

# ПРИМЕНЕНИЕ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ

С. П. Высоцкий, д.т.н., профессор<sup>1</sup>; Н. В. Цветкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

<sup>2</sup> Автомобильно-дорожный институт ГО УВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

**Аннотация.** Предлагается использование опреснительной установки обратного осмоса (ОО) для повышения эффективности маневренной работы оборудования в маневренном режиме, который необходим при изменении графика электрической нагрузки в электросетях. Для изучения динамического анализа данной системы особое внимание уделено детальному динамическому моделированию и управлению процессом опреснения, в котором используется мембранный модуль. Результаты моделирования показывают, что опреснительная установка обратного осмоса обеспечивает эксплуатационную маневренность при управлении энергопотреблением путем использования избыточной электроэнергии. Использование воды, полученной методом обратного осмоса, позволяет расширить спектр работы гибридных энергетических систем (ГБЭС) для максимального использования общей производительности системы.

**Ключевые слова:** генерация энергии, маневренность, опреснение воды, обратный осмос, моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с глобальным изменением климата необходимо использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для получения электрической и тепловой энергии [1]. Однако при использовании ВИЭ возникают проблемы технического и экономического характера с точки зрения устойчивой работы генерирующих установок из-за переменной нагрузки [2].

Обычно маневренные генерирующие установки большую часть времени не работают на полную мощность и обеспечивают промежуточную или пиковую нагрузки [3]. С другой стороны, генерирующие системы с базовой нагрузкой генерации электроэнергии (например, атомные электростанции) часто не могут снизить мощность по запросу независимого системного оператора. Несмотря на то, что гибкая работа генераторов с базовой нагрузкой только для генерации электроэнергии технически достижима, этот режим работы не рекомендуется из соображений стоимости, прибыльности и безопасности [4]. Это требует новых подходов к разработке энергетических систем, которые могли бы использовать избыточную мощность установки, когда генерация систем, использующих ВИЭ, активна или низка потребность в электроэнергии, для процессов с дополнительной стоимостью, помимо производства электроэнергии. Одним из таких энергетических решений является «гибридная» энергетическая система, которая в данной статье определяется как единое предприятие, производящее несколько продуктов, из которых, по крайней мере один является энергетическим товаром [2, 5].

**Цель исследования:** использование опреснительной установки обратного осмоса для эффективной маневренной работы гибридных энергетических систем.

## КОНФИГУРАЦИЯ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В данной работе одним из вариантов ГБЭС предлагается промышленная микросеть, подключенная к электросети, как показано на рис. 1, которая включает в себя несколько компонентов: установку первичного производства тепла (ППТ), систему термоэлектрического преобразования (ТЭП), систему производства электроэнергии с помощью ВИЭ, элемент накопления энергии (ЭНЭ), опреснительную установку (ОУ) и электросеть. Генерация первичного тепла является основным источником энергии для рассматриваемой ГБЭС и может представлять собой установку для производства пара на основе ядерного или ископаемого топлива. Пар, полученный на установке первичного производства тепла, подается в систему термоэлектрического преобразования, которая является основным источником энергии.



Высоцкий Сергей Павлович



Цветкова Надежда Витальевна

Система термоэлектрического преобразования может представлять собой энергетический цикл Брайтона или Ренкина и обеспечивает необходимую генерацию для удовлетворения потребности в сети, учитывая вклад от энергии, полученной с помощью ВИЭ, и электричество, доставленное в опреснительную установку. Необходимо отметить, что требуемая генерация исключается из общей выработки электроэнергии, что дает избыточную генерирующую мощность, которая может быть использована для производства других энергетических продуктов в дополнение к электроэнергии.

Как показано на рис. 1, выходная мощность установки с ВИЭ может вводиться в центр распределения электроэнергии через элемент накопления энергии или напрямую. Принимая во внимание тот факт, что генерация энергии с ВИЭ обычно характеризуется высокой изменчивостью и отсутствием возможности удаленного контроля, элемент накопления энергии может быть включен в ГБЭС для выравнивания мощности. Необходимо учитывать то, что стабилизирующая стоимость генерации энергии с ВИЭ будет снижена, если опреснительная установка полностью заменит элемент накопления энергии. Однако исключение элемента накопления энергии из ГБЭС может привести к увеличению затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание и, возможно, к сокращению срока службы опреснительной установки, поскольку оборудование будет изнашиваться с гораздо большей скоростью при прямом реагировании на сильно изменяющиеся ВИЭ. Потенциальное влияние элемента накопления энергии в ГБЭС на срок службы опреснительной установки требует дополнительного изучения, которое выходит за рамки данной статьи.

Рассматриваемая конфигурация ГБЭС соединена с электрической сетью через точку общей связи. Под наблюдением контролем два блока выработки электроэнергии, а именно: ППТ-ТЭП (ППТ в сочетании с ТЭП) и выработка электроэнергии ВИЭ в сочетании с ЭНЭ, работают

соответственно для выработки электроэнергии, запрошенной оператором электросети. Также диспетчер системы может определять изменяющиеся во времени параметры спроса на электроэнергию в ответ на изменения цен, альтернативный продукт и сырье, таким образом, поддерживая экономическую оптимизацию для операций. В любом случае мощность, подаваемая в электрическую сеть, ограничена максимально-номинальной генерирующей мощностью системы ППТ-ТЭП и минимальной подготовительной мощностью опреснительной установки.

## ОПИСАНИЕ И РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ

Ниже представлено подробное динамическое моделирование и регулирование установки ОО. Моделирование процесса обратного осмоса сосредоточено на двух основных компонентах, а именно: высоком давлении и мембранном разделении.

*Динамическое моделирование обратноосмотического элемента.*

Данная динамическая модель обратного осмоса разработана для описания динамики процесса в широком диапазоне рабочих условий [6].

Для модуля SWRO — динамические уравнения для плотности растворенного вещества, концентрации растворенного вещества и удельной внутренней энергии определяются следующим образом на основе законов сохранения массы и энергии:

$$V_{BR} \frac{d\rho_{b,t}}{dt} = Q_{0,t}\rho_{0,t} - Q_{p,t}\rho_{p,t} - Q_{n,t}\rho_{n,t} \quad (1)$$

$$V_{BR} \frac{dc_{b,t}}{dt} = Q_{0,t}c_{0,t} - Q_{p,t}c_{p,t} - Q_{n,t}c_{n,t} \quad (2)$$

$$V_{BR} \frac{d(\rho_{b,t}u_{b,t})}{dt} = Q_{0,t}\rho_{0,t}\hat{h}_{0,t} - Q_{p,t}\rho_{p,t}\hat{h}_{p,t} - Q_{n,t}\rho_{n,t}\hat{h}_{n,t} \quad (3)$$

где

$$V_{BR} = n_1 w_{BR} h_{BR} l_{BR} \phi_{BR} \quad (4)$$

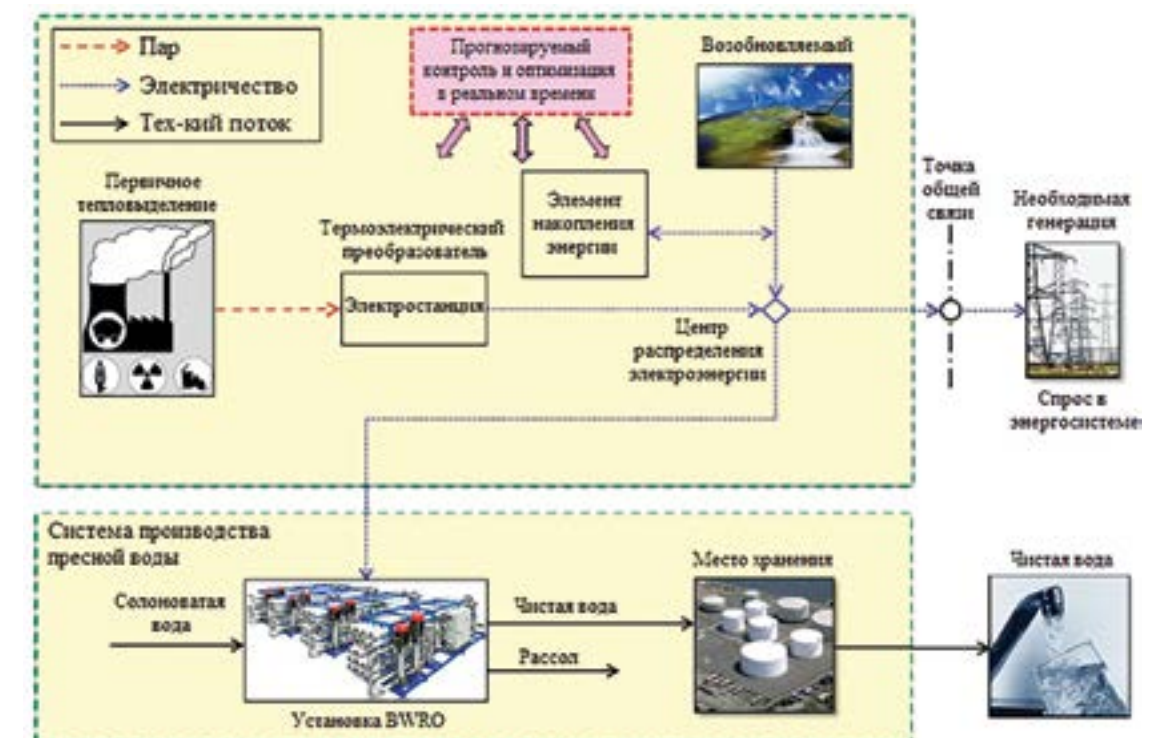


Рис. 1. Архитектурная топология рассматриваемой ГБЭС



Уравнения 5 и 6 соотносят осевые скорости с объемными расходами со стороны рассола следующим образом:

$$v_{z0,t} = \frac{Q_{0,t}}{n_1 w_{BR} h_{BR} \phi_{BR}} \quad z = 0 \quad (5)$$

$$v_{zp,t} = \frac{Q_{p,t}}{n_1 w_{RR} h_{RR} \phi_{RR}} \quad z = l_{BR} \quad (6)$$

Объемный расход пермеата ( $Q_n$ ) зависит от локального потока растворителя ( $J_v$ ):

$$Q_n = 2n_1 w_{BR} \int_0^{l_{BR}} J_v dz \quad (7)$$

В соответствии с классической моделью растворения диффузии средний поток растворителя (уравнение 8) и растворенный поток частиц  $i$  (уравнение 9) через мембрану определяются следующим образом:

$$J_v = L_v (\Delta p - \sum_i \Delta \pi_i), \quad z = \frac{l_{BR}}{2}, \quad \forall i \in \{Na^+, Cl^-\} \quad (8)$$

$$\bar{J}_{s,i} = \bar{J}_v \frac{c_{n,i}}{MW_i} = L_{s,i} \left( \frac{c_{m,i} - c_{n,i}}{MW_i} \right), \quad z = \frac{l_{BR}}{2}, \quad \forall i \in \{Na^+, Cl^-\} \quad (9)$$

при условии

$$L_v = L_{v0} \exp \left[ \frac{\alpha_1 (T_b - 293)}{293} - \alpha_2 p_0 \right] \left( 1 - \frac{A_s}{A_m} \right) \quad (10)$$

$$L_{s,i} = L_{s0,i} \exp \left[ \frac{\beta_1 (T_b - 293)}{293} \right], \quad \forall i \in \{Na^+, Cl^-\} \quad (11)$$

$$\Delta p = p_0 - p_n - \frac{\Delta p_{hydr}}{2}, \quad z = \frac{l_{BR}}{2} \quad (12)$$

$$\Delta \pi_i = \left( \frac{c_{m,i} - c_{n,i}}{MW_i} \right) RT, \quad \forall i \in \{Na^+, Cl^-\} \quad (13)$$

$$\bar{c}_{m,i} = \frac{c_{m,i}|_{z=0} + c_{m,i}|_{z=l_{BR}}}{2}, \quad \forall i \in \{Na^+, Cl^-\} \quad (14)$$

$$T_b = \frac{T_0 + T_p}{2} \quad (15)$$

Уравнение 8 подразумевает, что проницаемость воды через мембрану зависит от приложенной разности гидравлического давления ( $\Delta p$ ) и суммы разности осмотических давлений растворенных твердых веществ в водном растворе NaCl ( $\sum \Delta \pi_i$ ). Уравнение 9 показывает, что перенос растворенного вещества путем диффузии пропорционален только градиенту концентрации и, таким образом, не зависит от  $\Delta p$ . Соответственно, чем выше  $\Delta p$ , тем чище пермеат. Точно так же осмотическое давление (уравнение 13) пропорционально концентрации растворенного вещества.

Во время процесса ОО происходит накопление концентрации удерживаемого материала в пограничном слое, близком к мембране, что приводит к разнице между концентрацией растворенного вещества на поверхности мембраны и концентрацией в объемной фазе. Это явление называется «концентрационной поляризацией», что приводит к более высокой разнице осмотического давления на мембране [9]. На основе теории тонких пленок и закона диффузии Фика, концентрация на поверхности мембраны может быть получена следующим образом:

$$\frac{c_m - c_n}{c_b - c_n} = \exp \left( \frac{J_v}{k_{NaCl}} \right) \quad (16)$$

где  $k_{NaCl}$  – коэффициент массопереноса для обратной диффузии NaCl из мембраны в объемный раствор на стороне рассола и может быть оценен эмпирическим соотношением Шервуда:

$$k_{NaCl} = 0,065 \left( \frac{\rho_b v_{zb} d_h}{\mu_{NaCl}} \right)^{0,875} \left( \frac{\mu_{NaCl}}{\rho_b D_{NaCl}} \right)^{0,25} \left( \frac{D_{NaCl}}{d_h} \right) \quad (17)$$

Для каналов потока с некруглой геометрией гидравлический диаметр заполненных распорками каналов потока ( $d_h$ ) определяется следующим образом:

$$d_h = \frac{4\phi_{BR}}{\frac{2}{h_{sp}} + (1 - \phi_{BR}) a_{sp}} \quad (18)$$

$$a_{sp} = \frac{8}{h_{sp}} \quad (19)$$

Двумя важными параметрами, отражающими производительность мембраны обратного осмоса или общей системы обратного осмоса, являются регенерация воды  $R_w$  и извлечение соли  $R_s$ :

$$R_w (\%) = \frac{Q_n}{Q_0} \cdot 100 \quad (20)$$

$$R_s (\%) = \left( 1 - \frac{c_n}{c_b} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

$R_w$  количественно определяет долю поступающей воды, извлеченную в пермеате.  $R_s$  является характеристикой, часто используемой изготовителями мембран ОО для описания свойств извлечения мембраны.

Хотя формулы 1-21 были использованы для определения скорости и качества пермеата для каждого мембранного модуля, их можно использовать для прогнозирования того же поведения для сосудов обратного осмоса под давлением, которые содержат более одного мембранного модуля последовательно, следующим образом:

$$X_{p,j} = X_{0,j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, N_{M-1}, \quad \forall X \in \{Q, C, h, p\} \quad (22)$$

$$p_{p,j} = p_{0,j} - \Delta p_{hydr,j}, \quad j = 1, 2, \dots, N_M \quad (23)$$

$$p_n Q_n = \sum_{k=1}^{N_{ST}} p_{n,k} Q_{n,k} \quad (24)$$

$$C_n = \frac{\sum_{k=1}^{N_{ST}} c_{n,k} Q_{n,k}}{Q_n} \quad (25)$$

Для заданных условий подачи и специфических для мембраны параметров модели, можно рассчитать по формуле 1-25 при условии соблюдения ряда системных ограничений следующим образом:

$$S_{n,t} \leq S_n^{max} \quad (26)$$

$$v_{0,j,t}^{min} \leq v_{0,j,t} \leq v_{0,j,t}^{max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_M \quad (27)$$

$$p_{0,j,t}^{min} \leq p_{0,j,t} \leq p_{0,j,t}^{max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_M \quad (28)$$

$$T_{0,j,t}^{min} \leq T_{0,j,t} \leq T_{0,j,t}^{max}, \quad j = 1, 2, \dots, N_M \quad (29)$$

$$\sum_i \Delta \pi_{i,j,t} \leq \Delta p_{j,t}^{exit}, \quad j = 1, 2, \dots, N_M, \quad \forall i \in \{Na^+, Cl^-\} \quad (30)$$

Уравнение 26 обеспечивает максимальную минерализацию пермеата, чтобы удовлетворить требования стандарта на питьевую воду для содержания в любой момент времени. Уравнения 27-29 представляют рабочие ограничения системы ОО, такие как минимальная/максимальная скорость подачи, давление и температура. Уравнение 30 представляет собой так называемое «термодинамическое ограничение» обессоливания ОО мембран с поперечным потоком. Это неравенство подразумевает, что для обеспечения производительности пермеата по всему мембранному модулю применяемая разность гидравлического давления не должна быть меньше суммы разности осмотических давлений на выходе из модуля.

Следующие эмпирические уравнения используются для оценки соответствующих свойств соленой воды, необходимых для моделирования:

$$D_{NaCl} = 6,725 \cdot 10^{-6} \exp \left( 1,546 \cdot 10^{-4} C_{b,NaCl} - \frac{2513}{T_b} \right) \quad (31)$$

$$\mu_{NaCl} = \mu_{H_2O} [1 + A(S_b \cdot 10^6) + B(S_b \cdot 10^6)^2] \quad (32)$$

при условии

$$\mu_{H_2O} = 4,2844 \cdot 10^{-5} + [0,157(T_b - 273,15 + 64,993)^2 - 91,296]^{-1} \quad (33)$$

$$A = 1,541 + 1,998 \cdot 10^{-2} (T_b - 273,15) - 9,52 \cdot 10^{-5} (T_b - 273,15)^2 \quad (34)$$

$$B = 7,974 + 7,561 \cdot 10^{-2} (T_b - 273,15) - 4,724 \cdot 10^{-5} (T_b - 273,15)^2 \quad (35)$$

Падение гидравлического давления вдоль спирально навитого элемента можно описать постулируемой характеристикой:

$$\Delta p_{hydr} = \left( \frac{\lambda \rho_b v_{zb}^2}{2d_h} \right) \quad (36)$$

$$\lambda = 6,23 Re_b^{-0,3} \quad (37)$$

$$Re_b = \frac{\rho_b v_{zb} d_h}{\mu_{NaCl}} \quad (38)$$

$$v_{zb} = \frac{v_{z0} + v_{zr}}{2} \quad (39)$$

Уравнение 38 может быть действительным только в тестируемом режиме потока, то есть  $100 < Re_b < 1000$ .

В данной работе опреснение солоноватой воды методом ОО рассматривается для поддержки производства пресной воды через мембрану FilmTech 8'' BW30-400. Характеристики данной мембраны представлены в табл. 1. Используется предварительно обработанная исходная вода при температуре 298,15 К и давлением 1 атм. и с постоянным содержанием 3500 ч/млн. Энергия потребляется только насосами высокого давления. Опреснительная установка рассчитана на мощность 15,66 м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> (357,4 мг/сут), что примерно в четыре раза превышает размер одной из крупнейших в настоящее время системы опреснения морской воды методом ОО. Установка с такой мощностью потребляет 45 МВт электроэнергии для создания необходимого рабочего давления (16,5 бар) для обессоливания содержания 3500 ч/млн TDS.

В таблице 1 приведены технические характеристики установки BWRO, рассматриваемые в данной работе.

*Нормативный контроль*

На рис. 2 изображена сеть для крупномасштабной системы опреснения воды BWRO. Сеть обратного осмоса состоит из нескольких блоков обратного осмоса, каждый из которых содержит насос высокого давления, подающий предварительно обработанную воду в сотни резервуаров обратного осмоса. Для простоты моделирования предполагается, что каждый элемент ОО работает в одинаковых рабочих условиях. Такое же предположение справедливо для судов ОО, расположенных параллельно в каждом модуле ОО.

С данными допущениями разрабатываются стратегии регулирующего управления для опреснительной системы BWRO (рис. 3) для достижения двух целей управления: удовлетворение потребляемой мощности, запрошенной системным супервизором  $L_{E,sp}$ , т.е. ПЭН, и для поддержания давления подачи на необходимом уровне  $p_{0,sp}$ . В то время как первое достигается путем регулирования скорости вращения вала насоса  $\omega$ , последним можно управлять путем регулирования пневматического клапана давления (КД), расположенного в потоке ретентата. Эта схема управления гарантирует, что качество пермеата поддерживается в необходимых пределах, независимо от изменения ПЭН. Значения настроек моделирования представлены в табл. 2.

Таблица 1.

Параметры моделирования для мембраны BW30-400

Символ	Описание	Единицы измерения	Значение
$l_{BR}$	Длина канала рассола элемента ОО	м	0,8665
$h_{BR}$	Высота канала рассола элемента ОО	м	$7,112 \cdot 10^{-4}$
$h_{sp}$	Толщина распорки	м	$7,112 \cdot 10^{-4}$
$w_{BR}$	Ширина канала элемента ОО рассола	м	1,34
$n_l$	Количество листов на один модуль ОО	–	16
$\phi_{BR}$	Общая доля пустот в канале рассола	–	0,9
$a_{sp}$	Удельная поверхность распорки	м <sup>-1</sup>	11,249
$d_h$	Гидравлический диаметр	м	$9,1 \cdot 10^{-4}$
$A_m$	Общая площадь мембраны на один модуль ОО	м <sup>2</sup>	37,2 [400]
$A_s$	Зона мембраны, занятая осадками	м <sup>2</sup>	$1,86^a$ [20]
$\alpha_1$	Константа для переноса растворителя	–	8,6464
$\alpha_2$	Константа для переноса растворителя	бар <sup>-1</sup>	0,0149
$\beta_1$	Константа для переноса растворенного вещества	–	14,648
$L_{v0}$	Внутренний параметр переноса растворителя	м·Па <sup>-1</sup> ·с <sup>-1</sup>	$1,042 \cdot 10^{-11}$
$L_{s0}$	Внутренний параметр растворенного вещества	м·с <sup>-1</sup>	$1,333 \cdot 10^{-8}$

Таблица 2.

Значения настроек моделирования

Производство электроэнергии в сети (МВт)	Возобновляемая энергия		Переменная электрическая нагрузка, запрашиваемая BWRO, $L_{E,sp}$ (МВт)	Интервал выхода моделирования, $\Delta t$ (с)
	Тип	Производительность (МВт)		
от 144 до 135 (смена шага)	N/A	0	от 36 до 45 (смена шага)	0,1
165 (постоянная)	Фотоэлектрический элемент	0–30	15–45 (переменная)	60
165 (постоянная)	Оборот	0–28,8	15–43,8 (переменная)	60
135–165 (переменная)	Фотоэлектрический элемент	0–30	15–45 (переменная)	60



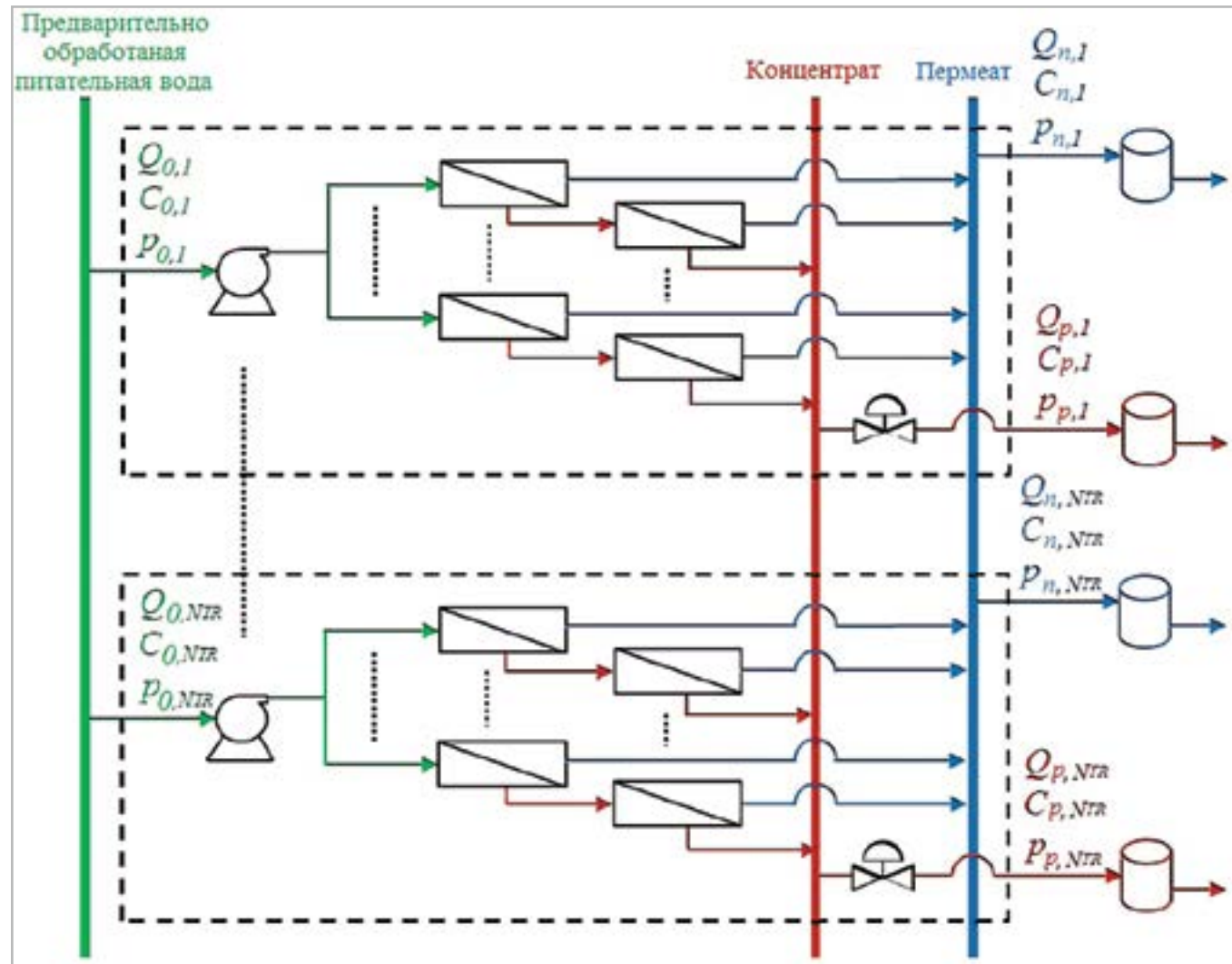


Рис. 2. Система ОО для опреснения солоноватой воды, где каждый пунктирный прямоугольник представляет один модуль ОО. NTR – количество модулей ОО в системе ОО

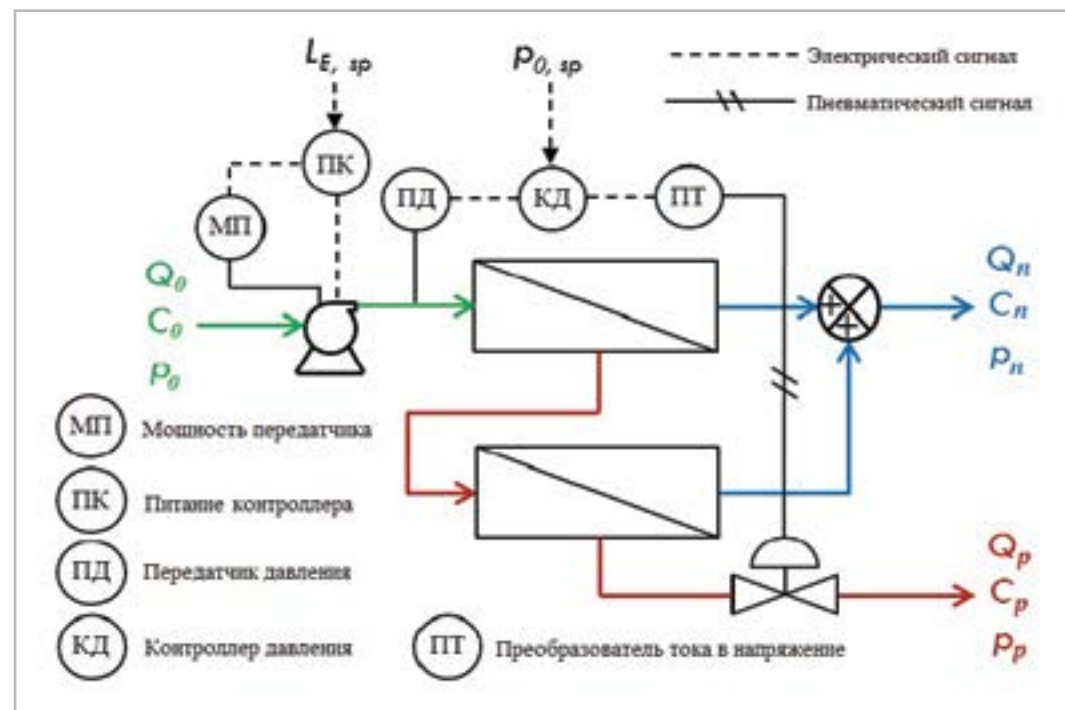


Рис. 3. Схема управления агрегатом ОО с двухступенчатым мембранным разделением

Установка первичного производства тепла, система термоэлектрического преобразования и необходимая генерация

Установка первичного производства тепла работает на полной мощности, вырабатывая эквивалентную электрическую нагрузку 180 МВт через систему термоэлектрического преобразования. В экстремальной ситуации, когда электрическая сеть запрашивает у ГБЭС необходимую генерацию 165 МВт при отсутствии ВИЭ, электрическая мощность, направляемая на опреснительную установку, составляет 15 МВт.

Система производства тепла с помощью возобновляемых источников энергии

Для систем производства тепла с помощью ВИЭ рассматриваются две отдельные системы: фотоэлектрическая система, которая преобразует солнечную энергию в электричество с использованием полупроводниковых материалов, и ветряная электростанция, которая преобразует кинетическую энергию ветра в механическую энергию или электричество через генератор.

Для тематических исследований каждый отдельный фотоэлектрический модуль имеет такой размер, чтобы он мог обеспечить максимальную номинальную мощность 4 МВт при стандартных условиях испытаний. Кроме того, предполагается, что семь фотоэлектрических модулей дают общую номинальную мощность 28 МВт, при условии, что допустимо линейное масштабирование мощности ВИЭ с количеством фотоэлектрических модулей. Аналогичным образом, восемь идентичных ветряных турбин, каждая мощностью 3,6 МВт, обеспечивают максимальную номинальную мощность 28,8 МВт при полной выработке.

Динамические характеристики расчета системы ОО

Проведено четыре тематических исследования (случай 1-4) для анализа динамических характеристик установки ОО, интегрированной в рассматриваемую ГБЭС. В исследованиях наблюдаются ключевые переменные процесса (PI, RO, LE,sp, p0, Qp, Sp и Rs), чтобы оценить, является ли динамическое поведение установки

ОО удовлетворительным при каждом тесте. В таблице 2 перечислены значения настройки моделирования, используемые в каждом сценарии, рассмотренном в данной работе.

1 случай: Время отклика и скорость нарастания на 25% -ное увеличение  $LE_{sp}$

Для оценки характеристики времени отклика и скорости линейного изменения предлагаемой установки ОО было выполнено ступенчатое изменение профиля электрической нагрузки при отсутствии ВИЭ. Переходный процесс был инициирован через 50 с из-за снижения потребности в электрической сети на 9 МВт с начального уровня генерации 144 МВт. Поскольку система ППТ-ТЭП генерировала постоянную электрическую мощность 180 МВт, это изменение привело к немедленному увеличению на 9 МВт в  $LE_{sp}$  (от начального уровня нагрузки 36 МВт). На рис. 4 показаны ответы контролируемых переменных (КП) и управляемых переменных (УП) после изменения шага, демонстрирующие очень короткое время отклика и скорость изменения в достижении двух целей управления. Как видно на рис. 4 (а), потребовалось около 30 с, чтобы потребляемая мощность соответствовала заданному изменению и достигла своего конечного значения путем соответствующей корректировки  $\omega$  (рис. 4 (б)). Клапан контроля давления быстро увеличил отверстие (рис. 4(в)), чтобы поддерживать давление подачи на постоянном значении 17,51 бар (рис. 4(г)) в ответ на изменение шага, сделанное в  $LE_{sp}$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что ОО-установка, будучи интегрированной в конфигурации ГБЭС, может успешно участвовать в рассматриваемых вспомогательных услугах электрических сетей.

В рабочих условиях, рассматриваемых в данной работе, эффект «обратной диффузии» преобладает над эффектом «потока пермеата» на концентрационную поляризацию. В целом, это приводит к меньшей поляризационной концентрации при более высокой скорости подачи сырья и, следовательно, к снижению солёности пермеата

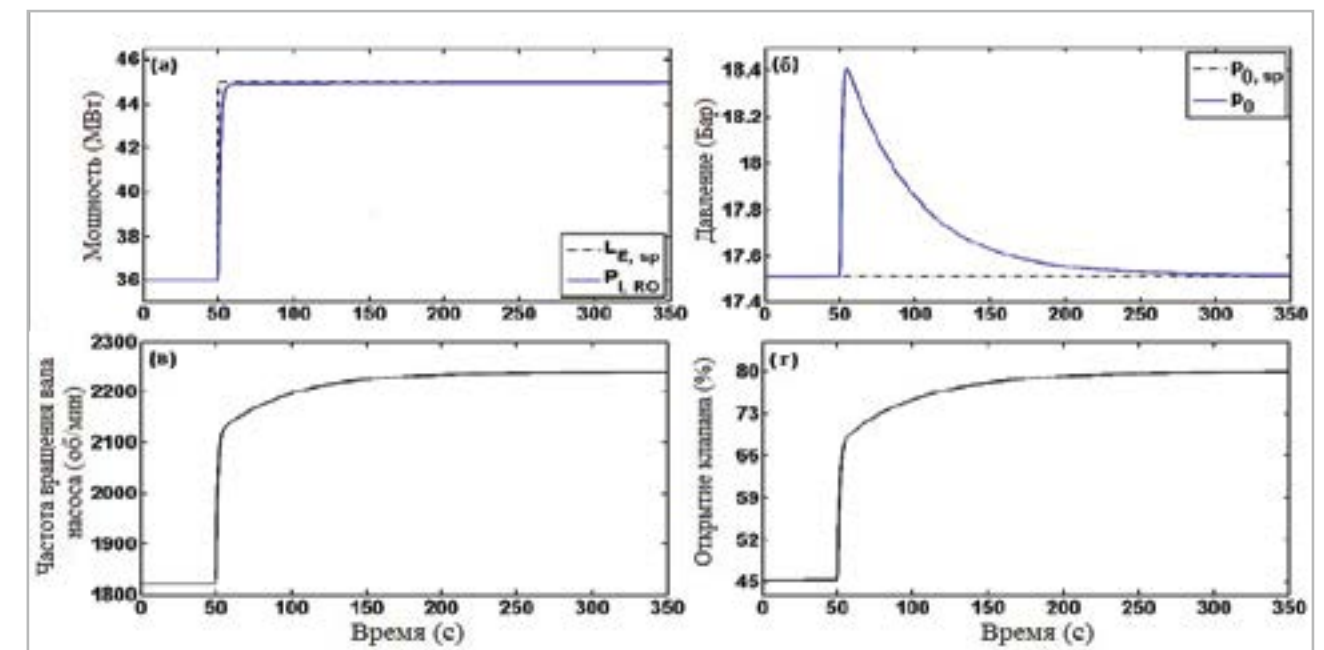


Рис. 4. Отклики КП и УП для 1 случая

(а) ПЭН ( $LE_{sp}$ ) в зависимости от потребляемой мощности насоса ( $P_I,RO$ ); (б) частота вращения вала насоса ( $\omega$ ); (в) давление подачи ( $p0,sp$ ) в зависимости от измеренного давления подачи ( $p0$ ); (г) открытия клапана ( $Vop$ )



и разницы осмотического давления на мембране. Отказы от соли, показанные на рис. 6 (в), показывают обратно пропорциональное поведение пермеата. Другими словами, чем выше скорость потока подачи, тем чище пермеат, при условии, что давление подачи остается неизменным.

*2 случай: ответ на нагрузку с фотоэлектрической солнечной энергией*

Во 2 случае продемонстрирована способность следящей за нагрузкой установки ОО в качестве гибкого ресурса нагрузки при переменном генерировании фотоэлектрической солнечной энергии. Предполагается постоянный поток электричества в 165 МВт, доставленный из конфигурации ГБЭС в электрическую сеть; таким образом, минимальная нагрузка 15 МВт всегда распределяется на опреснительную установку. На рис. 5 показаны временные ряды КП, а также скорость и качество пермеата, смоделированные в течение одной недели. Как видно на рис. 5 (а), установка обратного осмоса может эффективно поглощать

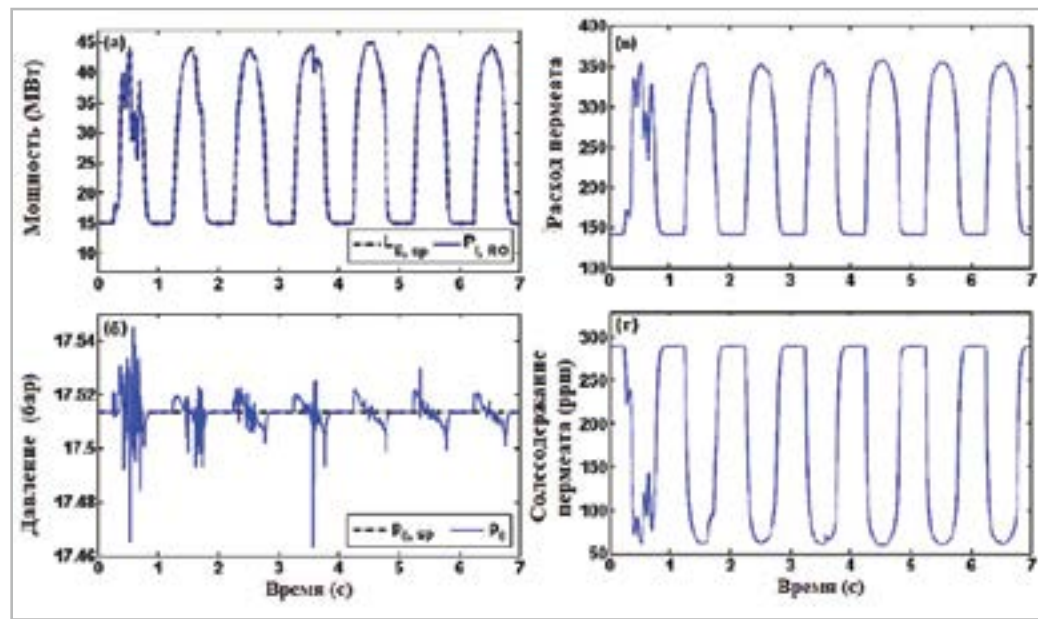


Рис. 5. Выходные ответы на ПЭН для 2 случая  
(а)  $L_{E,sp}$  против  $P_{I,RO}$ ; (б)  $p_{0,sp}$  против  $p_0$ ; (в)  $Q_n$ ; (г)  $S_n$

локальную и мгновенную изменчивость в источнике мощности ВИЭ, соответственно изменяя  $L_{E,sp}$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что поскольку установка ОО может эксплуатироваться с минимальным изменением в течение необходимого времени, конфигурация ГБЭС может поддерживать изменения в выработке электроэнергии в течение достаточно длительного периода времени.

*3 случай: ответная нагрузка с использованием ветровой энергии*

Этот тест предназначен для оценки возможностей той же системы, которая рассматривалась в случае 2, для отслеживания нагрузки, но при выработке энергии ветра. Результаты, смоделированные в течение одной недели, представлены на рис. 6. Как видно, система ОО может точно отслеживать изменяющуюся во времени электрическую нагрузку (рис. 6 (а)), необходимую оператору для производства пресной воды (рис. 6 (в)), сохраняя требуемое давление подачи (рис. 6 (б)) и качество пермеата (рис. 6 (г)) всегда.

*4 случай: эксплуатационная гибкость для экономической оптимизации с помощью фотоэлектрической солнечной энергии*

В 4 случае конфигурация ГБЭС, которая включает в себя опреснительную установку и солнечные фотоэлектрические системы, работает под гибким оперативным управлением для оптимизации чистой приведенной стоимости. В этом случае использовалась функция экономической оптимизации для определения наиболее выгодного ассортимента продуктов, что приводило к изменению выработки электроэнергии в зависимости от зависящих от времени оптовых цен на электроэнергию (на сутки вперед), на товары и сырье. В этом случае был принят тот же профиль генерации ВИЭ (фотоэлектрической мощности), который рассматривался во 2 случае (рис. 7 (а)), при этом постоянная выработка электроэнергии (полезная нагрузка) составляла 180 МВт от системы ППТ-ТЭП (рис. 7 (в)) [7].

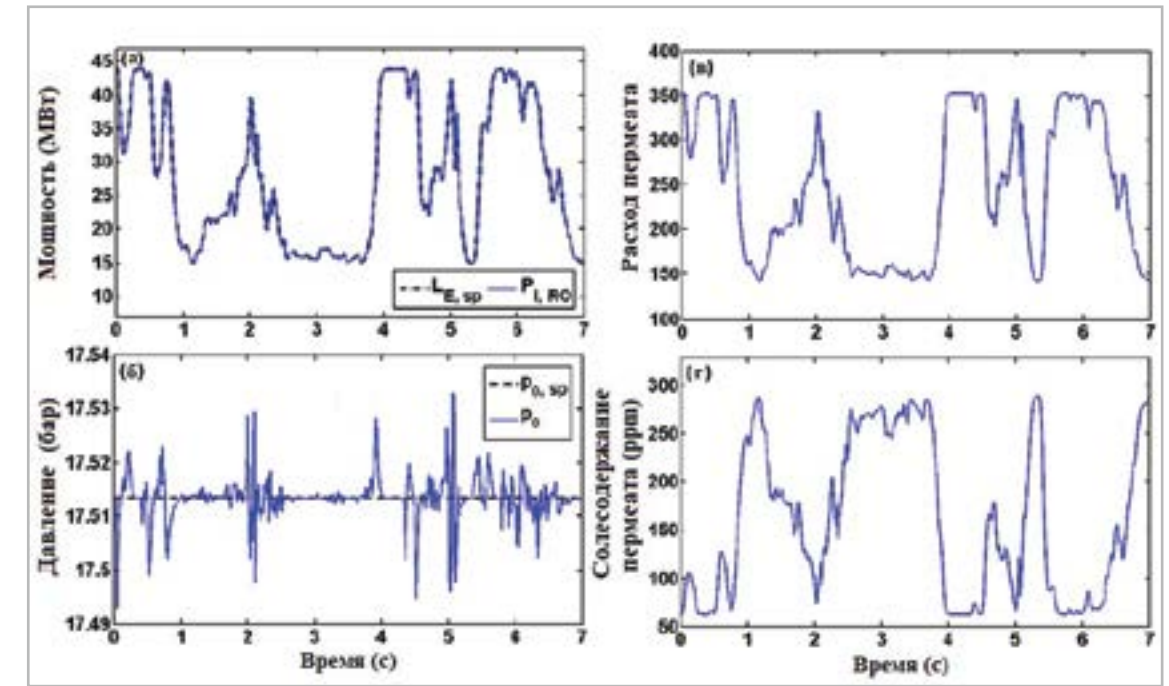


Рис. 6. Выходные ответы на ПЭН для 3 случая  
(а)  $L_{E,sp}$  против  $P_{I,RO}$ ; (б)  $p_{0,sp}$  против  $p_0$ ; (в)  $Q_n$ ; (г)  $S_n$

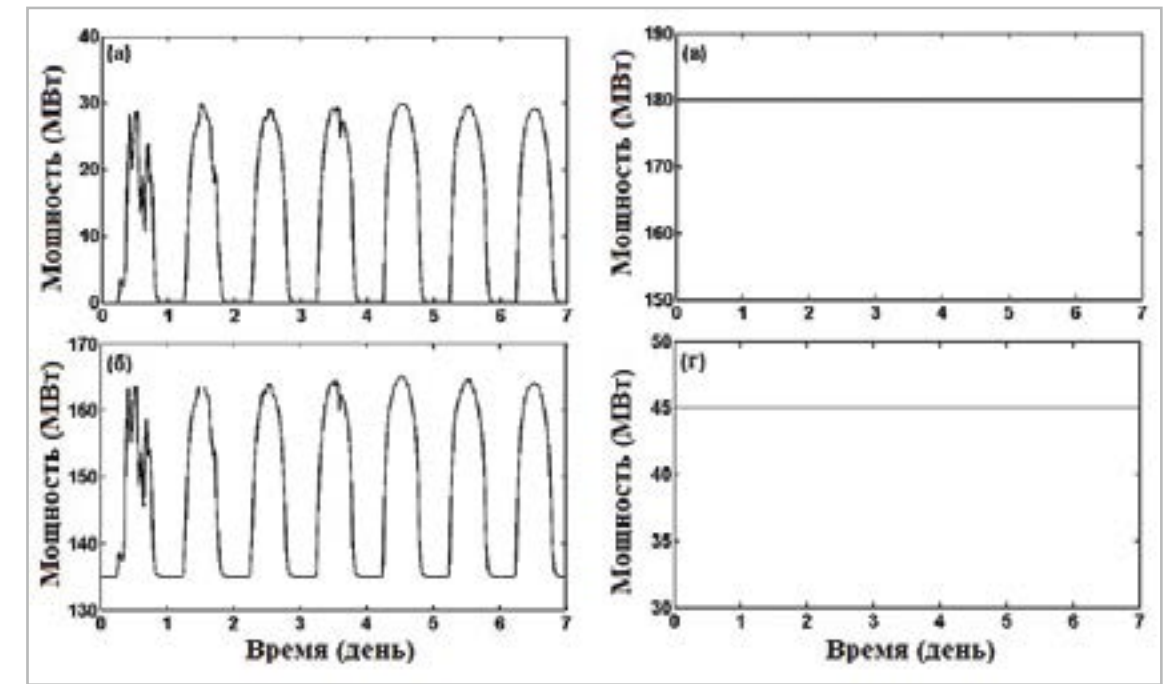


Рис. 7. Профили нагрузки/генерации для 4 случая  
(а) выработка электроэнергии с помощью фотоэлектрической солнечной энергии; (б) оптимальный график отгрузки, соответствующий максимизации чистой приведенной стоимости; (в) полезная нагрузка с учетом ПЭН в установке ОО и спрос на электроэнергию в сети; (г) ПЭН

### ВЫВОДЫ

1. Проведен динамический анализ производительности опреснительной установки ОО, интегрированной в ГБЭС, для количественной оценки ключевых динамических характеристик и изучения различных технических возможностей, которые могут возникнуть при включении гибких энергетических конфигураций в электрическую сеть.
2. Разработана динамическая модель процесса пресне-

ния ОО, в которой используется спирально-навитый мембранный модуль и соответствующая схема управления.

3. Получены результаты тематических исследований, которые показывают, что ОО-установка, будучи интегрированной в ГБЭС, может быстро реагировать и поддерживать требуемое изменение в течение достаточно длительного периода времени в ответ на большие и быстрые изменения в ПЭН для поддержки различных типов вспомогательных услуг.



## НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

С. П. Высоцкий, д.т.н., профессор; А. В. Писаренко, к.т.н., доцент

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» г. Макеевка

**Аннотация.** Выполнен анализ внутренних причин – состава транспортируемой среды, и внешних причин – механических воздействий от подработок и обводнений территорий в результате затопления шахт и погодных аномалий различной природы, на вероятность отказов и надежность работы трубопроводного транспорта. Приведены результаты исследований упрочнения почвы с использованием различных композиций на основе жидкого стекла. В отличающихся условиях внешних воздействий при изменении причин обводнения территории обоснована целесообразность применения разных композиций. Проанализировано влияние длительности эксплуатации трубопровода при транспортировке средств с различной коррозионной активностью на вероятность появления повреждений и надежность работы трубопроводного транспорта. Выполнен анализ эффективности использования трубопроводного транспорта при транспортировке тепла по трубопроводам различного диаметра.

**Ключевые слова:** трубопроводные коммуникации; тиксотропный эффект; коррозионная активность; длительность эксплуатации.



Высоцкий  
Сергей Павлович



Писаренко  
Анастасия Валериевна

Транспорт товаров и услуг является неотъемлемой частью существования современной цивилизации. Для транспорта высокорационных энергоносителей (нефть и природный газ), некоторых химических соединений (аммиак) используется, в основном, трубопроводный транспорт. При доставке указанных товаров между континентами используется танкерный флот. По сравнению с такими видами транспорта как железно-дорожный, автомобильный, авиационный трубопроводный отличается высокой надежностью и относительно низкой стоимостью.

Безальтернативным решением является трубопроводный транспорт горячей воды для систем отопления и, в некоторых случаях, для систем горячего водоснабжения теплоэлектростанций и теплофикационных котельных. Транспорт водоугольных суспензий автомагистральным трубопроводом стал привлекательной альтернативой другим видам транспорта, прежде всего, железнодорожному. В России был построен и находится в опытно-промышленной эксплуатации трубопровод для переноса водоугольного топлива (ВУТ) Белово-Новосибирск, годовой производительностью 3 млн. тонн угля на сухую массу. По указанному трубопроводу ВУТ транспортировалось от шахты Ильская в г. Белово на расстояние 260 км до ТЭЦ 5 г. Новосибирска.

Началом российского трубопроводного транспорта можно считать 1908 год, когда был сооружен нефтепровод, а в 1944 г. был сооружен трубопровод по транспортировке природного газа. Оба трубопровода находятся в эксплуатации до настоящего времени. Сеть трубопроводного транспорта покрывает огромные расстояния и составляет 230 тысяч километров, из них 143 тысячи километров – трубопроводы природного газа и 87 тысяч километров трубопроводов для транспортировки опасных жидкостей (нефть, газовый конденсат, нефтепродукты, жидкий аммиак и пр.). Трубопроводы проложены по территории с пересечением более 6000 рек [1].

Надежная, безопасная и эффективная эксплуатация трубопроводного транспорта является важным условием обеспечения не только стабильности и устойчивости работы отдельных регионов, но и экономики многих стран. Кроме этого в некоторых регионах возникают опасности при транспортировке такого безопасного продукта, как вода. Так, например, в Донецкой Народной Республике в районе г. Горловка подача воды в Донбасс осуществляется по каналу Северский Донец-Донбасс и на протяжении более 17 км проходит по трубопроводам большого диаметра. Трубопроводы проходят по территории, расположенной в местах подработок шахт. В отдельных местах просадка почвы под трубопроводами достигала 2,7 м. Нарушение или разрывы трубопровода или нескольких трубопроводов могут привести к тяжелым экологическим последствиям вследствие так называемого «эффекта домино».

Своевременный качественный анализ причин и последствий аварийных ситуаций, имеющих место при эксплуатации трубопроводных транспортных коммуникаций, может являться одним из методов предотвращения необратимых, сложных последствий.

Основные причины разрушения трубопроводов следующие: коррозия металла труб под напряжением, конструкционные дефекты, влияние природного воздействия,

### Список литературы

1. Wuebbles D, Jain A. Concerns about climate change and the role of fossil fuel use. *Fuel Processing Technology* 2001;71(1–3):99–119.
2. Hamsic, N., Schmelter, A., Mohd, A., Ortjohann, E., Schultze, E., Tuckey, A., et al. Increasing Renewable Energy Penetration in Isolated Grids Using a Flywheel Energy Storage System. In: *Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives; 2007 Apr 12–14; Setúbal, Portugal.* p. 195–200.
3. Ruth M., Zinaman O., Antkowiak, M., Boardman R., Cherry R., Bazilian M. Nuclear-renewable hybrid energy systems: Opportunities, interconnections, and needs. *Energy Conversion and Management* 2014;78:684–94.
4. Bragg-Sitton S., Boardman R. Overview of U.S. DOE Research and Development of Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems. *Transactions of the American Nuclear Society* 2015;112:113–6.
5. Garcia H., Chen, J., Kim J., McKellar M., Deason W., Vilim R., et al. Nuclear Hybrid Energy Systems - Regional Studies: West Texas & Northeastern Arizona. Idaho Falls (ID): Idaho National Laboratory, Nuclear Science and Technology Division; 2015 Apr. Report No.: INL/EXT-15-34503. Contract No.: DE-AC07-05ID14517. Sponsored by the U.S. Department of Energy.
6. Cherry R., Aumeier S., Boardman R. Large hybrid energy systems for making low CO2 load-following power and synthetic fuel. *Energy & Environmental Science* 2012;5(2):5489–97.
7. Bragg-Sitton S., Boardman R., Rabiti, C., Kim J., McKellar M., Sabharwall P., et al. Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems: 2016 Technology Development Program Plan. Idaho Falls (ID): Idaho National Laboratory, Nuclear Science and Technology Division; 2016 Mar. Report No.: INL/EXT-16-38165. Contract No.: DE-AC07-05ID14517. Sponsored by the U.S. Department of Energy.
8. Panwar, M., Mohanpurkar, M., Osorio, JD, Hovsapien, R. Significance of Dynamic and Transient Analysis in the Design and Operation of Hybrid Energy Systems. In: *Proceedings of the 9th International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human Machine Interface Technologies [Internet]; 2015 Feb 23–26; Charlotte, NC.* Available: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1179379/>.
9. Eichman J., Harrison K, Peters, M. Novel Electrolyzer Applications: Providing More Than Just Hydrogen. Boulder (CO): National Renewable Energy Laboratory; 2014 Sep. Report No.: NREL/TP-5400-61758. Contract No.: DE-AC36-08GO28308. Sponsored by the U.S. Department of Energy.