

УДК 628.1

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ПОПОЛНЕНИЯ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Д.П. Халимов

Рассмотрен опыт использования систем искусственного пополнения запасов подземных вод в ряде зарубежных стран.

Ключевые слова: искусственное пополнение запасов подземных вод (ИПЗ); скважинные схемы ИПЗ; сырая вода; вода пополнения; восстановленная вода.

INTERNATIONAL EXPERIENCE OF ARTIFICIAL RECHARGE AND RECOVERY

D.P. Khalimov

The article discusses the international experience of using Artificial Recharge in the some foreign countries.

Keywords: Artificial Recharge and Recovery (AR); ASR; raw water; recharge water; recovery water.

Под искусственным пополнением запасов подземных вод (ИПЗ) понимается подача воды извне в подземные водоносные горизонты с помощью специально предпринятых инженерных мероприятий. Искусственное пополнение запасов подземных вод (ИПЗ) – это не совсем новая концепция для большинства зарубежных стран. В Европе схемы искусственных подпиток подземных вод эксплуатируются уже на протяжении более сотни лет. Наиболее развиты такие системы в странах Западной Европы (Германия, Нидерланды, Швеция), а также в США, Израиле, Австралии, Южно-Африканской Республике, Индии и др. В странах западной Европы, как правило, используются сооружения береговой инфильтрации (в основном в Германии) и инфильтрационные бассейны (Нидерланды, Швеция и др.). В США, Австралии, Израиле наиболее развиты и широко применяются скважинные схемы пополнения запасов подземных вод, в которых поверхностные воды подаются в подземные водоносные слои через специальные водопоглощающие или нагнетательные скважины.

При анализе публикаций зарубежных материалов по ИПЗ прослеживаются четыре тенденции использования схем ИПЗ [1–3]:

1) использование схем ИПЗ для решения неотложных текущих задач с целью обеспечения питьевой водой населения и водоснабжения промышленных предприятий на территориях,

где наблюдается нехватка естественных запасов подземных водных ресурсов;

2) некоторые экономически развитые страны, даже имеющие значительные водные ресурсы, используют ИПЗ не только для подачи недостающего в настоящее время объема воды, но и технологию ИПЗ для создания и накопления стратегических запасов воды на будущее, на случай непредвиденных засух, и других климатических, экономических и политических катаклизмов, с тем, чтобы обеспечить устойчивое водоснабжение своих территорий. Это называется еще резервированием или банкингом воды;

3) на прибрежных территориях схемы ИПЗ используются для создания подземных водяных защитных экранов-барьеров с целью недопущения проникновения соленых морских вод в скважины с пресной водой;

4) с ростом дефицита воды и ее стоимости в технологии разведки, поиска и оценки запасов подземных вод с целью использования их в схемах ИПЗ все шире применяются более совершенные и дорогие методы и технологии, используемые в нефте- и газодобыче, что значительно улучшает проекты использования схем ИПЗ.

США. Страна имеет долгую историю, как в использовании схем поверхностной инфильтрации, так и схем подземного нагнетания [1].

В последние два десятилетия в США издано множество учебников, руководящих документов, регламентов, проводятся различные исследования в этой области. В стране течение последних 20 лет произошло заметное увеличение числа скважинных схем ИПЗ. Если в 1985 г. было всего три схемы скважинных ИПЗ, то к 2014 г. их стало 204.

Наряду с увеличением скважинных схем в США также наблюдается сдвиг в сторону роста схем ИПЗ для решения крупных региональных проблем, а не обустройства отдельных единичных скважин для небольших локальных потребностей. Мощности проектов становятся все больше, как например, в местечке Эверглейдс во Флориде, где создано 330 скважин общей мощностью 6,4 тыс. м³/сут.; Нью-Йорке – мощность ИПЗ 0,85 тыс. м³/сут.; Калифорнии – 0,23 тыс. м³/сут.; Сан-Антонио, Техасе – 0,23 тыс. м³/сут. Типичной схемой использования сооружений ИПЗ является скважинная схема ИПЗ из реки Мирная, штат Флорида (рисунок 1, таблица 1) [1].

По данным Американской ассоциации водоснабжения [1] большинство схем используется, в основном, для муниципального водоснабжения – 94 %, для полива площадок для гольфа – 4 %, для промышленного водоснабжения и охлаждения технологического оборудования – 2 %.

По срокам хранения наполняемых вод в подземном слое в основном выделяются два периода: сезонное – 28 %, многолетнее – 15 % или их сочетание – 57 %. Исследования показали, что большинство организаций, эксплуатирующих сооружения ИПЗ, довольны их работой и качеством поставляемой воды (89 %). В большинстве случаев источником водоснабжения являются поверхностные воды, которые используются как отдельно – 7 %, подземные воды составляют 22 %, совместные поверхностные и подземные – 60 %. Во многих схемах ИПЗ сырая вода подается для искусственного пополнения запасов подземных вод без предварительной очистки. Для предварительной очистки сырой воды, как правило, применяются два метода – обеззараживание и регулирование показателя состава рН исходной воды, как по отдельности для каждого показателя так и совместно для обоих показателей. В ряде случаев (43 %) применяется повторная очистка уже извлеченной из подземного водоносного слоя восстановленной воды перед ее подачей потребителю. В основном это обеззараживание, снижение содержания железа, марганца и регулирование рН воды.

Германия. Берлин снабжается искусственным восполнением подземных вод с 1916 г.; Висбаден – с 1921 г.; Гамбург – с 1928 г. [5]. В Германии боль-

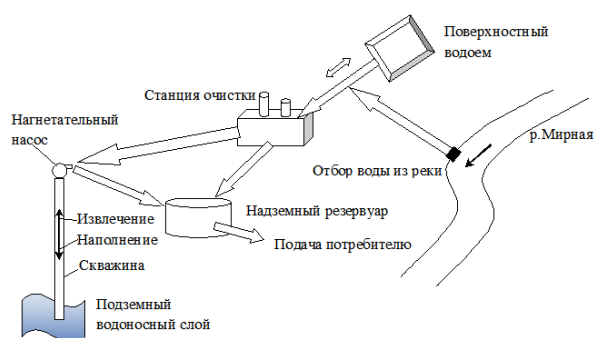


Рисунок 1 – Схема сооружений искусственного пополнения запасов подземных вод на р. Мирная, штат Флорида

шинство схем основаны на береговой фильтрации, которая используется вдоль рек Рейн, Майн, Эльба и рек области Рур. Около 15 % всей питьевой воды Германии получены через искусственное восполнение подземных вод.

Главной целью схем и сооружений искусственного пополнения запасов подземных вод является питьевое водоснабжение (54 % от общего использования), но есть также несколько схем (около 2 %), которые используются для сохранения заболоченных мест, поддержания уровней воды в озерах и восстановления грунтовых вод. Использование схем ИПЗ по сравнению с водой, непосредственно взятой из рек, наиболее предпочтительно, так как подземная вода лучше защищена от большинства типов загрязнений, имеет относительно постоянное качество и температуру, и расход извлекаемой подземной воды может быть легко увязан с колебаниями в водопотреблении. Поверхностные воды в промышленно развитой Германии, особенно воды открытых рек, озер подвержены и постоянной опасности внезапного загрязнения из-за возможного попадания в них промышленных сбросов и сточных вод. Возможны также нарушения качества вод при хранении обрабатываемых поверхностных вод в отстойниках, резервуарах, при транспортировке и т. д. Для предотвращения всех этих опасных ситуаций в Германии широко применяют береговую инфильтрацию путем устройства скважин или дрен рядом с рекой, озером и забирают через эти скважины подземную воду, которая, в свою очередь, пополняется инфильтрационными водами рек и озер. В процессе инфильтрации вода рек и озер очищается за счет прохождения через почву и грунты, от дна водоемов до подземного водоносного слоя, и попадает в подземный слой уже предварительно частично очищенной.

Таблица 1 – Основные характеристики схемы ИПЗ из р. Мирная, штат Флорида [4]

Схема	Река Мирная	
Назначение	Основное: сезонное регулирование Второстепенное: создание банка воды (резервирование вод)	
Подземный водоносный слой	2 известняковых водоносных слоя Верхний: на глубине 122–155 м (толщина слоя 30 м) проницаемость 450 м ² /сут.; упругоёмкость пласта: 0,0004 Нижний: на глубине 174–274 м (толщина слоя 100 м) проницаемость 560 м ² /сут.; упругоёмкость пласта: 0,0001	
Водоисточник	Р. Мирная. Изменяющиеся расходы и качество речной воды не позволяют производить отбор из реки в течение до 7 мес. в году. Поверхностная вода поступает в подземный водоносный слой и хранится там для покрытия недостатка воды в эти 7 мес.	
Предварительная очистка	Речная вода предварительно очищается до требований использования ее для хозяйственно-бытовых целей	
Качество	Сырая речная вода (средняя) электропроводность щёлочность (CaCO ₃ , мг/л) 50	Подземная вода (средняя) электропроводность щёлочность (CaCO ₃ , мг/л) 143
Нагнетание/восстановленная мощность	Нагнетание и мощность извлечения на 1 скваж.: 2000–4000 м ³ /сут. (87–167 м ³ /час)	
История схем нагнетание/восстановленная мощность	На главных участках схемы ИПЗ в течение 19 лет создано 6400 млн м ³ объемов хранения (81 % от планируемого объема)	
Решение проблем засорения нагнетательных скважин	Сезонная обратная промывка скважин	
Коэффициент восстановления	100 %	
Этапы внедрения схемы	1985 г.: 2 нагнетательные скважины (≈6000 м ³ /сут.) 1988 г.: дополнительные 4 нагнетат. скваж. (≈18000 м ³ /сут.) 2005 г.: в целом 21 нагнетат. скваж. (общая восстанов-я мощность ≈ 68000 м ³ /сут.)	
Основные возможности и проблемы	С отказом от необходимости расширения поверхностного водохранилища и полаганием на ИПЗ вместо поверхностного хранения воды, ожидается удовлетворение региональных потребностей воды и экономия, по крайней мере, половины капитальных затрат по сравнению с другими вариантами водоснабжения. Недавно возросшие концентрации мышьяка (на некоторых участках) привели к необходимости повторной очистки и исследованиям по выявлению путей снижения мышьяка на других участках. Достигнуто снижение его концентрации	
Процесс планирования	Планирование водоснабжения позволило внедрить поэтапный подход, что обеспечивает долгосрочную устойчивость (включая реализацию мер по охране воды). Цель – заложение под землю на хранение излишек воды во время высокого речного стока и отбора этой воды из реки в засушливые месяцы	

Нидерланды. Искусственное восполнение подземных вод началось в небольших размерах еще в 1940 г. путем инфильтрации поверхностных вод в безнапорные водоносные слои, чтобы противодействовать понижению уровня подземных вод. Крупномасштабные проекты были начаты в 1950-х гг. с целью водоснабжения густозаселенных районов вдоль побережья Северного моря [1].

Добыча подземных вод в этих районах ограничена из-за их засоления вторгающимися морскими водами, и общего понижения горизонта подземных вод. Объемы искусственно пополняемых вод в 1990 г. достигали 180 млн м³, а их добыча составила 22 % от общей потребности страны в целом. Амстердам получает 60 % питьевой воды от сооружений искусственного пополнения

запасов подземных вод, расположенных в области песчаных дюн. Схема искусственного пополнения запасов подземных вод включает в себя очищенные речные воды, распределяемые через более чем 40 поверхностных водоемов подпитки подземных вод, расположенных на 86 га земли. Скорость инфильтрации составляет около 0,2 м/сут., и время их прохождения от поверхностных водоемов до подземных вод составляет в среднем 90 дней. Вода забирается обратно через дренажи и открытые каналы, расположенные на расстоянии около 60 м от инфильтрационных бассейнов.

Для передачи поверхностных вод в более глубокие водоносные слои используются нагнетательные буровые скважины. При использовании скважинных схем были решены проблемы засорения скважин и оптимизированы эксплуатационные процедуры, как-то:

- обеспечение непрерывной поставки питьевой воды;
- предотвращение на прибрежных территориях вторжения соленых вод в области интенсивной добычи пресных подземных вод;
- обеспечение очистки поверхностных вод во время их инфильтрации через подстилающие грунты оснований инфильтрационных бассейнов;
- устранение экологических опасностей, вызываемых понижением уровня подземных вод из-за их интенсивной откачки для водоснабжения.

Австралия. Искусственное восполнение не новое понятие и для Австралии. Впервые оно было осуществлено более ста лет назад в местечке Маунт-Гамбиер в южной Австралии [1]. Этот небольшой городок собирает все свои атмосферные осадки и направляет их в нижележащие подземные карстовые водоносные слои, используя для этого более чем 300 дренажных колодцев, которые разбросаны по всей территории города. Ежегодное восполнение подземных вод таким способом составляет от 3,6 до 6,2 млн м³. Затем эти воды перемещаются под землей к соседнему озеру, откуда они забираются для повторного использования. В последние годы в Австралии проводятся значительные исследования в области ИПЗ. Они сосредоточены главным образом на исследовании качества воды и микробиологических изменениях, которые происходят после смешивания подземных и поверхностных вод, а также в процессе их дальнейшего хранения. Главная часть этих исследований связана с использованием вод более низкого качества, таких как атмосферные воды, путем добавления в них вод рек и очищенных сточных вод. В 2002 г. в стране было 25 проектов ИПЗ, которые

эксплуатировались или находились в разработке. В большинстве случаев они были направлены на использование вод атмосферных осадков и/или очищенных сточных вод в целях использования их для нужд ирригации. Установлено, что для ряда схем использования ИПЗ в Австралии может быть допустимо некоторое ухудшение подземного водоносного слоя из-за нагнетания в них вод непитьевого качества.

Примером поверхностной инфильтрации является схема в Бурдекин Дельта, которая является самой старой и самой большой инфильтрационной схемой в Австралии. Схема работает с середины 1960-х гг. и в значительной степени способствовала развитию промышленности выращивания сахарного тростника. Схема ИПЗ использовалась и для предотвращения вторжения морских вод в подземные пресные водоносные слои. Схема искусственного восполнения управляется специальным Советом по воде. Общая схема ИПЗ состоит из естественных и искусственных каналов и водоемов восполнения, которые снабжаются водой, взятой из реки Бурдекин. Орошаемая пахотная земля обслуживается водой из 2000 эксплуатационных буровых скважин, которые выдают от 210 до 530 млн м³ воды ежегодно. Австралия не только осуществляет инновационные схемы ИПЗ, но также проводит серьезные научные исследования. Ряд таких схем используется в Аделаиде, где городские поверхностные стоки направляются в недавно образовавшиеся заболоченные места, которые служат в качестве мест очистки городского поверхностного стока перед их нагнетанием в подземные воды. Эта вода затем в безводный период извлекается из-под земли для целей ирригации. Таким образом, подобные схемы гарантируют, что для целей ирригации не будут использованы чистые питьевые воды.

Израиль. Израиль – страна с крайне ограниченными водными запасами [5]. Ежегодные естественно возобновляемые водные ресурсы составляют приблизительно 1,7 млрд м³, а ежегодная потребность в воде составляет около двух млрд м³, из которых приблизительно половина используется для сельского хозяйства, а остальная часть используется жителями и промышленным сектором. Все израильские поселения снабжаются водой из единой общественной Всеизраильской водопроводной сети, поставляющей в среднем приблизительно 250 л воды в сутки на 1 человека. Управляет Всеизраильской водопроводной сетью государственная кампания Мекорот. Сеть имеет более 12000 км водопроводных труб, 1050 скважинных колодцев, 13 станций очистки сточных вод и центров по вторичному использованию очищенных вод,

35 предприятий с опреснительными установками для морских вод. Этот водопровод поставляет 70 % общего объема воды полного водопотребления, в том числе 80 % питьевой воды. Более 60 % мероприятий по ИПЗ проводит кампания Мекорот. Около 95 % из общего объема использованных сточных вод собирается, и приблизительно 80 % соответствующим образом очищается и в большинстве случаев используется повторно для нужд ирригации (42 %). В настоящее время городской сектор потребляет приблизительно 700 млн м³, ежегодный прирост составляет приблизительно 20 млн м³ ежегодно, рост примерно на 4 %.

Предполагается, что население Израиля к 2020 г. увеличится до 8,5 млн, и потребление воды в городском секторе приблизится к одному млрд м³. К этому стоит добавить, что по статистике в среднем в каждые 3 из 5 лет в Израиле случается засуха, подземные источники начинают опустошаться быстрее, чем они успевают естественно пополняться, и страна переходит в режим строгой экономии воды. Больше половины территории Израиля (65 %) занимает пустыня Негев, в которой ежегодно выпадает не более 35 мм осадков; на севере же страны может выпадать в среднем 700 мм осадков за год. В виду острой нехватки естественных источников воды Израиль стремится использовать и эти скудные дождевые осадки в виде источников питьевой воды. Сезон дождей длится с ноября по апрель, однако в засушливые годы его может и не быть. В сезон дождей осадки собирают и нагнетают под землю в схемы ИПЗ, а затем в сухой сезон используют их. С целью увеличения количества дождей в течение почти 30 лет Израиль проводит работы по искусственному влиянию на облака для вызова атмосферных осадков, это привело к увеличению ливней на 10–15 %.

Большие объемы извлечения подземных вод вызвали понижение уровней грунтовых вод и, как следствие, это резко повлияло на водные ключи и родники. Например, родник Яркон высох после предыдущего отбора в 220 млн м³/год, и общий годовой расход родника Таниним уменьшился с 110 млн м³/год до 30 млн м³/год [1].

В стране объемы искусственного пополнения колебались от максимального 62 млн м³/год, до минимального – 4 млн м³/год, в зависимости от наличия естественных источников начальной или сырой воды, используемой для пополнения

запасов подземных вод. В среднем, 26 млн м³/год, или 7,5 % свыше среднего естественного пополнения было искусственно восполнено за 23-летний период к 1993 г. Одна из самых больших искусственных схем искусственного восполнения водных ресурсов в Израиле – это проект района Дэна, в котором подземный водоносный слой используется как место, или среда для улучшения качества сточных вод г. Тель-Авив. Восстановленная под землей вода используется затем для ирригации и за пятилетний период (1991–1996 гг.) таким путем было предоставлено около 400 млн м³ воды.

Есть также и другие системы искусственного пополнения подземных вод, включая проект Негев к северу от Тель-Авива. Это схема использует речные стоки, где система стока трех рек перехватывается и подается каналом в специальный отстойник, а затем вода выпускается в бассейны ИПЗ для схем повторного использования в прибрежных дюнах. Подобные проекты существуют в южных пустынных областях.

Таким образом, во многих странах применяются схемы искусственного пополнения запасов подземных вод. Проблемы уменьшения запасов подземных вод и нехватка пресной питьевой воды становятся все более острыми, поэтому весьма актуально изучение передового зарубежного опыта в области использования схем ИПЗ для решения или смягчения этих проблем путем искусственного пополнения и увеличения запасов природных подземных вод.

Литература

1. *Dr Murray R.* Artificial Recharge: The intentional banking and treating of water in aquifers / R. Murray, 2008. Pretoria, South Africa.
2. *Блэк Бил.* Ценные ресурсы: управление использованием подземных вод / Бил. Блэк. Ванкувер, Канада, комп. Shlumberger, 2008.
3. Lessons Learned from Aquifer Storage and Recovery (ASR) Systems in the United States // Journ. of Water Resource and Protection. 2014. № 6. P. 1603–1629.
4. http://www.regionalwater.org/page_id=1198. Peace River Facility. Karlsruhe Stra.e 84, D-76139 Karlsruhe, Germany.
5. *Левин М.И.* Вода – как исчерпаемый ресурс: пример Израиля / М.И. Левин, Н.В. Шилова. М., 2009.