

УДК 627.81:519.21

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОКА С МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЗАТРАТ****Сафронова Т.И., Дегтярева О.Г., Дацьо Д.А.***ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», Краснодар,  
e-mail: mail@kubsau.ru*

На всех реках Черноморского побережья Краснодарского края (от г. Новороссийска до города Туапсе) отмечается недостаток запасов питьевых подземных вод в меженный период. Проблема водообеспечения народного хозяйства при непереносимом условии сохранения окружающей среды в устойчивом состоянии является одной из важнейших научных и прикладных задач современности. На действующих водозаборах для увеличения эксплуатационных запасов разрабатывают мероприятия по строительству регулирующих емкостей (водохранилищ). Для решения проблемы в Кубанском государственном аграрном университете разработана система регулирования стока атмосферных осадков. При проектировании столь сложной системы, начиная со стадии строительства, а также на стадии эксплуатации принимаемые инженерные решения следует рассматривать с учетом оценки общей цены намечаемых мероприятий. Цена эффективности и финансовой устойчивости намечаемого мероприятия будет включать затраты на строительство и эксплуатацию системы с учетом природно-климатических факторов, существенно влияющих на эксплуатационные возможности. Именно природно-климатические факторы, а еще точнее, наличие атмосферных осадков является определяющим, хотя и не единственным фактором, способным вызвать неблагоприятное состояние системы. В статье рассмотрен математический аппарат оценки основных характеристик цены мероприятия по строительству и эксплуатации системы регулирования стока атмосферных осадков в зависимости от исходного состояния элементов системы и степени влияния вероятностей наступления неблагоприятного состояния. В статье описана разработка модели оптимального управления системы с учетом неопределенности затрат.

**Ключевые слова:** водоснабжение, водохранилище, искусственное пополнение подземных вод**DEVELOPMENT OF MODEL OF THE OPTIMUM USE OF STREAM OF WATER FROM SMALL TERRITORIES AT INDEFINITE EXPENSES****Safronova T.I., Degtyareva O.G., Datso D.A.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin», Krasnodar, e-mail: mail@kubsau.ru*

On all rivers of the black Sea coast of the Krasnodarskogo edge (from the city of Novorossiyska to the city Tuapse) the lack of supplies of underground drinking-waters is marked in a boundary path period. A problem of lack of water at the necessary condition of environmental preservation in the stable state is one of major scientific and applied tasks of contemporaneity. On operating water, intakes for the increase of operating supplies develop measures on building of regulative capacities (storage pools). For the decision of problem, the system of adjusting of flow of atmospheric fallouts is developing in the Kuban state agrarian university. At planning of so difficult system, since the stage of building, and on the stage of exploitation it is necessary to examine the accepted engineering's decisions taking into account the estimation of blanket price of the set measures. The cost of efficiency and financial stability of the set measure will include expenses on building and exploitation of the system taking into account the factors of climate, influencing on exploitation. Exactly factors of climate, a presence of atmospheric fallouts is a determining, but not unique factor, able to cause the unfavorable state of the system. In the article, the mathematical vehicle of estimation of basic descriptions of cost of measure is considering on building and exploitation of the system of adjusting of flow of atmospheric fallouts depending on the initial state of elements of the system and degree of influence of probability of the unfavorable state. In the article, development of optimum case of the system frame is describing taking into account the vagueness of expenses.

**Keywords:** water supply, storage pool, artificial addition to the under waters

В бассейнах рек Черноморского побережья Краснодарского края основной проблемой водообеспечения является недостаток запасов питьевых подземных вод в меженный маловодный период. Вместе с тем природно-климатические и гидрогеологические условия Черноморского побережья Краснодарского края складываются наилучшим образом для аккумуляции атмосферных осадков и поверхностных водотоков, которых достаточно в осенне-зимне-весенний период. Атмосферные осадки являются наиболее надежным и качествен-

ным источником водоснабжения и орошения. Для увеличения эксплуатационных запасов на действующих водозаборах применяют искусственное пополнение запасов, разрабатывают мероприятия по строительству регулирующих емкостей (водохранилищ), ориентированных на внутригодовое регулирование стока [1].

Цель исследования: разработка модели использования стока с малых водосборов для обеспечения пресной водой в засушливый период года производства сельскохозяйственной продукции.

## Материалы и методы исследования

В Кубанском государственном аграрном университете для решения проблемы водообеспечения разработана система регулирования стока атмосферных осадков (СРС АО) [2, 3]. Это комплекс взаимосвязанных гидротехнических сооружений. Основными составляющими системы являются: надземное и подземное водохранилища (по одному или несколько, того или иного вида); станции механического подъема воды; транспортные водоводы или трубопроводы; защитные сооружения и другие элементы.

В рамках реализации технического проекта «Система регулирования стока атмосферных осадков» разработаны следующие технологии:

- 1) для подземных водохранилищ;
- 2) для отдельно последовательно стоящих подземных и надземных водохранилищ;
- 3) для расположенных друг над другом подземных и надземных водохранилищ (совмещенных) [2, 3].

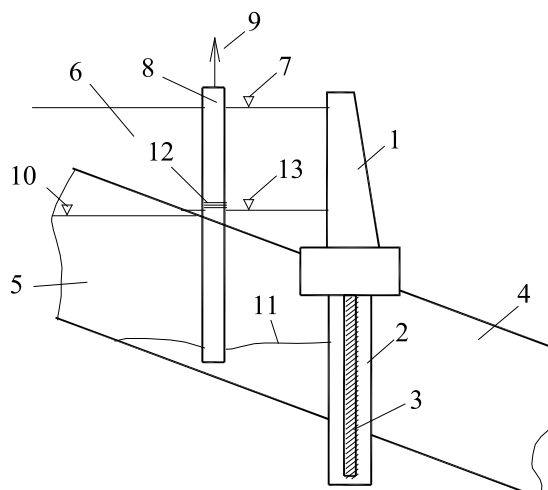
В технологиях эффективно используется надземный и подземный объем долины горной реки. Такой подход обеспечивает надежный водоотбор на протяжении всего периода эксплуатации системы регулирования стока.

Например, разработано устройство для регулирования накоплений подземных вод, представленное на рисунке. Устройство в поперечном створе долины реки включает водонепроницаемый барраж, который полностью (по мощности и ширине) перекрывает водоносный горизонт. Так образуется подземное водохранилище. Надземное водохранилище образует плотина, перекрывающая по ширине поперечный створ долины реки. Надземное водохранилище расположено над подземным водохранилищем, водонепроницаемый барраж – в одном створе с надземной плотиной, между сваями, образуя совместный подземный экран. Выше отметок затопления при максимальном уровне на берегу надземного водохранилища расположен водоприемный колодец. Объемы обоих водохранилищ связаны между собой запорно-регулирующими трубопроводами, а с потребителем – хотя бы одно из водохранилищ.

Накопление подземных вод данным устройством описано в работах. В результате накопления пресных вод в подземном и надземном водохранилищах в многогодичный период года уровень их повышается и соответствует максимальным уровням воды [4]. Подземные воды по химическому составу гидрокарбонатные кальциевые с минерализацией от 0,2 до 0,6 г/л [5].

При пересыхании поверхностного водотока в периоды маловодности вода расходуется из надземного водохранилища. В подземном водохранилище осуществляется слежение за уровнем воды, чтобы не допустить падения уровня кривой депрессии до минимальных значений.

При ориентировании системы водопотребления на орошение нужна более теплая вода. Тогда ее рациональнее подавать из надземного водохранилища через трубопровод. Чтобы не допустить падения уровня воды в надземном водохранилище до «мертвого объема», когда уровень надземных вод падает до минимальных отметок, в надземное водохранилище осуществляется попуск воды из подземного водохранилища посредством трубопроводной системы через скважину или колодец.



*Устройство для регулирования запасов пресных вод: 1 – надземная плотина; 2 – сваи; 3 – водонепроницаемый барраж; 4 – водоносный горизонт; 5 – подземное водохранилище; 6 – надземное водохранилище; 7 – максимальный уровень воды в надземном водохранилище; 8 – шахтный колодец; 9 – технологические трубопроводы; 10 – максимальная отметка вод подземного водохранилища; 11 – минимальная отметка кривой депрессии; 12 – затвор; 13 – «мертвый» объем водохранилища*

Инновация решения проблемы заключается в интенсивном использовании атмосферных осадков, а также весеннего стока в горных ущельях для проведения искусственного пополнения подземных вод. В зависимости от площади водосбора в одном ущелье может быть несколько надземных и подземных водохранилищ [6].

При совместной эксплуатации подземных и поверхностных вод возможно погасить лимиты пресных вод за счет гибкого управления водозаборными системами из поверхностных и подземных вод [7]. Подземные воды обладают большой регулирующей способностью (емкостью), менее подвержены влиянию изменчивости климата.

Нами проведен анализ сведений государственного водного реестра, анализ природных факторов, влияющих на состояние, наличие и доступность водных ресурсов для водоснабжения населения, орошения и производства.

Обоснование оптимальных вариантов системы совместного использования подземных и поверхностных вод требует разработки более совершенных методов расчета, применения критериев с учетом неопределенности результатов и затрат [8]. Рассмотрим оптимизационную задачу о нахождении закона изменения цены удовлетворительного состояния системы, обеспечивающую максимальную прибыль с учетом потерь от неблагоприятного состояния.

Обозначим цену намечаемого мероприятия –  $S$ . Предполагаем, что цена  $S(t)$  со временем строго монотонно убывает от некоторой цены  $S_0 = S(0)$ ; амечаемые мероприятия образуют пуассоновский поток интенсивности  $\lambda$ ,  $R(S)$  – вероятность наступления неблагоприятного состояния. В статье [9] вычислены

основные характеристики цены состояния и промежутка времени до наступления благоприятного состояния – математическое ожидание, дисперсия, плотность распределения вероятностей. Приведем формулу для плотности вероятностей промежутка времени до наступления благоприятного состояния:

$$p(\tau) = \lambda R(S(\tau)) \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right).$$

Пусть  $S_m$  – некоторая минимальная цена, такая, что  $R(S_m) = 1$ , то есть по этой цене отмечается неудовлетворительное состояние системы всегда.

Далее предположим, что если удовлетворительное состояние системы наступит в момент времени  $\tau$ , то системе будет нанесен ущерб, равный  $K(\tau)$ . Общий доход будет равен

$$Q = \int_0^{\infty} (S(\tau) - K(\tau)) \lambda R(S(\tau)) \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right) d\tau$$

и далее потребуем  $Q \Rightarrow \max_{S(\tau)}$ .

Используем методы вариационного исчисления [2]. Найдем изменение  $Q$  при замене  $S(\tau)$  на  $S(\tau) + \delta S(\tau)$

$$\begin{aligned} \delta Q &= \int_0^{\infty} \delta S(\tau) [\lambda R(S(\tau)) + (S(\tau) - K(\tau)) \lambda R'(S(\tau))] \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right) d\tau + \\ &+ \int_0^{\infty} (S(\tau) - K(\tau)) \lambda R(S(\tau)) \cdot \left(-\int_0^{\tau} \lambda R'(S(t)) \delta S(t) dt\right) \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right) d\tau. \end{aligned}$$

Приведем второе слагаемое к виду:

$$\begin{aligned} &-\int_0^{\infty} \lambda R'(S(t)) \delta S(t) dt \int_t^{\infty} (S(\tau) - K(\tau)) \lambda R(S(\tau)) \cdot \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right) d\tau = \\ &= -\int_0^{\infty} \lambda R'(S(\tau)) \delta S(\tau) d\tau \int_{\tau}^{\infty} (S(t) - K(t)) \lambda R(S(t)) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda R(S(v)) dv\right) dt. \end{aligned}$$

Тогда в выражении для  $\delta Q$  под знаком интеграла получим выражение

$$\begin{aligned} &[\lambda R(S(\tau)) + (S(\tau) - K(\tau)) \lambda R'(S(\tau))] \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right) - \\ &- \lambda R'(S(\tau)) \int_{\tau}^{\infty} (S(t) - K(t)) \lambda R(S(t)) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda R(S(v)) dv\right) dt. \end{aligned}$$

По методу вариационного исчисления оно должно обращаться в нуль:

$$\begin{aligned} &[\lambda R(S(\tau)) + (S(\tau) - K(\tau)) \lambda R'(S(\tau))] \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(t)) dt\right) = \\ &= \lambda R'(S(\tau)) \int_{\tau}^{\infty} (S(t) - K(t)) \lambda R(S(t)) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda R(S(v)) dv\right) dt. \end{aligned} \tag{1}$$

Выполним преобразование (разделим обе части этого выражения на  $\lambda R'(S(\tau))$ ). Далее продифференцируем по  $\tau$ . Тогда получим

$$\begin{aligned} &\left[\frac{d}{d\tau} \frac{R(S(\tau))}{R'(S(\tau))} + (S'(\tau) - K'(\tau))\right] \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(v)) dv\right) - \\ &-\left[\frac{R(S(\tau))}{R'(S(\tau))} + (S(\tau) - K(\tau))\right] \lambda R(S(\tau)) \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(v)) dv\right) = \\ &= -(S(\tau) - K(\tau)) \lambda R(S(\tau)) \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda R(S(v)) dv\right). \end{aligned}$$

Сокращая экспоненты и приводя подобные

$$\frac{d}{d\tau} \frac{R(S(\tau))}{R'(S(\tau))} + (S'(\tau) - K'(\tau)) - \lambda \frac{R^2(S(\tau))}{R'(S(\tau))} = 0,$$

вычислим производную

$$\frac{d}{d\tau} \frac{R(S(\tau))}{R'(S(\tau))} = \frac{(R'(S(\tau)))^2 - R(S(\tau))R''(S(\tau))}{(R'(S(\tau)))^2} S'(\tau) = \left[ 1 - \frac{R(S(\tau))R''(S(\tau))}{(R'(S(\tau)))^2} \right] S'(\tau).$$

Получили дифференциальное уравнение для оптимального значения  $S(\tau)$

$$\left[ 2 - \frac{R(S(\tau))R''(S(\tau))}{(R'(S(\tau)))^2} \right] S'(\tau) - \lambda \frac{R^2(S(\tau))}{R'(S(\tau))} - K'(\tau) = 0. \quad (2)$$

(2) – дифференциальное уравнение первого порядка относительно  $S(\tau)$ .

Чтобы определить константу в общем решении уравнения (2), положим в (1)  $\tau = 0$ . И получим дополнительное условие для определения константы.

$$\frac{R(S(0))}{R'(S(0))} + S(0) - K(0) = \int_0^{\infty} (S(t) - K(t)) \lambda R(S(t)) \cdot \exp\left(-\int_0^t \lambda R(S(v)) dv\right). \quad (3)$$

Пусть  $K(\tau) = K_0 \tau$  (частный случай выражения ущерба). Запишем дифференциальное уравнение, соответствующее этому случаю

$$\left[ 2 - \frac{R(S(\tau))R''(S(\tau))}{(R'(S(\tau)))^2} \right] S'(\tau) - \lambda \frac{R^2(S(\tau))}{R'(S(\tau))} - K_0 = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид  $S(\tau) = S_0$ . Тогда  $S'(\tau) = 0$ , и мы приходим к алгебраическому уравнению

$$-\lambda \frac{R^2(S_0)}{R'(S_0)} = K_0. \quad (5)$$

### Результаты исследования и их обсуждение

Система регулирования стоков атмосферных осадков – это комплекс взаимосвязанных гидротехнических сооружений. Основными составляющими системы являются: надземное и подземное водохранилища; станции механического подъема воды; транспортные водоводы или трубопроводы; защитные сооружения и другие элементы [10]. Естественно, большое разнообразие сооружений, конструктивно и функционально отличающихся друг от друга, накладывают определенные требования конструктивно-технологического характера [11]. Прежде всего, это взаиморасположение как в плане, так и по высоте основных составляющих системы. Далее в обязательном порядке должны учитываться возможности технологических связей. Например, скорость подачи расходов из надземного водохранилища в подземное или наоборот; пропускная способность катастрофических сооружений; пропускная способность водотранспортных сооружений и трубопроводов и другие аспекты.

При проектировании столь сложной системы, начиная со стадии строительства,

а также на стадии эксплуатации принимаемые инженерные решения следует рассматривать с учетом оценки общей цены намечаемых мероприятий. В статье рассмотрен процесс установления цены мероприятий при выборе параметров системы регулирования стока атмосферных осадков.

Превышение пределов изменения параметров режима эксплуатации может привести к сезонно необратимым явлениям – выводу системы из строя на сезон, хотя в дальнейшем все процессы возобновятся [12].

### Выводы

СРС АО – водохозяйственная система, предназначенная для обеспечения рационального использования атмосферных осадков. Необходима стоимостная оценка негативных последствий, рисков и ущербов. Полученная формула (5) позволяет количественно оценить ущерб. Если ущерб приемлем, необходимо формировать банк данных технологий предотвращения рисков и ущербов и условий их реализации.

Необходимость принятия управленческих решений обусловлена остротой водно-экологических проблем. В статье подчеркнута необходимость разработки модели оптимального управления системы регулирования стока атмосферных осадков с малых водосборов с учетом неопределенности затрат.

### Список литературы

1. Дегтярев Г.В. Гидроциклонный водозабор для закрытых оросительных систем: дис. ... канд. техн. наук. Фрунзе, 1984. 249 с.

2. Дегтярёва О.Г., Дегтярёв Г.В. Устройство для регулирования запасов подземных вод // Патент РФ № 2569004. Патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. 2015. Бюл. № 32.
3. Дегтярёва О.Г., Дегтярёв Г.В. Способ регулирования запасов подземных вод // Патент РФ № 2569035. Патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. 2015. Бюл. № 32.
4. Гольдман Р.Б. Применение планирования для двухфакторного эксперимента // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 г. (Краснодар, 09 февраля 2016 г.). Краснодар: Издательство ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2016. С. 448–449.
5. Подколзин О.А., Соколова И.В., Осипов А.В., Баракина Е.Е., Перов А.Ю. Содержание основных микроэлементов в почвах Краснодарского края // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 69. С. 171–176.
6. Приходько И.А., Чеботарев М.И. Инновационный комплекс технологических операций для повышения мелиоративного состояния почв рисовой оросительной системы // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2011. № 28. С. 169–172.
7. Дегтярев Г.В., Дегтярев В.Г., Табаев И.А. Математическое моделирование ослабленных вертикальных несущих конструкций здания при усилении самоупрочаемым бетоном // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 1 (52). С. 192–198.
8. Кондратенко Л.Н. Эксплуатация антинакипного аппарата на предприятии аграрно-промышленного комплекса // Итоги научно-исследовательской работы за 2017 год: сборник статей по материалам 73-й научно-практической конференции преподавателей (Краснодар, 14 марта 2018 г.). Краснодар: Издательство Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2018. С. 613–614.
9. Сафронова Т.И., Соколова И.В. Вероятностная модель снижения цены мелиоративного мероприятия // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 132. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/110.pdf> (дата обращения: 06.11.2018).
10. Дегтярев Г.В., Варваркина В.А. Численное моделирование дебита скважины в ПО MIDAS GTS NX // Строительство и экономика: проблемы и решения: сборник статей по материалам региональной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, магистрантов и преподавателей (Краснодар, 21 марта 2018 г.). Краснодар Издательство: Магарин, 2018. С. 18–20.
11. Дегтярев Г.В., Дегтярев В.Г., Табаев И.А. Математическое моделирование ослабленных вертикальных несущих конструкций здания при усилении самоупрочаемым бетоном // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 1 (52). С. 192–198.
12. Рекс Л.М., Умывакин В.М., Сафронова Т.И., Приходько И.А. Математическая модель экологической ситуации на рисовой оросительной системе // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета 2008. № 10. URL: <http://ej.kubagro.ru/2008/10/pdf/03.pdf> (дата обращения: 06.11.2018).