

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПУТНОЙ ВОДЫ НЕФТИ, ОЧИЩЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИЙ ГБП, В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ ЙЕМЕНА

Р.Х.М. Касем

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

✉ rabeagasem@gmail.com

Аннотация. Йемен, страна с крайне ограниченными водными ресурсами (125 м³ на душу населения в год), сталкивается с острым водным кризисом, угрожающим сельскому хозяйству, экономике и продовольственной безопасности. Сельское хозяйство, потребляющее более 90 % водных ресурсов, страдает от чрезмерного забора грунтовых вод, их засоления и снижения уровня водоносных горизонтов на 2–4 метра ежегодно. В данной статье исследуется возможность использования очищенной попутной воды из нефтегазовой отрасли для орошения сельхозугодий. Мы предложили применение технологий гидробиотанических площадок (ГБП) для очистки попутной воды. На примере региона Мариб показано, что из 100 000 баррелей нефти в день можно очищать 500 000 баррелей попутной воды ежедневно, что может обеспечить 29 млн м³ воды в год, достаточных для орошения 2 900 гектаров. Это позволит выращивать устойчивые к солености культуры, такие как люцерна и хлопок, а также использовать разбавленную воду для более чувствительных культур, таких как томаты и сорго. Внедрение проектов с использованием гидробиотанических площадок (ГБП) способно уменьшить нагрузку на ограниченные запасы пресной воды, сократить экологические угрозы и укрепить сельскохозяйственный сектор.

Ключевые слова: попутные воды, продовольственная безопасность, засоление, нефтегазовая отрасль, очистка воды, гидробиотанические площадки, орошение

Для цитирования. Касем Р.Х.М. Перспективы использования попутной воды нефти, очищенной с помощью технологий ГБП, в сельском хозяйстве Йемена // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 4. С. 76–82. DOI: 10.14529/build250409

Original article
DOI: 10.14529/build250409

THE POTENTIAL FOR USING PRODUCED WATER FROM OIL PURIFICATION VIA CONSTRUCTED WETLANDS IN YEMEN AGRICULTURE

R.H.M. Qasem✉

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

✉ rabeagasem@gmail.com

Abstract. Yemen is a country with limited water resources (125 million cubic meters per capita per year). It is facing an acute water crisis that threatens its agriculture, economy, and food security. The country's agriculture uses more than 90% of its water supply and is struggling with excessive groundwater extraction, salinization, and a decrease in aquifer levels of 2–4 meters annually. This article examines the potential use of purified produced water from the oil and gas industry for agricultural irrigation. We suggest using constructed wetlands to treat this water. Using the example of the Marib region, we can see that out of 100,000 barrels of oil produced per day, 500,000 barrels of water can be purified and provide 29 million cubic meters of water per year. This is enough to irrigate 2,900 hectares of land, making it possible to grow salt-resistant crops like alfalfa and cotton. It can also be used for more sensitive crops like tomatoes and sorghum, which require diluted water. The implementation of projects that use constructed wetlands can help reduce the pressure on limited freshwater resources, decrease environmental threats, and strengthen the agricultural sector.

Keywords: produced water, food security, salination, oil and gas industry, water purification, constructed wetlands, irrigation

For citation. Qasem R.H.M. The potential for using produced water from oil purification via constructed wetlands in Yemen agriculture. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(4):76–82. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250409

Введение

Йемен сталкивается с одним из самых серьезных кризисов нехватки воды в мире, что оказывает глубокое влияние на его сельскохозяйственный сектор, а также на экономику и продовольственную безопасность страны. При ежегодном объеме возобновляемых водных ресурсов всего 125 кубических метров на душу населения – что значительно ниже порога в 1000 кубических метров на душу населения, определяемого ООН как водный дефицит – Йемен классифицируется как страна, испытывающая абсолютную нехватку воды. Сельское хозяйство, в котором занято более 50 % населения и которое играет ключевую роль в обеспечении страны продовольствием, потребляет более 90 % водных ресурсов страны. Однако десятилетия чрезмерного забора воды, неэффективных методов орошения и усиливающегося воздействия изменения климата привели к резкому снижению уровня грунтовых вод, при этом некоторые водоносные горизонты сокращаются на 2–4 метра ежегодно [1]. Такое неустойчивое использование воды привело к засолению критически важных запасов пресной воды, что еще больше усугубляет кризис. В результате фермеры сталкиваются с растущими трудностями в поддержании урожайности, что угрожает продовольственной безопасности и средствам к существованию в сельских общинах, где сельское хозяйство является основным источником дохода.

В этом контексте поиск альтернативных источников воды становится вопросом крайней важности. Одним из перспективных, но недостаточно используемых решений являются сточные воды, образующиеся в нефтегазовой отрасли [2]. Кроме того, это оказывает вредное воздействие на окружающую среду и нефтяные резервуары из-за потери значительного количества нефти. Известные как попутная вода, эти отходы добычи углеводородов в настоящее время рассматриваются как побочный продукт и закачиваются обратно в землю. Это создает серьезные экологические риски, включая загрязнение пресноводных водоносных горизонтов [3]. Однако с использованием современных технологий очистки эти сточные воды могут быть преобразованы в ценный ресурс для сельскохозяйственного орошения. На каждый баррель добываемой нефти приходится примерно 3 барреля воды, что в сумме составляет миллионы кубических метров в год. При надлежащей очистке эта вода может стать надежным и устойчивым альтернативным источником для орошения, снижая давление на сокращающиеся запасы пресной воды в Йемене и поддерживая сельскохозяйственную продуктивность [4, 5].

Потенциал использования очищенных сточных вод из нефтегазовой отрасли представляет собой уникальную возможность для решения проблемы нехватки воды в Йемене и одновременно снижения экологических рисков. Переориентируя

этот недоиспользуемый ресурс, Йемен может сделать значительный шаг к повышению водной безопасности, увеличению сельскохозяйственного производства и содействию устойчивому развитию. В условиях этого кризиса нефтегазовая отрасль производит значительные объемы сточных вод, известных как попутная вода, в процессе добычи [6].

Цель данной статьи – изучить, как очищенные сточные воды из нефтегазовой отрасли могут помочь решить проблему нехватки воды для сельского хозяйства в Йемене. Рассматривая потенциальные преимущества, вызовы и стратегии реализации, мы стремимся выделить жизнеспособный путь к водной безопасности и устойчивому развитию в одной из самых вододефицитных стран мира.

Водный кризис в Йемене

Масштабы нехватки воды

Йемен является одной из самых вододефицитных стран в мире с ежегодным объемом возобновляемых водных ресурсов, оцениваемым всего в 125 кубических метров на душу населения, что значительно ниже порога в 1000 кубических метров на душу населения, определяющего водный дефицит (ФАО 2023). Этот кризис имеет серьезные последствия для населения, экономики и стабильности страны. Быстрый рост населения увеличил спрос на воду, в то время как изменение климата привело к продолжительным засухам и нерегулярным осадкам, что еще больше сократило доступность воды. Общий забор воды на душу населения ежегодно снижается (рис. 1), что усугубляет ситуацию [7]. Плохое управление водными ресурсами, характеризующееся неэффективным использованием, отсутствием инфраструктуры и слабым управлением, усугубило ситуацию. Кроме того, продолжающаяся гражданская война повредила водную инфраструктуру, нарушила предоставление услуг и затруднила усилия по решению кризиса. В результате более 18 миллионов человек не имеют доступа к безопасной питьевой воде, а Йемен стал сильно зависеть от неустойчивых источников грунтовых вод [8].

Зависимость от грунтовых вод и последствия их чрезмерного использования

Грунтовые воды составляют более 70 % общего водопользования в Йемене, поскольку поверхностные воды ограничены, а альтернативные источники, такие как опреснение или переработка сточных вод, остаются недостаточно развитыми. Однако чрезмерный забор грунтовых вод привел к серьезным последствиям. Водоносные горизонты истощаются быстрее, чем они могут восполняться, при этом уровень грунтовых вод снижается на несколько метров в год в некоторых регионах. Чрезмерная откачка также вызвала проникновение морской воды в прибрежных районах, делая грунтовые воды непригодными для питья или ороше-

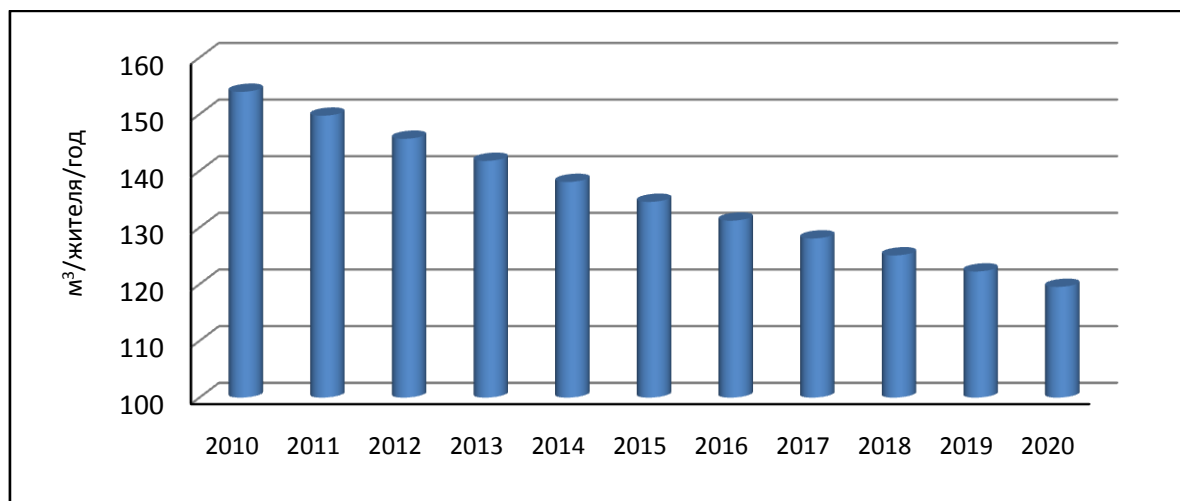


Рис. 1. Общий забор воды на душу населения Йемена (Всемирный Банк 2023)

ния [9, 10]. В некоторых районах чрезмерная эксплуатация привела к проседанию почвы, что повредило инфраструктуру и экосистемы. Фермеры вынуждены копать более глубокие колодцы, что увеличивает затраты и усугубляет неравенство. Многие сельские общины отказываются от сельского хозяйства из-за нехватки воды, что приводит к перемещению населения и продовольственной небезопасности. Эта неустойчивая зависимость от грунтовых вод угрожает долгосрочной водной безопасности Йемена.

Значение сельского хозяйства для экономики и продовольственной безопасности Йемена

Сельское хозяйство играет ключевую роль в экономике и продовольственной безопасности Йемена, обеспечивая занятость более 50 % рабочей силы и внося 15–20 % в ВВП страны. Основные культуры включают кат, зерновые, фрукты и овощи. Однако нехватка воды значительно повлияла на этот сектор. Большинство йеменцев полагаются на местные продукты питания, но снижение сельскохозяйственной продуктивности усугубило продовольственную небезопасность, оставив более 17 миллионов человек зависимыми от гуманитарной помощи (Всемирный Банк, 2023). Широкое распространение выращивания ката, которое потребляет значительную часть водных ресурсов Йемена, отвлекло воду и землю от продовольственных культур, что еще больше угрожает продовольственной безопасности. Для многих сельских домохозяйств сельское хозяйство является основным источником дохода, но нехватка воды вынудила фермеров покинуть свои земли, что привело к безработице и миграции в городские районы [11]. Решение проблемы нехватки воды требует сбалансирования сельскохозяйственных потребностей с устойчивыми методами управления водными ресурсами для обеспечения продовольственной безопасности и экономической стабильности.

Попутная вода в нефтегазовой отрасли

Попутная вода является побочным продуктом добычи нефти и газа и состоит из воды, которая естественным образом присутствует в углеводородных пластах или закачивается в скважины для повышения эффективности добычи. В процессе добычи эта вода смешивается с нефтью или газом и выводится на поверхность [12]. Обычно она содержит сложную смесь солей, углеводородов, тяжелых металлов и химических добавок, используемых в процессах бурения и добычи, как показано в таблице. По мере старения нефтяных месторождений объем попутной воды часто увеличивается, нередко превышая объем добываемой нефти [13].

В Йемене нефтегазовая отрасль производит значительные объемы попутной воды. Хотя точные данные ограничены из-за продолжающегося конфликта и недостаточного мониторинга, исследования показывают, что объем сброса воды, связанный с добычей нефти, превышает три миллиона баррелей в день. Это влечет за собой ежегодные расходы в размере около 480 миллионов долларов [6]. По оценкам, нефтяные месторождения Йемена производят десятки тысяч баррелей воды в день после 2015 г. (рис. 2), причем на некоторых месторождениях соотношение воды к нефти составляет 5:1 или выше. Например, в бассейне Масила, одном из наиболее значимых нефтедобывающих регионов Йемена, исторически фиксировались значительные объемы попутной воды в процессе добычи нефти. Основным методом управления попутной водой в Йемене является ее закачка обратно в подземные пласты. Эта практика преследует две цели: поддержание давления в пласте для оптимизации добычи нефти и безопасная утилизация воды. Однако закачка сопряжена с существенными экологическими рисками.

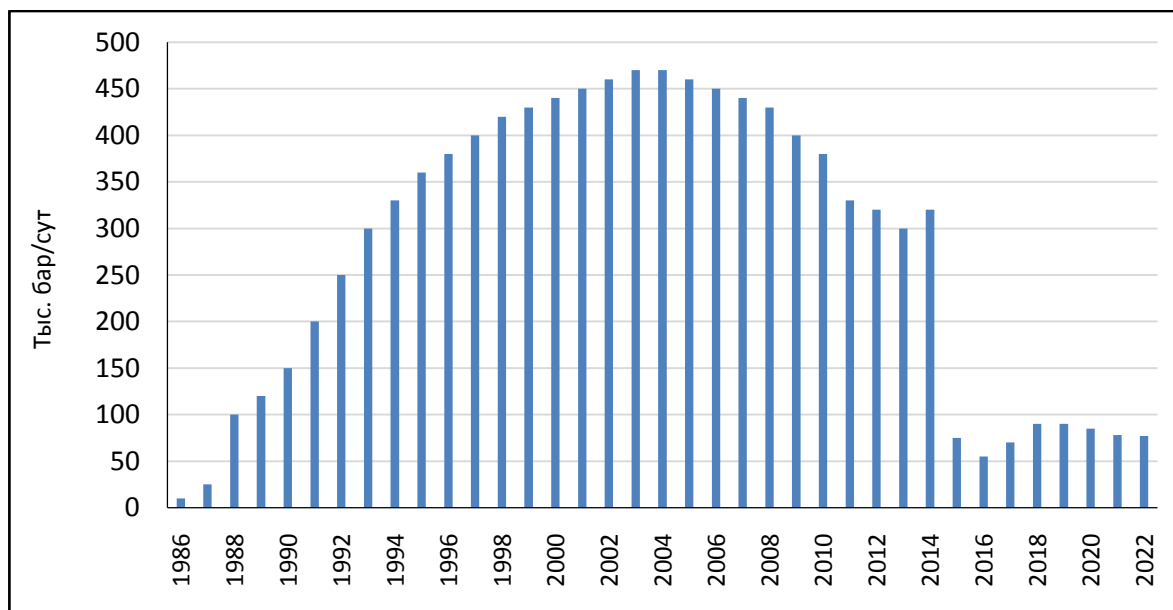


Рис. 2. Среднесуточная добыча нефти в Йемене с 1986 по 2022 гг.

Очистка попутной воды для использования в сельском хозяйстве

Очистка попутной воды включает многоэтапный процесс удаления загрязняющих веществ и обеспечения ее безопасности для орошения. Распространенные методы очистки включают предварительную обработку, которая удаляет крупные частицы и остатки нефти с помощью гравитационного разделения, скимминга или фильтрации, обратного осмоса; биологической очистки, при которой микроорганизмы разлагают органические загрязнители и снижают химическое потребление кислорода, как на гидроботанических площадях ГБП [15, 16]. Однако обратный осмос и другие методы невозможно применять в стране, как Йемен, поэтому ГБП является подходящим предложением. Эти процессы могут быть адаптированы для устранения специфического состава попутной воды, обеспечивая ее соответствие стандартам орошения, установленным такими организациями, как продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (FAO) (см. таблицу). Ключевые параметры качества воды для орошения включают соленость, коэффициент поглощения натрия, уровни токсичных элементов, таких как тяжелые металлы и углеводороды, а также отсутствие патогенов. Высокие затраты, потребности в энергии и техническом обслуживании технологий, таких как обратный осмос, создают значительные трудности в условиях ограниченных ресурсов. В таких контекстах природные решения, такие как ГБП, предлагают более устойчивую и экономически эффективную альтернативу. Системы ГБП используют естественные процессы, включающие растения, микроорганизмы и почву, для очистки попутной воды, удаляя загрязняющие вещества, такие как углеводороды, тяжелые металлы и взвешенные

частицы [16–18]. Сначала происходит отделение и восстановление большей части нефти из попутной воды с использованием серии поверхностных сепараторов. Затем попутная вода распределяется на гидроботанические площадки (ГБП) через длинный буферный пруд. Очищенная вода самотеком поступает в серию испарительных прудов, где её можно либо переработать в промышленную соль как конечный продукт, либо направить на дополнительную очистку для использования в сельском хозяйстве (рис. 3). Этот подход был успешно внедрен в таких странах, как Оман, где технология камышовых зарослей используется для очистки попутной воды в нефтяной отрасли. Применяя аналогичные решения, Йемен мог бы решить проблемы нехватки воды, снизить экологические риски и обеспечить надежный источник воды для сельского хозяйства, одновременно минимизируя затраты и технические сложности.

Пример исследования: регион Мариб

Нефтяное месторождение Асад Аль-Камель расположено в городе Мариб в центре Йемена, в 236 км от столицы страны, Саны (рис. 4). На месторождении используются глубокие скважины, где вода закачивается в водоносные горизонты.

Вставка из рис. 4 представляет собой спутниковый снимок указанного нефтяного месторождения, на котором обозначены три точки: 1 – местоположение нефтяного месторождения, 2 – место предполагаемого размещения ГБП и 3 – сельскохозяйственные угодья, куда подается очищенная вода для орошения. Существует возможность создания орошаемых участков и выращивания различных видов растений, поливаемых водой, очищенной на соседней системе ГБП. Поскольку пищевые культуры требуют очень низкой солености,

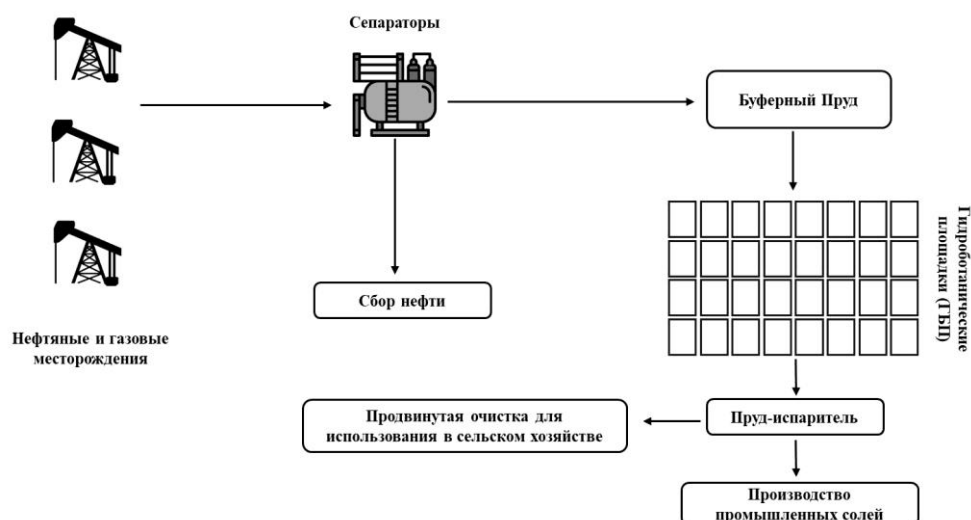


Рис. 3. Общая схема ГБП, используемых для очистки попутной воды

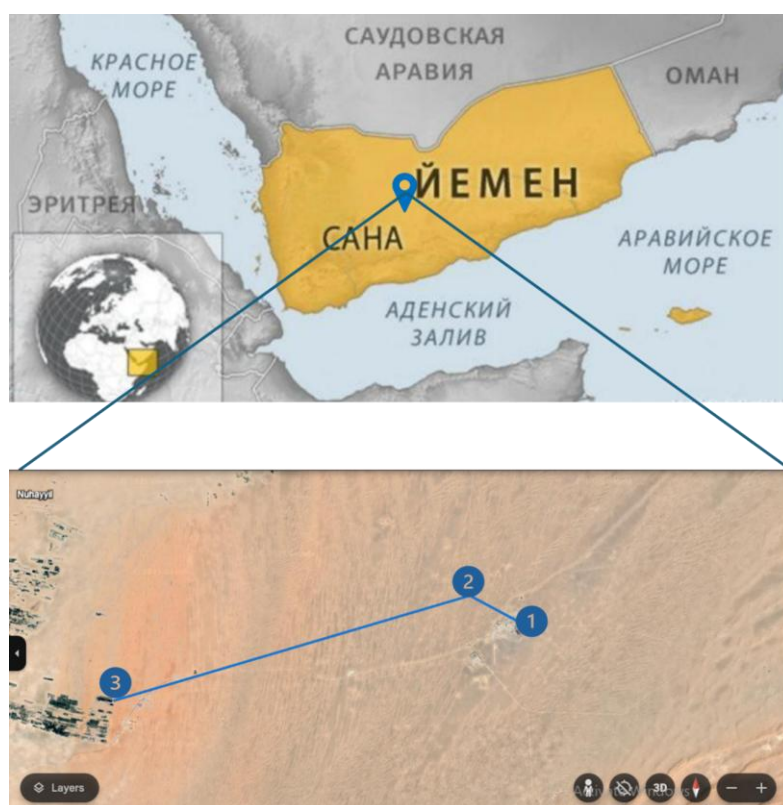


Рис. 4. Расположение нефтяного месторождения в пустыне юго-восточной части Аравийского полуострова в Йемене (вверху) и предлагаемая система ГБП (внизу)

выращивание устойчивых к солености растений, таких как люцерна и хлопок, является подходящим вариантом. Кроме того, разбавление этой воды пресной водой (не обязательно высокой степени очистки) представляет собой ещё одну возможность для использования такой воды в орошении культур, таких как томаты и сорго, как это практикуется в Америке и Мексике.

На основе масштабного экспериментального проекта в Омане было отмечено, что содержание

нефти уменьшается по мере прохождения воды через террасы ГБП, как показано на рис. 5. Таким образом, концентрация нефти в воде значительно снижается в нижних ячейках системы после прохождения 50 % ее длины. Однако другие параметры, такие как бор и солёность, увеличиваются вдоль длины ГБП, что может повлиять на рост растений. Поэтому было принято решение использовать три различных качества воды, забирая её из трёх точек вдоль длины системы.

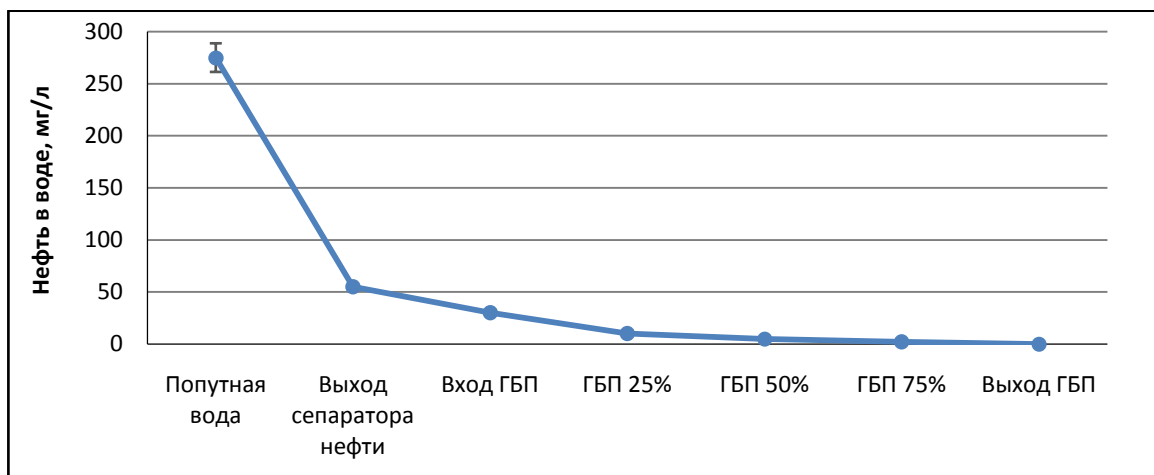


Рис. 5. Значение концентрации нефти в воде на различных этапах очистки ГБП [5]

Для проектирования системы камышовых зарослей для очистки попутной воды с нефтяных месторождений Мариба в Йемене необходимо учитывать объем попутной воды, площадь, необходимую для камышовых зарослей, и потенциальные площади орошаемых сельскохозяйственных угодий. Ниже приведен пошаговый анализ:

Предположения и данные

1. Добыча нефти: 100 000 баррелей в день (барр./сутки). (Раньше этот показатель составлял около 700 000 баррелей).

2. Соотношение воды и нефти: Обычно нефтяные месторождения производят 3–10 баррелей воды на каждый баррель нефти. В данном примере предположим соотношение 5:1, что означает:

– объем попутной воды: 100 000 барр./сутки (нефть) \times 5 = 500 000 баррелей воды в день;

– перевод в кубические метры: 500 000 баррелей \times 0,159 м³/баррель = 79 500 м³/день.

3. Производительность камышовых зарослей: камышовые заросли могут очищать 0,5–2 м³ воды на квадратный метр в год в зависимости от конструкции и условий. В данном примере предположим скорость очистки 1 м³/м²/год.

4. Требования к орошению: для орошения сельскохозяйственных культур обычно требуется 10 000 м³ воды на гектар в год.

Шаг 1: Расчет необходимой ГБП

Для очистки 79 500 м³/день попутной воды:

– годовой объем очистки: 79 500 м³/день \times 365 дней = 29 017 500 м³/год;

– необходимая площадь камышовых зарослей: 29 017 500 м³/год \div 1 м³/м²/год = 29 017 500 м² или 2 901,75 га.

Шаг 2: Расчет объема очищенной воды, доступной для орошения

Предполагая, что система камышовых зарослей очищает 79 500 м³/день попутной воды:

– годовой объем очищенной воды:

79 500 м³/день \times 365 дней = 29 017 500 м³/год.

Шаг 3: Расчет площади орошаемых сельскохозяйственных угодий

Используя требование к орошению – 10 000 м³/га/год:

– площадь орошаемых угодий:

29 017 500 м³/год \div 10 000 м³/га/год = 2 901,75 га.

Заключение

Йемен, страдающий от острого водного кризиса с ежегодным объемом возобновляемых водных ресурсов всего 125 м³ на душу населения, сталкивается с серьезными вызовами в сельском хозяйстве, которое потребляет более 90 % водных ресурсов. Чрезмерный забор грунтовых вод, засоление и снижение уровня водоносных горизонтов на 2–4 метра ежегодно угрожают продовольственной безопасности и экономической стабильности. Одним из перспективных решений является использование очищенной попутной воды из нефтегазовой отрасли, объем которой превышает три миллиона баррелей в день. Технологии гидроботанических площадок (ГБП) предлагают экономически эффективное и экологически устойчивое решение. Предложено, что в регионе Мариб, где добывается 100 000 баррелей нефти в день, можно очищать 500 000 баррелей попутной воды ежедневно, получая 29 млн м³ воды в год. Это позволит орошать около 2 900 гектаров сельхозугодий, выращивая устойчивые к солености культуры, такие как люцерна и хлопок. Кроме того, разбавление этой воды пресной водой представляет собой ещё одну возможность для использования такой воды в орошении культур, таких как томаты и сорго. Реализация проектов на основе ГБП может снизить давление на пресноводные ресурсы, минимизировать экологические риски и поддержать сельскохозяйственное производство.

Список литературы/References

1. Varisco D. Pumping Yemen Dry: A History of Yemen's water crisis. *Human Ecology*, 2019, vol. 47, no. 3, pp. 317–329. DOI: 10.1007/s10745-019-0070-y
2. Сидорова Л.П., Снигирева А.Н. Очистка сточных и промышленных вод. Ч. II: [Электронный ресурс]: Биохимическая очистка: учебное пособие. Екатеринбург, 2017. 127 с. [Sidorova L.P., Snigireva A.N. Ochistka stochnykh i promyshlennykh vod. Ch. II.: [Elektronnyy resurs]: Biokhimicheskaya ochistka: uchebnoe posobie [Treatment of wastewater and industrial waters. Part II: [Electronic resource]: Biochemical treatment: textbook]. Ekaterinburg, 2017. 127 p. (in Russ.)]
3. Kihila J., Mtei K.M., Njau K.N. Wastewater treatment for reuse in urban agriculture; the case of Moshi Municipality, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2014, vol. 72, pp. 104–110. DOI: 10.1016/j.pce.2014.10.004
4. Echchel A., Hess T., Sakrabani R. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. *Agricultural Water Management*, 2018, vol. 206 (7), pp. 124–134. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.05.006
5. Stefanakis A.I., Prigent S., Breuer R. Integrated produced water management in a desert oilfield using wetland technology and innovative reuse practices. In book: *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*, 2018, pp. 23–42.
6. Altamimi S.M.S., Khelghat-Doost H., Hassan M.S. Effect of re-injecting water associated with oil (Produced Water) in the oil production process on groundwater quality in masila fields in Hadhramout, Yemen. *Taiwan Water Conservancy*, 2020, vol. 68, no. 3, pp. 66–76. DOI: 10.6937/TWC.202009/PP_68(3).0006
7. Burki T. Yemen's neglected health and humanitarian crisis. *Lancet*, 2016, vol. 387(10020), pp. 734–5. DOI: 10.1016/S0140-6736(16)00389-5
8. Wiebelt M., Breisinger C., Ecker O., Al-Riffai P., Robertson R., Thiele R. Climate change and floods in Yemen: impacts on food security and options for adaptation. 2011. 60 p.
9. Al Saafani M.A., Nagi H.M., Alhababy A.M., Abubakr M.M., & Hajer A. Impact of sea level rise and climate change on the coastal zone of aden governorate, Republic of Yemen. *Faculty of Science Bulletin*, 2015, vol. 27, pp. 15–32.
10. Iraqi A.A., Abdallah A.M. Analysis of long-term climatic changes at Al-Hodeidah-Yemen during the period between 1985 and 2019. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, vol. 150, no. 3–4, pp. 1067–1081. DOI: 10.1007/s00704-022-04178-2
11. Barakat H., Elaydi H. Global food crisis: updates from the MENA region. 2022.
12. Al-Ghouti M.A., Al-Kaabi M.A., Ashfaq M.Y., Da'na D.A. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, vol. 28 (4), pp. 222–239. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.02.001
13. Al-Anezi, K., Belkharchouche, M., Alali, S., and Abuhaimeed, W., Erratum: Produced water characterization in Kuwait and its impact on environment. *Desalination and Water Treatment*, 2013, vol. 51(1–3), pp. 302–306. 2015. DOI: 10.1080/19443994.2012.726325
14. Rambeau O., De Lafond Morales R., Baldoni P., Gosselin J.P., Baccou J.C. Low salt petroleum produced water reuse: a farming alternative outside the food chain. *Water Science and Technology*, 2004, vol. 50 (2), pp. 139–147. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0109>
15. Hassan I., Chowdhury S.R., Prihartato P.K., Razzak S.A. processes Wastewater treatment using constructed wetland: current trends and future potential. *Processes*, 2021, vol. 9(11), p. 1917. DOI: 10.3390/pr
16. Stefanakis A.I. Constructed wetlands for sustainable wastewater treatment in hot and arid climates: Opportunities, challenges and case studies in the Middle East. *Water*, 2020, vol. 12(6), p. 1665.
17. Langergraber G., Dotro G., Nivala J., Rizzo A., Stein O.R. Wetland technology: practical information on the design and application of treatment wetlands. IWA Publishing, 2020. 200 p.
18. Al Mahruki, A., Alloway B., Patzelt H. The use of reed-bed technology for treating oil-production waters in the Sultanate of Oman. *SPE International Health, Safety & Environment Conference*, Abu Dhabi, UAE, April 2006. DOI: <https://doi.org/10.2118/98548-MS>

Информация об авторе:

Касем Раби Хуссейн Мохаммед, аспирант кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; rabeagasem@gmail.com

Information about the author:

Rabi H.M. Qasem, postgraduate student, the department of Town Planning, Engineering Networks and Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, rabeagasem@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 24.03.2025, принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 24.03.2025, approved after reviewing 25.04.2025.