

УДК 519.876.5

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД****<sup>1</sup>Мартиросян А.В., <sup>1</sup>Мартиросян К.В., <sup>1</sup>Манторова И.В., <sup>2</sup>Кутовой И.Н.**<sup>1</sup>*Институт сервиса, туризма и дизайна (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорск, e-mail: info@pfncfu.ru;*<sup>2</sup>*ФГБОУ ВО «Пятигорский государственный университет», Пятигорск, e-mail: info@pgu.ru*

В данной статье предлагается решение задачи автоматизации управления процессом эксплуатации месторождений минеральных вод. Представленная задача является актуальным направлением научных исследований в области рационального недропользования. В статье приводится описание разработанной системы управления. Представлен процесс определения математического обеспечения системы, состоящего из двух компонентов: математической модели объекта управления и метода синтеза управления. Для объекта управления предложена типовая математическая модель, представленная в виде уравнения или системы уравнений в частных производных с граничными условиями. Выбранная модель способна достаточно точно отражать динамику процессов, происходящих в месторождении, и, соответственно, давать точные результаты моделирования воздействий на месторождение минеральных вод на выходе. Также для объекта определен вид передаточной функции, заданной в виде ряда Фурье для моделирования входного воздействия на объект управления. В конце статьи показаны результаты апробации и тестирования разработанной демоверсии информационной системы управления «Регулятор гидrolитосферных процессов». Результаты представлены в виде графиков переходных процессов, по которым возможно определить устойчивость вычислительной схемы с заданными пользователем параметрами. С использованием информации, получаемой посредством работы системы, специалист способен сделать ряд выводов, определяющих необходимость корректировки параметров в зависимости от поставленной задачи.

**Ключевые слова:** системы управления, моделирование систем, геофильтрационная модель, рациональное недропользование

**AUTOMATION OF A MINERAL WATER FIELDS EXPLOITING PROCESS****<sup>1</sup>Martirosyan A.V., <sup>1</sup>Martirosyan K.V., <sup>1</sup>Mantorova I.V., <sup>2</sup>Kutovoy I.N.**<sup>1</sup>*Institute of Service, Tourism and Design (branch) of North-Caucasus Federal University, Pyatigorsk, e-mail: info@pfncfu.ru;*<sup>2</sup>*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Pyatigorsk State University», Pyatigorsk, e-mail: info@pgu.ru*

This article proposes a solution to the mineral water fields exploiting process control automating problem. The presented task is the actual direction of scientific research in the field of rational subsoil use. The article describes the developed control system. The process of determining the software of a system consisting of two components is presented: a mathematical model of the control object and a control synthesis method. For the control object, a typical mathematical model is proposed, represented as an equation or a system of partial differential equations with boundary conditions. The selected model is capable of fairly accurately reflecting the dynamics of the processes occurring in the field, and, accordingly, to give accurate results of modeling the effects on the mineral water field at the outlet. Also, the object has the form of the transfer function defined as a Fourier series for modeling the input action on the control object. At the end of the article, the results of testing and testing the developed demo version of the control system «Regulator of hydrolitospheric processes» are shown. The results are presented in the form of graphs of transient processes, by which it is possible to determine the stability of the computational scheme with user-defined parameters. Using the information obtained through the operation of the system, the specialist is able to draw a number of conclusions determining the need for adjusting the parameters depending on the task.

**Keywords:** control systems, system modeling, geofiltration model, resources conservation

Процесс автоматизации управления гидрогеологическим объектом можно разделить на три основных этапа:

- первичный анализ объекта с целью получения исходной информации;
- определение и апробирование методов математического описания и объекта управления;
- синтез управления процессом эксплуатации объекта, подразумевающий контроль целевых параметров объекта посредством корректировки параметров выбранного режима эксплуатации.

На практике процесс организации управления природным объектом может быть представлен следующим образом. На первом этапе проводится первичный анализ объекта. На основе полученных данных разрабатывается математическая модель, необходимая для получения информации о характере протекания гидродинамических процессов в исследуемом месторождении и определении необходимых величин и закономерностей для дальнейшего синтеза распределенного регулятора [1, 2].

Удачная реализация управления на нескольких связанных объектах может создать предпосылки для синтеза системы управления комплексом связанных месторождений. Это позволит производить мониторинг общего состояния гидроминеральной базы региона, изучить реакцию комплекса месторождений на изменения интенсивности добычи на разных объектах, тем самым получая уникальную информацию о характере связи и зависимости изучаемых объектов [3].

Цель исследования: разработка инструмента оперативной оценки изменений гидродинамических характеристик месторождения минеральных вод в зависимости от параметров режима эксплуатации.

Если рассматривать исследование единичного объекта, то необходимо уделить особое внимание процессу определения параметров объекта и разработке вычислительной схемы для моделирования. Так как месторождение минеральных вод – это сложный природный объект, то полное соответствие геометрических, физических и гидродинамических параметров не представляется возможным. Конечная математическая модель имеет ряд допущений по отношению к реальному объекту [4]. В практике гидродинамики, в процессе эксплуатации перед предприятиями появляется необходимость решения нескольких классов задач, каждый из которых подразумевает достаточность разной точности вычислений. При эксплуатации месторождения с простыми условиями распределения и движения подземных вод нет необходимости проводить моделирование повышенной точности, так как риск непредвиденных ситуаций минимален, в то время как при эксплуатации природного объекта со сложной структурой использование результатов, полученных при низкой точности моделирования, может привести к аварии на производстве [3]. При увеличении сложности модели время моделирования гидродинамических процессов месторождения значительно повышается, в то время как предприятиям часто нужно получить оперативные данные о состоянии месторождения для продолжения эксплуатации, что ведет к экономическим издержкам.

В ходе исследований была определена оптимальная схема моделирования месторождений, способная корректно оценить характер протекания гидродинамических процессов в месторождениях низкой и средней сложности строения [1]. Моделирование месторождений повышенной сложности – это долгий процесс, возможный только при частном подходе и глубоком изучении объекта.

## Материалы и методы исследования

В данном разделе дано описание методологического обеспечения и математического обеспечения предлагаемой информационной системы управления «Регулятор гидrolитосферных процессов». Предлагаемая система способна провести анализ устойчивости вычислительной схемы математической модели объекта. Только доказав устойчивость вычислительной схемы применительно к рассматриваемому объекту, можно переходить к дальнейшему синтезу распределенного регулятора.

На данный момент организациям, занимающимся эксплуатацией месторождений минеральных вод, законодательно необходимо предоставлять результаты компьютерного эксперимента для получения лицензии на разработку новой скважины, месторождения. Вследствие низкого уровня автоматизации процессов анализа состояния месторождений организациям сложно решить поставленную задачу. Существующие аналоги программных решений обойдутся предприятиям в 1 500 000 руб. за каждую скважину [5]. Высокая цена обоснована низкой конкуренцией в данном сегменте рынка программных продуктов. Существуют более доступные аналоги (Modflow), недостатком которых являются:

- необходимость обучения персонала ввиду специфичности интерфейса и принципов работы системы;

- невозможность 3D-моделирования процесса геофильтрации, являющегося необходимостью при анализе сложных природных объектов.

Представленные недостатки стали предпосылками к разработке собственного программного решения. Был проведен ряд успешных экспериментов на скважинах месторождений, которые доказали возможность разработки, внедрения и сопровождения систем управления на предприятия региона.

В ходе проведенного мониторинга было определено, что в первую очередь предприятиям необходимо убедиться в корректности выбранного набора параметров моделирования. Имея представление только о необходимом конечном результате, специалистам, не сталкивающимся с программным моделированием геофильтрации, зачастую сложно определиться с мерой допущений при формировании исходных данных для математической модели.

Предлагаемая информационная система управления «Регулятор гидrolитосферных процессов» позволит апробировать набор выбранных параметров, не только предоставляя возможность убедиться в устойчивости вычислительной схемы с введенными параметрами, но и увидеть график переходного процесса (реакции системы на поданное входное воздействие). Анализ графика переходного процесса дает возможность получить базовую информацию об интенсивности и характере протекания гидродинамических процессов в объекте с заданными параметрами. Организации, занимающиеся эксплуатацией месторождений минеральных вод, располагают набором параметров, необходимых для математического описания объекта, поэтому использование предлагаемой демоверсии системы способно повысить эффективность дальнейшего моделирования и синтеза путем определения корректных параметров моделирования.

Заложенная в систему математическая модель объекта разработана на базе уравнения (1), описыва-

ющего характер протекания гидродинамических процессов в месторождении.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{1}{\eta^*} \cdot \left( k_x \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) - F \frac{\partial S}{\partial x} - \hat{S}(t) \cdot \delta(x, y, z), \quad (1)$$

где  $S$  – изменение дебита месторождения, м;  
 $k_x, k_y, k_z$  – коэффициенты фильтрации, м/сут;  
 $\eta$  – коэффициент упругоэластичности пласта;  
 $F$  – скорость потока;  
 $\hat{S}(t)$  – управляющее воздействие.

Крайевые условия математической модели определяются в соответствии с набором параметров моделируемого месторождения. Для программной реализации вычислений проводится дискретизация математической модели методом конечных разностей.

В системе используется специальная технология, позволяющая подать на объект модельное входное воздействие в виде ряда Фурье [6]. Реакция объекта на данное воздействие показывает характер протекания процесса фильтрации в месторождении, реализуя процесс геофильтрационного моделирования, в основе которого в первую очередь устойчивость вычислительной схемы. Пробное моделирование переходного процесса производится при подаче входного воздействия следующего вида:

$$S(x) = \sum_n A_n \cdot \cos(\psi_n \cdot x), \quad (2)$$

где  $n$  – номер гармоники ряда Фурье;  
 $A_n$  – весовой коэффициент;  
 $\psi_n$  – пространственная частота (аналог угловой частоты, представленной как функция координаты, рад/м).

Если представить  $\psi_n$  как  $\psi_n = \pi \cdot n / L_x$  ( $n = \overline{1, \infty}$ ), то выражение (2) принимает следующий вид:

$$S(x) = \sum_n A_n \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot x}{L_x}\right). \quad (3)$$

Результатом подачи входного воздействия является распределение изменения уровня жидкости в мо-

делируемом пласте [4]. Параметрами, по которым определяется устойчивость вычислительной схемы, определяется по факту выхода системы на установившийся режим и плавности градиенту распределения изменения уровня жидкости.

### Результаты исследования и их обсуждение

Интерфейс демоверсии информационной системы управления «Регулятор гидролитосферных процессов» представлен на рис. 1 и включает следующий набор полей:

- размеры моделируемой области (по  $X, Y, Z$ );
- водопроницаемость пласта (необходима для отражения связи между соприкасающимися пластами месторождения);
- мощность пласта;
- напор жидкости в пласте;
- коэффициент фильтрации пласта;
- коэффициент упругоэластичности пласта;
- коэффициент перетекания.

В данном окне выводятся значения параметров, введенных пользователями, график переходного процесса объекта управления, краткая информация о полученном результате и рекомендации. Если график переходного процесса стремится к установившемуся режиму и градиент изменения уровня жидкости в пласте плавно понижается, то вычислительная схема принимается устойчивой. В рекомендациях дополнительно указан адрес электронной почты, по которой пользователь может связаться с организацией для дальнейшего сотрудничества.

После заполнения данных полей (рис. 2) необходимо нажать кнопку «Расчет» внизу экрана, после чего программа выполнит математический алгоритм и выдаст результат. Форма вывода результата расчета представлена на рис. 3.

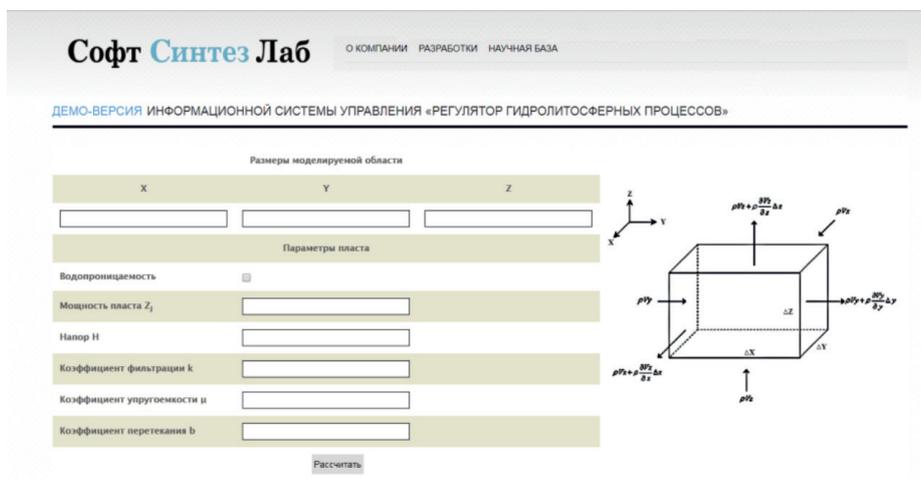


Рис. 1. Интерфейс демоверсии информационной системы управления «Регулятор гидролитосферных процессов»

О КОМПАНИИ РАЗРАБОТКИ НАУЧНАЯ БАЗА

## Софт Синтез Лаб

ДЕМО-ВЕРСИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ «РЕГУЛЯТОР ГИДРОЛИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ»

Размеры моделируемой области

X	Y	Z
100	100	80

Параметры пласта

Водопроницаемость	<input type="checkbox"/>
Мощность пласта $Z_1$	70
Напор $H$	90
Коэффициент фильтрации $k$	0.3
Коэффициент упругости $\mu$	0.007
Коэффициент перетекания $b$	0.00003

Рассчитать

Рис. 2. Ввод параметров в интерфейс системы



Рис. 3. Форма вывода результата расчета

В случае, когда вычислительная схема неустойчива, график переходного процесса не стремится к установившемуся значению, а на градиенте изменения уровня жидкости появляются характерные резкие изломы. При неустойчивости вычислительной схемы пользователю предлагается проверить и скорректировать значения введенных параметров. В ходе тестирования системы был отмечен ряд наиболее частых ошибок, допускающихся пользователями при заполнении формы ввода параметров в интерфейс системы:

- несоответствие отношения величины напора к толщине пласта моделируемого месторождения;

- значительное завышение значения коэффициента перетекания;
- использование запятой при вводе значений параметров.

Качественная интеграция позволяет достичь хороших результатов в скорости и эффективности работы системы. Тестирование системы проводилось в несколько этапов. На первом этапе система тестировалась сотрудниками организации на наличие ошибок в вычислительном аппарате, модуле обработки и вывода информации. На данном этапе были обнаружены и устранены ряд ситуаций, когда при определенном наборе параметров система выдавала некорректный результат работы. Также был

исправлен набор исходных параметров для проведения моделирования. Исходный набор содержал такие значения, как пьезопроводность пласта, градиент увеличения депрессионной воронки и др. Данные параметры повышают точность отражения характера протекания гидродинамических процессов в пластах месторождения, но параллельно увеличивают время моделирования. Проведение экспериментов доказало незначительность изменений результатов работы системы при решении данной задачи, что позволило пренебречь указанными параметрами.

На втором этапе тестирование проводилось с участием специалистов профильных организаций. Специалистами проводилась оценка эффективности работы системы: скорость расчета, корректность и полнота получаемого результата. Посредством сотрудничества со специалистами были внесены незначительные корректировки в процесс вычислений.

При моделировании гидродинамических процессов используется дискретизационная сетка, количество шагов которой обуславливается требованиями к точности моделирования. Опытно-фильтрационные работы, проводимые для определения исходных данных об объекте – это трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому определение значений основных коэффициентов в большом количестве точек дискретизации не представляется возможным [7]. В связи с этим при моделировании используются усредненные значения коэффициентов по

размерам выбранного шага дискретизации, что объясняет погрешность модельных и реальных данных.

С изменением параметров пользователь получает градиент изменения уровня жидкости в напоре, по характеру которого видна динамика моделируемого объекта. На рис. 4 представлен результат работы системы.

Общий подход к моделированию геофильтрации подразумевает корректировку параметров моделирования для достижения целевой функции. Искусственная корректировка параметров способна повысить сходимость результатов эксперимента с данными, полученными на реальном месторождении. Поэтому анализ результатов работы предлагаемой системы способен помочь специалистам повысить уровень соответствия модели и объекта, тем самым обеспечив устойчивость схемы вычисления.

Располагая данной информацией, специалист способен сделать ряд выводов, определяющих необходимость корректировки заданных параметров в зависимости от поставленной задачи. Например, при задаче максимизации объема добычи ресурса специалисту необходимо определить минимальную динамику объекта, так как в таком случае, при незначительном превышении допустимого объема добычи внедренная система автоматического управления сохранит устойчивость, а месторождение сохранит целостность [5]. В обратном случае, рассогласование модельной и реальной величины понижения уровня может привести к аварийной ситуации.

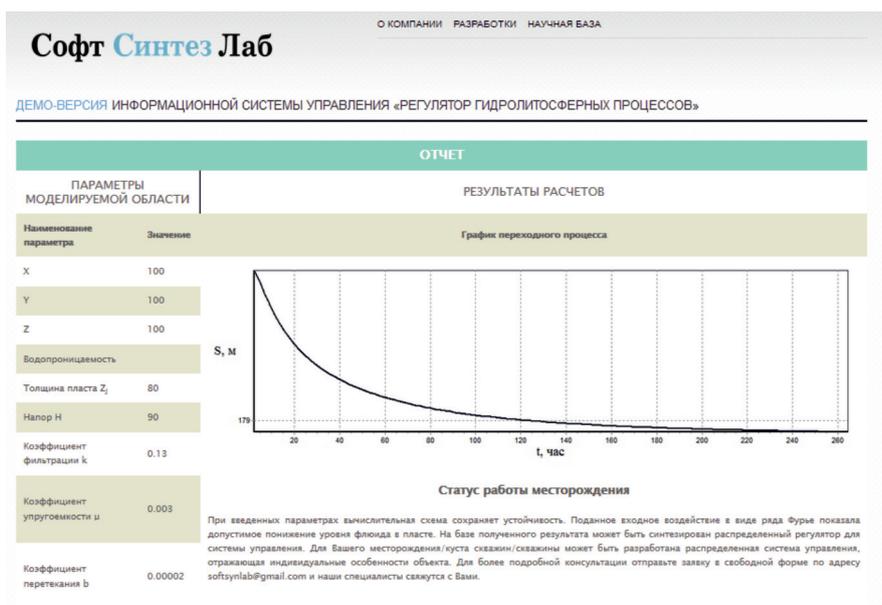


Рис. 4. Результат работы системы



Рис. 5. Результат работы системы

На рис. 5 представлен результат работы системы, где с помощью незначительной корректировки величин была получена менее динамичная модель. Использование результатов данной модели при синтезе распределенной системы управления способно значительно повысить показатели устойчивости и адаптивности системы, как к техногенным, так и природным изменениям в процессе эксплуатации водоносного пласта.

В результате тестирования и отладки демоверсии информационной системы управления «Регулятор гидrolитосферных процессов» представляет собой полноценный программный продукт, способный провести корректную оценку устойчивости вычислительной схемы и способную предоставить рекомендации по дальнейшему выбору параметров объекта.

### Заклучение

Разработанная демоверсия информационной системы управления «Регулятор гидrolитосферных процессов» является необходимым компонентом для организации автоматического управления процессом добычи минеральных вод. Результат работы данной системы позволяет определить устойчивость вычислительной схемы и скорректировать параметры объекта управления для проведения успешного синтеза системы управления заданными

параметрами процесса добычи минеральной воды.

### Список литературы

1. Быстров С.В., Григорьев В.В., Мансурова О.К., Першин И.М. Синтез полиномиальных законов управления для непрерывных динамических объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 5. С. 398–403.
2. Ильюшин Ю.В., Першин И.М. Methodology for the determination of the stability in a spatially distributed control object with impulse input impact // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 5 (199). С. 186–198.
3. Chernyshev A.B., Martirosyan K.V., Martirosyan A.V. Analysis of the nonlinear distributed control system's sustainability. Journal of Mathematics and Statistics 10 (3). Date Views 12.07.2014. [Electronic resource]. URL: <http://thesicpub.com/abstract/10.3844/jmssp.2014.316.321> (date of access: 25.05.2019).
4. Ильюшин Ю.В., Трушников В.Е. Преобразование случайного векторного воздействия линейным элементом системы с целью его компенсации при добыче подземных вод. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 1. С. 97–103.
5. Малков А.В., Помеляйко И.С., Першин И.М. Особенности эколого-гидрогеологического мониторинга курортных территорий на примере Кисловодска // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2018. Т. 95. № 2. С. 80.
6. Мартиросян А.В., Мартиросян К.В. Применение рядов Фурье в синтезе распределенных систем управления // 2019 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (Январь 28–31). СПб., 2019. С. 609–613.
7. Ilyushin Y., Mokeev A. Tunnel furnace of a conveyor type: technical controlling of the temperature field. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Т. 12. № 20. P. 9377–9389.