} – статический напор в гидротранспортной системе земснаряда

2. База данных коэффициентов (А, В и С ($\tau = 0$)) уравнения напорной характеристики ГН на воде для серийно выпускаемых грунтонасосов при всех штатных диаметрах рабочего колеса. Ю.А. Поповым доказано [1, 2], что напорная характеристика всех центробежных нагнетателей аппроксимируется уравнением вида

$$Q_{ГН} = A \cdot Q^2 + B \cdot Q + C, \quad (3)$$

где запись С ($\tau = 0$) для грунтонасосов подразумевает новое или реставрированное рабочее колесо, т.е. в начальный период его эксплуатации. Также доказано, что по мере износа рабочего колеса ($\tau > 0$) напорная характеристика ГН меняет свое положение, опускаясь вниз конгруэнтно своему первоначальному очертаению.

3. **Блок реализации кавитационного запаса в штатной ситуации** (рис. 1, А), который предусматривает:

1) на основании экспертной оценки принятие решения о способе реализации кавитационного запаса (увеличением глубины подводной разработки грунта или увеличением грунтопроизводительности земснаряда);

2) по команде оператора отсылка в один из двух *вспомогательных* блоков реализации кавитационного запаса в соответствии с п. 1;

3) после реализации кавитационного запаса автоматическая отсылка в блок «Штатная ситуация при отсутствии кавитационного запаса».

4. Блок «**Штатная ситуация при отсутствии кавитационного запаса**». Проектная грунтопроизводительность земснаряда принимается равной нормативной ($Q_{ГР}^{ПП} = Q_{ГР}^H$), если

данная ситуация установлена при нормативной плотности гидросмеси или если в штатной ситуации при наличии кавитационного запаса последний реализован увеличением глубины подводной разработки грунта. Если же кавитационный запас в такой ситуации реализован увеличением грунтопроизводительности земснарядов, то ($Q_{ГР}^{ПП} = Q_{ГР}^Ф$), где $Q_{ГР}^Ф$ – фактическая грунтопроизводительность земснарядов после реализации кавитационного запаса таким способом. После всех указанных действий с учетом величины коэффициента потерь грунта при его гидротранспорте и укладке в сооружение K_{II} (в соответствии с [5] $K_{II} = 1,05 \div 1,33$) определение *проектной месячной и сезонной* грунтопроизводительности земснарядов.

5. Блок «**Нештатная ситуация кавитация ГН**». Рассмотрение по команде оператора нужного способа вывода ГН из нештатной ситуации или вариантное рассмотрение способов вывода ГН из нештатной ситуации в последовательности (рис. 2): замена штатного рабочего колеса ГН на рабочее колесо меньшего диаметра (рис. 2,5) → уменьшение диаметра штатного рабочего колеса наименьшего диаметра на 12% (ГрУ) или на 15% (Гр) путем обрезания лопаток (рис. 2,6) → дросселирование напорного трубопровода (рис. 2,7) → уменьшение частоты вращения рабочего колеса путем замены привода ГН при длительной (сезон и более) работе ГН в режиме кавитации, например при строительстве каналов (рис. 2,8) → эжектирование всасывающего трубопровода ГН (рис. 2,9) → погружение ГН под уровень воды в забое земснаряда (рис. 2,10).

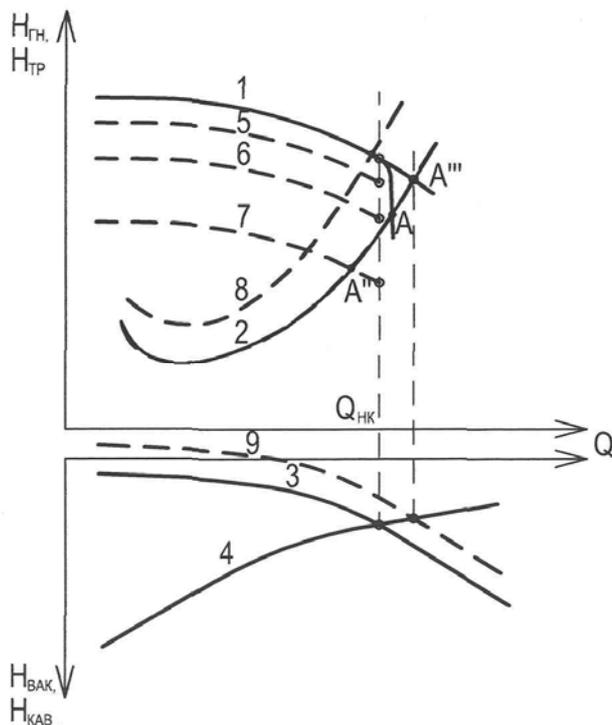


Рис. 2. Рабочие характеристики гидравлической системы при выводе грунтонасоса из нештатной ситуации «Кавитация ГН»: 1, 2, 3 и 4 - расчетное положение соответственно напорной, гидравлической, вакуумметрической и кавитационной характеристик; 5 - напорная характеристика после замены рабочего колеса ГН на рабочее колесо меньшего диаметра; 6 - напорная характеристика ГН после обрезания лопаток штатного рабочего колеса наименьшего диаметра; 7 - напорная характеристика ГН после уменьшения частоты вращения рабочего колеса; 8 - гидравлическая характеристика после дросселирования напорного трубопровода; 9 - вакуумметрическая характеристика после эжектирования всасывающего трубопровода ГН или после погружения ГН под уровень воды в забое

Следует отметить две важные особенности решения задач эжектирования всасывающего трубопровода ГН и погружения ГН под уровень воды в забое:

1) Ю.А. Поповым и В.С. Лаптевым [8] дан наиболее строгий вывод уравнения напора эжектора и затем В.С. Лаптевым на основе метода имитационного моделирования процесса самонастройки сложной гидравлической системы ГН с эжектором в его всасывающем трубопроводе впервые в инженерной практике разработан метод **теоретического** (а не полуэмпирического!) решения этого уравнения;

2) методом синтезирования двух ранее считавшихся альтернативными технических решений (эжектирование всасывающего трубопровода ГН и погружение ГН под уровень воды в забое земснарядов) найдено новое эффективное техническое решение задач увеличения глубины бескавита-

ционной подводной разработки грунта земснарядами традиционной постройки, признанное изобретением [10]; решение этой задачи выполнено

по поручению областной администрации Новосибирской области с целью разработки технического средства для углубления водохранилища Новосибирской ГЭС. С помощью вспомогательного блока «**Эжектор**» при заданной величине подпора эжектора $\Delta H_э$ можно оперативно подобрать требуемый водяной насос вспомогательной гидравлической подсистемы эжектора и произвести необходимые гидравлические расчёты.

6. Блок «**Нештатная ситуация дефицит напора ГН**». Рассмотрение по команде оператора нужного способа вывода ГН из нештатной ситуации или вариантное рассмотрение спосо-

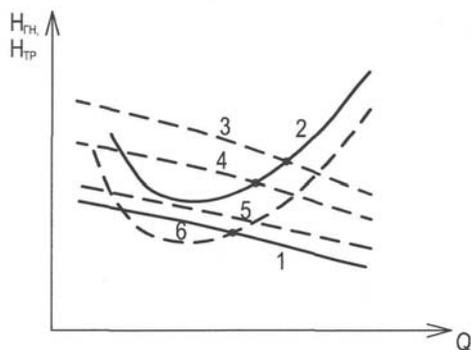


Рис. 3. Рабочие характеристики гидравлической системы при выводе грунтонасоса из нештатной ситуации «Дефицит напора ГН»: 1 и 2 - расчетное положение ($\rho = \rho_H$) соответственно напорной и гидравлической характеристик; 3 - напорная характеристика ГН земснаряда; 4 - напорная характеристика ГН с учётом подпора эжектора во всасывающем трубопроводе или напорная характеристика ГН с учётом суммарного подпора эжектора во всасывающем и береговом трубопроводах; 5 - напорная характеристика ГН после замены рабочего колеса на рабочее колесо большего диаметра или после увеличения диаметра штатного рабочего колеса с наибольшим диаметром путём наплавки его лопаток

бов вывода ГН из нештатной ситуации в последовательности (рис. 3):

замена штатного рабочего колеса ГН на рабочее колесо большего диаметра или увеличение диаметра штатного рабочего колеса с максимальным диаметром на 10% путём наплавки его лопаток (рис. 3,5) → эжектирование всасывающего трубопровода ГН или одновременное эжектирование всасывающего трубопровода ГН и берегового трубопровода земснаряда (рис. 3,4) → последовательное соединение ГН земснаряда и ГН перекачивающей станции (рис. 3,3) → снижение плотности гидросмеси до $\rho < \rho_H$.

При возведении Северного обхода г. Новосибирска Федеральной автомобильной дорогой Омск-Новоси-

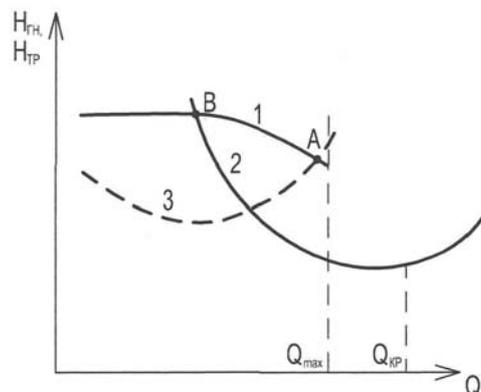


Рис. 4. Схема вывода ГН из нештатной ситуации «Работа системы на левой рабочей точке»: 1 и 2 - расчетное положение ($\rho = \rho_H$) соответственно напорной и гидравлической характеристик; 3 - гидравлическая характеристика после уменьшения диаметра берегового трубопровода;

примечания: Q_{max} - максимальный расход на паспортной запорной характеристике ГН; $Q_{кр}$ - критический расход гидросмеси, соответствующий первой критической скорости

бирск одним из авторов (В.А. Седовым) научно обоснован и признан изобретением [11] способ увеличения приведённой дальности гидротранспортирования грунта, основанный на одновременном эжектировании всасывающего трубопровода ГН и берегового трубопровода земснаряда. С помощью *вспомогательного* блока «**Эжектор**» можно оперативно подобрать водяные насосы эжекторов и произвести необходимые гидравлические расчёты.

7. Блок «**Нештатная ситуация «Работа системы на левой рабочей точке»**». Ситуация, показанная на рис. 1,Д, может иметь место при стечении двух обстоятельств: 1) диаметр берегового трубопровода *существен-*

но превышает диаметр напорного патрубка ГН; 2) приведённая дальность гидротранспортирования грунта имеет относительно небольшое значение. Важно, что в этой ситуации грунтопроизводительность земснаряда может снизиться (по сравнению с работой гидравлической системы на правой рабочей точке) в $2 \div 2,5$ раза. Визуально ситуация может быть зафиксирована резким уменьшением нагрузки (силы тока) в электросети главного электропривода. Попытка дросселировать напорный трубопровод приводит, как правило, к тому, что 30-50% потребляемой электроприводом мощности будет расходоваться на преодоление местного гидравлического сопротивления в установленной (на выходе из земснаряда) диафрагме, что экономически нецелесообразно. Вывод гидравлической системы ГН из нештатной ситуации безальтернативно возможен только одним способом – заменой берегового трубопровода на трубопровод меньшего диаметра (рис. 4).

8. Блок **«Нештатная ситуация «Разорванные рабочие характеристики»**. Впервые на возможность возникновения такой ситуации и связанные с ней неблагоприятные последствия (перегрузка и как следствие перегрев и выход из строя главного электропривода) обратил внимание Б.М. Шкундин [12]. Основные особенности проявления нештатной ситуации:

1) наличие нештатной ситуации может быть установлено на *стадии проектирования* расчетами на воде; основным признаком ее наличия является $H_{ГН} > H_{ТР}$ на правой границе паспортной напорной характеристики;

2) **основной причиной** возникновения нештатной ситуации является **завышение диаметра напорного патрубка грунтонасосов**, что, например, характерно для грунтонасосов типа ГрУТ 2000/63; так как в этом случае на правой границе паспортной напорной характеристики $H_{ГН} > H_{ТР}$, а гидравлическая система ГН при $H_{ГН} > H_{ТР}$ существовать не может, то происходит разгон жидкости до установления равновесия $H_{ГН} = H_{ТР}$ в рабочей точке А; при этом $Q_A > Q_{max}$, что может привести к превышению паспортной номинальной мощности и к перегреву привода (не приводит к таким последствиям только достаточно большой запас мощности привода, например при отсутствии штатных электродвигателей при заводской комплектации грунтонасосов).

Последовательность действий в случае установления нештатной ситуации «Разорванные рабочие характеристики»:

1) проверка наличия запаса мощности привода при $\rho = \rho_0$; при потребляемой мощности привода $N_{потр}$ меньше номинальной по паспорту $N_{ном}$ проверка запаса мощности привода при $\rho = \rho_H$;

2) в последней ситуации ($\rho = \rho_H$) если $N_{потр} > N_{ном}$, то расчётами (Блок 8) установление возможности снижения напорной характеристики (см. Блок 5) или повышения гидравлической характеристики путём замены берегового трубопровода на трубопровод меньшего диаметра.

1. *Попов Ю.А.* Инженерные основы регулирования и оптимизации режимов работы земснарядов: учебное пособие / Ю.А. Попов, Д.В. Рошупкин, Т.И. Пеняскин. – Новосибирск: Изд-во НИСИ, 1976. – 67 с.
2. *Попов Ю.А.* Гидромеханизация земляных работ. Часть 1. Теория процессов гидромеханизации: учебное пособие / Ю.А. Попов [и др.]. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2000. – 84 с.
3. *Лизунов Е.В.* Гидромеханизация земляных работ в транспортном строительстве: монография / Е.В. Лизунов, В.А. Седов, В.С. Лаптев. – Новосибирск: СО Изд-ва «Наука», 2002. – 127 с.
4. *Свидетельство №2005610545* об официальной регистрации программы для ЭВМ «Земснаряд» (Расчёт проектной грунтопроизводительности земснарядов с обоснованием способов и параметров вывода грунтонасосов из нештатных ситуаций). Авторы: Попов Ю.А. и Лаптев В.С. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 28.02.2005 г.
5. *Глевицкий В.И.* Гидромеханизация в транспортном строительстве: справочное пособие / В.И. Глевицкий – М.: Транспорт, 1988. – 271 с.
6. *Попов Ю.А.* Оптимизация процессов гидромеханизации земляных работ в современных условиях / Ю.А. Попов, Е.В. Лизунов [и др.] // Известия вузов. Строительство. – 2001. – №9 – 10. – С. 77 – 84.
7. *Лизунов Е.В.* Актуальные задачи оптимизации технологических процессов гидромеханизации при возведении узкопрофильных земляных сооружений / Е.В. Лизунов, В.А. Седов. – 2002. – №3. – С. 52 – 58.
8. *Попов Ю.А.* Математическое моделирование гидравлической системы грунтонасоса с эжекторным грунтозабором / Ю.А. Попов, В.С. Лаптев // Известия вузов. Строительство. – 2003. – №12 – С. 41 – 48.
9. *Лизунов Е.В.* Новый подход к концепции вывода грунтонасосов земснарядов из нештатных ситуаций при разработке грунтов способом гидромеханизации / Е.В. Лизунов, В.А. Седов, В.С. Лаптев // Известия вузов. Строительство. – 2004. – №6 – С. 52 – 57.
10. *Патент* на изобретение №2265699 «Грунтозаборное устройство» по заявке №2004108670 от 23.03.2004 г. Патентообладатели: ЗАО «Сибгидромехстрой», НГАСУ (Сибстрин), Лизунов Е.В., Седов В.А., Попов Ю.А., Лаптев В.С.
11. *Патент* на изобретение №2269627 «Способ увеличения приведенной дальности гидротранспортирования грунта от земснаряда» по заявке №200410868 от 23.03.2004 г. Патентообладатели: ЗАО «Сибгидромехстрой», НГАСУ (Сибстрин), Лизунов Е.В., Седов В.А., Попов Ю.А., Лаптев В.С.
12. *Шкундин Б.М.* Гидромеханизация в энергетическом строительстве / Б.М. Шкундин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 224 с.

■ ■ ■ ■ ■

Коротко об авторах

Попов Юрий Андреевич – доктор технических наук, профессор, руководитель научной школы кафедры «Технология строительного производства»
Лаптев Вячеслав Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), rector@sibstrin.ru
Лизунов Евгений Владимирович – генеральный директор «Сибгидромехстрой», кандидат технических наук, Заслуженный строитель РФ,
Седов Владимир Александрович – кандидат технических наук, главный инженер «Сибгидромехстрой». sibgms@ngs.ru

