

Разработка распределенной системы управления гидродинамическими процессами водоносных горизонтов с учетом стохастических возмущающих факторов

Ю.В. ИЛЮШИН, М.-А.М. АСАДУЛАГИ ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ amalasadulagi@gmail.com

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Ilyushin, Y.V.; Asadulagi, M.-A.M. Development of a Distributed Control System for the Hydrodynamic Processes of Aquifers, Taking into Account Stochastic Disturbing Factors. *Water* 2023, 15, 770. <https://doi.org/10.3390/w15040770>

Аннотация. Неконтролируемый интенсивный водозабор из месторождений минеральных вод может привести к негативным последствиям, проникновению сточных вод за пределы водоупорных слоев, разрушению структуры водоносных горизонтов и дальнейшей потере источника минеральных вод в целом. В данной статье рассматриваются вопросы управления гидродинамическими процессами при случайных воздействиях в водоносных горизонтах месторождений минеральных вод с использованием математических моделей. Проведен анализ технологического процесса добычи минеральных вод и статистический анализ данных ретроспективного мониторинга с целью подтверждения гипотезы о стационарности рассматриваемых процессов. На основе полученных данных была построена математическая модель гидрогеологических процессов, протекающих при случайных возмущениях. Влияние таких возмущений выражается в отклонениях напора в водоносном горизонте от заданного значения. Управление заключается в поддержании напора в водоносном горизонте на заданном уровне с целью сохранения гидроминеральной базы региона. В качестве корректирующих блоков предлагаются кусковые и распределенные регуляторы, параметры которых рассчитываются частотными методами синтеза контроллеров. Использование замкнутой системы управления позволяет минимизировать влияние случайных эффектов.

Ключевые слова: минеральная вода; водоносный горизонт; автоматизация; компьютерное моделирование; системный анализ; управление.

Development of a Distributed Control System for the Hydrodynamic Processes of Aquifers, Taking into Account Stochastic Disturbing Factors

Yury V. ILYUSHIN and Mir-Amal M. ASADULAGI ✉

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

✉ amalasadulagi@gmail.com

Abstract: Uncontrolled, intensive extraction of water from mineral water deposits can lead to negative consequences, the penetration of sewage beyond the water-resistant layers, the destruction of the structure of aquifers and the further loss of the mineral water source. This paper deals with the issues of control of hydrodynamic processes under random impacts in the aquifers of mineral water deposits using mathematical models. The analysis of the technological process of mineral water extraction and statistical analysis of retrospective monitoring data of the deposit were carried out in order to confirm the hypothesis of the stationarity of the processes under consideration. A mathematical model of hydrogeological processes occurring under random disturbances has been constructed. The influence of such disturbances is expressed in deviations of the head in the aquifer from the desired value. Controlling consists of maintaining the head of aquifers at a given level in order to preserve the hydro-mineral base of the region. Lumped and distributed controllers are proposed as corrective blocks, the parameters of which are calculated by frequency methods of controller synthesis. The use of a closed loop control system minimizes the influence of random effects.

Keywords: system analysis; control; mineral water; aquifer; automation; computer simulation.

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2023.

1. Введение

На сегодняшний день ведется активная добыча тяжелой воды на горнодобывающих предприятиях, и потребность в ней продолжает расти. В то же время неконтролируемая интенсивная эксплуатация может вызвать негативные изменения в водоносном комплексе: проникновение сточных вод за пределы водоносных горизонтов или нарушение структуры водоносных горизонтов. Поэтому необходимо рассматривать гидрогеологические процессы как объекты управления с присущими им элементами и звеньями управления, с учетом случайных воздействий, возникающих в гидрогеологическом объекте. Случайными факторами, влияющими на объект исследования, являются: расход ресурсов на дебет водопотребления, стохастическое изменение дебита воды, повышенная сейсмическая активность [1-6].

При описании месторождения минеральных вод необходимо учитывать его протяженность в пространстве, в результате чего требуется представление объекта управления в виде системы с распределенными параметрами. Кроме того, при исследовании системы необходимо учитывать влияние случайных факторов на гидрогеологические процессы.

Наиболее подробные основные сведения о методах построения математических моделей гидрологических процессов содержатся в работах И.К. Гавича, В.В. Антонова, Е.А. Ломакина, П.К. Коносовского и других. Их работы внесли большой вклад в развитие методов построения двумерных моделей. Однако эти работы в чистом виде не могут быть использованы для построения трехмерных моделей пространственно-распределенных объектов. Методологией анализа распределенных объектов, в частности представления в частотной области, занимались такие ученые, как А.Г. Бутковский, Т.К. Сиразетдинов и другие [7]. Среди исследований последних лет в области систем управления с распределенными параметрами значительную роль сыграли исследования А.В. Малькова и И.М. Першина, которые в своих работах решают задачи совершенствования теоретических основ управления гидрогеологическими объектами [8]. В области исследования стохастических систем имеются работы многих ученых, в числе которых К. Остром, Л.Г. Евланов, В.М. Константинов и другие. В перечисленных работах в области управления, как единичными [9-11], так и распределенными системами [12-15], не рассматривается анализ стохастических процессов в распределенных объектах управления и конкретно управление гидродинамическими процессами с учетом случайного характера изменения параметров объекта.

Таким образом, основными задачами, направленными на повышение экономической эффективности добычи минеральных вод при минимизации экологических угроз [16, 17], являются анализ гидрогеологических процессов при случайных воздействиях, поиск методов и алгоритмов управления, а также законов оптимального функционирования технологического процесса.

2. Анализ тематической области и формулировка проблемы

Анализируя гидролитосферные процессы как объект управления, можно выявить структуру взаимодействия водоносных горизонтов в гидрогеологическом объекте и определить параметры, которые могут иметь случайное изменение во времени и осложнять процесс поддержания напора в водоносном горизонте на заданном уровне. Если допустить падение напора ниже предельно допустимого, то вода из верхних водоносных горизонтов начинает обильно просачиваться в нижние, особенно из слоя грунтовых вод. Качество минеральной воды в эксплуатируемом водоносном горизонте ухудшается. Это приведет к высокому риску полной потери эксплуатируемого источника минеральной воды.

В качестве объекта исследования рассматривается эксплуатируемый участок Кисловодского месторождения минеральных вод. Мониторинг в наблюдательных скважинах показал систематические колебания давления воды во времени. Причин этому может быть несколько: повреждение оборудования, выпадение осадков, изменение пористости, человеческий фактор.

Эти систематические колебания, обусловленные различными факторами, могут быть описаны и рассмотрены как неопределенные или случайные процессы, которые необходимо учитывать при построении математической модели гидрогеологических объектов. Кроме того, следует учитывать сейсмическую активность, которая также оказывает неопределенное или случайное

воздействие. Предполагаемые случайные факторы оказывают стохастическое влияние на дебит воды в водоносном горизонте и на уровень просадки напора. Анализируя динамику уровней и их систематические колебания, можно предположить некоторое ограничение для математической модели объекта, заключающееся в том, что моделируемые случайные процессы будут рассматриваться как стационарные. Для проверки этой гипотезы был проведен статистический анализ данных мониторинга пьезометрического уровня в наблюдательных скважинах рассматриваемого участка месторождения.

Целью данного исследования являлась разработка системы управления гидролитосферным процессом при случайных воздействиях, направленной на поддержание качества и запасов минеральной воды месторождения путем контроля пьезометрического уровня в эксплуатируемом водоносном горизонте.

Требуется провести детальный анализ гидрогеологического объекта с анализом присущих ему случайных процессов, влияющих на гидродинамические параметры при эксплуатации на месторождении. Это требует системно-аналитического моделирования технических и физических элементов объекта исследования на различных уровнях управления с последующей разработкой математической модели, учитывающей случайные возмущения в геофильтрационных процессах водоносных горизонтов месторождения минеральных вод. Математическая модель дополнена начальными и граничными условиями и верифицирована данными, полученными экспериментально на реальном объекте добычи минеральной воды.

3. Описание района исследования

Район исследований расположен на территории двух региональных таксономических единиц гидрогеологического районирования 1-го порядка (по Л.К. Островскому): Крымско-Цискавказской провинции сложных бассейнов пластовых и блоково-стратовых вод и Крымско-Цискавказской провинции сложных бассейнов пластово-блоковых, пластовых, карстово-блоковых, прожилково-блоковых и покровно-проточных подземных вод. Границы между ними проходят по системе цискавказских глубинных разломов в фундаменте. В пределах первой провинции расположены два бассейна подземных вод второго порядка: Азово-Кубанский и Восточно-Кавказский. А в пределах второй провинции – Большой Кавказский и Центральный Кавказский.

Территория Большого региона Кавказских Минеральных Вод (КМВ) расположена в зоне сочленения указанных гидрогеологических провинций по границам Большого Кавказского и Восточно-Кавказского артезианских бассейнов. Кисловодское месторождение минеральных вод расположено в пределах Большекавказского артезианского бассейна.

В геолого-структурном отношении территория Большого КМВ входит в северное крыло Большого Кавказского мегантиклинория, известного как Северо-Кавказская моноклираль, и расположена в области меридионального Минераловодского поднятия. Это поднятие имеет вид широкой и пологой антиклинали, постепенно погружающейся к северу. Свод поднятия шириной до 60 км местами осложнен поперечными складками и разломами в продольном и поперечном направлениях. Восточное и западное крылья поднятия Минеральные Воды погружаются в Терек-Кумскую и Кубанскую впадины соответственно.

В тектоническом отношении территория исследования является частью Альпийской складчатости, в пределах которой выделяются два структурных этапа: кристаллический фундамент и осадочный чехол.

Кристаллический фундамент нижнепалеозойского возраста представлен дислоцированными кристаллическими зеленовато-серыми хлорит-альбитовыми и слюдисто-хлоритовыми сланцами. Подвал разделен системой тектонических разрывов северо-восточного простирания с амплитудой разломов и обратных разломов до 20-50 м и осложнен фельзитовыми интрузиями, преимущественно розовыми крупнозернистыми гранитами.

Общие закономерности залегания водоносных горизонтов хорошо видны из геолого-гидрогеологического профиля (рис. 1).

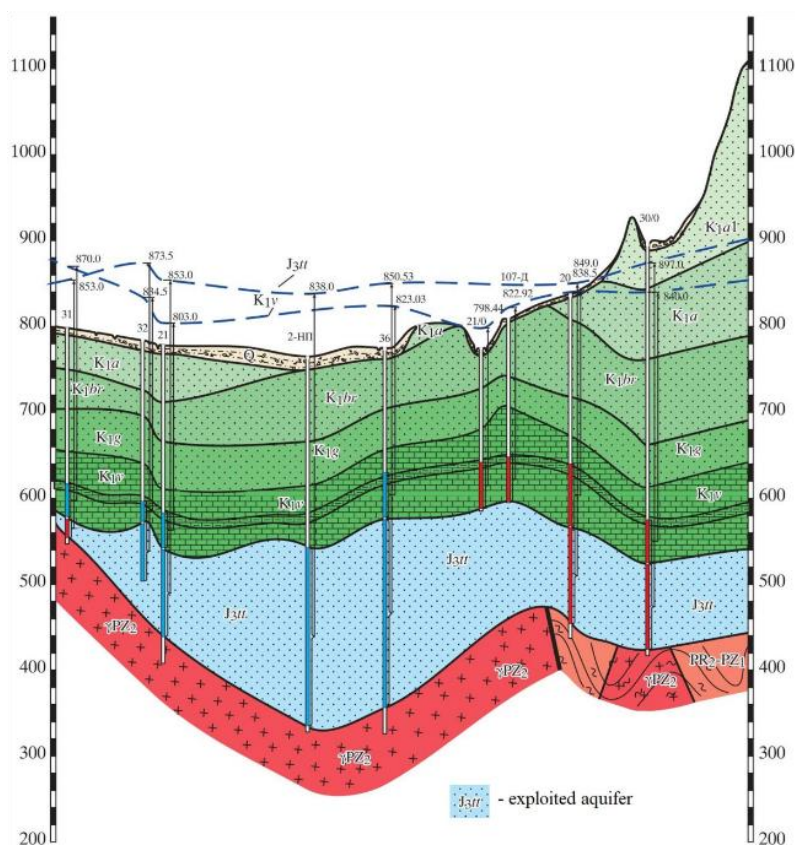


Рис. 1. Геологический и гидрогеологический профиль Кисловодского месторождения

Наиболее древними породами на территории Кисловодского месторождения являются нижнепалеозойские (PZ1) кристаллические сланцы и верхнепалеозойские (PZ) граниты. Они вскрыты скважинами на глубинах от 80 м в южной и до 400 м в северной частях месторождения.

Юрская система (J): отложения юрской системы залегают с угловым и стратиграфическим несогласием на палеозойских отложениях и представлены тоарским ярусом нижней юры и титонским ярусом верхней юры. Остальные стратиграфические отложения юрской системы эродированы.

Тоаркский ярус (J1t): тоаркские отложения встречаются только в верхней южной части Березовской теснины. Севернее они отсекаются предтитонской трансгрессией.

Это дает основание полагать, что тоарские отложения, залегающие на поверхности кристаллического фундамента и выполняющие неровности его рельефа, в процессе последующего размыва образовали линзы, одна из которых залегает в районе Березовского участка Кисловодского месторождения. Отложения представлены аргиллитами и песчаниками, толщина которых достигает 70 м.

Титонский ярус (J3ft): отложения титонского яруса залегают на эродированной поверхности фундамента. Они вскрыты скважинами на глубинах от 100 до 400 м, увеличивающихся в северном направлении. Титонская пестроцветная толща состоит из рыхлых песчаников, глин и гранитных груб. Отложения титонского яруса подразделяются исследователями на три толщи: нижнюю, в которой преобладают грубозернистые пестроцветные песчаники с редкими прослоями глин и грунта; среднюю, состоящую из гранитных грунтов с прослоями песчаников и глин, и верхнюю, сложенную красно-бурыми глинистыми песчаниками с включениями гипса. Мощность отложений титонского яруса находится в обратной зависимости от рельефа верхней части палеозойского фундамента. В местах, где поверхность фундамента образует впадины, толщина пестроцветной толщи увеличивается, и, наоборот, на возвышенных участках фундамента она минимальна.

Меловая система (К): отложения меловой системы представлены нижним отделом. Верхнемеловой разрез в районе участка полностью эродирован. Нижнемеловые отложения представлены валанжинским, хаутеривским, барремским, аптским и альбским ярусами.

Валанжинский ярус (K_{1v}): валанжинские отложения, представленные в разрезе доломитовыми известняками, перекрывают пестроцветную титонскую толщу. Они выходят на поверхность на небольшой площади в южной части месторождения, по долинам рек Березовая, Кабардинка и Ольховка.

Доломитизированные известняки вскрыты на месторождении на глубинах от 5 до 300 м, увеличиваясь с юга на север. Их толщина довольно постоянна по площади и изменяется в незначительных пределах – от 80 до 90 м.

Хаутеривский ярус (K_{1g}): Отложения хаутеривского яруса залегают на доломитизированных известняках валанжина и имеют важное значение в плане песчано-глинистого состава. Отложения образованы рядом ракушечных известняков и аргиллитовых песчаников с прослоями известняков и выходами на поверхность в основной и северной частях месторождения, а также на редко поднятых участках.

Общая мощность хаутеривских отложений составляет около 50 м, они, как и подстилающие их отложения, имеют небольшой уклон на северо-восток.

Барремский (K_{1br}): отложения барремского яруса представлены последовательностью плотных оолитовых известняков, переслаивающихся с известково-аргиллитовыми песчаниками. Выше залегают известковые песчаники с небольшим количеством тонких прослоев оолитовых известняков. Они перекрываются аргиллитовыми алевролитами, которые местами переходят в сильно аргиллитованные темно-коричневые песчаники, а выше сменяются серовато-желтыми мелкозернистыми аргиллитовыми песчаниками. Заканчивается разрез барремских отложений красными железистыми песчаниками. Мощность отложений около 40 м.

Аптский ярус (K_{1a}): аптский ярус представлен глинами (нижний подэтап), перекрытыми песками и песчаниками (верхний подэтап). Общая мощность отложений аптского яруса составляет 245 м.

Альбский ярус (K_{1al}): отложения альбского яруса залегают на севере и западе описываемой территории. В нижней части они представлены песками и песчаниками (нижний подэтап), а в верхней части – черными известковистыми глинами (верхний подэтап). Мощность альбского яруса составляет 150-200 м.

На севере нижнемеловые отложения погружаются под верхнемеловые.

Кайнозойская эра (KZ): в районе Кисловодского месторождения она представлена элювиальными, делювиальными и аллювиальными образованиями верхнечетвертичной системы (Q_{IV}), которые распространены преимущественно по тальвегам постоянных и временных водотоков. Элювиальные отложения широко распространены на водораздельных пространствах к северу и югу от рек Березовая, Аликоновка, Подкумок. Они представлены желтовато-серыми уплотненными суглинками, содержащими дробленые песчаники преимущественно в нижней части разреза.

Делювиальные отложения наиболее развиты вдоль склонов долин вышеуказанных рек, особенно в нижней части склонов. В верхней части склонов делювиальные отложения имеют незначительную мощность, а часто и вовсе отсутствуют. Они представлены в основном желтовато-серыми и красновато-коричневыми суглинками с большим количеством обломков доломитовых известняков разного размера: от мелкой гальки до огромных глыб. Особенно много глыб в средней части долин, где их склоны полностью сложены доломитовыми известняками. Здесь эти глыбы часто доходят до русел рек и, загромождая их, изменяют направление течения. Мощность делювиальных отложений колеблется от 0,2 до 50 м.

Аллювиальные отложения заполняют дно речных долин и впадающих в них оврагов. Здесь они представлены чередованием глин, суглинков, песков и плохо округленной гальки и гравия. В аллювиальных отложениях встречаются также валуны различных размеров. В районе реки Березовой у подножия правого склона часто встречаются иловато-суглинистые отложения, а также погребенные почвы и травертины. Горный характер русел рек и их разрушительная деятельность в паводковые периоды создают неблагоприятные условия для накопления осадков, что в целом определяет незначительную мощность аллювиальных отложений – не более 5-10 м, за исключением отдельных участков, где она достигает 40 м.

Помимо геологической характеристики месторождения, информация о запасах минеральных вод исследуемого водоносного горизонта приведена в табл. 1. Имеется несколько добывающих скважин, которые добывают воду из титонского водоносного горизонта.

Таблица 1

Сведения о запасах минеральных вод Кисловодского месторождения

Скважина №	Эксплуатационные запасы, м ³ /сут	Год бурения
23	3	1955
8	2	1963

Состояние эксплуатации водоносного горизонта и пьезометрический мониторинг показаны на рис. 2.

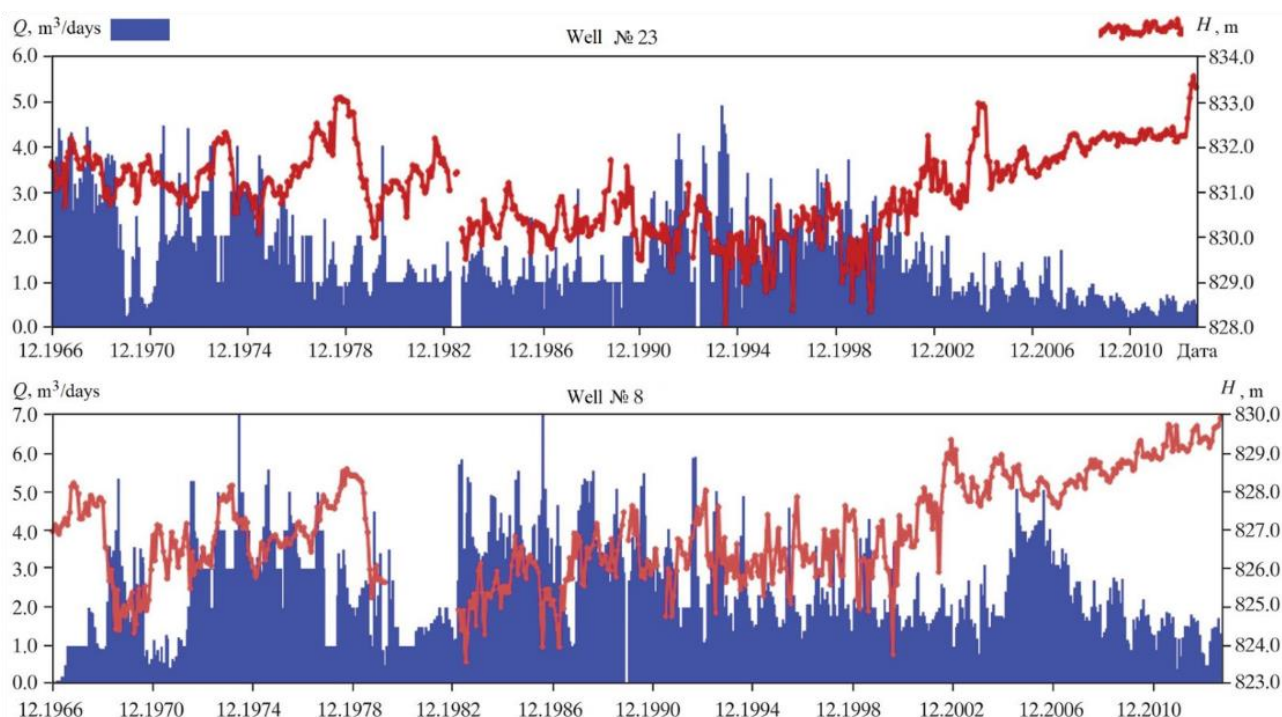


Рис. 2. Динамика эксплуатации водоносных горизонтов

4. Методы исследования

Анализ современных исследований позволил определить набор эффективных методов моделирования гидрогеологических объектов, которые наиболее часто используются для решения задач в данной предметной области [8, 13]. В результате оценки эффективности представленного метода для анализа дальнейших исследований был выбран метод, использующий математическое описание гидрогеологического объекта в виде трехмерной геофильтрационной модели. Эксперимент, проведенный на прототипе модели гидрогеологического объекта, показал сходимость значений реальных данных с модельными на 80-90 %. Ошибки в моделировании геофильтрационных процессов могут привести к ошибкам в управлении эксплуатацией водоносной системы. Благодаря своей эффективности данный метод моделирования используется для синтеза распределенных систем управления.

Прежде чем перейти к математической модели объекта, необходимо провести исследования пьезометрического уровня в наблюдательных скважинах. Это необходимо для того, чтобы выдвинуть гипотезу о стационарности рассматриваемых случайных процессов и учесть эти процессы при моделировании объекта. Большинство методов анализа и прогнозирования динамических процессов применимы к стационарным временным рядам. После анализа гидрогеологического

объекта исследования был сделан вывод, что достаточным методом изучения стационарности будет оценка ряда относительно его центрального тренда. Часто для выявления нестационарности ряда достаточно рассмотреть график процесса. В то же время для статистически достоверного доказательства стационарности необходимо использовать специальные методы, такие как составление коррелограммы процесса и разбиение на последовательные группы наблюдений для сравнения их между собой.

Для анализа ряда динамики пьезометрического уровня из наблюдательной скважины № 87 на месторождении с помощью коррелограммы необходимо дополнить исходный ряд динамики рядами из сдвинутых во времени уровней этого ряда (табл. 2). Рассчитав коэффициенты корреляции исходного ряда Y_t с другими, результирующую коррелограмму можем представить на рис. 3 в следующем виде. Поскольку коэффициент автокорреляции первого порядка оказался наибольшим, то временной ряд содержит тенденцию. С увеличением задержки корреляция монотонно уменьшается, что свидетельствует о стационарности ряда, вероятностные свойства которого не меняются со временем. Для подтверждения полученных результатов был использован второй метод оценки стационарности ряда.

Таблица 2

Исходные ряды динамики уровня (в метрах) со сдвинутыми рядами для статистической обработки

Y_t	Y_{t-1}	Y_{t-2}	Y_{t-3}	Y_{t-4}	Y_{t-5}	Y_{t-6}	Y_{t-7}
821,05 821,12	821,05						
821,29	821,12	821,05					
820,96	821,29	821,12	821,05				
820,89	820,96	821,29	821,12	821,05			
820,89	820,89	820,96	821,29	821,12	821,05		
820,89	820,89	820,89	820,96	821,29	821,12	821,05	
820,75	820,89	820,89	820,89	820,96	821,29	821,12	821,05
820,75	820,75	820,89	820,89	820,89	820,96	821,29	821,12
820,75	820,75	820,75	820,89	820,89	820,89	820,96	821,29
821,22	820,75	820,75	820,75	820,89	820,89	820,89	820,96
821,67	821,22	820,75	820,75	820,75	820,89	820,89	820,89
822,05	821,67	821,22	820,75	820,75	820,75	820,89	820,89
822,44	822,05	821,67	821,22	820,75	820,75	820,75	820,89
822,08	822,44	822,05	821,67	821,22	820,75	820,75	820,75
821,55	822,08	822,44	822,05	821,67	821,22	820,75	820,75
821,58	821,55	822,08	822,44	822,05	821,67	821,22	820,75
822,22	821,58	821,55	822,08	822,44	822,05	821,67	821,22
822,91	822,22	821,58	821,55	822,08	822,44	822,05	821,67
823,07	822,91	822,22	821,58	821,55	822,08	822,44	822,05
823,18	823,07	822,91	822,22	821,58	821,55	822,08	822,44
823,52	823,18	823,07	822,91	822,22	821,58	821,55	822,08
823,94	823,52	823,18	823,07	822,91	822,22	821,58	821,55
824,06	823,94	823,52	823,18	823,07	822,91	822,22	821,58
824,06	824,06	823,94	823,52	823,18	823,07	822,91	822,22
823,85	824,06	824,06	823,94	823,52	823,18	823,07	822,91
822,86	823,85	824,06	824,06	823,94	823,52	823,18	823,07

Y_t	Y_{t-1}	Y_{t-2}	Y_{t-3}	Y_{t-4}	Y_{t-5}	Y_{t-6}	Y_{t-7}
823,2	822,86	823,85	824,06	824,06	823,94	823,52	823,18
822,97	823,2	822,86	823,85	824,06	824,06	823,94	823,52
822,25	822,97	823,2	822,86	823,85	824,06	824,06	823,94
822,15	822,25	822,97	823,2	822,86	823,85	824,06	824,06
821,79	822,15	822,25	822,97	823,2	822,86	823,85	824,06
821,91	821,79	822,15	822,25	822,97	823,2	822,86	823,85
822,25	821,91	821,79	822,15	822,25	822,97	823,2	822,86
822,34	822,25	821,91	821,79	822,15	822,25	822,97	823,2
822,29	822,34	822,25	821,91	821,79	822,15	822,25	822,97

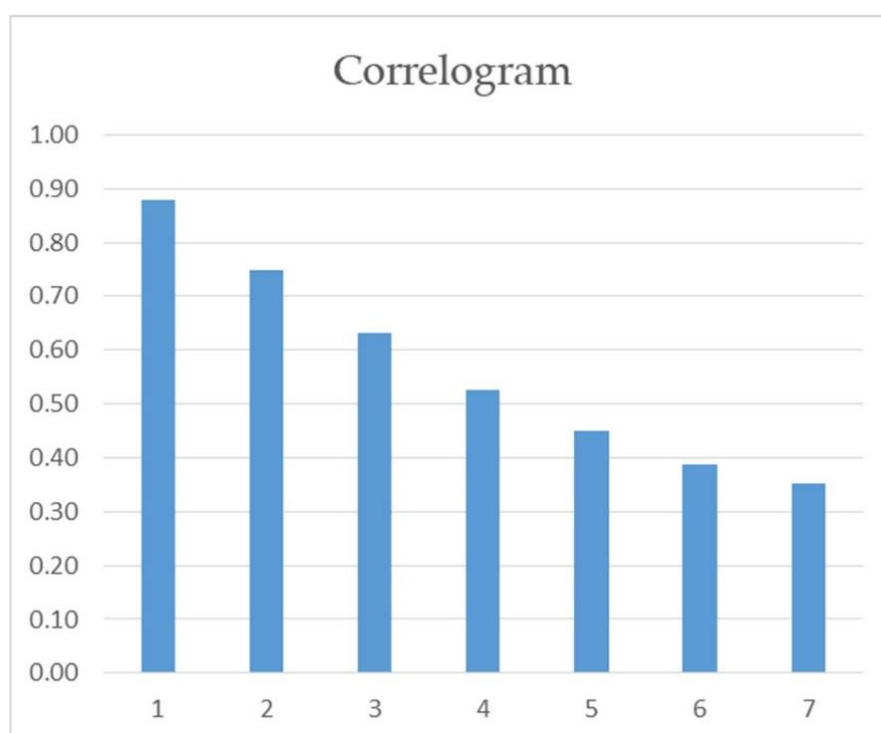


Рис. 3. Статистическая обработка данных

Для начала необходимо отобрать и сгруппировать данные. Так, для периода наблюдения с 2008 по 2020 год (150 наблюдений) мы разбили ряд на три равных отрезка (по 50 значений в каждом). Различия в средних значениях рядов незначимы ($t = 0,96$, $df = 98$, $p > 0,05$), где t – t -тест Стьюдента, df – степень свободы, p – уровень значимости. Данные были сгруппированы по 100 наблюдений, в качестве примера были выбраны два сегмента (2004-2012 гг. и 2012-2020 гг.). Различия в средних значениях рядов также незначимы ($t = 0,64$, $df = 198$, $p > 0,05$). Таким образом, стационарность временного ряда по данным наблюдательных скважин доказана. По аналогичной методике был проанализирован ряд других контрольных скважин месторождения.

Проведенные исследования были систематизированы и представлены в виде методики, которую рекомендуется использовать для статистической обработки данных по наблюдательным скважинам гидрогеологического объекта с целью оценки стационарности процессов. Проведя исследование влияния случайных возмущений на пласт, мы перешли к системному анализу гидрогеологического объекта для последующей разработки математической модели.

Для упрощения описания и выделения возмущающих и входных воздействий предлагается наглядная модель в виде блок-схемы (рис. 4), которая отображает не только воздействие на эксплуатируемый водоносный горизонт, но и взаимодействие между слоями.

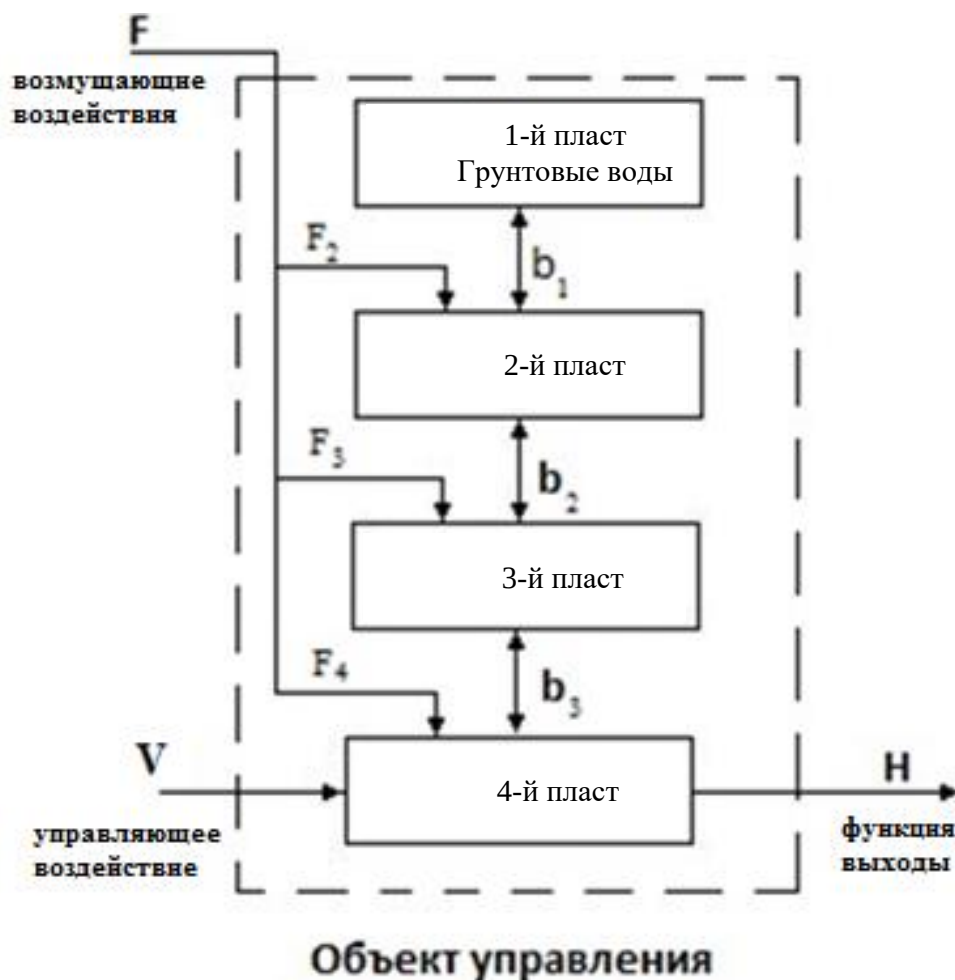


Рис. 4. Схематическая модель месторождения как объекта управления.

F – скорость потока в водоносном пласте (возмущение);

V – понижение пьезометрического уровня в местах расположения добывающих скважин (управляющее воздействие);

$F = \bar{F} + \tilde{F}$, $V = \bar{V} + \tilde{V}$ – суммы детерминированной и случайной составляющих процессов;

b_i – параметры перетока (постоянные коэффициенты, полученные экспериментально на реальном объекте, характеризующие скорость перетока жидкости через межпластовые водоносные горизонты);

H – напор в водоносном пласте (контролируемое значение в точках расположения контрольных скважин)

Во многих литературных источниках [8, 18–21] приводятся основные принципы математического моделирования водоносных систем и различные варианты моделирования. Предпочтение отдавалось описанию объекта с помощью трехмерной модели. Данный тип математической модели описывает фильтрационные процессы в водоносных горизонтах и взаимодействие между ними через различные коэффициенты. Математическая модель центрального участка Кисловодского месторождения с четырьмя добывающими и четырьмя наблюдательными скважинами может быть записана в виде системы дифференциальных уравнений, определяющих геофильтрационные процессы водоносной системы. Пусть h_1 – напор в подземных водах, а H_i – напор в i -том водоносном горизонте ($i = 2, 3, 4$), тогда математическая модель месторождения может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial h_1(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{\eta_1} \left(k_{1,x} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{1,y} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{1,z} \frac{\partial^2 h_1(x, y, z, \tau)}{\partial z_1^2} \right); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = & \frac{1}{\eta_2} \left(k_{2,x} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + k_{2,y} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + k_{2,z} \frac{\partial^2 H_2(x, y, z, \tau)}{\partial z_2^2} \right) - \\ & - (\bar{F}_{2,x} + \tilde{F}_{2,x}) \cdot \frac{\partial H_2(x, y, z, \tau)}{\partial x}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial H_3(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \\ & = \frac{1}{\eta_3} \left(k_{3,x} \frac{\partial^2 H_3(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{3,y} \frac{\partial^2 H_3(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{3,z} \frac{\partial^2 H_3(x,y,z,\tau)}{\partial z^2} \right) - \\ & - (\bar{F}_{3,x} + \tilde{F}_{3,x}) \cdot \frac{\partial H_3(x,y,z,\tau)}{\partial x}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial H_4(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = \\ & = \frac{1}{\eta_4} \left(k_{4,x} \frac{\partial^2 H_4(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + k_{4,y} \frac{\partial^2 H_4(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + k_{4,z} \frac{\partial^2 H_4(x,y,z,\tau)}{\partial z^2} \right) - \\ & - (\bar{F}_{4,x} + \tilde{F}_{4,x}) \cdot \frac{\partial H_4(x,y,z,\tau)}{\partial x} + (\bar{V}(y_j, \tau) + \tilde{V}(y_j, \tau)) \cdot \delta(x_j, y_j, z_j); \\ & 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_{z_4} \end{aligned} \quad (4)$$

где: η_i – параметр упругой емкости i -го водоносного горизонта; $\bar{F}_{i,x} + \tilde{F}_{i,x} = F_{i,x}$ – скорость течения i -того водоносного горизонта, представленная в виде суммы детерминированной и случайной композитивно; $\bar{V}(y_j, \tau) + \tilde{V}(y_j, \tau) = V(y_j, \tau)$ – снижение напора в добывающих скважинах, представленное как сумма детерминированной и случайной составляющих соответственно; $k_{i,x}, k_{i,y}, k_{i,z}$ – коэффициенты фильтрации; x_j, y_j, z_j – координаты расположения добывающих скважин ($j = 1, 2, 3, 4$); $\delta(x_j, y_j, z_j)$ – параметр, который равен единице, если $x = x_j, y = y_j, z = z_j$, в противном случае равен нулю.

В рассматриваемой математической модели фильтрационный параметр k (м/сут) является наиболее важным, поскольку он определяет не только характер перетока воды в горизонте, но и позволяет количественно оценить его объем. Показатель этого параметра определяется гидрохимическими компонентами воды и пористостью исследуемой породы. Данный параметр определяется с помощью экспериментальных фильтрационных работ. На основании измерений в определенных точках (расположение наблюдательных скважин) находится среднее значение параметра на исследуемой территории.

Модель геофильтрации усложняется тем, что в ней учитывается случайный характер внешних факторов в виде 10 %-ного стохастического снижения шумового напора в местах расположения эксплуатационных скважин и скорости потока в водоносных горизонтах.

Математическая модель также дополняется граничными условиями [22]. Граничные условия между водоносными горизонтами (условия Дарси):

$$\begin{aligned} h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) &= h_1(x, y, L_{z_1}, \tau) + b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)); \\ H_2(x, y, 0, \tau) &= H_2(x, y, 0, \tau) - b_1 \cdot (H_2(x, y, 0, \tau) - h_1(x, y, L_{z_1}, \tau)); \\ H_i(x, y, L_{z_i}, \tau) &= H_i(x, y, L_{z_i}, \tau) + b_i \cdot (H_i(x, y, 0, \tau) - H_i(x, y, L_{z_i}, \tau)); \\ H_{i+1}(x, y, 0, \tau) &= H_{i+1}(x, y, 0, \tau) - b_i \cdot (H_{i+1}(x, y, 0, \tau) - H_i(x, y, L_{z_i}, \tau)); \end{aligned} \quad (5)$$

где b_i – параметр перетока ($i = 1 \dots 3$). Нижняя граница нижнего водоносного горизонта:

$$\frac{\partial H_4(x, y, L_{z_4}, \tau)}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

В модели делается допущение, что толщина пластов вдоль координаты y настолько велика, что воздействия от добывающих скважин не оказывают существенного влияния на пластовое давление на границах горизонтов. Тогда граничные условия боковых границ записываются в следующем порядке:

$$\begin{aligned} h_1(0, y, z, \tau) &= h_{10}; \\ h_1(x, 0, z, \tau) &= h_1(x, L_y, z, \tau) = h_{1,0}; \\ H_i(0, y, z, \tau) &= H_{i0}; \\ \frac{\partial H_i(L_x, y, z, \tau)}{\partial x} &= 0; \\ H_i(x, 0, z, \tau) &= H_i(x, L_y, z, \tau) = H_{i0}; \end{aligned} \quad (7)$$

где h_{10}, H_{i0} – начальные состояния невозмущенных водоносных горизонтов. Геометрические и физические данные месторождения (в метрах) приведены в [22]. Для оценки динамики гидроди-

намических процессов, используя разностную схему, модель объекта преобразуется к дискретному виду, поскольку для системы уравнений геофильтрационных процессов в данной постановке с учетом заданных граничных и начальных условий моделируемого участка трудно получить аналитическое решение [23-27].

Для составления дискретной формы описанной выше математической модели месторождения исследуемый участок был разбит на несколько сеток со следующими параметрами: $\Delta_x = L_x/(N_x - 1)$, $\Delta_y = L_y/(N_y - 1)$, $\Delta_{zi} = L_{zi}/(N_{zi} - 1)$ -дискретные шаги к соответствующим координатным осям ($i = 1 \dots 4$), где N_x , N_y , N_{zi} - количество дискретных точек (в нашем случае $N_x = 8$, $N_y = 8$, $N_{zi} = 7$). Для эксплуатируемого нижнего водоносного горизонта уравнение в дискретном виде будет иметь вид:

$$\frac{\Delta H_{4,\eta,\gamma,\xi}}{\Delta \tau} = \frac{1}{\eta_4} \left(k_{3,x} \frac{H_{4,\eta-1,\gamma,\xi} - 2 \cdot H_{4,\eta,\gamma,\xi} + H_{4,\eta+1,\gamma,\xi}}{\Delta x^2} + k_{4,y} \frac{H_{4,\eta,\gamma-1,\xi} - 2 \cdot H_{4,\eta,\gamma,\xi} + H_{4,\eta,\gamma+1,\xi}}{\Delta y^2} + k_{4,z} \frac{H_{4,\eta,\gamma,\xi-1} - 2 \cdot H_{4,\eta,\gamma,\xi} + H_{4,\eta,\gamma,\xi+1}}{\Delta z^2} \right) - (\bar{F}_{4,\eta} + \bar{F}_{4,\eta}) \cdot \frac{H_{4,\eta,\gamma,\xi} - H_{4,\eta-1,\gamma,\xi}}{\Delta x} + (\bar{V}_\gamma + \bar{V}_\gamma) \cdot \delta_{\eta 0, \gamma 0, \xi 0};$$

$$2 < \eta < N_x - 1; 2 < \gamma < N_y - 1; 2 < \xi < N_{z4} - 1. \quad (8)$$

Остальные уравнения записываются аналогичным образом. С использованием дискретной модели разработано программное обеспечение, численно моделирующее гидродинамические процессы водоносных горизонтов при случайных воздействиях. Результаты моделирования использованы для анализа динамических характеристик объекта и последующего синтеза системы управления процессом производства минеральной воды. График отклика объекта на первую пространственную гармонику входного воздействия, полученного в месте расположения второй наблюдательной скважины, и динамика отклонения напора при воздействии случайных возмущений проиллюстрированы на рис. 5.

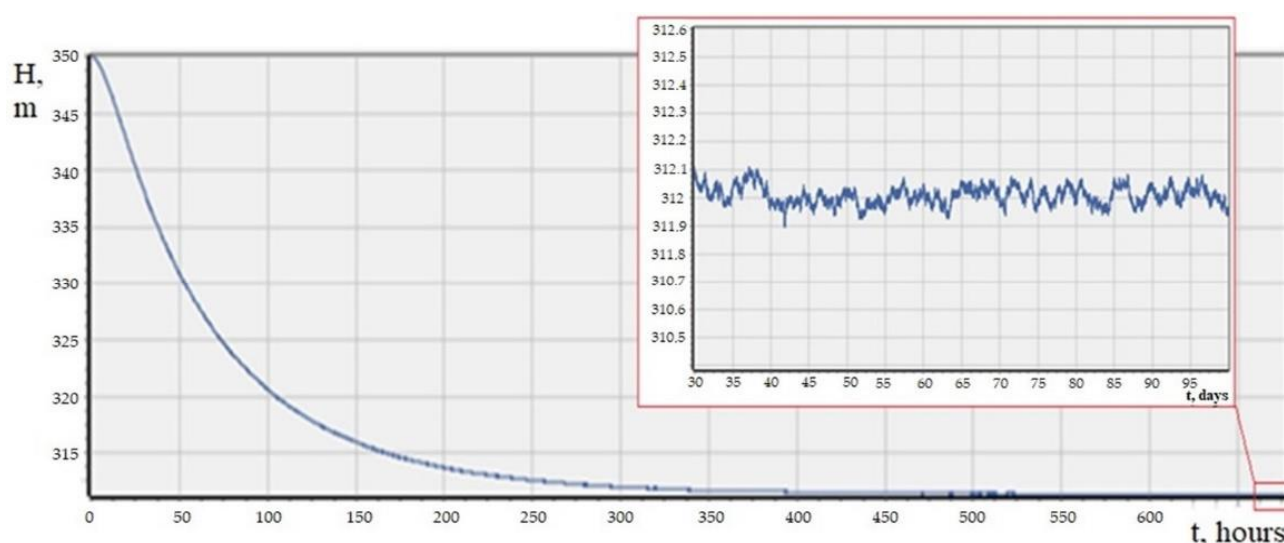
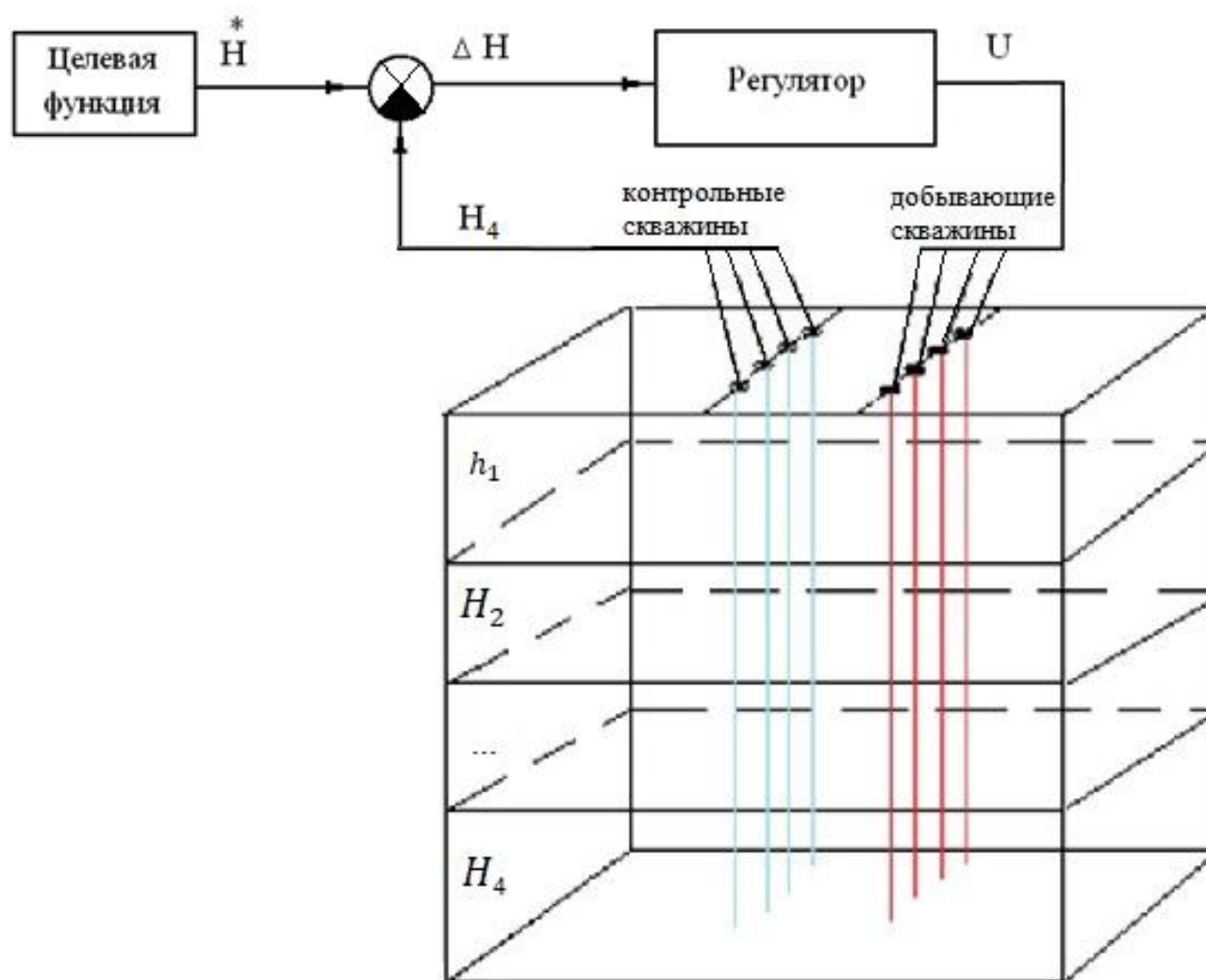


Рис. 5. Реакция объекта на первую гармонику и воздействие случайного возмущения

Отклонение напора в установившемся режиме достигает 0,12 м, что может привести к проникновению сточных вод в эксплуатируемый водоносный горизонт. Задача заключается в управлении гидродинамическим процессом и снижении влияния случайных возмущений на поддержание напора эксплуатируемого водоносного пласта на заданном уровне с целью сохранения запасов и качества минеральной воды. Для распределенных объектов, модели которых определяются по экспериментальным данным, разработан частотный метод синтеза распределенных регуляторов [8]. Этот метод показал свою эффективность при управлении различными объектами тепловой и электромагнитной природы. Кроме того, этот метод может быть применен для управления объектами гидрогеологических исследований, модель которых получена по экспериментальным данным. Структуру распределенной системы управления можно представить так, как показано на рис. 6.

Рис. 6. Структура системы управления. H_{des} -желаемый напор воды

Задача управления решается двумя методами: синтезом единичных регуляторов с позиции рассмотрения объекта как многомерной системы и синтезом распределенных регуляторов с использованием методов частотного синтеза систем с распределенными параметрами. Используя аппроксимирующие функции, описывающие реакции объекта на входное воздействие [28-32], синтезируются следующие регуляторы. Передаточная функция рассчитанного ПИД-регулятора:

$$R(s) = K_p + \frac{1}{T_{in} \cdot s} + T_d \cdot s = 0.413 + \frac{1}{158437.673 \cdot s} + 0.0002 \cdot s \quad (9)$$

где K_p – коэффициент пропорциональности, T_d – постоянная времени производной, T_{in} – постоянная времени интеграла.

Передаточная функция рассчитанного распределенного регулятора: Передаточная функция рассчитанного ПИД-регулятора:

$$\begin{aligned} W(y, s) &= E_1 \cdot \left[\frac{n_1-1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4-1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{s} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2-1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot s; \\ W(y, s) &= 25.139 \cdot \left[\frac{0.001}{1.001} - \frac{1}{1.001} \nabla^2 \right] + 0.0001 \cdot \left[\frac{0.015}{1.015} - \frac{1}{1.015} \nabla^2 \right] \frac{1}{s} + 1079.880 \cdot s, \end{aligned} \quad (10)$$

где E_i , n_i – соответственно прирост и весовые коэффициенты.

5. Результаты

Путем формирования управляющих воздействий и представления их в дискретном виде были получены алгоритмы управления гидродинамическими процессами, которые были реализованы в программном обеспечении, моделирующем поведение замкнутой системы управления. На рис. 7 и 8 показаны переходные процессы системы с использованием разработанных регуляторов.

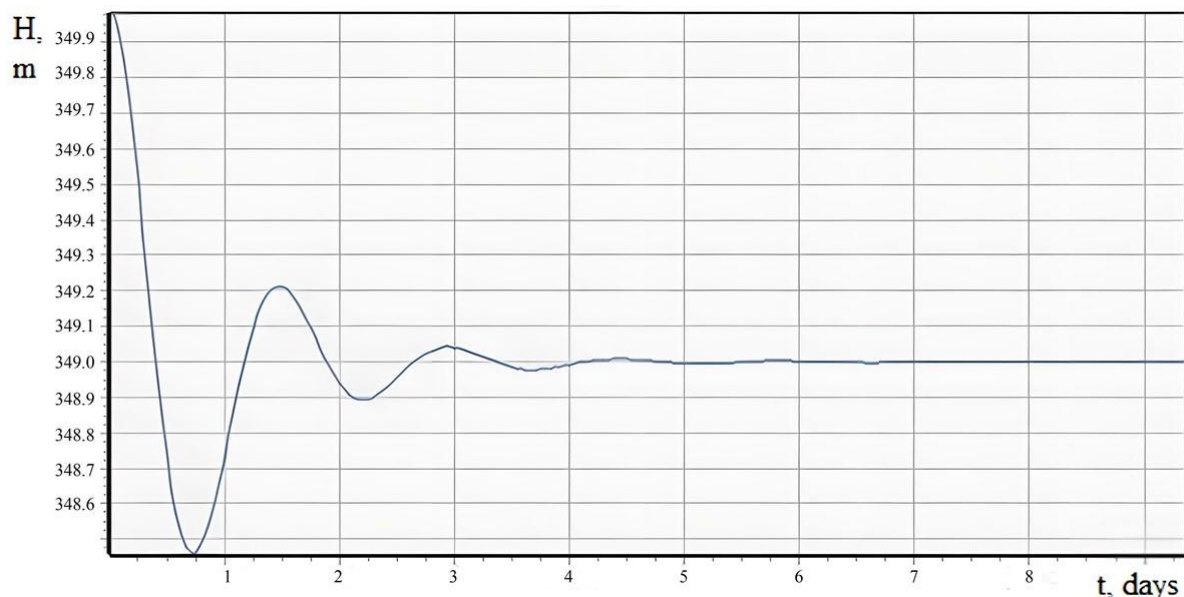


Рис. 7. Процесс управления с помощью ПИД-регулятора

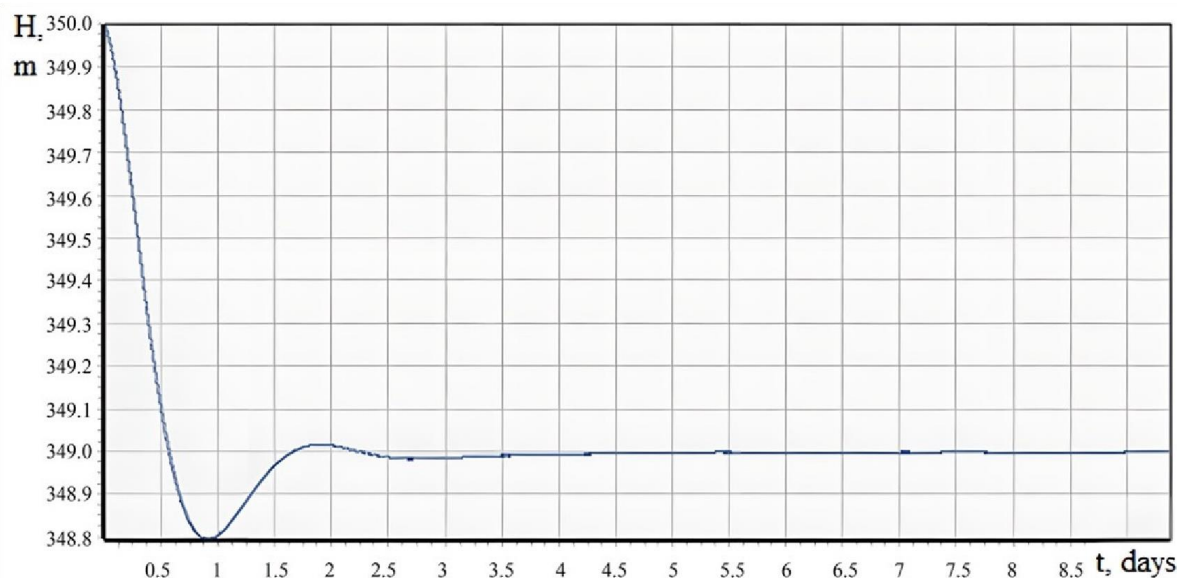


Рис. 8. Процесс управления с распределенным регулятором

Результаты моделирования замкнутых систем показывают, что параметры синтезированных регуляторов найдены правильно, и системы обеспечивают поддержание давления на заданном уровне. Однако следует подчеркнуть преимущество распределенного регулятора перед единичным, так как перерегулирование значительно меньше ($\sigma_{\text{dis}} = 20 \% < \sigma_{\text{pid}} = 53 \%$), и система быстрее выходит на устойчивое состояние.

Следует отметить, насколько мало влияние случайных возмущений на систему управления. Сравнение случайного сигнала на выходе системы и на выходе объекта до применения распределенного регулятора на рис. 9 показывает, что случайное воздействие уменьшилось (с $\pm 0,15$ м до $\pm 0,005$ м).

Параметры геофильтрации моделируемого участка месторождения могут изменяться с течением времени. Поэтому была проведена проверка устойчивости распределенной системы управления к параметрическим возмущениям. Разработанная система управления не потеряла работоспособности при уменьшении или увеличении коэффициентов фильтрации в десять раз.

Данные методы могут быть применены при регулировании водных ресурсов с учетом влияния случайных возмущающих факторов [15, 16]. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы и в смежных областях, где объекты могут быть представлены в контексте класса систем управления с распределенными параметрами [33–42], для человеко-машинных систем [43–46], и особенно для нефтегазовой отрасли [47–51]. Использование этих методов позволит расширить возможные пути решения некоторых экономических проблем [52–54].

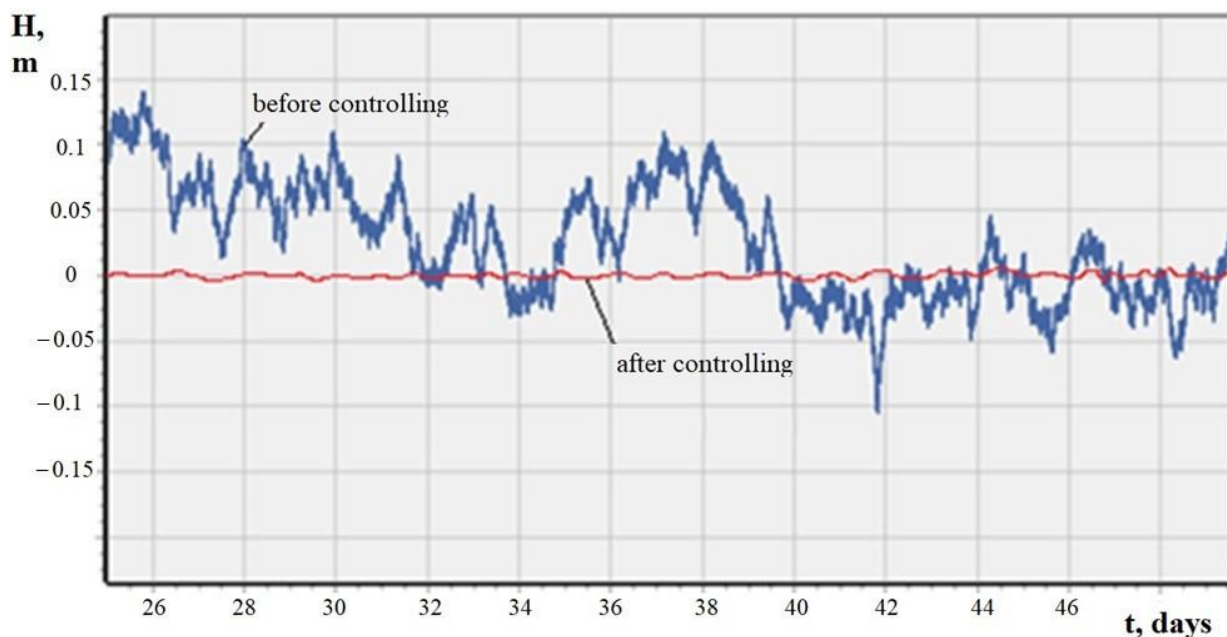


Рис. 9. Динамика головки до и после контроля

6. Обсуждение

В последнее время наблюдается рост добычи минеральных вод для промышленного розлива и курортных целей. Нерациональный забор воды может привести к ухудшению качества добываемой воды. По экспериментальным данным добывающей компании, наблюдаются систематические колебания напора воды. Причин может быть несколько: повреждение оборудования, выпадение осадков, изменение пористости, человеческий фактор. Данное месторождение расположено вблизи горы Эльбрус, поэтому не исключено сейсмическое влияние. Кроме того, важную роль играет антропогенное воздействие. К последнему следует добавить следующее: с 2010 года ведется активная застройка, как в центральной части города Кисловодска, так и на его окраинах. Из-за отсутствия центральной канализации многие жители пользуются выгребными ямами, которые под воздействием атмосферных осадков просачиваются в грунтовые воды. С 2012 года систематически наблюдается загрязнение минеральных источников. При достаточно высоком пластовом давлении загрязнение сводится к минимуму. Но из-за неконтролируемого забора воды происходит падение давления (напора), что приводит к усугублению ситуации.

Все эти возмущения в данном исследовании рассматриваются как систематическое (или возможное) влияние на дебит воды в водоносном горизонте и напор в скважинах. В результате пьезометрический уровень отклоняется от желаемого значения. Если отклонения велики, то возрастает риск поступления загрязняющих веществ в эксплуатируемый водоносный горизонт. Решить эту проблему можно путем снижения добычи воды и увеличения заданного значения напора, но при этом снизится и прибыль добывающей компании. Однако при использовании синтезированной распределенной системы управления влияние случайных процессов сводится к минимуму, что повышает рентабельность.

Преимущество метода учета случайных эффектов в математической модели позволяет снизить их влияние. Однако флуктуации могут быть периодическими и принимать различные формы. Поэтому была применена система управления с обратной связью, способная контролировать процесс в условиях неопределенных изменений. Например, было проведено несколько экспериментов с резким увеличением параметров модели. При таких неопределенных воздействиях система устойчива и переходит в статический режим, но с большим временем регулирования.

Преимуществом распределенного регулятора, как уже отмечалось, является меньшая перерегулируемость по сравнению с регулятором с единичными параметрами. При использовании регулятора с дискретным управлением напор падает значительно меньше, чем при использовании распределенного регулятора. Это повышает риск поступления загрязняющих веществ в водоносный горизонт из верхних горизонтов (из-за разности напоров). Быстродействие играет важную роль, так как показывает, насколько быстро система управления стабилизирует производственный процесс при неопределенных возмущениях.

Однако преимуществом единичных регуляторов является более простая реализация по сравнению с распределенными регуляторами.

7. Заключение

В работе рассмотрены методы исследования гидрогеологических объектов, распределенных систем управления и систем, находящихся под случайными воздействиями. На основе проведенного исследования сделаны выводы об эффективности использования контроллеров для регулирования процессов откачки минеральных вод из эксплуатируемого водоносного горизонта. Основные задачи, решенные в рамках исследования:

1. разработана математическая модель для исследуемого участка Кисловодского месторождения минеральных вод, учитывающая влияние случайных факторов на скорость потока и дебет воды в водоносных горизонтах;
2. разработана замкнутая система управления гидролитосферным процессом при случайных воздействиях. При этом использование распределенных регуляторов позволило минимизировать отклонение случайной величины на выходе системы управления.
3. Разработано программное обеспечение для моделирования распределенной системы управления гидродинамическим процессом в водоносных горизонтах при случайных воздействиях.

Вклад авторов: Концептуализация, Ю.В.И. и М.-А.М.А.; методология, М.-А.М.А.; программное обеспечение, Ю.В.И. и М.-А.М.А.; валидация, М.-А.М.А.; формальный анализ, Ю.В.И.; исследование, М.-А.М.А.; ресурсы, Ю.В.И.; курирование данных, М.-А.М.А.; написание – подготовка первоначального проекта, М. А.М.А.; написание-первоначальная подготовка проекта, Ю.В.И. и М.-А.М.А.; рецензирование и редактирование, Ю.В.И.; визуализация, М.-А.М.А.; руководство, Ю.В.И.; администрирование проекта, М.-А.М.А.; получение финансирования, Ю.В.И. Все авторы прочитали и согласились с опубликованным вариантом рукописи.

Финансирование: Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление Совета по институциональному надзору: Не применимо.

Положение об информированном согласии: Не применимо.

Заявление о доступности данных: Не применимо.

Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Malkov, A.V.; Pershin, I.M.; Pomelyaiko, I.S. *Kislovodskoe Deposit of Carbonic Mineral Waters: System Analysis, Diagnostics, Forecast, Control*; Nauka: Moscow, Russia, 2015; 283p. (In Russian)
2. Lubentsova, E.V.; Masyutina, G.V.; Lubentsov, V.F. Ensuring the compatibility of automated process control systems with related automation systems and automated control systems. *Mod. Prob. W. Sol. Sc. Pr. Ed.* 2018, 6, 32–34. (In Russian)
3. Pershin, M.I. Investigation of errors in the dynamic characteristics of distributed objects during approximation. *Mod. Sci. Innov.* 2014, 4, 46–50. (In Russian)
4. Pomelyayko, I.S. The evaluation of the size of anthrotechnogenic load on the city territory (on the example of resorts of Caucasian mineral waters). In *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists: Geology in the Developing World*, Perm, Russia, 15–17 April 2020; pp. 545–548. (In Russian)
5. Pomelyayko, I.S.; Malkov, A.V. Problems of the quality of surface and underground waters of the resorts of the Kavkazskie Mineralnye Vody region and ways to solve them. *Water Resour.* 2019, 46, 178–190. (In Russian) <http://doi.org/10.31857/S0321-0596462178-190>

6. Shakhrai, E.A.; Lubentsov, V.F. Analysis of methods for the synthesis of multi-mode control systems for dynamic objects. In Proceedings of the XII International Scientific Conference, Krasnodar, Russia, 25–27 November 2021; pp. 107–113. (In Russian)
7. Voronin, A.Y. Modified frequency method for searching parameters of a distributed high-precision controller. *Mechatron. Autom. Control* 2015, 16, 89–95. (In Russian)
8. Malkov, A.V.; Pershin, I.M. *Systems with Distributed Parameters. Analysis and Synthesis*; Nauchnyi Mir: Moscow, Russia, 2012; 476p. (In Russian)
9. Abramkin, S.E.; Dushin, S.E. Study of the hydrogen production unit as a control object. In Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference: System Synthesis and Applied Synergetics, Nizhny Arkhyz, Russia, 28 September 2021; pp. 337–341. (In Russian) <http://doi.org/10.18522/syssyn-2021-57>
10. Imaev, D.K.; Smirnov, R.I.; Shestopalov, M.Y.; Kvashnin, S.V. Optimal placement of control system components in the field of intensive physical influences. In Proceedings of the Mathematical Theory of Control and Its Applications (MTUIP-2020), (In Russian). Saint Petersburg, Russia, 7–8 October 2020; pp. 336–339.
11. Krylova, E.L.; Nemudruk, M.L.; Fedorov, M.S.; Novozhilov, I.M.; Shchurov, D.A. The Use of OPC UA technology in the study of computer models of control objects in the educational process. In Proceedings of the X All-Russian Scientific Conference: System Synthesis and Applied Synergetics, Nizhny Arkhyz, Russia, 28 September 2021; pp. 306–310. (In Russian) <http://doi.org/10.18522/syssyn-2021-52>
12. Chernyshov, S.E.; Galkin, V.I.; Ulyanova, Z.V.; Macdonald, D.I.M. Development of mathematical models to control the technological properties of cement slurries. *J. Min. Inst.* 2020, 242, 179–190. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.179>
13. Drovosekova, T.I.; Pershin, I.M. Peculiarities of modeling hydro-lithospheric processes in the region of Kavkazskie mineralnye vody (Caucasus mineral springs). In Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, Saint Petersburg, Russia, 25–27 May 2016; pp. 215–217. <http://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519732>
14. Golovina, E.; Shchelkonogova, O. Possibilities of Using the Unitization Model in the Development of Transboundary Groundwater Deposits. *Water* 2023, 15, 298. <http://doi.org/10.3390/w15020298>
15. Golovina, E. Environmental Peculiarities of Transboundary Groundwater Management. *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 2019, 10, 511–519.
16. 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). *J. Min. Inst.* 2021, 252, 788–800. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.2>
17. Romasheva, N.V.; Babenko, M.A.; Nikolaichuk, L.A. Sustainable development of the Russian Arctic region: Environmental problems and ways to solve them. *Min. Inf. Anal. Bull.* 2022, 2022, 78–87. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_102_0_78
18. Martirosyan, A.V.; Martirosyan, K.V.; Chernyshev, A.B. Application of Fourier Series in Distributed Control Systems Simulation. In Proceedings of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 28–31 January 2019; pp. 609–613. <http://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8656865>
19. Martirosyan, A.V.; Ilyushin, Y.V.; Afanaseva, O.V. Development of a Distributed Mathematical Model and Control System for Reducing Pollution Risk in Mineral Water Aquifer Systems. *Water* 2022, 14, 151. <http://doi.org/10.3390/w14020151>
20. Palyanitsina, A.; Tananykhin, D.; Masoud, R. Strategy of water-flooding enhancement for low-permeable polymictic reservoirs. *J. Appl. Eng. Sci.* 2021, 19, 307–317. <http://doi.org/10.5937/jaes0-29693>
21. Palyanitsina, A.; Sukhikh, A. Peculiarities of assessing the reservoir properties of clayish reservoirs depending on the water of reservoir pressure maintenance system properties. *J. Appl. Eng. Sci.* 2020, 18, 10–14. <http://doi.org/10.5937/jaes18-24544>
22. Asadulagi, M.M.; Vasilkov, O.S. The Use of Distributed and Lumped Type Controllers for the Hydro-lithospheric Process Control System of the Kislovodskoye Field. In Proceedings of the 3rd International Conference on Control in Technical Systems, Saint Petersburg, Russia, 30 October 2019; pp. 7–10. <http://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973272>
23. Grigoriev, V.V.; Bystrov, S.V.; Mansurova, O.K. Exponential stability regions estimation of nonlinear dynamical systems. *Mekhatronika Avtom. Upr.* 2020, 21, 131–135. <http://doi.org/10.17587/mau.21.131-135>
24. Pershin, I.M.; Papush, E.G.; Malkov, A.V.; Kukharova, T.V.; Spivak, A.O. Operational Control of Underground Water Exploitation Regimes. In Proceedings of the 3rd International Conference on Control in Technical Systems, Saint Petersburg, Russia, 1 November 2019; pp. 77–80. <http://doi.org/10.1109/CTS48763.2019.8973323>
25. Kukharova, T.V.; Pershin, I.M. Conditions of Application of Distributed Systems Synthesis Methods to Multidimensional Object. In Proceedings of the International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, Vladivostok, Russia, 3–4 October 2018. <http://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602749>
26. Khabarov, N.; Smirnov, A.; Balkovič, J.; Skalský, R.; Folberth, C.; Van Der Velde, M. Heterogeneous Compute Clusters and Massive Environmental Simulations Based on the EPIC Model. *Modelling* 2020, 1, 215–224. <http://doi.org/10.3390/modelling1020013>
27. Kupfersberger, H.; Rock, G.; Draxler, J.C. Combining Groundwater Flow Modeling and Local Estimates of Extreme Groundwater Levels to Predict the Groundwater Surface with a Return Period of 100 Years. *Geosciences* 2020, 10, 373. <http://doi.org/10.3390/geosciences10090373>
28. Leigh, J.R. *Control Theory: A Guided Tour*, 3rd ed.; The Institution of Engineering and Technology: Stevenage, UK, 2012; 472p. <http://doi.org/10.1049/PBCE072E>
29. Richard, A.B. Spectra of digraphs. *Linear Algebra Appl.* 2009, 432, 2181–2213. <http://doi.org/10.1016/j.laa.2009.02.033>
30. Rapoport, E.Y.; Pleshivtseva, Y.E. Technology of solving multi-objective problems of control of systems with distributed parameters. *Optoelectron. Instrum. Data Process.* 2017, 53, 316–328. <http://doi.org/10.3103/S8756699017040021>
31. Shestopalov, M.Y.; Smirnov, R.I.; Imaev, D.H. Approximation of the Natural Gas Pumping Compressor Characteristics using a Multi-layer Neural Network. In Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Moscow, Russia, 26–28 January 2021; pp. 1088–1091. <http://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396438>
32. Tsapleva, V.V.; Masjutina, G.V.; Danchenko, I.V. Construction of a mathematical model for the extraction of mineral raw materials. In Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Veliky Novgorod, Russia, 22 October 2020. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/613/1/012154>

33. Klizas, P. Geofiltration studies of clay at the future radioactive waste repository for Ignalina nuclear power plant. *J. Environ. Eng. Land. Manag.* 2014, 22, 219–225. <http://doi.org/10.3846/16486897.2014.903186>
34. Jensen, J.K.; Nilsson, B.; Engesgaard, P. Numerical Modeling of Nitrate Removal in Anoxic Groundwater during River Flooding of Riparian Zones. *Groundwater* 2021, 59, 866–877. <http://doi.org/10.1111/gwat.13108>
35. Kondrasheva, N.K.; Ereemeeva, A.M. Production of biodiesel fuel from vegetable raw materials. *J. Min. Inst.* 2023, 300, 1–9. <http://doi.org/10.31897/PMI.2022.15>
36. Korshunov, G.I.; Ereemeeva, A.M.; Drebenstedt, C. Justification of the use of a vegetal additive to diesel fuel as a method of protecting underground personnel of coal mines from the impact of harmful emissions of diesel-hydraulic locomotives. *J. Min. Inst.* 2021, 247, 39–47. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>
37. Pershin, I.M.; Kukharova, T.V.; Tsapleva, V.V. Designing of distributed systems of hydrolithosphere processes parameters control for the efficient extraction of hydromineral raw materials. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021, 1728, 012017. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/1728/1/012017>
38. Martirosyan, A.V.; Kukharova, T.V.; Fedorov, M.S. Research of the hydrogeological objects' connection peculiarities. In Proceedings of the 4th International Conference on Control in Technical Systems, Saint Petersburg, Russia, 21–23 September 2021; pp. 34–38. <http://doi.org/10.1109/CTS53513.2021.9562910>
39. Litvinenko, V.S.; Petrov, E.I.; Vasilevskaya, D.V.; Yakovenko, A.V.; Naumov, I.A.; Ratnikov, M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *J. Min. Inst.* 2022, 260, 1–17. <http://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
40. Martirosyan, K.V.; Chernyshev, A.B.; Martirosyan, A.V.; Tatyana, K.V. Formation of the Anterior Heating Function under the Action of Uniformly Distributed Sources. In Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 27–30 January 2020; pp. 755–760. <http://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9038947>
41. Ilyushin, Y.; Mokeev, A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type. *Int. J. App. Eng. R.* 2017, 12, 1500–1510.
42. Kukharova, T.V.; Ilyukhina, Y.A.; Shestopalov, M.Y. Development of a Methodology for Controlling the Process of Heating Metal Blanks in a Methodical Furnace. In Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 25–28 January 2022; pp. 718–721. <http://doi.org/10.1109/EIConRus54750.2022.9755574>
43. Arefiev, I.B.; Afanaseva, O.V. Implementation of Control and Forecasting Problems of Human-Machine Complexes on the Basis of Logic-Reflexive Modeling. In Proceedings of the International Conference System Analysis in Engineering and Control, Nanjing, China, 24–26 June 2022. http://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6_17
44. Dagaev, A.; Pham, V.D.; Kirichek, R.; Afanaseva, O.; Yakovleva, E. Method of Analyzing the Availability Factor in a Mesh Network. *Commun. Comput. Inf. Sci.* 2022, 1552, 346–358. http://doi.org/10.1007/978-3-030-97110-6_27
45. Kukharova, T.V.; Utkin, V.A.; Pershin, I.M. Modeling of a Decision Support System for a Psychiatrist Based on the Dynamics of Electrical Conductivity Parameters. In Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 26–29 January 2021; pp. 975–978. <http://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396273>
46. Zlotnikov, K.A.; Afanaseva, O.V.; Shestopalov, M.Y.; Skorobogaty, A.S. Enhancement of Automated Training Systems for Improvement of Staff Training Quality. In Proceedings of the 17th Russian Scientific and Practical Conference on Planning and Teaching Engineering Staff for the Industrial and Economic Complex of the Region, Saint Petersburg, Russia, 14–15 November 2018; pp. 33–35. <http://doi.org/10.1109/PTES.2018.8604229>
47. Islamov, S.R.; Bondarenko, A.V.; Korobov, G.Y.; Podoprighora, D.G. Complex algorithm for developing effective kill fluids for oil and gas condensate reservoirs. *J. Civ. Eng. Technol.* 2019, 10, 2697–2713.
48. Legkokonets, V.A.; Islamov, S.R.; Mardashov, D.V. Multifactor analysis of well killing operations on oil and gas condensate field with a fractured reservoir. In Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers: Topical Issues of Rational Use of Mineral Resources, Saint Petersburg, Russia, 18–20 April 2018; pp. 111–118.
49. Sultanbekov, R.; Denisov, K.; Zhurkevich, A.; Islamov, S. Reduction of Sulphur in Marine Residual Fuels by Deasphalting to Produce VLSFO. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1765. <http://doi.org/10.3390/jmse10111765>
50. Korshunov, G.I.; Ereemeeva, A.M.; Seregin, A.S. Justification of reduction in air requirement in ventilation of coal roadways with running diesel engines. *Min. Inf. Anal. Bull.* 2022, 3, 47–59. http://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_3_0_47
51. Ereemeeva, A.M.; Korshunov, G.I.; Kondrasheva, N.K. Method to reduce harmful emissions when diesel locomotives operate in coal mines. In Proceedings of the XV International Forum-Contest: Topical Issues of Rational Use of Natural Resources, Saint Petersburg, Russia, 13–17 May 2019; pp. 10–16. <http://doi.org/10.1201/9781003014577-2>
52. Gerasimova, I.G.; Oblova, I.S.; Golovina, E.I. The Demographic Factor Impact on the Economics of the Arctic Region. *Resources* 2021, 10, 117. <http://doi.org/10.3390/resources10110117>
53. Golovina, E.; Pasternak, S.; Tsiglianu, P.; Tselischev, N. Sustainable Management of Transboundary Groundwater Resources: Past and Future. *Sustainability* 2021, 13, 12102. <http://doi.org/10.3390/su132112102>
54. Tarabarinova, T.A.; Golovina, E.I. Capitalization of mineral resources as an innovation ecological strategy. *Geol. Min. Resour. Sib.* 2021, 4, 86–96. <http://doi.org/10.20403/2078-0575-2021-4-86-96>