

Научная статья

УДК 303.732.4. 004.056.5

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.6>

Проектирование системы управления гидrolитосферными процессами в пластах глубокого залегания

Иван Андреевич Бондин^{1*}¹ Южный федеральный университет (105/42, ул. Большая Садовая, Ростов-на-Дону, 344006, Россия)¹ bondin@sfedu.ru

*Автор, ответственный за переписку

Аннотация. В статье рассматривается задача проектирования системы управления гидrolитосферными процессами в пластах глубокого залегания. Рассмотрен прикладной метод синтеза системы управления дебитом добывающей скважины, в котором понижение уровня в наблюдательной скважине используется как регулируемая величина, а дебит добывающей скважины - как управляющее воздействие. Показано, что применение наблюдательной скважины в канале обратной связи позволяет исключить искажающее влияние термо-газлифта, характерное для глубоких газонасыщенных горизонтов, и формировать эксплуатационный режим исходя из заданного допустимого понижения уровня.

Ключевые слова: гидrolитосферный процесс, пласт глубокого залегания, система управления, добывающая скважина, наблюдательная скважина, дебит, понижение уровня, синтез регулятора

Для цитирования: Бондин И. А. Проектирование системы управления гидrolитосферными процессами в пластах глубокого залегания // Современная наука и инновации. 2026. № 2. С. 69–79. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.6>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.04.2026;
одобрена после рецензирования 21.05.2026;
принята к публикации 21.06.2026.

Research article

Design of a control system for hydrolithospheric processes in deep-lying formations

Ivan A. Bondin^{1*}¹ Southern Federal University (105/42, Bolshaya Sadovaya St., Rostov-on-Don, 344006, Russia)¹ bondin@sfedu.ru

*Corresponding author

Abstract. The article addresses the problem of designing a control system for hydrolithospheric processes in deep-seated aquifers. An applied method is considered for synthesizing a control system for the discharge rate of a production well, in which drawdown in an observation well is used as the controlled variable, while the discharge rate of the production well serves as the control action. It is shown that the use of an observation well in the feedback loop makes it possible to eliminate the distorting effect of thermal gas-lift phenomena typical of deep gas-saturated aquifers and to establish the production regime on the basis of the prescribed allowable drawdown.

Keywords: hydrolithospheric process, deep-lying formation, control system, production well, observation well, flow rate, drawdown, controller synthesis

© Бондин И. А., 2026

For citation: Bondin IA. Design of a control system for hydrolithospheric processes in deep-lying formations. *Modern Science and Innovations*. 2026;(2):69-79. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.6>

Conflict of Interest: the author declares no conflicts of interest.

The article was submitted 01.04.2026;
approved after reviewing 21.05.2026;
accepted for publication 21.06.2026.

Введение. Исследование пластов глубокого залегания, содержащих минеральные подземные воды, требует не только определения фильтрационных параметров, но и разработки методов управления режимами водоотбора. В традиционной гидрогеологической постановке дебит добывающей скважины задаётся как исходный эксплуатационный параметр, после чего по результатам наблюдений оценивается реакция водоносного горизонта. Такой подход позволяет косвенно описывать режим работы одиночной скважины, поскольку существуют большие сложности в измерении избыточного пьезометрического уровня подземных вод, из-за существенного влияния термо-газ лифта, протекающего в эксплуатационной скважине [7], на измерительное оборудование (как правило устанавливаемого на оголовке скважины).

Анализ существующих исследований показывает, что значительная часть разработанных моделей ориентирована на описание фильтрации в относительно однородных водоносных горизонтах [3]. В этих моделях используются классические уравнения в частных производных, параметры которых определяются по результатам экспериментальных исследований (опытно-фильтрационных работ). Данный подход хорошо зарекомендовал себя при исследовании неглубоко залегающих горизонтов, однако при изучении глубоких газонасыщенных пластов его применение существенно ограничено.

В пластах глубокого залегания достоверное определение статических и динамических характеристик по данным одиночной эксплуатационной скважины затруднено влиянием термо-газлифта. При выпуске воды происходит изменение температурно-барических условий, выделение спонтанного газа, облегчение компенсационного столба воды в стволе и искажение показаний уровня или избыточного давления. Поэтому измеренный уровень в добывающей скважине не всегда отражает фактическое понижение в пласте. Более того, в ряде случаев вследствие роста температуры, переходных процессов и перехода части растворённого газа в спонтанную фазу в стволе скважины может фиксироваться не снижение, а рост уровня или устьевого давления. В результате наблюдаемая реакция эксплуатационной скважины оказывается противоположной фактической гидродинамической реакции пласта, что делает использование одиночной добывающей скважины недостаточным для корректного определения динамических характеристик объекта управления.

В связи с этим возникает необходимость перехода к управленческой постановке задачи, при которой регулируется не только дебит добывающей скважины, но и фактическая реакция пласта, фиксируемая по данным наблюдательной скважины [7]. Такой подход позволяет рассматривать гидrolитосферный процесс как объект управления с входным воздействием, выходной регулируемой величиной, обратной связью и ограничениями по допустимому воздействию на пласт.

Целью работы является разработка прикладного метода синтеза системы управления дебитом добывающей скважины, обеспечивающего поддержание заданного понижения уровня в наблюдательной скважине (не подверженной влиянию термо-газ лифта) при эксплуатации пластов глубокого залегания. Актуальность такой постановки определяется тем, что в лицензии на право пользования недрами, на основании протокола Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых, закрепляются параметры эксплуатации, включая допустимое понижение уровня. Следовательно, соблюдение данного

показателя требует не только режимного контроля, но и целенаправленного управления дебитом добывающей скважины с учётом фактической реакции пласта.

Материалы и методы. В рассматриваемой статье показан прикладной метод синтеза системы управления дебитом добывающей скважины, позволяющего управлять гидrolитосферным процессом исходя из обеспечения заданного понижения уровня в наблюдательной скважине. В отличие от традиционного подхода, при котором дебит задаётся как фиксированный эксплуатационный параметр, предложенный метод рассматривает дебит добывающей скважины как управляющее воздействие, а понижение уровня в наблюдательной скважине — как регулируемую величину, характеризующую фактическую реакцию пласта на эксплуатационную нагрузку.

Результаты и обсуждение. Гидролитосферный процесс как объект управления. Гидролитосферный процесс в пласте глубокого залегания представляет собой сложный динамический процесс, формирующийся под влиянием естественных и техногенных факторов. К числу основных факторов относятся геолого-структурная неоднородность, трещинно-жильный характер коллектора, напорный режим, газонасыщенность, температурно-барические условия, а также изменение эксплуатационной нагрузки во времени [8, 10, 17].

Для целей синтеза системы управления пласт глубокого залегания целесообразно рассматривать как объект с распределёнными параметрами. Управляющим воздействием является дебит добывающей скважины, а регулируемой величиной — понижение уровня или давления в наблюдательной скважине. Именно наблюдательная скважина позволяет получить более достоверную информацию о реакции пласта, поскольку на её показания в меньшей степени влияет газовыделение в стволе добывающей скважины.

Использование пары «добывающая–наблюдательная скважина» особенно важно в условиях газонасыщенных минеральных вод. При измерениях в добывающей скважине термо-газлифт может приводить к завышению напора на устье и искажению восстановления уровня после остановки выпуска [15]. Наблюдательная скважина, расположенная в непосредственной близости от добывающей, позволяет фиксировать депрессию в пласте без прямого влияния потока газовой смеси.



Рисунок 1. Схема использования наблюдательной скважины для фиксации понижения уровня

Комплексный подход к исследованию пластов глубокого залегания позволяет получать достоверные данные о состоянии водоносного горизонта, контролировать эксплуатационный режим и сохранять кондиционный химический и газовый состав минеральных вод в процессе промышленной разработки [1–9]. В рамках настоящей работы данный подход реализуется через переход от разрозненного анализа результатов опытно-фильтрационных работ к построению математической модели объекта управления и последующему синтезу регулятора дебита добывающей скважины.

На первом этапе по данным опытно-фильтрационных исследований были определены параметры передаточной функции объекта управления. Рассматриваемая передаточная

функция описывает влияние изменения дебита добывающей скважины № 1-бис-Э на понижение уровня в наблюдательной скважине № 2-бис-Э. Расстояние между скважинами составляет 11 м, что позволяет использовать наблюдательную скважину как локальный канал обратной связи, фиксирующий фактическую реакцию пласта на эксплуатационное воздействие.

Таблица 1. Параметры исследования рассматриваемого водоносного горизонта

Дебит скв. № 1-бис-Э, м³/сут	Понижение уровня в скв. № 1-бис-Э, м	Понижение уровня в скв. № 2-бис-Э, м
65	45	12
	$K_1 = 45/65 = 0,6923$	$K_2 = 12/65 = 0,1846$

По результатам исследований при дебите скважины № 1-бис-Э, равном 65 м³/сут, понижение уровня в добывающей скважине составило 45 м, а в наблюдательной скважине № 2-бис-Э – 12 м. На основании этих данных были определены статические коэффициенты передачи:

$$K_1 = 45/65 = 0,6923 \quad (1)$$

$$K_2 = 12/65 = 0,1846 \quad (2)$$

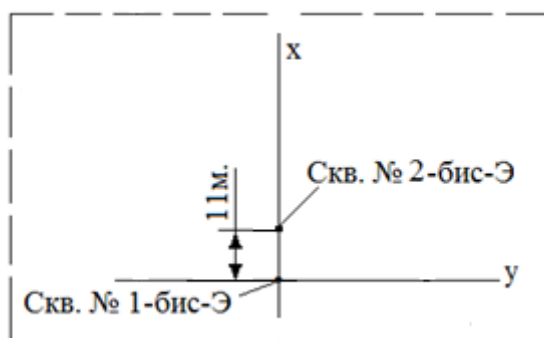


Рисунок 2. Схема расположения скважин

Значение K_1 характеризует реакцию добывающей скважины на собственный водоотбор, тогда как K_2 отражает реакцию наблюдательной скважины и, соответственно, фактическое распространение депрессионного воздействия в пласте. Именно коэффициент K_2 имеет принципиальное значение для построения системы управления [3-6], поскольку он описывает связь между управляющим воздействием — дебитом добывающей скважины — и регулируемой величиной — понижением уровня в наблюдательной скважине.

Для первого интервала аппроксимации, соответствующего условию $r_0 \leq x \leq L_1$, где $r_0 = 0,2$ м — радиус депрессионной воронки, а $L_1 = 11$ м — расстояние между добывающей и наблюдательной скважинами, были определены параметры аппроксимирующего звена. Исходя из этого получим систему уравнений:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ K_2 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases} \quad (3)$$

$$\beta = (D)^{1/2}.$$

Подставляя исходные данные в систему (3) и решая полученную систему (4), получим:

$$\begin{cases} 0.6923 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot r_0), \\ 0.1846 = \frac{K}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot L_1), \end{cases}$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2},$$

$$K = 1.32182 \quad (4)$$

Статический коэффициент передачи аппроксимирующего звена на первом интервале записывается в виде:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x^2);$$

$$\beta = (0.12239)^{1/2}. \quad (5)$$

На рисунке 3 приведены графики изменения статических коэффициентов передачи, построенные с использованием ОФР и численным моделированием, с использованием статического коэффициента передачи (3, 4).

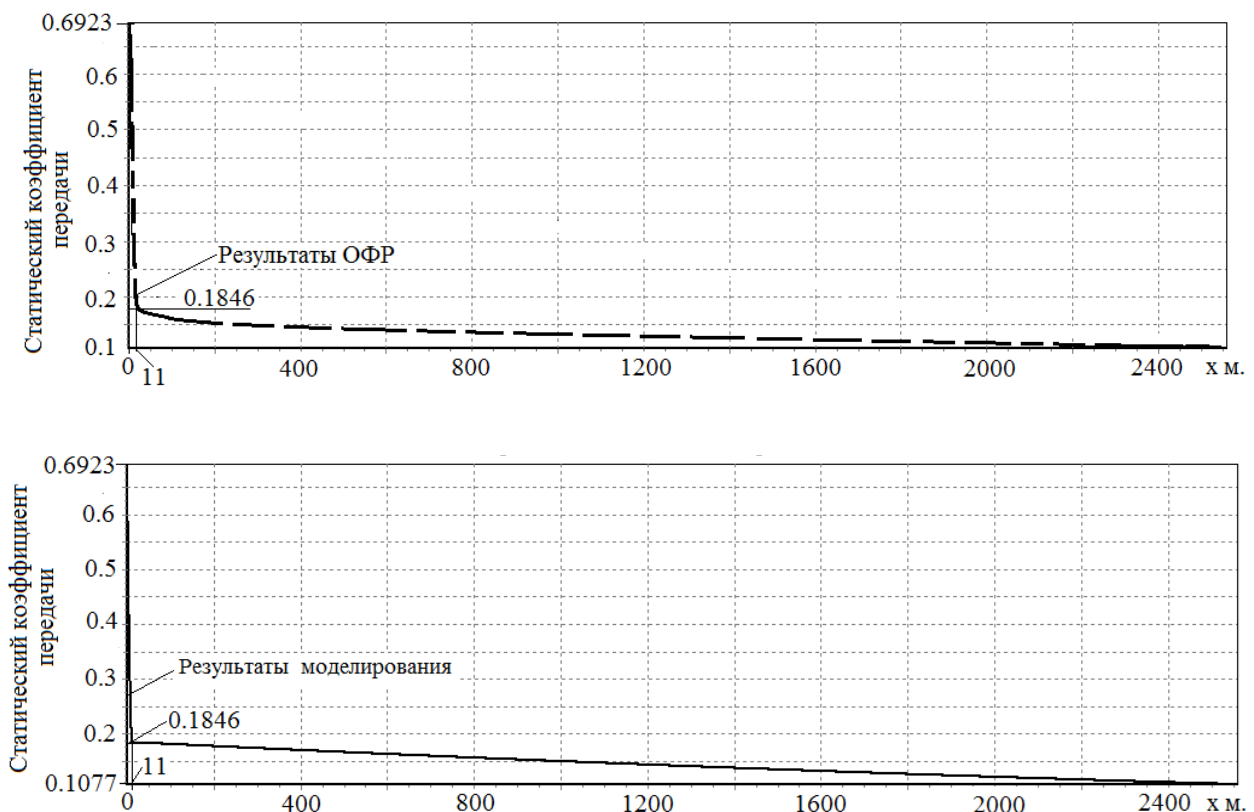


Рисунок 3. Понижение уровня в рассматриваемом горизонте

Для описания динамики гидrolитосферного процесса используется передаточная функция аппроксимирующего звена в операторной форме:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x); \beta = (s/a + 0.12239)^{1/2}, \quad (6)$$

где: s-оператор Лапласа; а-определяемый параметр (коэффициент пьезопроводности).

Полагая в (3) $s=j\omega$ и преобразуя, получим соотношение для определения фазы аппроксимирующего звена для первого интервала:

$$\Delta\varphi_i = -\operatorname{Im}(\beta) \cdot x - \arctan(\operatorname{Im}(\beta) / \operatorname{Re}(\beta)),$$

$$\beta = \left(\frac{j\omega_i}{a_i} + D \right)^{1/2}, L_{i-1} \leq x < L_i, L_0 = r_0. \quad (7)$$

Изменяя значение дебита в скважине 1-бис-Э ($Q=40+25 \cdot \sin(3.6 \cdot 24 \cdot t)$, (t-время (сут.) и измеряя колебательный процесс в скважине 2-бис-Э, для первого интервала был вычислен сдвиг по фазе функции выхода (колебаний изменения уровня в скважине №2-бис-Э относительно входного воздействия (колебаний дебита скважины №1-бис-Э, который составил: $\Delta\varphi_1 = -1.12$ рад.

Подставляя исходные данные: $x_1 = L_1 = 11$; $D = 0.1223$; $\Delta\varphi_1 = -1.12$ в (8) определим значение a , которое удовлетворяет уравнению:

$$-1.12 = -\operatorname{Im}(\beta) \cdot 11 - \arctan(\operatorname{Im}(\beta) / \operatorname{Re}(\beta)),$$

$$\beta = \left(\frac{j \cdot (3.6 \cdot 24)}{a_i} + 0.1223 \right)^{1/2}. \quad (8)$$

Вычисленное значение параметра: $a_1 = 0.0000324/24$ м²/час. Передаточная функция объекта управления записывается в виде:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x); \beta = (s/(0.0000324/24) + 0.1223)^{1/2} \quad (9)$$

Используя передаточную функцию (9), была разработана программа, позволяющая определить параметры регулятора, при проектировании системы управления рассматриваемым процессом.

Методика синтеза регулятора распадается на следующие этапы:

1. Определим желаемую точку среза модуля ($\omega = \omega_1$) разомкнутой системы, полагая что фазовый сдвиг, вносимый в систему регулятором, равен нулю:

$$-\pi + \Delta f = -\arctg(\operatorname{Im}(W_a(j\omega)) / \operatorname{Re}(W_a(j\omega))), \quad (10)$$

где Δf - желаемый запас устойчивости по фазе.

2. Определение значения коэффициента усиления регулятора.

Подставляя вычисленное значение ω_1 в уравнение:

$$K = (((\operatorname{Im}(W_a(j\omega_1)))^2 + (\operatorname{Re}(W_a(j\omega_1)))^2)^{0.5})^{-1}, \quad (11)$$

3. Определение параметров интегрирующего и дифференцирующего звеньев.

Определение параметров регулятора будем осуществлять, исходя из условия, что значение частот ω_1 и ω_2 принадлежат линии перегиба

Подставляя ω_1 и ω_2 в уравнение линии перегиба, получим следующую систему уравнений:

$$\lg \omega_1 = 0.5 \cdot \lg(E_4) - 0.5 \cdot \lg(E_2), \quad (12)$$

$$\lg \omega_2 = 0.5 \cdot \lg(E_4) - 0.5 \cdot \lg(E_2) \quad (13)$$

Решая полученную систему уравнений, определим значения параметров

Интегрирующего (E4) и дифференцирующего (E2) звеньев.

Рассмотренная методика реализована в программном продукте, используя который были вычислены параметры регулятора, при этом полагалось: запас устойчивости по фазе $\Delta f = \pi/4$; запас устойчивости по модулю $\Delta L \geq 10$ дБ.

Передающая функция регулятора записывается в виде:

$$R(s) = 54.144 + 0.000031 / s + 322.188 \cdot s,$$

s – оператор Лапласа

(14)

4. Определение запасов устойчивости.

Амплитудная и фазовая характеристики разомкнутой системы приведены на рисунке 4 (ω в 1/час).

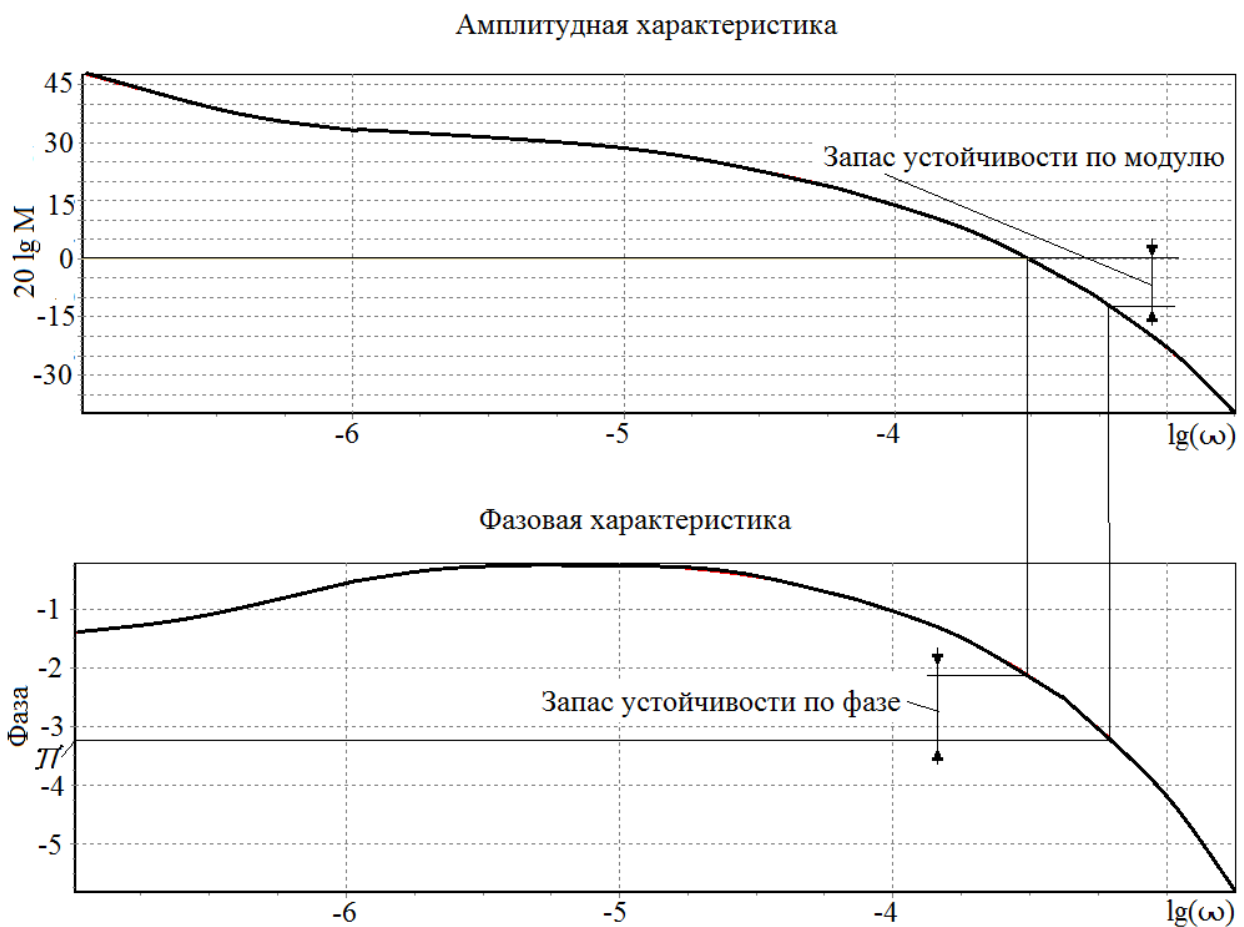


Рисунок 4. Амплитудная и фазовая частотные характеристики разомкнутой системы

Передающая функция регулятора и объекта управления записываются в виде:

$$W_a = \frac{1.32182}{\beta} \cdot \exp(-\beta \cdot x);$$

$$\beta = (s/(0.0000324/24) + 0.1223)^{1/2}$$

(15)

Структурная схема замкнутой системы управления приведена на рис.5

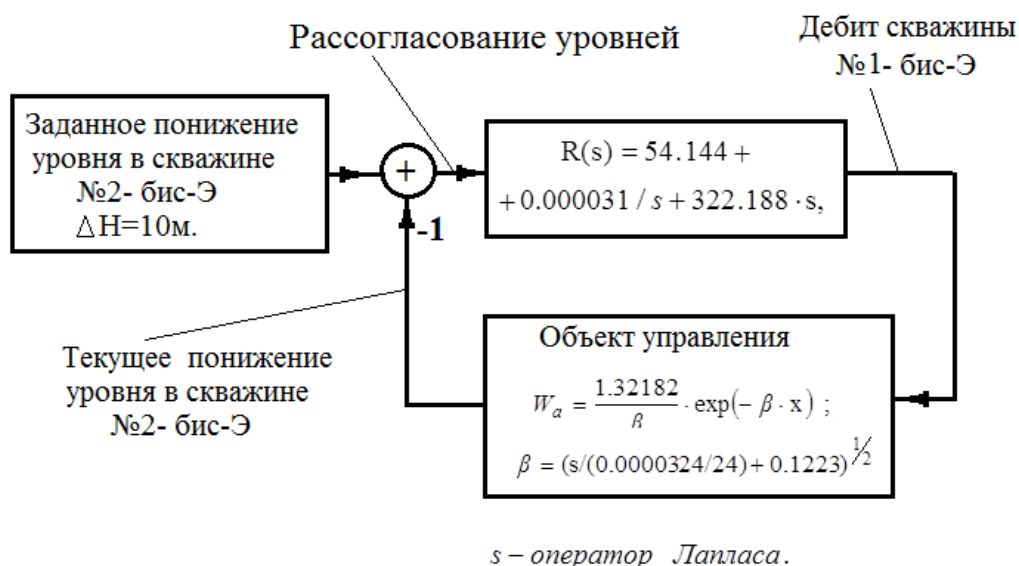


Рисунок 5. Структурная схема замкнутой системы

Моделируя работу замкнутой системы управления (с использованием программно-моделирующего комплекса) получен график переходного процесса, приведенный на рисунке 6:

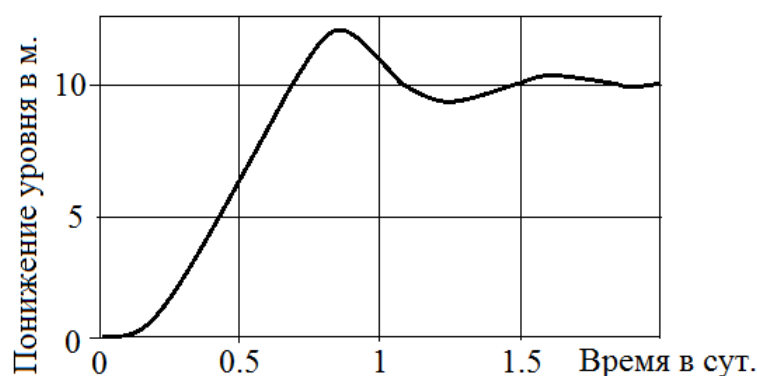


Рисунок 6. График переходного процесса

На рис. 6 приведен график переходного процесса системы управления рассматриваемым процессом, с регулятором (15).

Заключение. В работе рассмотрена задача проектирования системы управления гидrolитосферными процессами в пластах глубокого залегания. Показано, что для глубоких газонасыщенных горизонтов традиционная схема анализа, основанная на интерпретации данных одиночной добывающей скважины, имеет существенные ограничения вследствие влияния термо-газлифта и искажения измеряемого избыточного уровня подземных вод.

Разработан прикладной метод синтеза системы управления дебитом добывающей скважины, позволяющий управлять гидrolитосферным процессом исходя из обеспечения заданного понижения уровня в наблюдательной скважине. В предложенной постановке дебит добывающей скважины рассматривается как управляющее воздействие, а понижение уровня в наблюдательной скважине - как регулируемая величина, отражающая фактическую реакцию пласта на эксплуатационную нагрузку.

Предложенная система управления реализует обратную связь по данным наблюдательной скважины и позволяет перейти от пассивного контроля последствий водоотбора к активному формированию рационального режима эксплуатации. Это обеспечивает возможность поддержания эксплуатационной нагрузки в пределах

допустимого воздействия на пласт глубокого залегания с учётом инерционности, запаздывания и нелинейности гидролитосферного процесса.

В настоящее время ведутся работы по реализации рассматриваемой системы управления дебитом добывающей скважины № 1-бис-Э, при этом, измерение текущего уровня осуществляется с использованием скважины № 2-бис-Э.

Список источников

1. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
2. Бондин И. А., Снурницын Г. К. Автоматизация системы управления добычи и мониторинга скважин Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // Геология и недропользование. 2023. № 3. С. 36–39.
3. Бондин И. А., Снурницын Г. К. Системный анализ процессов в гидролитосфере Ессентукского месторождения минеральных подземных вод // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник материалов XII Всероссийской научной конференции. Нижний Архыз, 23–29 сентября 2024 г. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2024. С. 224–230. <https://doi.org/10.18522/syssyn-2024-39>
4. Бондин И. А. Методика кусочной аппроксимации статических характеристик гидролитосферных процессов глубокого залегания // Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 6. С. 81–89. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-6-81-89>
5. Бондин И. А. Системный анализ гидрогеохимических характеристик эксплуатационных скважин, каптирующих сеноман-маастрихтский водоносный горизонт месторождения 4-й категории сложности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2026. № 1. С. 16–22.
6. Бондин И. А. Системный анализ гидролитосферных процессов Ессентукского месторождения минеральных подземных вод (Новоблагодарненский участок) // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2025. № 2. С. 5–9.
7. Бондин И. А., Остапенко Н. В., Бондина Д. А. Проблемы проектирования систем управления гидролитосферными процессами водоносных горизонтов глубокого залегания в трещиноватых горных породах // VI Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2025): сборник докладов. Санкт-Петербург, 17–19 сентября 2025 г. СПб.: ЛЭТИ, 2025. С. 273–276.
8. Бондин И. А., Першин И. М. Методика описания статических и динамических характеристик гидролитосферных процессов глубокого залегания // Системный синтез и прикладная синергетика: сборник научных трудов XIII Всероссийской научной конференции. Таганрог, 20–25 октября 2025 г. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2025. С. 142–146. <https://doi.org/10.18522/syssyn-2025-23>
9. Бондин И. А., Першин И. М., Цаплева В. В. Проектирование систем управления гидролитосферными процессами: методические указания к практическим занятиям по курсу «Системный анализ и моделирование». Пятигорск: СКФУ, 2026. 28 с.
10. Боровский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 327 с.
11. Ким Д. П. Теория автоматического управления. М.: Физматлит, 2003. 288 с.
12. Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод: приказ МПР России от 30.07.2007 № 195.
13. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гостехиздат, 1947. 244 с.
14. Пупков К. А., Егупов Н. Д., Баркин А. И., Воронов Е. М., Коньков В. Г., Корнюшин Ю. П., Милов Л. Т., Мышляев Ю. И., Рыбин В. М., Сивцов В. И., Трофимов А. И., Фалдин Н. В., Шевяков О. В. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник в 5 т. Т. 1. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 654 с.
15. Мироненко В. А., Шестаков В. М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
16. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М.: Наука, 1977. 664 с.
17. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М.: МГУ, 1995. 368 с.

References

1. Besekerskiy VA, Popov EP. Theory of Automatic Control Systems. St. Petersburg: Professiya, 2003. 752 p. (In Russ.).
2. Bondin IA, Snurnitsyn GK. Automation of the control system for production and monitoring of wells at the Essentuki mineral groundwater deposit. Geology and Subsurface Management. 2023;(3):36-39. (In Russ.).
3. Bondin IA, Snurnitsyn GK. System analysis of processes in the hydrolithosphere of the Essentuki mineral groundwater deposit. In: System synthesis and applied synergetics: proceedings of the XII All-Russian Scientific Conference. Nizhny Arkhyz, September 23-29, 2024. Rostov-on-Don: SFedU, 2024. P. 224-230. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/syssyn-2024-39>
4. Bondin IA. Method of piecewise approximation of static characteristics of deep-seated hydrolithospheric processes. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2025;(6):81-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-6-81-89>
5. Bondin IA. System analysis of hydrogeochemical characteristics of production wells capturing the Cenomanian-Maastrichtian aquifer of a 4th category complexity deposit. Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies. 2026;(1):16-22. (In Russ.).
6. Bondin IA. System analysis of hydrolithospheric processes of the Essentuki mineral groundwater deposit (Novoblagodarnensky site). Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies. 2025;(2):5-9. (In Russ.).
7. Bondin IA, Ostapenko NV, Bondina DA. Problems of designing control systems for hydrolithospheric processes of deep aquifers in fractured rocks. In: VI International Scientific Conference on Control Problems in Technical Systems (PUTS-2025): proceedings. St. Petersburg, September 17-19, 2025. St. Petersburg: LETI, 2025. P. 273-276. (In Russ.).
8. Bondin IA, Pershin IM. Method for describing static and dynamic characteristics of deep-seated hydrolithospheric processes. In: System synthesis and applied synergetics: proceedings of the XIII All-Russian Scientific Conference. Taganrog, October 20-25, 2025. Rostov-on-Don: SFedU, 2025. P. 142-146. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/syssyn-2025-23>
9. Bondin IA, Pershin IM, Tsapleva VV. Design of control systems for hydrolithospheric processes: guidelines for practical classes in the course "System Analysis and Modeling". Pyatigorsk: NCFU, 2026. 28 p. (In Russ.).
10. Borevskiy BV, Samsonov BG, Yazvin LS. Methodology for determining aquifer parameters from pumping test data. Moscow: Nedra, 1979. 327 p. (In Russ.).
11. Kim DP. Theory of Automatic Control. Moscow: Fizmatlit, 2003. 288 p. (In Russ.).
12. Classification of reserves and predicted resources of drinking, technical and mineral groundwater: order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 195 of July 30, 2007. (In Russ.).
13. Leybenzon LS. Movement of natural fluids and gases in a porous medium. Moscow: Gostekhizdat, 1947. 244 p. (In Russ.).
14. Pupkov KA, Egupov ND, Barkin AI, Voronov EM, Konkov VG, Korniyushin YuP, Milov LT, Myshlyayev YuI, Rybin VM, Sivtsov VI, Trofimov AI, Faldin NV, Shevyakov OV. Methods of classical and modern automatic control theory: textbook in 5 vols. Vol. 1. Moscow: Bauman MSTU, 2004. 654 p. (In Russ.).
15. Mironenko VA, Shestakov VM. Theory and methods of interpretation of experimental filtration works. Moscow: Nedra, 1978. 325 p. (In Russ.).
16. Polubarinova-Kochina PYa. Theory of groundwater movement. Moscow: Nauka, 1977. 664 p. (In Russ.).
17. Shestakov VM. Groundwater dynamics. Moscow: MSU, 1995. 368 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Иван Андреевич Бондин – аспирант, Южный федеральный университет, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, кафедра синергетики и процессов управления имени профессора А.А. Колесникова; руководитель департамента недропользования. ООО «Холдинг Аква», г. Эссентуки; bondin@sfedu.ru; телефон: 8(928)338-56-22.

Вклад авторов: автор провел исследования и подготовку публикации.

Information about the authors

Ivan A. Bondin – postgraduate student, Southern Federal University, Institute of Computer Technologies and Information Security, Department of Synergetics and Management Processes named after Professor A.A.

Kolesnikov; Head of the Department of Subsoil Use. LLC Holding Aqua, Essentuki; bondin@sfedu.ru; phone: 8(928)338-56-22.

Author contributions: the author conducted research and prepared the publication.