УДК 628.12

В.И. Щербаков, И.Ю. Пурусова, В.В. Помогаева
ФГБОУ ВПО «Воронежский ГАСУ»

МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ ВОДОПОДЪЕМНЫХ СКВАЖИН

Рассмотрено моделирование оперативного управления водоподъемными скважинами, позволяющее оптимизировать режимы работы насосного оборудования. За основу принята модель возмущенного состояния системы с режимом подачи воды от скважин и гидравлической настройкой управляемых дросселей. В качестве функциональных ограничений использован баланс водных потоков через систему в целом. Представлен алгоритм решения задачи потокораспределения в области управления водозаборными скважинами, состоящий из определения предварительной настройки управляемых дросселей. По результатам численного моделирования водозаборных скважин построены дроссельные характеристики для управляемых дросселей, установленных на подающих линиях. Синтез дроссельных характеристик подающих линий согласно заданным прогнозам позволяет осуществлять оперативное управление режимами подачи воды в резервуар чистой воды, демонстрирует траекторию перехода системы в новое состояние, что является альтернативой прямому моделированию.

Ключевые слова: водоподъемные скважины, резервуар чистой воды, моделирование оперативного управления, режимы работы, водоподъемная станция

При эксплуатации водозаборов, состоящих из группы скважин, возникают проблемы, связанные с тем, что реальная подача воды потребителям отличается от проектной. Суммарная подача воды всеми погружными насосами, работающими на один водовод, значительно ниже расчетной, определенной по паспортным данным насосов. Задачей моделирования является выявление этого несоответствия, а также причин их возникновения.

Модель оперативного управления функционированием водоподъемной станцией (ВПС) состоит в формализации процедуры воздействия на режим подачи воды погружными насосами от скважин в сборный водовод путем изменения гидравлического сопротивления управляемых дросселей (УД).

Значимый вклад в изучение проблемы регулирования подачи воды насосами внесли отечественные ученые: Н.Н. Абрамов, В.Я. Карелин, Б.С. Лезнов, С.Н. Карамбиров, Д.В. Васин, В.В. Алексеев, А.П. Авсюкевич, О.А. Штейнмиллер и др.

Целью настоящей работы является совершенствование существующих конструктивных решений по повышению производительности ВПС [1—8], снижению энергозатрат, обеспечению стабильности работы оборудования, повышению надежности работы ВПС.

Рассматривается моделирование процесса управления системами водоснабжения первого подъема на ВПС. В качестве функциональных ограничений используется баланс водных потоков через систему в целом. Схема (рис. 1) включает три погружных центробежных насоса (поз. 1, 2, 5), установленных на определенных глубинах в скважинах и подающих воду в соответ-

ствующие коллекторные узлы (поз. 3, 4), а далее вода от этих узлов по сборному трубопроводу направляется в резервуар чистой воды (РЧВ) (поз. 6).

В узел 3 вода поступает от двух скважин, а в узел 4 — от одной скважины. В скважинах могут устанавливаться насосные агрегаты разных марок, различающиеся по напору и производительности.

Согласно постановке задачи для принятой формы функциональных ограничений УД устанавливаются на двух подающих линиях от скважин 1 и 5, от 2-й скважины установка УД не предусматривается. УД (задвижка) — дроссельное устройство с приводом, позволяющее оперативно изменять гидравлическое сопротивление дроссельного элемента.

Рассмотрим схему подачи воды в РЧВ [9, 10], полагая, что последний служит источником питания систем подачи и распределения воды второго подъема. Давление в РЧВ равно барометрическому.

Допускаем, что погружные насосы вырабатывают постоянные напоры в узлах 1, 2, 5, подающих воду в водовод. Исходная информация, соответствующая установившемуся режиму перед началом управления, приведена в табл. 1.

Рис. 1. Схема ВПС: 1, 2, 5 — узлы питания (погружные насосы, установленные в скважинах); 3, 4 — узлы присоединения к сборному трубопроводу; 6 — РЧВ; УД — управляемые дроссели

Табл. 1. Исходные данные системы водозабора (см. рис. 1)

Обозначение участка	Q , л/с	S	h , м	Обозначение узла	$Z+H$, м
1—3	50	0,0038	9,5	1	95
2—3	35	0,0024	3,0	2	88,5
3—4	85	0,00092	5,0	3	85,5
5—4	40	0,0028	4,5	4	80,5
4—6	125	0,000992	15,5	5	85
				6	65

Модель оперативного управления [3—6] системой водозаборных скважин имеет вид

$$\left[C_{p \times n1} \middle| C_{p \times n1D} \right] \begin{bmatrix} h_{n1 \times 1} \\ h_{n1D \times 1} \end{bmatrix} = \left[M_{p \times g} \right] \begin{bmatrix} \hat{H}_{g \times 1} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\left[A_{m \times n1} \middle| A_{m \times n1D} \right] \begin{bmatrix} Q_{n1 \times 1} \\ Q_{n1D \times 1} \end{bmatrix} = [0]; \quad (2)$$

$$\left[0_{(e-1) \times n1} \middle| E_{(e-1) \times n1D} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ Q_{n1D \times 1}^r \end{bmatrix} = \left[0_{(e-1) \times n1} \middle| E_{(e-1) \times n1D} \right] \begin{bmatrix} 0 \\ Q_{n1D \times 1}^{rZ} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $[C]$, $[M]$, $[A]$ — матрица сложности участков, соединяющих узлы, и матрица инцидентий узлов ВПС с незадаанным потенциалом соответственно; $n1$, $n1D$ — число участков, исключая участки с УД и число участков с установ-

ленным УД соответственно; e — число энергоузлов — стоков с фиксированным потенциалом; Q_i, h_i — расчетный расход и потери напора участка i ; верхние индексы r и rz — реальные участки и участки (реальные) на которых прогнозируется водоток; $[E]$ — матрица составленная из единичных элементов, в каждой строке по два элемента противоположного знака; g — общее число энергоузлов, включая ЭУ — источники; H_j — полный напор узла j .

Соответствующая линейная модель оперативного управления подачи воды от скважин (см. рис. 1) в относительных отклонениях, полученная путем линеаризации нелинейной модели (1)—(3), будет иметь вид [12]

$$\left[C_{p \times n1} \mid C_{p \times n1D} \right] \left\{ \left[\frac{\alpha h_{n1}}{0} \mid \frac{0}{\alpha h_{n1D}} \right] \left[\frac{\delta \bar{Q}_{n1 \times 1}}{\delta \bar{Q}_{n1D \times 1}} \right] + \left[\frac{h_{n1}}{0} \mid \frac{0}{h_{n1D}} \right] \left[\frac{0}{\delta \bar{S}_{n1D}} \right] \right\} = [0]; \quad (4)$$

$$\left[A_{m \times n1} \mid A_{m \times n1D} \right] \left[\frac{Q_{n1}}{0} \mid \frac{0}{Q_{n1D}} \right] \left[\frac{\delta \bar{Q}_{n1 \times 1}}{\delta \bar{Q}_{n1D \times 1}} \right] = 0; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \left[0_{(e-1) \times n1} \mid E_{(e-1) \times n1D} \right] \left[\frac{Q_{n1}^r}{0} \mid \frac{0}{Q_{n1D}^r} \right] \left[\frac{0}{\delta \bar{Q}_{n1D}^r} \right] = \\ & = \left[0_{(e-1) \times n1} \mid E_{(e-1) \times n1D} \right] \left[\frac{Q_{n1}^r}{0} \mid \frac{0}{Q_{n1D}^{rZ}} \right] \left[\frac{0}{\delta \bar{Q}_{n1D}^{rZ}} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $\delta \bar{Q}_i = \frac{\delta Q_i}{Q_i}$; $\delta \bar{S}_i$ — относительное отклонение расчетного расхода и коэффициента гидравлического сопротивления участка i .

С позиции моделирования возмущенного состояния системы гидравлическая модель ВПС (см. рис. 1) представляет собой плоский незакольцованный граф (планарный граф) с граничными условиями первого рода в узлах (поз. 1, 2, 5, 6), т.е. пересечение участков в узлах (поз. 3, 4).

Система ограничена узлами с определенными формами граничных условий, что позволяет получить однозначное решение задачи.

Поскольку прогноз подачи воды от скважин не может быть зафиксирован ввиду отсутствия «долгосрочного» прогноза неуправляемого участка 2—3, задаемся прогнозом подачи воды через участки 1—3 и 5—4 с установленным УД (табл. 2).

Табл. 2. Прогноз подачи воды от водозаборных скважин

Обозначение участка	До исполнения прогноза	После исполнения прогноза	
	Q , л/с	Q , л/с	ΔQ , %
1—3	50	60	20
2—3	35	—	—
3—4	85	—	—
5—4	40	48	20
4—6	125	—	—

Результаты моделирования процесса управления подачей воды от трех водоподъемных скважин (см. рис. 1) приведены в табл. 3, 4.

Табл. 3. Результаты моделирования по участкам процесса управления подачей воды

Обозначение участка	До исполнения прогноза			После исполнения прогноза		
	Q , л/с	$S \times 10^5$	h , м	Q , л/с	$S \cdot 10^5$	h , м
1—3	50	380	9,5	59,373	222,462	7,842
2—3	35	244,898	3,0	24,798	244,898	1,506
3—4	85	69,204	5,0	83,266	69,204	4,798
5—4	40	281,25	4,5	47,183	125,536	2,794
4—6	125	99,2	15,5	131,662	99,2	17,196

Табл. 4. Результаты моделирования по узлам процесса управления подачей воды

Обозначение узла	До исполнения прогноза	После исполнения прогноза
	$Z+H$, м	$Z+H$, м
1	95,0	95,0
2	88,5	88,5
3	85,5	87,1576
4	80,5	82,359
5	85	85
6	65	65

Результаты моделирования рассмотрим с позиции экономической эффективности схемы транспортирования воды от скважин до РЧВ. Модель управления [9, 11, 14, 15] водоподъемными скважинами позволяет отслеживать переход системы в новое состояние и изменение параметров по отдельным линиям в рамках этого перехода. При этом, если от двух скважин подача воды в водовод возрастает в соответствии с заданным прогнозом, то от третьей — подача воды уменьшается. Это приводит к снижению напора и величины подачи воды в РЧВ по сравнению с ожидаемыми значениями в новом состоянии, т.е. система управления оказывается недостаточно эффективной.

Подобные негативные проявления при функционировании системы обусловлены подачей воды в РЧВ от нескольких скважин через общий водовод, который гидравлически связан со всеми скважинами и является передающим звеном режимных возмущений одной группы скважин на другие. Причем в такой (зависимой) схеме подачи воды общий водовод выступает не только как передающее, но и как тормозящее звено, так как при увеличении подачи воды от каких-либо скважин, его сопротивление возрастает и тормозит увеличение подачи воды от остальной части скважин. При этом часть насосного оборудования отклоняется от оптимальных режимов работы в сторону увеличения затрат электроэнергии [4, 16—23]. Такую картину демонстрируют результаты моделирования (см. табл. 3, 4) при увеличении расхода воды по линиям 1—3 и 4—5 за счет полного открытия УД, при этом увеличивается напор в узле 3 почти на 1,66 м, а в узле 4 уже на 1,86 м, причем в последнем случае рост напора происходит не только за счет открытия УД на линии 4—5, но и за счет повышения напора в узле 3, т.е. в узле 4 произошло накопление возмущения от двух скважин.

Ухудшает работу системы управления и подачи воды различие характеристик насосного оборудования скважин, согласно табл. 4, отличие полных пьезометрических напоров узлов 1 и 2 привело к уменьшению подачи воды от второй скважины (поз. 2) более, чем на 29 %. При значительной разнице марок насосов возможно увеличение потери энергии в напорных линиях и уменьшение подачи воды от отдельных скважин. Это отражается и на расходе воды на линии 3—4 водовода, подающего воду в РЧВ, т.е. подача воды в резервуар увеличилась всего лишь на 5,3 %, за счет уменьшения расхода по линии 3—4 на 2,04 %. При этом подача воды в водовод от двух скважин, стимулированная системой управления возросла на 18,4 %.

Для такой схемы (см. рис. 1) характерна подача воды в один коллекторный узел от нескольких скважин, следствием чего является противодействие насосного оборудования, усугубляемое различием в напорах. Элементы противодействия присутствуют в схеме с соответствующими негативными последствиями, выявленными по результатам моделирования. Такая схема подачи воды в сборный трубопровод приводит к «передавливанию» одними более мощными насосами других с худшими характеристиками и переходом на неоптимальные режимы работы.

Алгоритм решения задачи потокораспределения в области управления водозаборных скважин состоит из определения предварительной настройки УД, которые могут быть либо полностью открытыми, либо предварительно зарегулированными [6, 12].

Потери напора в дросселе определяются по формуле

$$h_D = \xi \frac{W_D^2}{2g} = S_D Q_D^2. \quad (7)$$

Для УД коэффициент гидравлического сопротивления S_D является переменной величиной, зависящей от возмущающего воздействия, передаваемого на привод дросселя.

По результатам численного моделирования водозаборных скважин на основе (1)—(3), (4)—(6) построены дроссельные характеристики $Q_{Di} = \varphi_i(S_{Di})$ для каждого из двух УД, установленных на подающих воду от скважин линиях. Зависимости расхода воды, подаваемой из скважины погружным насосом через дроссель, от его коэффициента гидравлического сопротивления, приведены на рис. 2.

Рис. 2. Дроссельные характеристики системы водоподъемных скважин: 1 — участок 1—3; 2 — участок 5—4

В соответствии с постановкой задачи одна подающая линия не оснащена УД и исполнение прогноза подачи воды по этой линии (из-за отсутствия механизма его исполнения) не реализуемо. Это недостаток данной модели [13, 17], однако, погрешность исполнения прогноза, обусловленная этой неконтролируемой линией, уменьшается по мере увеличения масштабов системы, т.е. количества скважин.

Синтез дроссельных характеристик подающих линий, полученных на основе модели оперативного управления, позволяет осуществлять оперативное управление режимами подачи воды в РЧВ согласно заданным прогнозам, демонстрирует траекторию перехода системы в новое состояние, что является альтернативой прямого моделирования на основе (1)—(3), (4)—(6). Оба метода могут быть реализованы в рамках функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом распределения воды на насосной станции I подъема.

Благодаря полученным дроссельным характеристикам [6, 13, 24] удается определить максимальное значение расхода воды, поступающей в РЧВ, а также появляется возможность моделирования наиболее экономичного [17] режима эксплуатации погружных насосов скважин. Рассматриваемая конкретная схема (см. рис. 1) и решение задачи управления дроссельными устройствами водозаборных скважин могут быть использованы для других схем подачи воды насосными станциями.

Результаты данных исследований особенно актуальны для существующих и реконструируемых водозаборов при эксплуатации погружных насосов с различными характеристиками подачи и напора.

Библиографический список

1. Алексеев В.В., Сердюк Н.И. Рациональный выбор средств для подъема воды (раствора) по гидрогеологическим скважинам. М. : МГГРУ, 2005. 213 с.
2. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М. : Наука, 1985. 278 с.
3. Сердюк Н.И. Совершенствование технологий сооружения и эксплуатации скважин на жидкие полезные ископаемые // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2005. № 1. С. 56—60.
4. Сердюк Н.И. Оптимизация процесса эксплуатации водозаборных скважин // Экологические системы и приборы. 2005. № 3. С. 8—11.
5. Николаев В.Г. Исследование энергоэффективности работы оборудования насосных станций // Гидротехническое строительство. 2009. № 9. С. 39—45.
6. Карелин В.Я., Минаев А.В. Насосы и насосные станции. М. : Стройиздат, 1986. 320 с.
7. Панов М.Я., Стогней В.Г., Петров Ю.Ф. Развитие теории управления функционированием гидравлических систем в приложении к водоподъемным станциям. Воронеж : ВГТУ, 2009. 57 с.
8. Orchard Bryan. Pump monitoring and communications // World Pumps. 2007. No. 495. Pp. 20—23.
9. Anderson H.H. Submersible Pumps and their applications. Morden Surrey : Trade and Technical Pr, 1986. 326 p.

10. Пурусова И.Ю., Щербаков В.И. Математическое моделирование оперативного управления водоподъемными станциями // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 4-2. С. 310—313.
11. Тугай А.М. Расчет и конструирование водозаборных узлов. Киев : Будівельник, 1978. 160 с. (Инженеру-проектировщику)
12. Панов М.Я., Щербаков В.И., Квасов И.С. Моделирование возмущенного состояния гидравлических систем сложной конфигурации на основе принципов энергетического эквивалентирования // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2002. № 6. С. 130—137.
13. Панов М.Я., Пурусова И.Ю., Щербаков В.И. Разработка математической модели управления функционированием водоподъемной станции // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2009. № 1. С. 176—182.
14. Щербаков В.И., Панов М.Я., Петров Ю.Ф. Моделирование возмущенного состояния систем подачи и распределения воды // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 281—287.
15. Панов М.Я., Пурусова И.Ю., Щербаков В.И. Моделирование потокораспределения и управление водоподъемными станциями // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2007. Т. 3. № 6. С. 182—185.
16. Панов М.Я., Петров Ю.Ф., Щербаков В.И. Теория и методы управления функционированием систем водоснабжения // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2011. № 1. С. 71—86.
17. Пурусова И.Ю., Помогаева В.В. Рациональное использование энергоресурсов на водоподъемных станциях // Электротехнические комплексы и системы управления. 2006. № 1. С. 62—63.
18. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных и воздушных установках. М. : Энергопромиздат, 2006. 360 с.
19. Искендеров А.А. Задачи выбора оптимальных режимов работы НС // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 5. С. 62—64.
20. Simovert Master Drives. Voltage Source Converters for 3-Phase Drive Systems 6SE71 Cabinet Units 37 kW to 1500 kW. Catalog DA 65.2 Germany, 1997. 92 p.
21. Nool P. Determining the real cost of powering a pump // World Pumps. 2008. No. 496. Pp. 32—34.
22. Vogelesang Hans. An introduction to energy consumption in pumps // World Pumps. 2008. No. 496. Pp. 28—31.
23. Wharton S.T., Martin P., Watson T.J. Pumping stations: design for improved buildability and maintenance. London : Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Report, 1998. No. 182. 99 p.
24. Pump life cycle costs: A guide to LCC analysis for pumping systems. Executive Summary. Hydraulic Institute, Europump, U.S. Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT), 2000, 16 p.

Поступила в редакцию в августе 2015 г.

Об авторах: **Щербаков Владимир Иванович** — доктор технических наук, профессор кафедры гидравлики, водоснабжения и водоотведения, **Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВО «Воронежский ГАСУ»)**, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, scher@vgasu.vrn.ru;

Пурусова Ирина Юрьевна — ассистент кафедры гидравлики, водоснабжения и водоотведения, **Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВО «Воронежский ГАСУ»)**, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, vps_na@list.ru;

Помогаева Валентина Васильевна — кандидат технических наук, доцент, кафедры гидравлики, водоснабжения и водоотведения **Воронежский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВО «Воронежский ГАСУ»)**, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84, pomogaeva8@mail.ru.

Для цитирования: *Щербаков В.И., Пурусова И.Ю., Помогаева В.В. Модель оперативного управления работой водоподъемных скважин // Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 118—127.*

V.I. Shcherbakov, I.Yu. Purusova, V.V. Pomogaeva

OPERATIONAL CONTROL MODEL OF WATER-LIFTING WELLS

In work the modeling of operational management of water lifting wells, which allow optimizing the operating modes of pump equipment is considered. The model of the indignant condition of the system with water supply mode from wells and hydraulic control of the operated throttles is assumed as a basis. As functional restrictions the balance of water streams through the system in general is used. The solution algorithm of the problem of a load flow in the field of management of water wells consisting of definition of preliminary control of the operated throttles is presented. According to the results of numerical modeling of water wells, throttle characteristics are constructed for the operated throttles established on the flow lines. The synthesis of throttle characteristics of the flow lines, allows exercising operational management of the water supply modes in the tank of clean water according to the set forecasts, shows a trajectory of transition of the system to a new state that is alternative of direct modeling.

Key words: water-lifting wells, the tank of clean water, operational control modeling, the operating modes, water-lifting station

References

1. Alekseev V.V., Serdyuk N.I. *Ratsional'nyy vybor sredstv dlya pod"ema vody (rastvora) po gidrogeologicheskim skvazhinam* [Rational Choice of Measures for Water (Solution) Lifting from Hydrogeological Wells]. Moscow, MGGRU Publ., 2005, 213 p. (In Russian)
2. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskikh tsepey* [Theory of Hydraulic Circuits]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 278 p. (In Russian)
3. Serdyuk N.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii sooruzheniya i ekspluatatsii skvazhin na zhidkie poleznye iskopaemye* [Improving the Technology of Construction and Operation of Wells in the Liquid Minerals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geology and Exploration]. 2005, no. 1, pp. 56—60. (In Russian)
4. Serdyuk N.I. *Optimizatsiya protsessa ekspluatatsii vodozabornykh skvazhin* [Optimization of Operating Process of Water Wells]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices]. 2005, no. 3, pp. 8—11. (In Russian)
5. Nikolaev V.G. *Issledovanie energoeffektivnosti raboty oborudovaniya nasosnykh stantsiy* [The Study of Energy Efficiency of Pumping Stations Equipment]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering]. 2009, no. 9, pp. 39—45. (In Russian)
6. Karelin V.Ya., Minaev A.V. *Nasosy i nasosnye stantsii* [Pumps and Pump Stations]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 320 p. (In Russian)
7. Panov M.Ya., Stogney V.G., Petrov Yu.F. *Razvitie teorii upravleniya funktsionirovaniem gidravlicheskikh sistem v prilozhenii k vodopod"emnym stantsiyam* [Development of The Theory of Operation of Hydraulic Systems in Application to Pumping Stations]. Voronezh, VGTU Publ., 2009, 57 p. (In Russian)

8. Orchard Bryan. Pump Monitoring and Communications. World Pumps. 2007, no. 495, pp. 20—23.
9. Anderson H.H. Submersible Pumps and their Applications. Morden Surrey, Trade and Technical Pr, 1986, 326 p.
10. Purusova I.Yu., Shcherbakov V.I. Matematicheskoe modelirovanie operativnogo upravleniya vodopod'emnymi stantsiyami [Mathematical Modeling of Operational Management of Pumping Stations]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka : teoriya i praktika* [Current Research Directions of the 21st Century : Theory and Practice]. 2014, vol. 2, no. 4-2, pp. 310—313. (In Russian)
11. Tugay A.M. *Raschet i konstruirovaniye vodozabornykh uzlov* [Design and Analysis of Intake Nodes]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1978, 160 p. (Inzheneru-proektirovshchiku [To a design engineer])
12. Panov M.Ya., Shcherbakov V.I., Kvasov I.S. Modelirovanie vozmushchennogo sostoyaniya gidravlicheskikh sistem slozhnoy konfiguratsii na osnove printsipov energeticheskogo ekvivalentirovaniya [Modeling Perturbed State of Hydraulic Systems of Complex Configuration Based on the Principles of Energy Equivalent]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika* [News of the Russian Academy of Sciences. Energy]. 2002, no. 6, pp. 130—137. (In Russian)
13. Panov M.Ya., Purusova I.Yu., Shcherbakov V.I. Razrabotka matematicheskoy modeli upravleniya funktsionirovaniem vodopod'emnoy stantsii [Development of Mathematical Model of Management of Pumping Stations Functioning]. *Nauchnyy zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniya* [Scientific Journal. Engineering Systems and Facilities]. 2009, no. 1, pp. 176—182. (In Russian)
14. Shcherbakov V.I., Panov M.Ya., Petrov Yu.F. Modelirovanie vozmushchennogo sostoyaniya sistem podachi i raspredeleniya vody [Perturbed State Simulation of Water Supply Systems]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011, no. 8, pp. 281—287. (In Russian)
15. Panov M.Ya., Purusova I.Yu., Shcherbakov V.I. Modelirovanie potokoraspredeleniya i upravlenie vodopod'emnymi stantsiyami [Modeling of Flow Distribution and Management of Pumping Stations]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Herald of the Voronezh State Technical University]. 2007, vol. 3, no. 6, pp. 182—185. (In Russian)
16. Panov M.Ya., Petrov Yu.F., Shcherbakov V.I. Teoriya i metody upravleniya funktsionirovaniem sistem vodosnabzheniya [Theory and Methods of Management of Water Supply Systems Functioning]. *Nauchnyy zhurnal. Inzhenernye sistemy i sooruzheniya* [Scientific Journal. Engineering Systems and Facilities]. 2011, no. 1, pp. 71—86. (In Russian)
17. Purusova I.Yu., Pomogaeva V.V. Ratsional'noe ispol'zovanie energoresursov na vodopod'emnykh stantsiyakh [Rational Use of Energy Resources on Water-Lifting Stations]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrical Systems and Management Systems]. 2006, no. 1, pp. 62—63. (In Russian)
18. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemyy elektropriwod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy Saving and Regulated Electric Driver in Pump and Blower Installations]. Moscow, Energopromizdat Publ., 2006, 360 p. (In Russian)
19. Serdyuk N.I. Optimizatsiya protsessa ekspluatatsii vodozabornykh skvazhin [Optimization of Water Wells Operation]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Ecological Systems and Devices]. 2005, no. 3, pp. 8—11. (In Russian)
20. Iskenderov A.A. Zadachi vybora optimal'nykh rezhimov raboty NS [Problems of Choosing the Optimum Modes of Pump Stations]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics]. 2004, no. 5, pp. 62—64. (In Russian)
21. Simovert Master Drives. Voltage Source Converters for 3-Phase Drive Systems 6SE71 Cabinet Units 37 kW to 1500 kW. Catalog DA 65.2 Germany, 1997, 92 p.
22. Nool P. Determining the Real Cost of Powering a Pump. World Pumps. 2008, no. 496, pp. 32—34.
23. Voegesang Hans. An Introduction to Energy Consumption in Pumps. World Pumps. 2008, no. 496, pp. 28—31.
24. Wharton S.T., Martin P., Watson T.J. Pumping Stations: Design for Improved Buildability and Maintenance. London, Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Report, 1998, no. 182, 99 p.

25. Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary. Hydraulic Institute, Europump, U.S. Department of Energy's Office of Industrial Technologies (OIT), 2000, 16 p.

About the authors: **Shcherbakov Vladimir Ivanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Hydraulics, Water Supply and Water Disposal, **Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE)**, 84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, 394006, Russian Federation; scher@vgasu.vrn.ru;

Purusova Irina Yur'evna — Assistant Lecturer, Department of Hydraulics, Water Supply and Water Disposal, **Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE)**, 84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, 394006, Russian Federation; vps_na@list.ru;

Pomogaeva Valentina Vasil'evna — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Hydraulics, Water Supply and Water Disposal, **Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE)**, 84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh, 394006, Russian Federation; pomogaeva8@mail.ru.

For citation: Shcherbakov V.I., Purusova I.Yu., Pomogaeva V.V. Model' operativnogo upravleniya rabotoy vodopod"emnykh skvazhin [Operational Control Model of Water-Lifting Wells]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 12, pp. 118—127. (In Russian)