

Методы управления добывающими скважинами минеральных вод

М. М. Асадулаги¹, М. С. Федоров², В. Е. Трушников¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

amalasadulagi@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются методы управления добычей на месторождении минеральных вод за счёт различного расположения скважин и использования контрольных скважин. Рассмотрена математическая модель гидродинамических процессов с учётом случайных факторов. На основе полученных моделей определяются параметры аппроксимирующих функций. Данные передаточные звенья используются для синтеза регуляторов в замкнутой системе управления для эффективной добычи минеральной воды, сохраняя её качество.

Ключевые слова: добывающие скважины, гидродинамические процессы, математическая модель, синтез

I. ВВЕДЕНИЕ

Минеральная вода является очень востребованным ресурсом, используемым в медицинских целях во многих регионах как России, так и мира в целом. Ее добыча связана с большим количеством трудностей и рисков для окружающей среды, гидросферы и литосферы местности, в которой ведется добыча. При всем при этом минеральная вода продается в каждом продуктовом магазине или аптеке и ее повсеместно употребляют, например, в медицинских целях, а у источников минеральных вод до сих пор строят знаменитые курорты и санатории, пользующиеся огромным спросом уже не один век [1–2].

За последнее десятилетие объем добычи минеральных вод только возрастает. Так, например, на территории Кавказских минеральных вод за последние 20 лет стали добывать воду более чем в 2 раза интенсивнее, что говорит о высоком спросе на минеральную воду, а также еще раз доказывает актуальность данной отрасли на сегодняшний день [3].

Целью данной работы является моделирование текущих гидрогеологических процессов, протекающих в месторождении для определения эффективности системы. Так как большая часть месторождений до сих пор существует на базе систем, разработанных в прошлом столетии, данная работа будет актуальна достаточно долгое время. Данные исследования будут рассматриваться на примере региона Кавказских Минеральных Вод. Добыча минеральной воды на этом участке производится уже давно, и на текущий момент там установлено не самое современное оборудование. Для оценки процессов, происходящих при добыче, а также для формирования выводов по месторождению, необходимо построить модель на основании существующих данных опытно-фильтрационных работ [4–8].

II. АНАЛИЗ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

В настоящее время, отрасль добычи минеральных вод замедлила свое развитие, оно происходит не так стремительно, как, например у нефтедобывающей отрасли. Однако она все еще остается очень востребованной и прибыльной для производителей. Основной курс развития отрасли сейчас стоит на повышение эффективности и понижение рисков экологических проблем.

На основании вышеизложенного можно выделить несколько основных проблем:

- проблема устаревшего оборудования добывающих скважин [9–11];
- проблема низкого уровня цифровизации [12–15];
- проблема рисков для экологии окружающей среды.

Решения этих проблем можно добиться за счет обновления устаревших технических составляющих, модернизации и цифровизации отрасли [16–18]. Новые модернизированные скважины будут более эффективны скважин, разработанных еще в прошлом веке, а высокий уровень цифровизации поможет сбалансировать процесс добычи и снизить вред для экологии. Так, например, повсеместное внедрение систем управления, положительно повлияет на все аспекты данных проблем – повысит эффективность добычи, а следовательно, и прибыль производителя, снизит риски для экологической обстановки геосферы, за счет более сбалансированного процесса добычи, а следовательно снижения нагрузки на водоносные пласты, что в свою очередь приведет к повышению срока службы месторождения. Конечно, предложенные меры будут максимально эффективны в комплексе, а при внедрении по отдельности будут не столь эффективны.

Для достижения решения выявленных проблем обозначим цель данной работы – создание распределенной системы управления добычей на месторождении минеральных вод. Проанализируем уже существующие решения выявленных проблем.

В статье [3] рассмотрены основные проблемы, с которыми сталкиваются заводы по добыче и розливу минеральной воды, а также пути их решения. Некоторые авторы также выделяют проблему слабой законодательной базы в отрасли добычи минеральных вод, а также неправильное налогообложение при производстве, так, например, рассматриваются вопросы налогообложения отрасли со стороны государства, а также проблему законодательной базы и предлагают

пути решения данных проблем. Так же рассматриваются и экологические вопросы [19–22]. В ходе представленной работы был проведен качественный анализ всех данных исследований за 50 лет, а также данных гидрогеологического мониторинга. В ходе данной работы были выявлены основные факторы, негативно влияющие на экологическую обстановку в регионе, а также на качество добываемой минеральной воды. Среди таких причин были выявлены бактериологическое загрязнение месторождения, падение кондиций рабочих горизонтов, накопление загрязняющих веществ в педосфере, таких как тяжелые металлы, фенолы, соединения ртути и другие. Раскрываются особенности и сущность экологической обстановки региона Кавказских минеральных вод. По итогам авторы приходят к выводу о том, что экологическая проблема является одной из основополагающих причин понижения развития туризма в регионе, а также других не менее важных проблем. Проблема влияния на экологию актуальна не только для России, но и для мира в целом. Стихийные бедствия часто поражают густонаселенные районы, приводят к огромным человеческим жертвам и материальному ущербу. Спрос на ресурс значительно увеличился, как и производство отходов.

Также синтезом системы управления, но уже для Пятигорского месторождения занимается Дровосекова Т.И. В ходе своих исследований автор проводит комплексное изучение Пятигорского месторождения, выявляет актуальные его проблемы строит его математическую модель и на ее основе синтезирует как разомкнутую, так и замкнутую системы управления гидролитосферными процессами, которая призвана повысить эффективность разработки месторождения, а также снизить риски, связанные с разработкой. Эту же проблему для Ессентукского месторождения описана в литературе Мардояном М.М. Указаны существующие проблемы эксплуатации скважин, указывается необходимость в математическом моделировании при определении рациональных режимов эксплуатационных скважин. Однако, в отличие от предыдущих авторов не строит математическую модель и не синтезирует системы управления, а только обозначает остроту вопроса их необходимости.

Более глобально этот вопрос рассмотрела школа И.М. Першина [17]. Тут уже были рассмотрены общие принципы построения математических моделей и синтеза распределенных систем управления без привязки к конкретным месторождениям. В ходе этой работы был произведен синтез системы управления гидро-литосферными процессами для модели месторождения, основанной на построении распределенных регуляторов. Также очень важным фактом является и то, что предложенная в этом труде система управления, основывается на сочетании теории распределения мод и частотного метода синтеза распределенных систем управления.

Цаплева В.В. в своих исследованиях [23] проводит системный анализ, и предлагает решения некоторых проблем региона г. Лермонтова. По мнению автора необходимо решать экологические проблемы путем дезактивации и очистки илов в окрестных прудах и водоемах, а также в руслах стоков, которые сбрасывают загрязненные илом воды. Также, в представленной работе предлагается множество рекомендаций касающихся грамотного мониторинга территорий

города Лермонтова, его окрестных, как поверхностных, так и подземных вод и минеральных месторождений. Особенно уделяется внимание экологическим антропогенным процессам, связанным с загрязнением почвы.

Проблемы разработки распределенных систем управления добычей минеральных вод рассмотрены также в [4]. Рассматривается важная проблема проектирования распределенных систем управления. Управляющие воздействия на рассматриваемые гидролитосферные процессы осуществляются комплексом добывающих скважин. В статье показан метод определения аппроксимационных звеньев для описания динамических характеристик гидролитосферных процессов. Представлена структура распределенных регуляторов, используемых в системах управления рассматриваемыми процессами. В работе анализируются результаты синтеза распределенной системы управления и результаты моделирования замкнутой распределенной системы управления параметрами гидролитосферного процесса.

Так же ряд авторов перешли к более решительным действиям касательно вопроса управления разработкой месторождений. Они предлагают разработку системы поддержки принятия решений «Гидроминеральные ресурсы». Она позволяет организовать управление месторождениями минеральных вод и обеспечить сохранность запасов подземных вод. Система состоит из трех компонентов: информационной системы «Залежи», информационно-управляющей системы (ИСУ) «Управление добычей», системы поддержки принятия решений (СППР) «Стратегия разработки». Информационная система «Депозит» хранит исходную гидрогеологическую информацию о водозаборных скважинах. Помимо модели распределенного контроллера, в математическое обеспечение АСУ «Управление дебитом» включены стандартные методы расчета параметров работы скважин. Программное обеспечение системы «Стратегия эксплуатации» использует байесовские сети для реализации алгоритма управления параметрами месторождений. Консолидированные данные результатов гидроразведки необходимы для разработки стратегии строительства и эксплуатации месторождений [24–26].

III. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Исходя из проанализированной литературы, можно сделать вывод о том, что на сегодняшний день существует множество работ связанных с созданием распределенных систем управления добычей минеральных водных ресурсов, однако все они разбирают участки месторождения с детерминированными значениями параметров гидродинамического процесса. Помимо этого, мы принимаем систему пластов с линейными, или приближенными к линейным, верхними и нижними межпластовыми границами, что значительно облегчает задачу просчета распределения напоров в пласте. Пласты же со сложной конфигурацией имеют верхние и нижние межпластовые границы далекие от линейных. Осталось множество участков месторождений со сложной конфигурацией пластов, для которых не было создано систем управления, поскольку просчет распределения напоров усложняется наличием нелинейных границ. Поэтому проблема отсутствия

систем управления на таких участках стоит особенно остро.

Исходя из проанализированной информации уточним цель представленной работы – синтез распределенной системы управления разработкой месторождения минеральных вод при случайных воздействиях с использованием математической модели.

Схематически рассматриваемый участок и система управления скважинами на данном участке представлены на рис. 1. Контроль уровня воды в пластах может осуществлять двумя способами: с использованием контрольных скважин, так и непосредственно на добывающих скважинах [6, 11], что требует дополнительного переоборудования данных скважин.

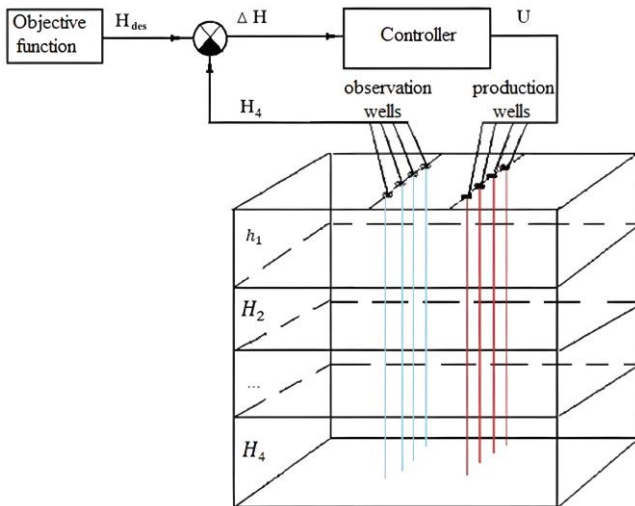


Рис. 1. Схема эксплуатируемого участка и системы управления

Модель гидродинамических процессов представляется системой дифференциальных уравнений в частных производных в следующем виде:

$$\frac{\partial H_i(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_i} \left(k_{i,x} \frac{\partial^2 H_i(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{i,y} \frac{\partial^2 H_i(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{i,z} \frac{\partial^2 H_i(x, y, z, \tau)}{\partial z_i^2} \right) - F_{i,x} \cdot \frac{\partial H_i(x, y, z, \tau)}{\partial x} + V(y_j, \tau) \cdot \delta(x_j, y_j, z_j); \quad (1)$$

H_i – напор горизонта ($i = 1, 2, 3, 4$); η_i – упругость; $F_{i,x}$ – скорость течения горизонта; $k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации по пространственным координатам; $V(y_j, \tau)$ – понижение уровня в точке расположения j -ой добывающей скважины; $\delta(x_j, y_j, z_j)$ – функция, которая принимает значение 1 при $x = x_j, y = y_j, z = z_j$, а в остальных случаях равна 0; x_j, y_j, z_j – координаты j -ой водозаборной скважины ($j = 1, 2, 3, 4$).

Уравнения дополняется начальными условиями и условиями на границах моделируемого участка. Так как математическая модель не имеет решения аналитическими способами, тогда для оценки динамики

процессов используются численные методы, объект разделяется на дискретные точки в конечно-разностной схеме [3–4].

Получив по результатам численного моделирования графики протекания гидродинамических процессов в водоносных горизонтах (рис. 2), можем перейти к синтезу регулятора через аппроксимирующие передаточные функции. Синтез осуществляется по различным методикам, таким как синтез многомерной системы управления и синтез распределенной системы управления.

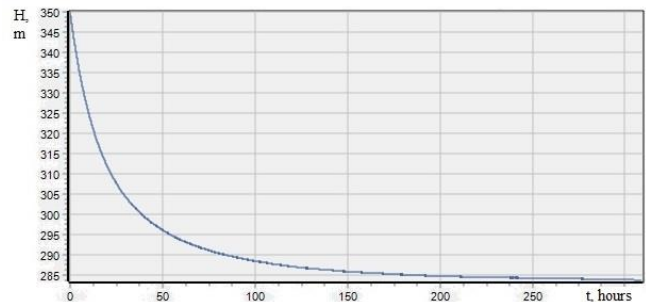


Рис. 2. Пример подписи под рисунком

Расчет параметров распределенного регулятора, управляющее воздействие на добывающие скважины может быть записано в виде:

$$U(y, \tau) = 104 \cdot \left[\frac{0.0011}{1.0011} \cdot \Delta H(y, \tau) - \frac{1}{1.0011} \cdot \nabla^2 \Delta H(y, \tau) \right] + 0.0074 \cdot \int_{\tau} \left[\frac{0.0006}{1.0006} \cdot \Delta H(y, \tau) - \frac{1}{1.0006} \cdot \nabla^2 \Delta H(y, \tau) \right] \cdot d\tau + 427 \cdot \frac{d\Delta H(y, \tau)}{d\tau}. \quad (2)$$

Преобразуя данное управляющее воздействие численным методом, получим алгоритм управления, который можно включить в программу замкнутой системы управления. Получим график работы системы управления гидродинамическим процессом (рис. 3).

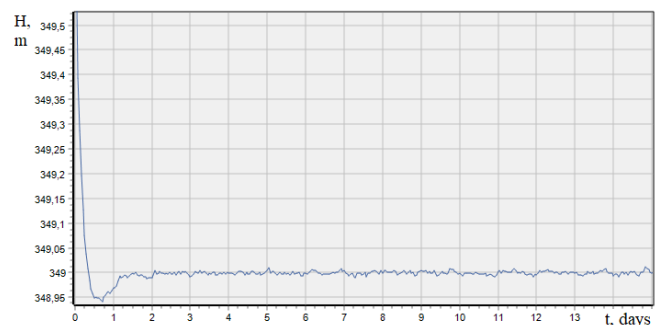


Рис. 3. График переходного процесса замкнутой системы

Результаты моделирования показывают успешную работу рассчитанных регуляторов для гидрогеологического процесса с учётом случайных факторов.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К основным задачам, реализованным в рамках исследования, стоит отнести:

1. Разработана математическая модель для исследуемого участка Кисловодского

месторождения минеральных вод, учитывающая влияние случайных факторов на скорость течения и дебит воды в водоносных горизонтах.

2. Разработана замкнутая система управления гидродинамическим процессом при случайных воздействиях. Кроме того, использование распределенных регуляторов минимизировало отклонение случайной величины на выходе системы управления.
3. Разработано программное обеспечение для моделирования системы управления добычающими скважинами при случайных воздействиях.

Данные результаты могут быть применены в регулировании водных ресурсов, с учётом влияния случайных возмущающих факторов, не только рассмотренного месторождения, но и смежных месторождений всего региона Кавказских Минеральных Вод, что позволит сохранить запасы и качество минеральных вод.

Помимо этого, полученные результаты так же могут быть использованы в смежных областях, где объекты могут быть представлены в разрезе класса систем с распределенными параметрами, в особенности для объектов нефтяного и газового сырьевого комплексов [27].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Golovina E., Shchelkonogova O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits. *Water (Switzerland)*, 2023, 15(2), 298. DOI: 10.3390/w15020298.
- [2] Golovina E.I., Grebneva A.V. Management of groundwater resources in transboundary territories (on the example of the Russian Federation and the Republic of Estonia). *Journal of Mining Institute*, 2021, 252(6), pp. 788–800. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.2
- [3] Pershin I.M., Papush E.G., Kukharova T.V., Utkin V.A. Modeling of Distributed Control System for Network of Mineral Water Wells. *Water* 2023, 15, 2289. DOI: 10.3390/w15122289
- [4] Asadulagi M.M., Ioskov G.V., Tronina E.V. Synthesis of Lumped and Distributed Controllers for Control System of Hydrodynamic Process 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, *FarEastCon 2019*, pp. 8933859. – DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933859.
- [5] Shapiro S.L., Kopkov M.P., Potseshkovskaya I.V. Problems of the organization of surface and underground space (e.g. historical embankments of Saint Petersburg). *E3S Web Conf.* 266 03016 (2021) DOI: 10.1051/e3sconf/202126603016
- [6] Potseshkovskaya I.V., Soroka A.N. Revitalization of urban industrial areas based on sustainable development principles. *E3S Web Conf.*, 266 (2021) 08012 DOI: 10.1051/e3sconf/202126608012
- [7] Demenkov P.A., Trushko O.V., Potseshkovskaya I.V. Numerical experiments on the modeling of compensatory injection for the protection of buildings during tunneling. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* Volume 13, Issue 23, 1 December 2018, P. 9161-9169
- [8] Shubin A.A., Tulin P.K., Potseshkovskaya I.V. The mechanism of underground cavities formation and the methods of their elimination. *International Journal of Civil Engineering and Technology* Volume 8, Issue 11, November 2017, Pages 667-681"
- [9] Kukharova T.V., Ilyushin Y.V., Asadulagi M.-A.M. Investigation of the OA-300M Electrolysis Cell Temperature Field of Metallurgical Production. *Energies* 2022, 15, 9001. DOI: 10.3390/en15239001
- [10] Polekhina V.S., Shestopalov M.Y., Ilyushin Y.V. Identification of Magnetic Field Strength Realisation as a Necessary Solution for High-Quality Metal Synthesis (2022) *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2022*, pp. 831-833. DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755649
- [11] Afanaseva O., Bezyukov O., Pervukhin D., Tukeev D. Experimental Study Results Processing Method for the Marine Diesel Engines Vibration Activity Caused by the Cylinder-Piston Group Operations. *Inventions* 2023, 8(3), 71. DOI: 10.3390/inventions8030071
- [12] Marinina O., Nechitailo A., Stroykov G., Tsvetkova A., Reshneva E., Turovskaya L. Technical and Economic Assessment of Energy Efficiency of Electrification of Hydrocarbon Production Facilities in Underdeveloped Areas. *Sustainability* 2023, 15, 9614. DOI: 10.3390/su15129614
- [13] Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. *Energies* 2022, 15, 9376. DOI: 10.3390/en15249376
- [14] Marinina O., Tsvetkova A., Vasilev Y., Komendantova N., Parfenova A. Evaluating the Downstream Development Strategy of Oil Companies: The Case of Rosneft. *Resources* 2022, 11, 4. DOI: 10.3390/resources11010004
- [15] Marinin M., Marinina O., Wolniak R. Assessing of Losses and Dilution Impact on the Cost Chain: Case Study of Gold Ore Deposits. *Sustainability* 2021, 13, 3830. DOI: 10.3390/su13073830
- [16] Sidorenko A.A., Dmitriev P.N., Alekseev V.Yu., Sidorenko S.A. Improvement of technological schemes of mining of coal seams prone to spontaneous combustion and rockbumps. *Journal of Mining Institute*. 2023, p. 1-13. DOI: 10.31897/PMI.2023.37
- [17] Kazanin O.I., Sidorenko A.A., Sidorenko S.A., Ivanov V.V., Mischo H. High productive longwall mining of multiple gassy seams: best practice and recommendations *Acta Montanistica Slovaca*. 2022. №27. pp. 152-162. DOI: 10.46544/AMS.v27i1.11
- [18] Sidorenko A. A., Sidorenko S. A., Ivanov V. V. Numerical modelling of multiple-seam coal mining at the Taldinskaya-Zapadnaya-2 mine *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021. №5. pp. 568-574.
- [19] Martirosyan A.V., Martirosyan K.V., Mir-Amal A.M., Chernyshev A.B. Assessment of a Hydrogeological Object's Distributed Control System Stability. 2022 *Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2022, pp. 768-771, DOI: 10.1109/EIConRus54750.2022.9755601.
- [20] Ereemeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally Friendly Diesel Fuel Obtained from Vegetable Raw Materials and Hydrocarbon Crude // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 5. DOI: 10.3390/en16052121
- [21] Kondrasheva N.K., Ereemeeva A.M. Production of biodiesel fuel from vegetable raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol 260. p. 248-256. DOI: 10.31897/PMI.2022.15
- [22] Korshunov G.I., Ereemeeva A.M., Seregin A.S. Justification of reduction in air requirement in ventilation of coal roadways with running diesel engines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(3):47-59. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_4716.
- [23] Pershin I.M., Kukharova T.V., Tsapleva V.V. Designing of distributed systems of hydroolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials. *Journal of Physics: Conference Series, Saint Petersburg*, 2021, 012017. DOI 10.1088/1742-6596/1728/1/012017.
- [24] Katysheva E. Analysis of the Interconnected Development Potential of the Oil, Gas and Transport Industries in the Russian Arctic. *Energies* 2023, 16, 3124. DOI: 10.3390/en16073124
- [25] Katysheva E.G. Application of BigData technology to improve the efficiency of Arctic shelf fields development // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 937 (2021). article 042080. DOI: 10.1088/1755-1315/937/4/042080
- [26] Katysheva E.G. The Role of the Russian Arctic Gas Industry in the Northern Sea Route Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. 539. 012075. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012075
- [27] Ilyushin Y.V. Development of a Process Control System for the Production of High-Paraffin Oil. *Energies* 2022, 15, 6462. DOI: 10.3390/en15176462