

**Комбинированные водозаборные системы как метод оптимального управления водными ресурсами**

Р.С. Штенгелов, Е.А. Филимонова

**Combined water-intake systems - optimal method of water resources management**

Shtengelov R.S., Filimonova E.A.

**Аннотация.** Рассматривается метод комбинированного использования водных ресурсов, представляющий собой комбинацию во времени взаимозащающих поверхностных и подземных водозаборов. Предложены типовые водохозяйственные задачи, которые могут быть эффективно решены с использованием комбинированных водозаборных систем.

*Ключевые слова:* водные ресурсы, комбинированное использование, дефицит речного стока, водохозяйственные задачи.

**Abstract.** Combined use of water resources is considered. It represents time combination of surface and underground form of water intake. It is offered typical problems of water management, which may be efficiently solved by combined water intake system.

*Key words:* water resources, conjunctive use, scarcity of stream flow, problems of water management.

**Введение.** Проблема прогрессирующего дефицита водных ресурсов в настоящее время принимает глобальные масштабы. По данным Генеральной Ассамблеи ООН более миллиарда людей во всем мире не имеют доступа к чистой питьевой воде, а в регионах с острым дефицитом воды проживает около 470 миллионов человек. В сложившейся ситуации принята Декларация тысячелетия ООН и другие многочисленные международные документы, где подчёркивается необходимость комплексного управления водными ресурсами.

Одним из таких методов является комбинированное использование водных ресурсов, представляющее собой технологически и оперативно сопряжённый процесс взаимозамещения водоотбора из поверхностных и подземных источников, обеспечивающий нужную производительность независимо от временных критических изменений количественного или качественного состояния какого-либо из этих источников. Комбинированные водозаборные системы (КВС) являются экологически благоприятными, поскольку повышается гарантированная отдача водохозяйственной системы без строительства новых водохранилищ, а подземные воды являются возобновляемым ресурсом.

**История комбинированного использования водных ресурсов в России и зарубежом.** Предложения о комбинированном использовании подземных и поверхностных вод выдвигались еще в 50-е годы XX века советскими и американскими гидрогеологами, однако до сих пор отсутствует даже единая терминология, определяющая использование подземных и поверхностных источников в единой водохозяйственной системе. В российской литературе можно встретить понятия «объединенное, совместное, комплексное, компенсированное, комбинированное» использование водных ресурсов, в иностранной литературе - «conjunctive, combined, integrated, joint use». Большинство исследователей употребляет термин «совместное использование» (или «conjunctive use»), неоднозначно трактуя это понятие.

Комбинированное использование водных ресурсов рассматривалось советскими и американскими гидрогеологами в основном применительно к проблемам орошения (Е.Л. Минкин, С.Я. Концевовский, Г.П. Кумсиашвили, С.Ш. Мирзаев, R.A. Young, D. Bredehoeft, R. Maknoon и др.) [7, 8, 10, 15, 18].

За последние десятилетия в Европе проведено несколько тестовых проектов использования подземных вод как дополнительного источника к поверхностному водоснабжению для хозяйственно-питьевых нужд (R.A. Downing, F. Law, M. Owen, M.J. Reeves) [13, 14, 16, 17]. Исследования выполнены на конкретных объектах и массового применения не получили.

В отечественной литературе идея комбинированного использования водных ресурсов для хозяйственно-питьевых нужд пока находится в стадии разработки и на практике не применяется. Сотрудниками института ИВП РАН В.С. Ковалевским, А.Л. Великановым, И.С. Зекцером и другими исследована возможность применения комбинированных систем на конкретных примерах. В частности, на примере анализа водоснабжения г. Москвы рассмотрена вероятность организации комбинированной системы водоподдачи [3, 6, 12].

Важным аспектом применения комбинированной эксплуатации является возможность использования подземных вод в качестве дополнительного источника для объектов, требующих бесперебойного водоснабжения. Использование подземных вод для покрытия дефицита технической воды в маловодные периоды разрабатывалось Д.Я. Ратковичем, М.В.Болговым, И.С. Зекцером, Р.Г. Джамаловым и др., в том числе – авторами статьи [1, 2, 5] при составлении схемы водообеспечения Калининской АЭС.

Несмотря на продолжительную историю изучения комбинированного использования водных ресурсов и большое количество работ, обоснование комбинированного использования водных ресурсов, и за рубежом, и в России разработано вплоть до настоящего времени недостаточно. Организация комбинированных водозаборных систем требует рассмотрения широкого круга вопросов:

1. Водохозяйственное обоснование

- анализ водохозяйственной обстановки и выявление дефицита располагаемых водных ресурсов для обеспечения существующей или перспективной водопотребности,
- обоснование величин минимальных допустимых расходов речного стока,
- технико-экономический расчет комбинированной водозаборной системы.

2. Гидрологическое обоснование, содержащее количественное определение характеристик и продолжительности маловодных периодов речного стока и их повторяемости в многолетье, а также величин допустимого изъятия речного стока.

3. Гидрогеологическое обоснование

- гидрогеодинамическое исследование условий формирования ущерба речному стоку,
- балансово-гидрогеодинамический анализ условий восстановления сработанных запасов подземных вод,
- изучение качества подземных и поверхностных вод, а также возможных проблем при их смешении, назначение необходимых способов водоподготовки.

Таким образом, обоснование применения комбинированного использования водных ресурсов требует привлечения специалистов из разных областей знаний, в том числе по различным направлениям гидрогеологических исследований.

### **Проблемы водного хозяйства, решаемые с помощью создания КВС.**

Прежде чем охарактеризовать водохозяйственные задачи, необходимо отметить, что специальное обоснование работы КВС необходимо лишь в случае использования водных ресурсов балансово-замкнутого бассейна поверхностного и подземного стока. В противном случае (если привлекаются водные ресурсы другого бассейна стока) водохозяйственная проблема сводится к обычной задаче местного характера, не требующей дополнительной методической геологической и гидрогеологической разработки.

При всём многообразии частных проблем водохозяйственного профиля можно выделить типовые задачи, которые могут быть эффективно решены путём организации комбинированных водозаборных систем [9, 11]:

**1. «Задача компенсации»** возникает в случае превышения водохозяйственной потребности над величиной располагаемых (доступных для использования) водных ресурсов, т.е. водопотребность не может быть полностью удовлетворена за счет речного стока.

Общие водные ресурсы в большинстве случаев оцениваются по величине речного стока, внутригодовое распределение которого на территории России крайне неравномерно. Основной его объём (до 60-80% годового) приходится на весеннее половодье, а меженные расходы снижаются в десятки и сотни раз. Верхним пределом располагаемых водных ресурсов (РВР) являются величины минимальных меженных расходов речного стока, приведенные к высокой вероятности превышения. Нижний предел РВР определяется, исходя из условия сохранения минимального допустимого расхода реки (МДР), необходимого для обеспечения водопользования и нормального функционирования водных и наземных экосистем на нижележащем участке реки. Допустимое изъятие речного стока в настоящее время не регламентируется нормативными документами, на практике величину МДР принимают не менее 50-75% минимального 30-суточного меженного расхода [3].

Очевидно, что при таких жёстких ограничениях вполне реально возникновение сезонного дефицита РВР для малых речных бассейнов, где меженные расходы сопоставимы с величиной водопотребности.

В этом случае комбинированная водозаборная система представляет собой единый водохозяйственный комплекс, состоящий из двух отдельных водозаборов – основного (ОВ) и компенсационного (КВ), которые управляются по общему диспетчерскому графику для обеспечения суммарной водохозяйственной потребности.

Дебит ОВ с поверхностной или подземной формой водоотбора обеспечивается речным стоком и работает с полной производительностью (равной водопотребности  $Q_3$ ) только в периоды высокой водности, когда отсутствует опасность уменьшения расхода поверхностных водотоков или их уровней сверх допустимых пределов. КВ включается в критически низководные периоды, когда продолжение работы ОВ с прежней производительностью приводит к нарушению нормативов допустимого изъятия речного стока.

Производительность основного водозабора  $Q_{ОВ}$  в любой текущий момент внутригодового состояния речного стока регулируется по фактическому расходу реки  $R$ , исходя из условия сохранения МДР:

$$Q_{ОВ} \leq R - \text{МДР}. \quad (1)$$

Период работы КВ в годовом цикле определяется условием снижения речного стока до величины:

$$R < Q_3 + \text{МДР}, \quad (2)$$

при этом его производительность  $Q_{КВ}$  регулируется синхронно с основным водозабором и должна составлять:

$$Q_{КВ} = Q_3 - Q_{ОВ} = Q_3 - (R - \text{МДР}). \quad (3)$$

Для оценки максимальной расчетной производительности компенсационного водозабора в качестве величины  $R$  используется  $R_{\min}$  - минимальный (среднемесячный или за 30-суточный период) расход реки с нормативной вероятностью превышения (95%–85% в зависимости от категории надежности водоподачи).

Гидрогеологической задачей в этом случае является обоснование\_местоположение КВ, работающего в том же или смежном водоносном горизонте в течение времени  $\Delta t$  (продолжительность «дефицитного периода») с производительностью  $Q_{КВ}$ , при условиях:

– дополнительный ущерб поверхностному водотоку имеет «отложенный» во времени характер, т.е. за период включения компенсационного водозабора он не превышает некоторой заданной минимальной величины, а полной величины достигает лишь в последующий многоводный период.

– за период между последовательными включениями компенсационного водозабора происходит полное или частичное естественное и/или искусственное восстановление запасов подземных вод в зоне его балансово-гидродинамического влияния.

**2. «Задача замещения»** обусловлена опасностью временного, но полного прекращения работы поверхностных водозаборов из-за недопустимого ухудшения качества речных вод вследствие аварийных промышленных сбросов, выхода из строя очистных сооружений и т.д., вплоть до террористических актов. Такие же ситуации могут возникать и по естественным причинам – при широких половодных разливах рек, сопровождающихся, как правило, резким всплеском бактериального и органического загрязнения речной воды.

В этих случаях концепция комбинированного использования водных ресурсов реализуется путём создания замещающего подземного водозабора (ЗВ), обеспечивающего на период недееспособности основного поверхностного водозабора удовлетворение полной (или нормативно сокращённой) районной водопотребности.

Основной водозабор – с поверхностной формой водоотбора, но возможен и подземный береговой с явным преобладанием привлекаемых ресурсов и малым временем добегающей речной воды. Внутригодовое распределение речного стока обеспечивает водоотбор за любой расчётный период, т.е. проблемы дефицита речного стока отсутствуют.

В этих условиях необходимо определить удаление (по нормали к урезу реки) подземного замещающего водозабора (ЗВ), работающего в течение времени  $t_0$  (длительность ЧС) с производительностью  $Q_{ЗВ} = Q_э$ , при условиях:

- доля привлекаемых ресурсов в балансе водоотбора ЗВ к моменту окончания периода ЧС не превысит допустимой величины  $\delta$  (рассчитанной из условия соблюдения ПДК в добываемой воде по компонентам фактического загрязнения),
- в частном случае при заданном  $\delta = 0$  (высотоксичные или неизученные загрязнения) время добегания речной воды  $t_p$  должно быть больше/равно продолжительности периода ЧС ( $t_p \geq t_0$ ).

Предполагается, что по независимым и неустраняемым обстоятельствам замещающий водозабор не может быть сооружен выше по течению реки от источника ЧС, либо такое его положение экономически нерационально. В противном случае задача решается путём создания ЗВ поверхностного или подземного типа выше источника ЧС.

В значительной степени такая постановка приближается к требованиям организации резервного водоснабжения, однако специфическим для ЗВ является обоснование необходимого удаления его от реки, обеспечивающего отсутствие (или допустимо малую долю) привлечения речных вод за период чрезвычайной ситуации.

**3. «Задача релаксации»** возникает для участков, где эксплуатация подземных вод уже привела или может привести к негативным (вплоть до недопустимых) последствиям гидродинамического, гидрогеохимического и экологического характера.

Основной водозабор – подземный, приречный, работает с производительностью  $Q_{ОВ} = Q_э$ , равной водохозяйственной потребности. Дефицит речного стока отсутствует.

Гидрогеологической задачей является обоснование уменьшения отбора подземных вод за счёт создания вспомогательного (релаксационного) водозабора. Для таких территорий идея комбинирования подземной и поверхностной форм водоотбора может быть реализована по двум направлениям:

- путём переноса части производительности подземного водозабора (например, водопотребности технического назначения) на релаксационный поверхностный водозабор (РПВ), работающий с производительностью  $Q_{РПВ}$ , достаточной для восстановления «нормальных» условий работы основного водозабора;
- путём создания системы искусственного пополнения запасов подземных вод в виде инфильтрационных сооружений, круглогодично или периодически (в периоды высокой водности) использующих речную воду.

В любом случае необходимым условием для организации «релаксационной» КВС является соответствие качества воды в речном стоке санитарным нормам.

**4. «Задача регенерации»** является частным случаем задачи компенсации с периодическим использованием подземных вод для нейтрализация ущерба поверхностному стоку, возникающего при работе поверхностного водозабора в маловодный период.

ОВ – поверхностный, работает в течение всего года с постоянной производительностью  $Q_{ОВ}$ . В маловодные периоды его работа приводит к недопустимому ущербу речному стоку на величину  $R^0$ . Компенсация этой величины осуществляется пополнением поверхностного водотока необходимым количеством воды, получаемой с

подземного регенерирующего водозабора (РВ), эксплуатация которого, в свою очередь, также приводит к дополнительному ущербу речному стоку  $R_{РВ}$ .

В данных условиях необходимо определить производительность регенерирующего водозабора, достаточную для нейтрализации ущерба  $R^0 + R_{РВ}$ .

Практическое решение задачи регенерации водотока требует назначения интегральной величины погрешности  $\epsilon$ , учитывающей точность гидрометрических оценок расходов водотоков, общего руслового баланса, нормативной величины МДР и т.д. Тогда алгоритм решения может выглядеть следующим образом:

- Фактический ущерб от работы основного водозабора составляет  $R_{ОВ}$ ,
- Допустимый ущерб  $R^*$  равен разности между текущим значением расхода водотока и величиной МДР,
- При наступлении маловодного периода расход водотока приближается к величине МДР и возникает недопустимый ущерб  $R^0 = R_{ОВ} - R^*$ ,
- Для его компенсации в водоток сбрасывается дебит регенерирующего подземного водозабора  $Q_{РВ,0} = R^0$ , работа которого создаёт «свой» ущерб  $R_{РВ,0}$ ,
- Если  $R_{РВ,0} > \epsilon \text{МДР}$ , то дебит регенерирующего водозабора должен быть увеличен до  $Q_{РВ} = Q_{РВ,0} + R_{РВ,0}$ , при котором «свой» ущерб составит  $R_{РВ,1}$ ,
- Если  $R_{РВ,1} - R_{РВ,0} > \epsilon \text{МДР}$ , то дебит регенерирующего водозабора должен быть увеличен до  $Q_{РВ} = Q_{РВ,0} + R_{РВ,1}$ , «свой» ущерб соответственно составит  $R_{РВ,2}$ ,
- Далее аналогичные сравнительные расчётные операции продолжаются до выполнения условия  $R_{РВ,n} - R_{РВ,n-1} \leq \epsilon \text{МДР}$ . Окончательный необходимый дебит регенерирующего водозабора  $Q_{РВ,n} = Q_{РВ,0} + R_{РВ,n} = R_{ОВ} - R^* + R_{РВ,n}$ .

Завершая характеристику типовых задач организации КВС, необходимо подчеркнуть, что предложенная классификация носит концептуальный характер и назначение, так как реальное воплощение форм комбинированного использования водных ресурсов на конкретных участках может быть весьма разнообразным в зависимости от общей водохозяйственной обстановки, гидрологических и гидрогеологических условий, технико-экономических соображений, вопросов землепользования и др.

**Заключение.** Комбинированное использование водных ресурсов позволяет решить проблемы временного дефицита речного стока или катастрофического ухудшения качества речной воды, проблему «переэксплуатации» подземных вод и др. Наиболее типичной и распространенной является задача компенсации (включая регенерацию, как частный случай компенсации).

Список литературы:

1. Болгов М.В., Раткович Д.Я. Проблема гидрологического обоснования проектов атомных электростанций (на примере Калининской АЭС) // Вод. ресурсы. 1997. Т.23. №3. С.365-370.
2. Болгов М.В., Маслов А.А., Филимонова Е.А. Динамико-стохастическое моделирование взаимосвязи поверхностных и подземных вод при их комбинированном

использовании // Матер. межд. науч. конф. Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 138-148.

3. Великанов А.Л., Клепов В.И., Минкин Е.Л.. Совместное использование поверхностных и подземных вод в Московской агломерации // Вод. ресурсы. 1994. Т.21. №6. С.711-714

4. Данилов-Данильян В.И. и др. Оценка допустимых изъятий стока в бассейнах малых рек: основные методические положения // Вод. ресурсы. 2006. Т.33, №2. С.224-238.

5. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г., Племенов В.А.. Возможность использования подземных вод для водообеспечения атомных электростанций (на примере Калининской АЭС) // Вод. ресурсы, 1996. Т.23, №4. С.500-503.

6. Ковалевский В.С. Комбинированное использование ресурсов поверхностных и подземных вод. М., Научный мир, 2001. 332 с.

7. Концебовский С.Я., Минкин Е.А. Гидрогеологические расчеты при использовании подземных вод для орошения. М.Наука. 1989. 253 с.

8. Кумсиашвили Г.П. Регулирование стока и охрана природных вод. М:МГУ, 1980. 136 с.

9. Маслов А.А., Прошкина Е.А., Штенгелов Р.С. Комбинированные водозаборные системы: принципы и условия организации // Матер. 8-го Междунар. конгресса «Вода: экология и технология» Экватор-2008.

10. Мирзаев С.Ш. и др. Опыт комплексного использования подземных вод в странах мира с развитым орошаемым земледелием. Ташкент: ФАН, 1991. 116 с.

11. Филимонова Е.А. Гидрогеодинамическое обоснование комбинированного использования водных ресурсов. Автореферат дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2010, 26 с.

12. Фулян Ю. Совместное использование поверхностных и подземных вод для повышения надежности водоснабжения (на примере Волжского источника водоснабжения Москвы). Автореферат дисс. на соискание ученой степени к.г.-м.н. М.1995, 26 с.

13. Downing R. A. Groundwater resources, their development and management in the UK an historical perspective // Quarterly J. of Engineer. Geol.1993. no 26. 335-358.

14. Law F. Integrated use of diverse sources// J. Inst. Water Engrs, 19. 1965. 413–457.

15. Maknoon R, Burges S.J. Conjunctive use of ground and surface water // American Water Works Association. 1978. Vol.70. No. 8. P. 419-424.

16. Owen M., Robinson V.K. Characteristics and yield in fissured Chalk. In: Thames Groundwater Scheme. Institution of Civil Engineers. 1978. 33–49.

17. Reeves. M. J. A Preliminary Study of the Relationship Between Cost and Well-field Design in the Great Ouse Chalk Groundwater Development. Technical Note No 4. Central Water Planning Unit, Reading. 1974.

18. Young R.A., Bregehoft J.D. Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive use of ground and surface water // Water Resour. Res 1972. Vol. 8, no. 3. 533-556.