

На правах рукописи

Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али

ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ ЙЕМЕН

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2007

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Российского государственного гидрометеорологического университета

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор  
Фрумин Григорий Тевелевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Арсеньев Герман Семенович

доктор географических наук  
Рянжин Сергей Валентинович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

Защита состоится «\_\_\_\_» апреля 2007 г. в \_\_\_\_ часов \_\_\_\_ минут на  
Заседании диссертационного совета Д 212.197.03 в Российском  
государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196,  
Санкт-Петербург, пр. Металлистов, д.3, аудитория 406<sup>б</sup>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
государственного гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ марта 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Бескид П.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Проблемы, связанные с потреблением воды и ее дефицитом, настолько обострились в последние десятилетия, что стали рассматриваться как одно из самых значимых свидетельств общего кризиса цивилизации. Они являются фактором, сдерживающим развитие многих стран, источником межгосударственных конфликтов и нестабильности. Дефицит воды снижает качество жизни, наряду с бедностью, становится причиной антисанитарии и роста заболеваемости населения. Пресная вода стремительно превращается в дефицитный природный ресурс. За XX столетие ее потребление увеличилось в 7 раз, тогда как население планеты выросло втрое. Не случайно ООН объявляла 2003 год Международным годом пресной воды.

Особым регионом является Ближний Восток, или Западная Азия, где сосредоточены все характерные для континента водные проблемы - в силу природных условий здесь существует водный голод, который усугубляется быстрым ростом населения и ростом экономики. Изложенное в полной мере относится и к Республике Йемен, где располагаемые к использованию водные ресурсы неуклонно снижаются. Об этом свидетельствует, в частности, динамика индекса напряженности водных ресурсов, возрастающая по экспоненте (рис. 1).

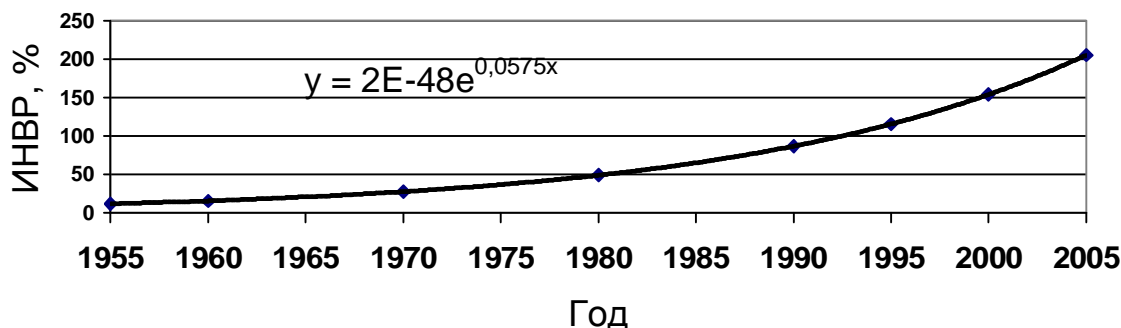


Рис. 1. Динамика индекса напряженности водных ресурсов в Республике Йемен

Индекс напряженности водных ресурсов (ИНВР) в Республике Йемен рассчитан нами как отношение водопотребления к обновляемому объему воды:

$$\text{ИНВР} = \frac{140 \cdot 10^6 \cdot \exp(1,393 + 0,0286 \cdot \text{условный год})}{10^9 \cdot 5,62 \cdot \exp(-0,0289 \cdot \text{условный год})} \quad (1)$$

В числителе формулы (1) приведено выражение для расчета объема водопотребления, за условный год был принят 1950г. (числовое значение равно нулю). В знаменателе формулы (1) приведено выражение для расчета объема обновляемых запасов воды, за условный год был принят 1955г. (числовое значение равно нулю).

Возобновляемые водные ресурсы в Йемене стремительно уменьшаются (с 5,6 км<sup>3</sup> в 1955г до 1,3 км<sup>3</sup> в 2005г.), а индекс напряженности водных ресурсов стремительно возрастает (с 11,6% в 1955г. до 205,1% в 2005г.). Таким образом, обеспечение народного хозяйства и бытовых нужд населения водой является одной из острейших проблем в Республике Йемен. Только 35% населения Йемена получают воду, пригодную для питья. В городах этот показатель составляет около 74%, в сельской местности – около 14%. Последствия использования некачественной воды весьма трагичны. Около 70% смертей детей в грудном возрасте вызвано различными заболеваниями, получаемыми через воду.

Основными причинами водного кризиса в Республике Йемен является постоянно возрастающий спрос на воду в результате роста населения (по темпам роста населения Йемен занимает пятое место в мире, опережая все другие страны Азии – 3,42% в год), расширения площадей сельскохозяйственных угодий, требующих искусственного орошения, отсутствие со стороны государственных служб контроля за процессами извлечения и потребления подземных вод.

Сложность решения проблемы водообеспечения в Республике Йемен обусловлена следующими причинами:

1. Практическим отсутствием поверхностных вод суши (озер, рек).
2. Большой численностью населения (18349000 человек в 2000 г.).
3. Высоким показателем среднегодового прироста населения (4,1% в 2000-2005 гг.).
4. Невысоким процентом городского населения (25% в 2000 г.) и значительной долей «рассеянного населения».
5. Невысоким уровнем экономического развития (внутренний валовой продукт, рассчитанный по параметру покупательной способности, в 2000 г. составлял 14400 млн. US \$).
6. Небольшим количеством производимой и потребляемой энергии (в 2001 г. ежегодное производство энергии – 3010 млн. кВт·ч, а потребление энергии составляло 2800 млн. кВт·ч).
7. Крайне неравномерным распределением осадков по территории республики и не увязкой их с районами максимального водопотребления.

В связи с изложенным всесторонний анализ проблемы водообеспечения в Республике Йемен представляет собой **актуальную задачу**, так как при успешном ее решении оказывается возможным выявить основные причины дефицита пресной воды, провести необходимые природоохранные мероприятия и разработать систему рационального управления водными ресурсами.

**Цель диссертационного исследования** состояла в обосновании путей совершенствования водообеспечения в Республике Йемен на основе экологически безопасных технологий с учетом климатических особенностей и природных ресурсов.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

- собрать, обобщить и проанализировать данные литературы о современном состоянии водообеспечения в Республике Йемен;

- рассчитать водохозяйственный баланс Республики Йемен;
- обосновать комплекс экологически безопасных технологий водообеспечения в республике с учетом климатических и природных условий;
- разработать рекомендации о путях совершенствования водной политики.

#### **Научная новизна работы.**

1. Предложена методика определения индекса напряженности водных ресурсов в Республике Йемен. Показано, что индекс напряженности водных ресурсов в Республике Йемен возрастает по экспоненциальному закону, что обусловлено ростом народонаселения, возрастанием антропогенной нагрузки на окружающую среду, а также ростом промышленного и сельскохозяйственного потребления водных ресурсов.
2. Впервые проведен комплексный анализ возможных путей решения проблемы экологически безопасного водообеспечения в Республике Йемен. Предложены и обоснованы экологически безопасные технологии водообеспечения, включающие повторное использование воды (очистка сточных вод), переход на современные методы орошения (капельное орошение), экологически безопасное опреснение морских вод методом гелиоопреснения, получение пресной воды из атмосферного воздуха и утилизация дождевых осадков с помощью подземных наливных резервуаров, устанавливаемых в западной части Йемена вдоль вади (высохших русел рек).
3. Получены математические зависимости для расчета удельных производительностей гелиоопреснителей, учитывающая интенсивность солнечной радиации и температуру испарения морской воды. Определены площади гелиоопреснителей, обеспечивающие в течение года выработку питьевой воды в городах Сана, Ходейда и Таиз.
4. Предложена методика расчета возможного покрытия дефицита пресной воды путем установки экологически безопасных подземных наливных резервуаров. Обоснованы оптимальные размеры цилиндрических наливных резервуаров, обеспечивающие минимальные расходы конструкционных материалов (равенство высоты резервуара его радиусу).

**Практическая значимость.** Полученные в диссертации теоретические и математические результаты позволяют:

- осуществлять текущую оценку состояния водообеспечения в Республике Йемен, а также выработать рекомендации по развитию и совершенствованию политики экологически безопасного водообеспечения;
- осуществлять и внедрять технически реализуемые и экологически безопасные технологии водообеспечения, позволяющие ликвидировать дефицит пресной воды в Республике Йемен.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Методика оценки индекса напряженности водных ресурсов в Республике Йемен.

2. Основные направления совершенствования водообеспечения в Республике Йемен, учитывающие ее климатические особенности, природные и экономические ресурсы.
3. Экологически безопасные технологии водообеспечения в Республике Йемен.
4. Математические зависимости для расчета параметров гелиоопреснителей и наливных резервуаров.

**Достоверность** научных положений и выводов обусловлена критическим анализом большого количества литературных источников и применением современных методов математико-статистической обработки данных.

**Личный вклад автора** заключается в постановке проблемы, методическом обеспечении ее решения и анализе полученных результатов.

**Апробация работы.** Результаты исследования докладывались и обсуждались на: Международном семинаре «Историческая геология и эволюционная география» (Санкт-Петербург, 2002г.), на LVII Герценовских чтениях в Российском государственном педагогическом университете им. А.И. Герцена (Санкт-Петербург, 2004г.), на итоговых сессиях Ученого Совета Российского Государственного гидрометеорологического университета (Санкт-Петербург, 2005г., 2006г.); на Международной научной конференции «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» (Санкт-Петербург, 25-27 мая 2005г.), на научном семинаре кафедры физической географии и природопользования в Государственном педагогическом университете им. А.И. Герцена (Санкт-Петербург, 14 февраля 2007г.). Материалы изложены в 7 публикациях, в том числе в журнале «Морской вестник», рекомендованный ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, включает 42 таблицы, 50 рисунков. Список литературы содержит 108 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе «Материалы и методы исследования»** даны общие ссылки на исходные литературные источники (Центральное статистическое управление Республики Йемен, Российские и зарубежные монографии и журнальные статьи, Большая энциклопедия «Кирилл и Мефодия» (2003г.). Конкретные ссылки на эти литературные источники приведены в соответствующих разделах диссертации. Для математико-статистической обработки данных были использованы пакет статистических программ Statistica 5.5. и табличный процессор Microsoft Excel.

Во **второй главе «Физико-географическое описание Республики Йемен»** приведен анализ данных о географическом положении республики

(рис.2.), климатических особенностях, демографических показателях, отраслях экономики, энергетике и водных ресурсах.

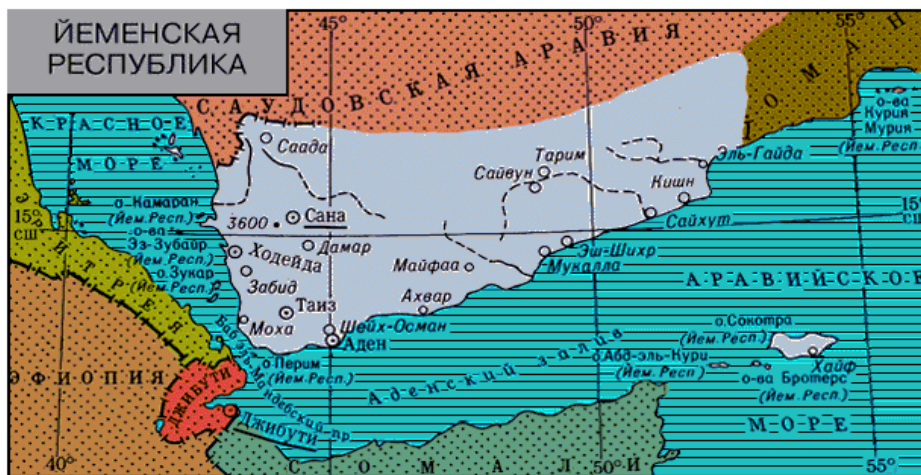


Рис. 2. Карта-схема географического положения Республики Йемен

Объем выпадающих осадков в Республике Йемен за год составляет около 60 млрд. куб. м. Наибольшее количество осадков выпадает в горных районах. Самый дождливый месяц август, сухой период с ноября по январь.

Для составления водохозяйственного баланса были выявлены количественные зависимости между среднегодовыми осадками ( $P$ ), среднегодовым испарением ( $I$ ) и высотой над уровнем моря ( $E$ ). Для этой цели были использованы первичные данные, приведенные в работе [Нуман Салим, 1998]. Для получения статистически значимых регрессионных уравнений весь массив данных был разбит на три группы. В первую группу были включены данные об осадках и испарении для территорий, расположенных на высоте над уровнем моря, меньшем 300 м; вторая группа территорий располагается на высотах, больших 1000 м и меньших 2000 м; третья группа территорий располагается на высотах, больших 2000 м. Результаты проведенного нами анализа, представленные в табл.1, свидетельствуют о наличии тесных корреляционных связей между рассмотренными переменными. Кроме того, все выявленные зависимости статистически значимы, так как  $F_p > F_T$  ( $F_p$  и  $F_T$  – расчетное и табличное значения критерия Фишера).

Линейные регрессионные уравнения, приведенные в табл. 1., позволяют, по крайней мере в первом приближении, рассчитывать водный баланс для различных территорий Республики Йемен. Зная высоту местности над уровнем моря, представляется возможным рассчитать количество осадков и испарение. В свою очередь разность этих величин позволяет рассчитать климатический сток ( $R$ ). Проведенные нами расчеты показали, что наибольшие величины стока характерны для территорий, расположенных над уровнем моря на высотах, больших 2000 м.

Таблица 1. Количественные соотношения между количеством осадков (Р), испарением (И) и высотой над уровнем моря (Е)

Высота над уровнем моря, Е, м	Осадки, Р, мм	Испарение, И, мм
$E < 300$	$P = 6,4 + 1,2 \cdot E$ $N = 7; r = 0,86; r^2 = 0,74;$ $\sigma_{Y(X)} = 62,1; F_P = 14,5;$ $F_T = 5,99$	$I = 1,9 + 1,2 \cdot E$ $N = 7; r = 0,87; r^2 = 0,75;$ $\sigma_{Y(X)} = 60,2; F_P = 15,1;$ $F_T = 5,99$
$1000 < E < 2000$	$P = -493 + 0,6 \cdot E$ $N = 6; r = 0,84; r^2 = 0,70;$ $\sigma_{Y(X)} = 104,9; F_P = 9,3;$ $F_T = 6,6$	$I = -464 + 0,6 \cdot E$ $N = 6; r = 0,83; r^2 = 0,68;$ $\sigma_{Y(X)} = 103,2; F_P = 8,7;$ $F_T = 6,6$
$E > 2000$	$P = -898 + 0,5 \cdot E$ $N = 5; r = 0,93; r^2 = 0,87;$ $\sigma_{Y(X)} = 35,5; F_P = 20,1;$ $F_T = 7,7$	$I = -548 + 0,3 \cdot E$ $N = 5; r = 0,92; r^2 = 0,84;$ $\sigma_{Y(X)} = 26,7; F_P = 15,8;$ $F_T = 7,7$

Линия регрессии, связывающая величину стока (R, мм) с количеством осадков (Р, мм), описывается следующим статистически значимым уравнением:

$$\ln R = 0,81 + 0,0063 \cdot P \quad (2)$$

$$N = 18; r = 0,73; r^2 = 0,53; \sigma_{Y(X)} = 0,83; F_P = 18,1; F_T = 4,45; F_P / F_T = 4,07$$

Статистическая обработка первичных данных позволила установить, что динамика численности населения Республики Йемен с 1950г. по 2000г. описывается экспоненциальным законом (рис.3.).

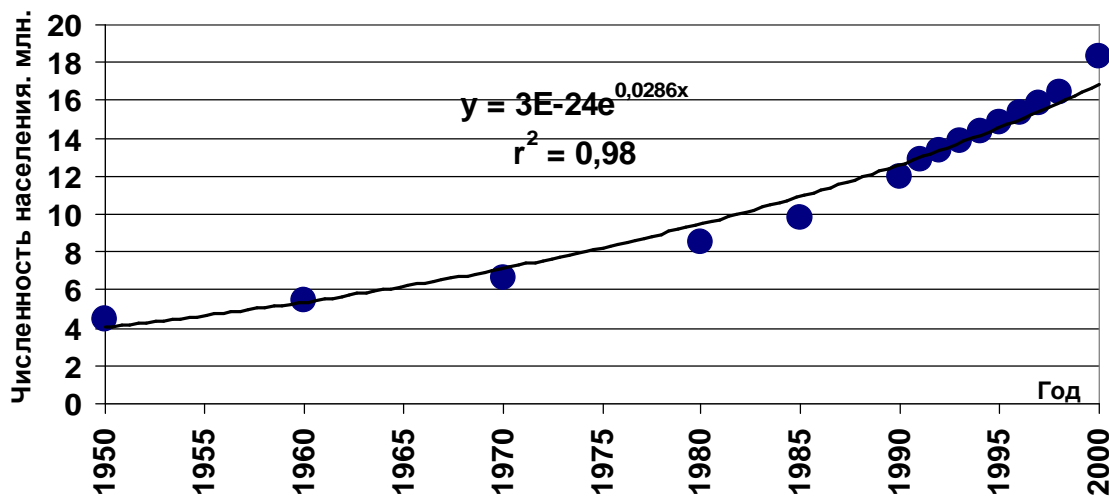


Рис. 3. Динамика численности населения в Республике Йемен



Динамика производства электроэнергии в Йемене характеризуется значительным ростом с 1967 г. по 1994 г. и резким падением в последующие годы (рис. 4.).

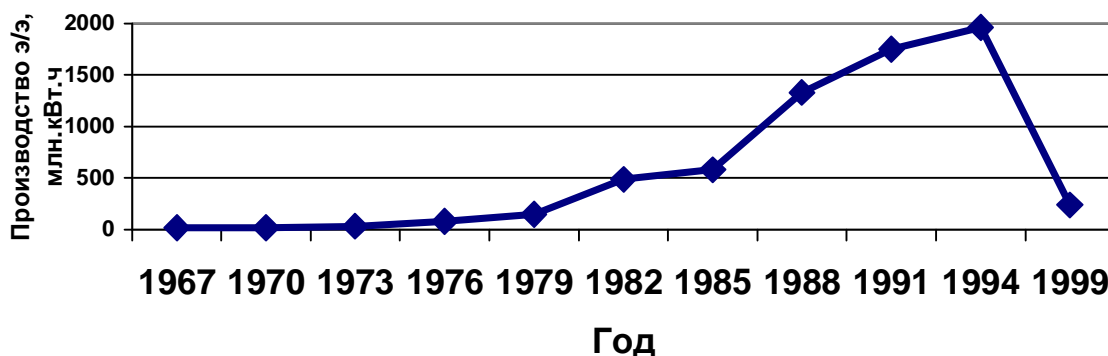


Рис. 4. Динамика производства электроэнергии в Республике Йемен

Обобщение изложенного в данной главе привело к выводу, что в настоящее время Республика Йемен характеризуется высокими темпами естественного прироста населения (4,1%), низкой энерговооруженностью (количество электроэнергии на душу населения 150,3 кВт·ч), незначительным количеством осадков (в среднем не более 100 мм в год) и отсутствием поверхностных вод суши. Быстрый рост населения и экономическое развитие в таких условиях все время усиливают нехватку воды, что грозит «водным голодом».

**В третьей главе «Состояние окружающей среды в Республике Йемен»** рассмотрены система геоэкологического мониторинга в Йемене (становление и современное состояние), динамика антропогенного воздействия на территорию республики, состояние воздушного бассейна, подземных вод и морских акваторий. Отмечено, что создание гидрометеорологических станций и постов в Йемена велось по индивидуальным проектам и не корректировалось государственными службами. В связи с этим, сеть этих станций и постов на территории страны расположена крайне неравномерно и не всегда научно обоснована.

Регулярные наблюдения за количеством выпадающих осадков в Йемене начались лишь с 1960 г. и только на семи станциях. Большинство же станций и осадкомерных постов начали функционировать только в конце 70-х – начале 80-х годов прошлого века. К настоящему времени в Йемене насчитывается 31 гидрометеорологическая станция и 84 поста. Однако наблюдения на многих станциях и постах ведутся не систематически и имеют прерывистые ряды данных. Так, из всех гидрологических постов наблюдения сейчас проводятся лишь на тридцати. Однако, большая часть постов не включена в единую гидрологическую службу, а принадлежит разным организациям, в результате чего отсутствует корреляция данных, получаемых на разных постах.

До настоящего времени в Йемене не существует единой гидрологической службы, призванной осуществлять систематические

наблюдения за речным стоком. Функционирующие гидрологические посты имеют ведомственную принадлежность, создавались они, как правило, для оценки различных характеристик стока при осуществлении каких-то конкретных проектов. Наблюдения на них проводились, обычно, непродолжительное время и часто прерывались. Во многих случаях гидрометеорологические измерения на метеостанциях и гидрологических постах чаще всего проводились в пределах лишь какого-то одного определенного бассейна в течение лишь нескольких лет. Затем здесь наблюдения прекращались, и посты перемещались в другой бассейн.

Оценка динамики антропогенного воздействия на территорию Республики Йемен, а также на отдельные города (области) этой республики было проведено в три этапа. На первом этапе было выявлено соотношение между коэффициентами антропогенного воздействия ( $K$ ) на территории десяти стран Азии и плотностью населения (ПН):

$$K^* = 0,33(\text{ПН}^*)^{1,27} = 0,33(\text{ПН}/41,6)^{1,27} \quad (3)$$

Расчет безразмерной величины плотности населения  $\text{ПН}^*$  проводили по формуле

$$\text{ПН}^* = \text{ПН}/41,6 \quad (4)$$

Здесь ПН – фактическая плотность населения, человек.км<sup>-2</sup>; 41,6 – среднемировая плотность населения, человек.км<sup>-2</sup>.

На втором этапе была проведена оценка динамики антропогенного воздействия на территорию Республики Йемен с 1990г. по 2003г. Было установлено, что за период с 1950г. по 2003г. коэффициент антропогенного воздействия на территорию Республики Йемен вырос в 7,5 раз, что обусловлено высокими темпами увеличения населения (рис. 5).

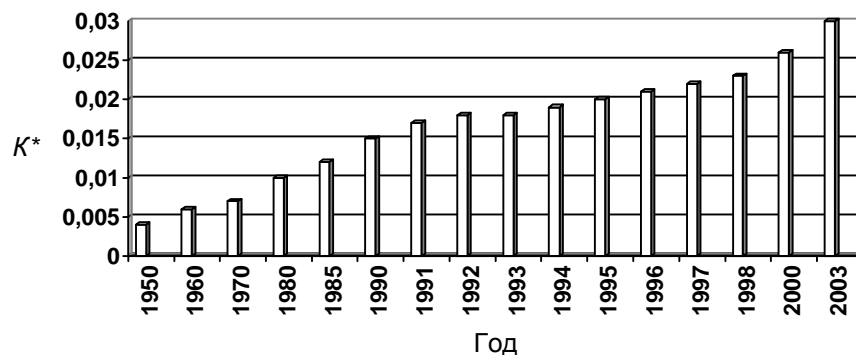


Рис. 5. Динамика коэффициентов антропогенного воздействия на территорию Республики Йемен

На третьем этапе исследования были проведены расчеты величин  $K^*$  для столицы государства (г.Сана) и ряда других городов (областных центров). Расчеты показали, что для столицы республики  $K^* = 27,4$ ; для других городов и областей  $K^*$  варьирует от 0,014 (г.Абиан + облсать) до 0,47 (г.Эбб + область).

Основным фактором изменения состояния воздушного бассейна Йемена в настоящее время является хозяйственная деятельность человека;

природные источники загрязнения атмосферы незначительны и сводятся в основном к временному усилению ее запыленности в результате ветровой эрозии в пустынных регионах. Главными источниками загрязнения воздуха и ухудшения экологической ситуации являются: промышленное производство, транспорт, бытовая деятельность населения. Подавляющее большинство электростанций, цементных заводов и других промышленных предприятий работают на мазуте и солярке. В результате их сжигания в атмосферу выбрасывается большое количество сернистого ангидрида, оксида углерода и других ядовитых и вредных газов. Кроме того, цементные заводы являются источником поступления в атмосферу недопустимо большого количества цементной пыли. При этом системы очистки газов, выбрасываемых в атмосферу в результате сжигания этих видов топлива на большинстве промышленных предприятий нет, отсутствует также систематический контроль за их составом.

Йемен относится к числу стран, располагающих скудным запасом водных ресурсов, что связано с природным и географическим положением этой страны, которая находится в северной части тропического пояса и характеризуется засушливым и полусушливым климатом. По этой причине Йемен испытывает нехватку водных ресурсов и страдает от развивающегося день ото дня водного кризиса, как в количественном, так и в качественном отношении. В то же время страна также страдает от отсутствия эффективных стратегических программ, которые помогли бы разумно распоряжаться водными ресурсами.

Несмотря на ограниченные запасы водных ресурсов, до сих пор ведутся работы по рытью колодцев, еще больше истощающие эти запасы, причем в ходе проведения подобных работ не учитываются проведенные на эту тему исследования, которые распространяются как в соответствующих государственных, так и в негосударственных организациях. Так, например, последнее исследование водного бассейна города Саны (подземных вод) показывает снижение уровня воды, который колеблется между 6 – 7 метрами в год, при этом общее число колодцев в бассейне Саны достигает 13000.

Помимо материковых источников загрязнения прибрежных морских вод не меньшую опасность для них представляют и непосредственные морские источники - загрязнение вод нефтью в результате сброса промывочных отходов нефтетанкерных резервуаров, аварий на нефтетанкерах в Аденском заливе при их заправке, загрузке и др. По статистическим данным через Аденский залив ежедневно проходит 50-60 судов и танкеров, которые ежегодно перевозят порядка 400 млн. т. грузов, значительную часть которых составляет нефть и ее производные. Наиболее подвержен опасности загрязнения Баб-эль-Мандебский пролив и близлежащие к нему районы в результате наиболее частых здесь столкновений входящих и выходящих из пролива судов. Кроме того, Аденский порт и его прибрежную зону загрязняет нефтью Аденский нефтеперерабатывающий завод.

**В четвертой главе «Современное состояние водообеспечения в Республике Йемен» рассмотрены количественные характеристики**

водообеспечения и проведен расчет водохозяйственного баланса. Отмечено, что главным потребителем воды является сельское хозяйство (89,2%), где по-прежнему применяются старые и неэффективные системы орошения, затем следует промышленность (9,2%) и коммунальное хозяйство (1,6%).

По нашим оценкам наибольшее количество осадков выпадает на водосборе Красного моря (35,3%), на водосборе Аль Раб Аль Кхали – 25,0%, на водосборе Аденского залива – 24,4% и на водосборе Арабского моря – 15,3%. Большая их часть тратится на испарение, часть стекает в океан, некоторое количество пополняет запасы подземных вод. Последние являются основным источником водоснабжения всех хозяйственных и бытовых нужд.

Возможность контроля за использованием подземных вод осложняется тем, что в стране насчитывается около 45 тыс. частных колодцев и около 200 буровых скважин. Попытки правительства ввести лицензии на использование частных колодцев и скважин и поставить их под контроль государства в результате несовершенства организационно-административной структуры государственного аппарата оказались безуспешными. В мире нет больше такой страны, подземные воды которой истощались бы такими темпами, как в Йемене. Ее столица в самые ближайшие годы может остаться без воды. Возобновляемые подземные водные ресурсы в настоящее время оцениваются примерно в 1,2 млрд. куб. м. в год. Объем ежегодного потребления подземных вод составляет около 8,2 млрд. куб. м, то есть почти в семь раз превышает объем ежегодного возобновления.

Негативным моментом, связанным с использованием воды, является не только ее острый дефицит, но и большая опасность загрязнения отходами деятельности человека, особенно в условиях отсутствия водоочистных сооружений, а также развитой водопроводной и канализационной сети.

Преобладающим методом избавления от сточных вод является их сброс в колодцы глубиной до 20 м. Такие колодцы в итоге являются источником загрязнения подземных вод. Даже в столице страны г. Санае очистка вод все еще осуществляется во временных водоемах окисления, которые получают сточные воды в объемах, превышающих их производительную мощность. В результате загрязненные воды попадают в окружающую среду, нередко используются для орошения полей, что приводит к снижению качества, а нередко и к загрязнению сельскохозяйственных продуктов.

Для обоснования направлений совершенствования водообеспечения в Республике Йемен было проведено составление водохозяйственного баланса, то есть количественного соотношения между поступлением (приходная часть) и расходом (расходная часть) за определенный период, рассматриваемое относительно выделенного балансового участка. Порядок составления уравнения водохозяйственного баланса заключался в следующем: - задавали интервал времени, за который рассматривается баланс (один год); - записывали все элементы баланса в виде алгебраической суммы приходных и расходных статей; - определяли числовые значения всех элементов баланса; - оценивали результаты баланса, то есть те изменения в

запасах воды, которые происходят на территории Республики Йемен в результате взаимодействия элементов баланса.

В общем виде водохозяйственный баланс Республики Йемен можно представить следующим образом. **Приходная часть баланса** складывается из объема осадков ( $V_{OC}$ ). **Расходная часть баланса** складывается из объема инфильтрации дождевых вод в водоносные горизонты ( $V_{инф.}$ ), испарения и транспирации ( $V_{исп.}$ ), климатического стока ( $V_{сток}$ ) и водопотребления ( $V_{потреб.}$ ). Балансовое уравнение за время  $t$  (один год) имеет вид:

$$\Delta W = V_{OC} - V_{инф.} - V_{исп.} - V_{сток} - V_{потреб.}, \quad (5)$$

где  $\Delta W$  – изменение запасов воды за время  $t$ .

Согласно нашим расчетам величина  $V_{OC} = 51 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год. По данным 2000г.  $V_{потреб.} = 3,4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год. Величина  $V_{инф.}$  рассматривалась как произведение  $V_{OC}$  на некоторый коэффициент  $k$ , значение которого согласно [Нуман Салим, 1998] было принято равным 0,1. То есть

$$V_{инф.} = 0,1 \cdot V_{OC}. \quad (6)$$

Для расчетов  $V_{исп.}$  и  $V_{сток}$  была проведена математико-статистическая обработка данных литературы и были выявлены числовые значения коэффициента испарения ( $\alpha_1$ ) и коэффициента стока ( $\alpha$ ). В результате были получены следующие значения:  $\alpha_1 = 0,936$ ;  $\alpha = 0,065$ . Эти величины были использованы для расчета водохозяйственного баланса с использованием следующих формул (табл. 2):

$$V_{исп.} = 0,936 \cdot V_{OC}. \quad (7)$$

$$V_{сток} = 0,065 \cdot V_{OC}. \quad (8)$$

Таблица 2. Элементы водохозяйственного баланса в Йемене, м<sup>3</sup>/год

$V_{OC}$	$V_{инф.}$	$V_{исп.}$	$V_{сток}$	* $V_{ПОТРЕБЛЕНИЕ}$			DW
				Сельское хозяйство	Коммунально-бытовое хозяйство	Индустрия	
$51 \cdot 10^9$	$5,1 \cdot 10^9$	$47,7 \cdot 10^9$	$3,3 \cdot 10^9$	$3,145 \cdot 10^9$	$0,21 \cdot 10^9$	$0,045 \cdot 10^9$	$-8,5 \cdot 10^9$

Примечание. \*Приведено значение  $V_{ПОТРЕБЛЕНИЕ}$  для 2000г.

Отрицательный водохозяйственный баланс ( $\Delta W = -8,5 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год) свидетельствует о необходимости мероприятий по покрытию водного дефицита. Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что объем водопотребления в 14,2 раза меньше, чем объем осадков ( $V_{OC} / V_{потреб.} = 51 \cdot 10^9 / 3,4 \cdot 10^9 = 14,2$ ).

Другой вариант расчета водохозяйственного баланса приведен в работе [Kamel Mostafa Amer & Waleed K. Al-Zubari, 2006]. Авторы этой работы рассматривают водный баланс как разницу между общими водными ресурсами в 1997г. и общим водопотреблением. По оценкам указанных исследователей, в 1997г. отрицательный водохозяйственный баланс в Йемене составил  $-1,38 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год, а по прогнозу в 2025г. составит  $-4,186 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год. Использование рассмотренного подхода позволило нам рассчитать динамику

отрицательного водохозяйственного баланса в Йемене с 1990г. по 2025г. (табл. 3.).

Различие между величинами дефицита воды по первому и второму вариантам расчетов обусловлена тем, что в первом варианте приходная часть баланса была связана с дождевыми осадками, которые до сих пор не используются, а во втором варианте – с подземными водами, которые и являются в настоящее время основным источником водообеспечения в республике.

Таблица 3. Динамика водохозяйственного баланса в Республике Йемен

Год	Общие водные ресурсы, м <sup>3</sup>	Общее водопотребление, м <sup>3</sup>	$\Delta W$ , м <sup>3</sup>	Год	Общие водные ресурсы, м <sup>3</sup>	Общее водопотребление, м <sup>3</sup>	$\Delta W$ , м <sup>3</sup>
1990	$2,0 \cdot 10^9$	$2,8 \cdot 10^9$	-0,8	2005	$1,3 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^9$	$-2,4 \cdot 10^9$
1995	$1,7 \cdot 10^9$	$3,1 \cdot 10^9$	-1,4	2010	$1,1 \cdot 10^9$	$4,0 \cdot 10^9$	$-2,9 \cdot 10^9$
2000	$1,5 \cdot 10^9$	$3,4 \cdot 10^9$	-1,9	2025	$0,7 \cdot 10^9$	$4,8 \cdot 10^9$	$-4,1 \cdot 10^9$

В пятой главе «**Направления совершенствования водообеспечения в Республике Йемен**» рассмотрены возможные пути решения проблемы, современные методы опреснения морских вод, возможности получения воды из атмосферного воздуха, совершенствование методов орошения и перспективы, связанные с установкой подземных наливных резервуаров.

В качестве возможных путей решения проблемы водообеспечения в Йемене обсуждены: транспортировка айсбергов, очистка сточных вод, покупка воды в других странах, опреснение морских вод, установка конденсоров воды их атмосферного воздуха и подземных наливных резервуаров (рис. 6).

Одна из возможностей для улучшения водного баланса состоит в **повторном использовании воды**. Значительный резерв водопотребления в Республике Йемен связан с очисткой сточных вод, так как примерно 75% неочищенных вод приморских городов сбрасывается непосредственно в море. В Йемене промышленные предприятия сосредоточены в четырех мухафазах: Сана, Таиз, Аль-Ходейда, Аден. Многие из них отработанные сточные воды, загрязненные промышленными отходами, а также продуктами жизнедеятельности животных и людей без всякой очистки сбрасывают прямо в канализационную сеть и в море. Однако, в городах, где в настоящее время проживает примерно 23,5 % населения страны, канализационной сетью охвачено менее половины городского населения. Еще более острое положение сложилось в сельской местности, где проживает большая часть населения. Здесь канализационной сетью обеспечено не более 10 % населения. Объем сточных вод в республике составляет  $82,9 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>, из них подвергается очистке примерно 55%, то есть  $82,9 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>. Таким образом,  $37,3 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> сточных вод не очищаются.



Рис. 6. Возможные пути решения проблемы водообеспечения в Республике Йемен

Один из наиболее эффективных и перспективных путей обеспечения пресной водой Республики Йемен является **опреснение** соленых морских вод (соленость вод Красного моря достигает  $42\text{‰}$ ). Опреснение воды – способ обработки воды с целью снижения концентрации растворенных солей до степени (обычно до  $1\text{ г.л}^{-1}$ ), при которой вода становится пригодной для питьевых и хозяйственных целей.

В диссертации рассмотрены различные методы опреснения морских вод (опреснение вымораживанием, химическим осаждением, ионным обменом, электродиализом, обратным осмосом, дистилляцией и гелиоопреснение). Однако, учитывая климатические особенности Йемена (высокие значения инсоляции), основное внимание было сосредоточено на **гелиоопреснении**. Сущность этого метода заключается в том, что под воздействием солнечной радиации в бассейне, заполненном соленой водой, происходит ее испарение, а дистиллят, образующийся при конденсации пара на наклонных, охлаждаемых воздухом поверхностях крыши из стекла или пластмассы, собирается в желобах, расположенных в нижней ее части; оставшийся рассол удаляется в дренаж (рис. 7).

Гелиоопреснение технологически отличается от обычных дистилляционных установок лишь тем, что для первоначального нагрева воды используются специальные теплообменники со стеклянной поверхностью, питаемые теплотой солнечной энергии. Солнечная дистилляция выгодно отличается от других методов опреснения, так как требует сравнительно меньших эксплуатационных расходов.

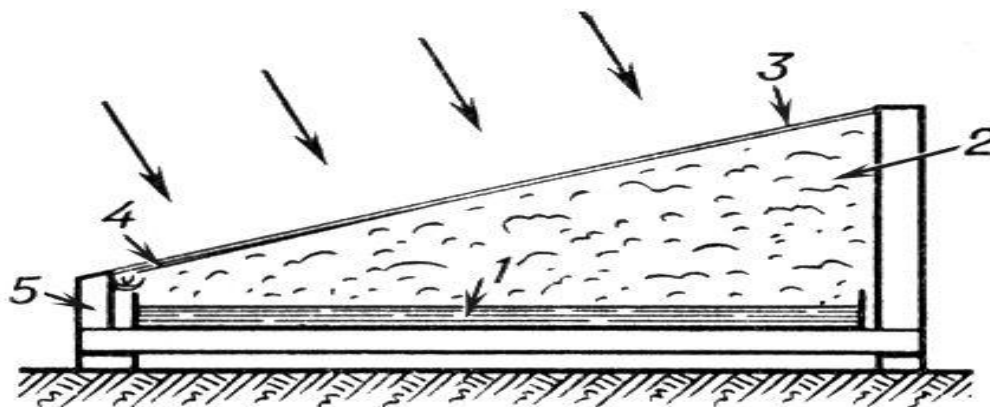


Рис. 7. Схема солнечного опреснителя типа «горячий ящик»  
 1 — сосуд с солёной водой; 2 — паровоздушная смесь; 3 — прозрачная крышка; 4 — конденсат; 5 — теплоизолирующая стенка ящика; стрелками обозначены солнечные лучи.

Размеры солнечных опреснителей характеризуются главным образом их производительностью, которая может быть с некоторыми допущениями вычислена по приближенной формуле:

$$Q = kE/L = kE/580, \quad (9)$$

где  $Q$  - удельная производительность опреснителя, л/м<sup>2</sup>·сут.;  $k$  - коэффициент использования солнечной энергии, принимаемый равным 0,3-0,5;  $E$ —интенсивность солнечной радиации;  $L=580$  - расход энергии на нагревание и испарение 1 кг воды.

Для проведения практических расчетов формула (9) была нами преобразована. При преобразовании было принято среднее значение величины  $k$  ( $k = 0,4$ ). В итоге была получена следующая формула

$$Q = 0,593 \cdot E \quad (10)$$

В приведенной формуле размерность  $Q$  - л/м<sup>2</sup>·сут, а размерность  $E$  – кВт·ч/м<sup>2</sup>·сут.

По формуле (10), используя данные о значениях инсоляции, были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые удельные производительности гелиоопреснителей для трех крупных городов Республики Йемен (г.Сана, г. Ходейда, г. Таиз) (рис. 8).

Особо отметим, что рассчитанные нами величины удельных производительностей опреснения, близки к тем значениям, которые приведены в работе [Salem M. Bin Gadhi & Mohammed A. Mukbel, 1998]. В этой работе, в частности, отмечается, что для типичного дня производительность солнечного опреснителя достигает 3,7 кг/м<sup>2</sup>·день.

К недостаткам этого метода следует отнести большие капиталовложения ввиду сложности конструкций и слишком больших параметров сооружений, а также низкую выработку на единицу поверхности солнечных опреснителей. Не поддающиеся контролю изменения погоды, облачность, широта места, сезонные колебания



температур значительно затрудняют и ограничивают применение метода солнечной дистилляции.

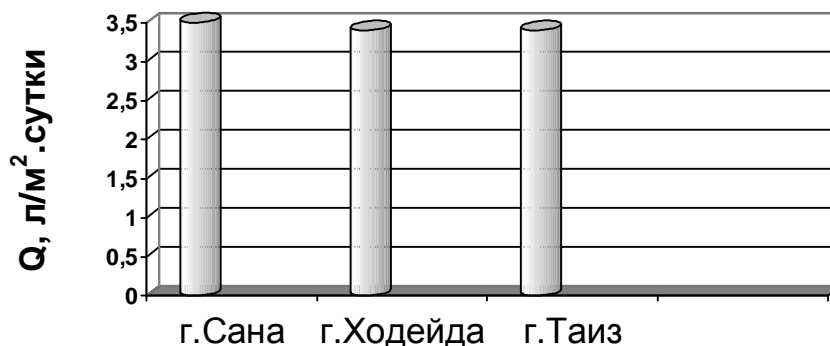


Рис. 8. Среднегодовые удельные производительности гелиоопреснителей в некоторых городах Республики Йемен (расчетные данные)

В дополнение к изложенному нами были проведены расчеты площадей гелиоопреснителей, обеспечивающие выработку питьевой воды в трех рассматриваемых городах в течение года. При расчетах были использованы стандартные средние характеристики человека и, в частности, количество питьевой воды в день для взрослого человека – 2 литра (табл. 4).

Таблица 4. Площади гелиоопреснителей для питьевого водоснабжения населения некоторых городов Республики Йемен

Город	Удельная производительность опреснителя, Q, л/м²·сут	Население	Площадь опреснителя, га
Сана	3,5	1834293	104,8
Ходейда	3,4	826672	48,6
Таиз	3,4	566569	33,3

В настоящее время власти Йемена планируют немедленно начать строительство десятков заводов по опреснению морской воды. Уже в ближайшее время правительство Йемена планирует объявить тендеры на проекты строительства многочисленных заводов для опреснения морской воды вдоль йеменского побережья, протяженность которого около 2000 км.

Одним из направлений, позволяющим частично решить проблему дефицита водных ресурсов в Йемене, является **использование тепла отходящих газов** печей цементных и других заводов для опреснения морской воды. Использование отходящих газов цементных печей этих заводов, как показали наши расчеты, позволит получать около  $2 \cdot 10^8$  кг ( $2 \cdot 10^8$  л) пресной воды в год. Если учесть, что на выращивание 1 кг пшеницы необходимо израсходовать  $10^3$  л воды, то указанное выше дополнительное

количество воды, используемой для орошения, позволит вырастить 200 тонн пшеницы.

Другое направление покрытия дефицита пресной воды – **получение воды из атмосферного воздуха**. Для этой цели используют конденсоры различных типов. Способ получения пресной воды из атмосферного воздуха состоит в том, что поглощение влаги из воздуха происходит при его продуве через сорбент, который затем отдает влагу при нагреве с последующей ее конденсацией, и отличается тем, что в качестве сорбента используют материал, состоящий из пористой матрицы и помещенного в поры гигроскопичного вещества. В качестве пористой матрицы используют неорганические оксиды, углеродные сорбенты, полимеры, природные сорбенты, порометаллы, пористые композиты или их смеси, в качестве гигроскопичного вещества в поры помещают неорганические соли, их смеси, их растворы и их кристаллогидраты. При этом нагрев сорбента на стадии десорбции воды осуществляют до температуры 50-80°C за счет использования солнечной или электрической энергии, а также тепла различных двигателей, а температуру в конденсаторе поддерживают близкой к температуре окружающей среды.

Количество воды, которое может быть получено из атмосферного воздуха зависит от: температуры и влажности окружающего воздуха; температуры конденсирующей поверхности; объема воздуха, проходящего через систему конденсации влаги. Очевидно, что размещение устройств для извлечения воды из воздуха целесообразно на тех территориях, которые характеризуются высокой относительной влажностью воздуха. В этой связи нами была предпринята попытка выявить зависимость величин относительной влажности воздуха (RH) от высоты местности над уровнем моря (E). В результате была выявлена следующая зависимость:

$$RH = 91 - 6,6 \cdot \ln(E) \quad (11)$$

$$N = 28; r = 0,76; r^2 = 0,58; F_p = 35,9 \quad F_T = 4,21; F_p / F_T = 8,5$$

Как следует из приведенной формулы относительная влажность воздуха линейно уменьшается с увеличением натурального логарифма высоты территории над уровнем моря (в интервале высот от 5 м до 2500 м).

Полученный результат приводит к выводу о целесообразности размещения устройств для извлечения воды из воздуха на территориях, расположенных невысоко над уровнем моря, например в районе Моха (E = 5м).

Покрытие дефицита воды в Йемене может быть реализовано также **на основе прогрессивных способов орошения**. Среди различных способов орошения (поверхностное, дождевание, аэрозольное увлажнение, подпочвенное, капельное) наиболее перспективно капельное орошение. Капельное орошение – локальное орошение с помощью микроводовыпусков, поливных капельниц. Капельное орошение имеет существенные преимущества по сравнению с другими видами ирригации. Оно превосходит поверхностное орошение и орошение дождеванием с точки зрения экономии воды. При орошении коэффициент полезного использования воды

определяется как соотношение между количеством воды, усвоенным растением, и израсходованным на полив. Исследования показывают, что эта величина составляет около 95% при капельном орошении, тогда как для поверхностного орошения она равняется 45%.

В 2000г. на орошение в республике было израсходовано  $3,145 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> воды. Согласно нашим расчетам переход на капельное орошение позволит сэкономить примерно  $1,655 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> воды.

В Республике Йемен ежегодное количество осадков ( $V_{\text{ос.}} = 51 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год) в 15 раз превышает объем ежегодного водопотребления ( $V_{\text{потреб.}} = 3,4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год). Более того, величина ежегодного стока ( $V_{\text{сток}} = 3,3$  м<sup>3</sup>/год) соизмерима с объемом водопотребления ( $V_{\text{потреб.}}/V_{\text{сток}} \approx 1$ ). Большая часть выпадающих осадков тратится на испарение, некоторое количество пополняет запасы подземных вод, часть стекает в Красное море, Аденский залив и Аравийское море.

По нашему мнению, количество стекающих осадков можно существенно уменьшить путем **установки резервуаров** под поверхностью земли (подземные наливные резервуары).

Обоснование пунктов установки наливных резервуаров было проведено нами в несколько этапов. На первом этапе был проведен анализ распределения дождевых осадков по территории Йемена. Анализ показал, что наибольшее количество осадков выпадает в западной горной части Йемена. На втором этапе был проведен анализ внутригодового объема осадков. Результаты анализа свидетельствуют о неравномерном объеме выпадающих осадков в течение года. Наибольшее количество осадков выпадает, например, в г.Таиз в апреле (152,2 мм), мае (216,4 мм), июле (214,5 мм), августе (181,9 мм) и сентябре (180,5 мм). На третьем этапе был проведен анализ топографической карты Йемена, содержащей горизонтальные изолинии, указывающие расположение различных территорий над уровнем моря. К сожалению, масштаб имевшейся в нашем распоряжении топографической карты Йемена (1: 1 000 000) не позволял рассчитать с достаточной точностью расстояние между вадями (высохшими руслами рек).

Тем не менее, суть предлагаемой нами идеи заключается в установке наливных резервуаров вдоль вадии, по которым происходит основной сток дождевых осадков в Красное море. Практическая реализация такого подхода, как показали расчеты, позволяет собирать весьма большое количество дождевых осадков (табл. 5). Как следует из приведенных данных, реализация предложенного проекта позволит собрать около  $1 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> дождевых осадков, что составит примерно 29,4% от современного водопотребления в Республике Йемен ( $3,4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год).

При проектировании наливных резервуаров особое внимание следует уделять минимальному расходу материалов (бетона, железобетона и т.д.).

Таблица 5. Объем дождевых осадков, который может быть собран подземными наливными резервуарами в западной части Йемена

Вади	Водосбор, км <sup>2</sup>	Среднегодовой сток, мм	Среднегодовой сток, м <sup>3</sup>
Harad	1700	6,0	10,2·10 <sup>6</sup>
Mawr	7912	20,5	162,2·10 <sup>6</sup>
Surdud	2370	28,9	68,5·10 <sup>6</sup>
Rima	2250	44,0	99,0·10 <sup>6</sup>
Zabid	4632	27,0	125,1·10 <sup>6</sup>
Rasyan	1990	6,2	12,3·10 <sup>6</sup>
Tuban	5060	21,6	109,3·10 <sup>6</sup>
Rabwa	460	12,5	5,8·10 <sup>6</sup>
Bana	6200	27,2	168,6·10 <sup>6</sup>
Ahwar	6419	11,0	70,6·10 <sup>6</sup>
Adhana	8300	10,5	87,2·10 <sup>6</sup>
Amd/Doan	6553	3,1	20,3·10 <sup>6</sup>
Al Ayn	1500	6,4	9,6·10 <sup>6</sup>
Sarr	2540	1,2	3,0·10 <sup>6</sup>
Bin Ali	720	4,4	3,2·10 <sup>6</sup>
Juaymah	760	1,0	0,76·10 <sup>6</sup>
Idim	5485	7,5	41,1·10 <sup>6</sup>
Thibi	718	2,6	1,9·10 <sup>6</sup>
Итого	<b>65569 км<sup>2</sup></b>	<b>241,6 мм</b>	<b>998,7·10<sup>6</sup> м<sup>3</sup></b>

Примечание. Во избежании неточностей перевода названия вади приведены на английском языке. Первичные данные для расчетов были заимствованы из [Jac A.M. Van Der Gun, 2000].

Пусть наливной резервуар имеет форму открытого цилиндра. При изготовлении резервуара материал идет на образование стенок и дна цилиндра. Если  $r$  – радиус основания и  $h$  – высота резервуара, то сумма площади основания и боковой поверхности цилиндра выразится следующим образом:

$$F = \pi r^2 + 2\pi r h \quad (12)$$

Объем цилиндра  $V$  равен:

$$V = \pi r^2 h \quad (13)$$

Исключив  $h$ , получим

$$F = \pi r^2 + 2V/r \quad (14)$$

Суть задачи заключается в том, чтобы при заданном объеме цилиндра (наливного резервуара) найти такое значение  $r$ , при котором поверхность  $F$  была бы минимальной. Дифференцируя (14) по  $r$  и приравнявая первую производную нулю, получим

$$dF/dr = 2\pi r - 2V/r^2 = 0 \quad (15)$$

Тогда:

$$2\pi r^3 = 2V \quad (16)$$

Так как

$$h = V / \pi r^2 \quad (17)$$

то отсюда находим:

$$h = r \quad (18)$$

Поскольку вторая производная

$$d^2F/dr^2 = 2\pi + 4V/r^3 \quad (19)$$

положительна, то при  $h = r$  поверхность наливного резервуара будет минимальной.

Иными словами, наибольшая экономия материалов будет достигнута в том случае, когда высота резервуара будет равна его радиусу. В этом случае объем резервуара будет равен

$$V = \pi r^2 h = \pi r^3 \quad (20)$$

Или

$$r = h = (V/\pi)^{1/3} \quad (21)$$

Для иллюстрации приводим результаты расчетов некоторых наливных резервуаров для некоторых вад, характеризующихся наибольшим, средним и наименьшим стоком дождевых осадков (табл. 6.). В приведенных расчетах учтен только объем стока, но не учитывался «мертвый объем» наливного резервуара.

Таблица 6. Размеры подземных наливных резервуаров для некоторых вад

Вади	Объем стока, м <sup>3</sup>	Высота = радиус, м
Bana	168,6·10 <sup>6</sup>	380
Zabid	125,1·10 <sup>6</sup>	340
Idim	41,1·10 <sup>6</sup>	240
Amd/Doan	20,3·10 <sup>6</sup>	190
Rasyan	12,3·10 <sup>6</sup>	160
Bin Ali	3,2·10 <sup>6</sup>	101
Juaymah	0,76·10 <sup>6</sup>	62

Приведенные результаты расчетов показывают, что в зависимости от объема стока линейные размеры наливных резервуаров весьма значительны. В этих случаях, по-видимому, вдоль вад следует устанавливать несколько наливных резервуаров меньших размеров. В общем случае, высота и радиус резервуара в зависимости от объема стока описывается следующей формулой (рис. 9):

$$r = h = 58,9 \cdot \ln V_{\text{сток}} + 448 \quad (22)$$

При установке наливных резервуаров весьма актуальна проблема предотвращения потерь воды за счет испарения. К настоящему времени достаточно четко выявилось основное направление в решении рассматриваемой проблемы – защита водной поверхности при помощи химических реагентов: распределяясь по поверхности воды, они образуют

пленку, затрудняющую испарение. Наиболее эффективными из них оказались гексадециловый (цетиловый) ( $C_{16}H_{33}OH$ ) и октадециловый ( $C_{18}H_{37}OH$ ) спирты и их смеси. К их преимуществам относятся простота нанесения защитного слоя, отсутствие ядовитых свойств, сравнительная доступность. Пленка цетилового спирта на воде вблизи невидима, не меняет ее вкуса, цвета и запаха. Анализ не обнаруживает присутствие цетилового спирта в воде, защищенной его пленкой.

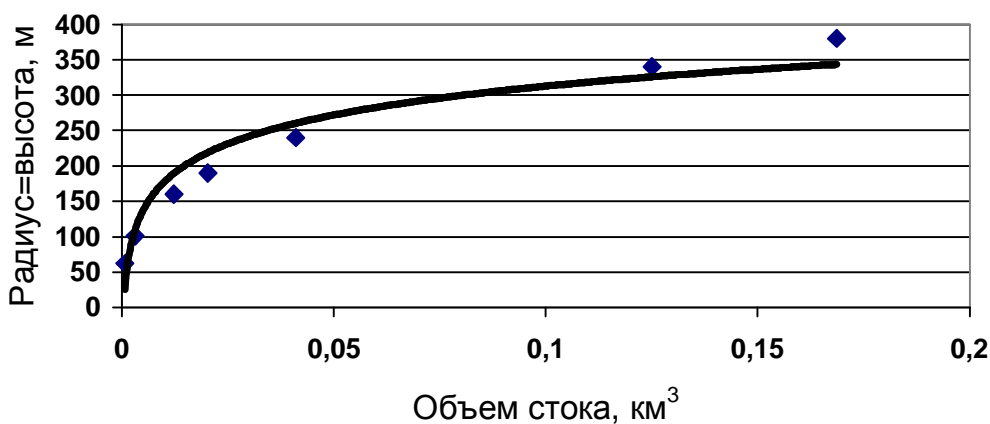


Рис. 9. Зависимость радиуса (высоты, м) подземного наливного резервуара от объема улавливаемого стока (км<sup>3</sup>)

Для создания непрерывной пленки цетилового спирта на поверхности в один гектар (100x100м) теоретически требуется всего 11г спирта. Ориентировочная оценка количества цетилового спирта, необходимого для покрытия поверхности воды в рассмотренных выше наливных резервуарах показывает, что оно варьирует от примерно 500 г до 13 г. (табл. 7.).

Таблица 7. Количество цетилового спирта для предотвращения испарения воды из наливных резервуаров

Вади	Поверхность резервуара, га	Теоретическое минимально необходимое количество цетилового спирта, г
Bana	45,3	500
Zabid	36,3	400
Idim	18,1	200
Amd/Doan	11,3	124
Rasyan	8,0	88
Bin Ali	3,2	35
Juaymah	1,2	13

Обобщение результатов наших расчетов показывает, что реализация предложенных мероприятий по покрытию дефицита пресной воды позволит дополнительно произвести и сэкономить примерно  $2,9 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> воды (табл. 8).

Таблица 8. Предлагаемые мероприятия по совершенствованию водообеспечения в Республике Йемен

Мероприятия	Дополнительно производимый или сэкономленный объем воды
Переход на капельное орошение	$1,7 \cdot 10^9 \text{ м}^3$
Установка подземных наливных резервуаров	$1,0 \cdot 10^9 \text{ м}^3$
Использование отходящих газов цементных заводов	$0,2 \cdot 10^9 \text{ м}^3$
Установка гелиоопреснителей морской воды в г.Сана, Таиз, Ходейда	$2,3 \cdot 10^6 \text{ м}^3$
Итого:	$2,9 \cdot 10^9 \text{ м}^3$

### ВЫВОДЫ

1. Одной из острых проблем Республики Йемен является обеспечение народного хозяйства и бытовых нужд населения пресной водой. Индекс напряженности водных ресурсов, рассчитываемый как отношение водопотребления к возобновляемым водным ресурсам, стремительно возрастает с 11,6% в 1955г. до 205,1% в 2005г.
2. В настоящее время Республика Йемен характеризуется высокими темпами естественного прироста населения (4,1%), низкой энерговооруженностью (количество электроэнергии на душу населения 150,3 кВт·ч), незначительным количеством осадков (в среднем по республике не более 100 мм в год) и отсутствием поверхностных вод суши. Быстрый рост населения и экономическое развитие в таких условиях все время усиливают нехватку воды, что грозит «водным голодом».
3. Динамика производства электроэнергии в Республике Йемен характеризуется значительным ростом с 1967г. (17 млн.кВт·ч) по 1994г. (1958 млн.кВт·ч) и резким падением в последующие годы (240 млн.кВт·ч в 1999г.), что существенно ограничивает решение проблемы водообеспечения путем опреснения морских вод и установки гидротехнических сооружений для сбора дождевых осадков и их последующей транспортировки.
4. Водохозяйственный баланс Республики Йемен, состоящий из приходной части (осадки) и расходной части (инфильтрация, испарение, климатический сток, потребление), характеризуется следующими величинами: осадки -  $51 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ , инфильтрация -  $5,1 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ , испарение -  $47,7 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ , сток -  $3,3 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ , потребление -  $3,4 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ . Отрицательный водохозяйственный баланс ( $-8,5 \cdot 10^9 \text{ м}^3/\text{год}$ ) свидетельствует о необходимости мероприятий по покрытию водного дефицита.
5. Для покрытия дефицита водообеспечения разработан комплекс экологически безопасных технологий.
6. Для покрытия дефицита пресной воды в Республике Йемен необходимо установить гелиоопреснители морской воды, использовать отходящие газы

цементных и других заводов для опреснения морской воды методом дистилляции, установить наливные резервуары вдоль вадии для сбора дождевых осадков, использовать конденсоры воды из атмосферного воздуха, перейти на капельное орошение и производить доочистку сточных вод.

7. Переход на капельное орошение позволит сэкономить примерно  $1,655 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> воды.

8. Ежегодное количество осадков в Республике Йемен в 15 раз превышает объем ежегодного водопотребления ( $51 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год и  $3,4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год соответственно). Установка наливных резервуаров позволит собирать примерно  $1 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>/год дождевых осадков, что составляет около 30% от современного водопотребления в республике.

9. Наибольшая экономия материалов будет достигнута в том случае, когда высота цилиндра наливного резервуара будет равна его радиусу. Для снижения испарения воды целесообразно нанесение высших жирных спиртов или кислот на поверхность воды, собранной в резервуаре.

10. При выборе принципа получения пресной воды следует проводить, исходя из местных условий с учетом свойств исходной воды (морская или атмосферная вода), источников энергии, инфраструктуры и т.д. с целью получения максимальной экономической эффективности.

#### **Основные публикации по теме диссертации**

1. *Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али* (2002) Проблемы рационального водопотребления и охраны водных ресурсов в Йемене. В монографии: «Историческая геоэкология и эволюционная география». Под ред. Е.М. Нестерова. СПб.: Эпиграф, С. 135 – 138.

2. *Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али* (2003) Социально-экономические предпосылки осложнения экологических проблем в Республике Йемен. Сборник научных трудов. Под ред. Г.И. Юренкова. СПб. : «Эпиграф», С. 8-12.

3. *Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али* (2004) Состояние воздушного бассейна Йемена. Сборник научных трудов. География и смежные науки. LVII Герценовские чтения / Под ред. Г.И. Юренкова. СПб. : «Эпиграф», С. 3-5.

4. *Фрумин Г.Т., Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али* (2005) Динамика антропогенного воздействия на территорию Республики Йемен. Материалы международной научной конференции 25-27 мая 2005 г. СПб.: РГГМУ, С. 52-53.

5. *Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али, Фрумин Г.Т.* (2006) Проблемы водообеспечения в Республике Йемен. Тезисы докладов Итоговой сессии ученого совета РГГМУ (25 – 26 января 2006 г.). СПб.: РГГМУ, С. 112 – 113.

6. *Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али, Фрумин Г.Т.* (2006) Проблема водообеспечения в Республике Йемен: современное состояние и пути решения // СПб.: Ученые записки РГГМУ, №2, С. 136-151.

7. *Фрумин Г.Т., Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али* (2006) Проблема водообеспечения в Республике Йемен: современное состояние и пути решения // Морской вестник. №4(20), С. 57-59.



