

## ВНЕПИКОВОЕ ОПРЕСНЕНИЕ ВОДЫ НА БАЗЕ ОТБОРНОГО ПАРА ЭНЕРГООБЛОКОВ АЭС С ВВЭР

В.А. Хрусталева, В.М. Сучков

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
г. Саратов, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1630-926X>, [khroustalevva@mail.ru](mailto:khroustalevva@mail.ru)

**Резюме:** В статье рассматривается комбинирование атомной электростанции с водородными реакторами (ВВЭР) и дистилляционной опреснительной установкой с горизонтально-трубным пленочным испарителем (ДОУ ГТПИ), их совместный режим работы в периоды покрытия провалов графиков электрической нагрузки и термоэкономическая эффективность. Представлены ряд преимуществ по сравнению с другими методами опреснения, технические характеристики и стоимость ДОУ ГТПИ выпускаемого ряда в России с учетом неучтенных затрат (строительные работы, работы по подводу морской воды, электроэнергии, отводу рассола, дистиллята). Такой энергокомплекс позволяет повысить КИУМ ядерного реактора, а также решить проблему нехватки пресной воды. Термоэкономическую эффективность данного энергокомплекса можно определить как полным, так и упрощенным алгоритмом с помощью введения "термоэкономического индекса". При этом многопродуктовый энергокомплекс с отбором пара от турбины АЭС на ДОУ ГТПИ следует сравнить с вариантом работы от специальных паровых котельных установок (КУ). При анализе результатов расчетов по упрощенному алгоритму на основе термоэкономического индекса заметно влияние фактора стоимости дистиллята на рынке, а также меньшая эффективность работы опреснительной установки, питаемой паром от КУ, чем от отбора пара от АЭС, особенно при увеличении числа часов работы ДОУ ГТПИ.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, опреснение воды, опреснительная установка, чистый дисконтированный доход, термоэкономический индекс.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-23-35

## OFF-PEAK WATER DISPERSAL BASED ON STEAM SELECTING OF NPP ENERGY BLOCKS WITH PWR

V.A. Khroustalev, V.M. Suchkov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,  
Saratov, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1630-926X>, [khroustalevva@mail.ru](mailto:khroustalevva@mail.ru)

**Abstract.** The article considers the combination of a nuclear power plant (NPP) with water-cooled water reactors (WCWR) and a distillation desalination plant (DDP) with a horizontal-tube film evaporator (HTFE), their joint operation during periods of covering the dips of electric load schedules and thermo-economic efficiency. A number of advantages are presented in comparison with other methods of desalination, technical characteristics and cost of the DDP with a HTFE of made in Russia series, taking into account the costs not included (construction works, work on sea water supply, electric power, brine distillate, distillate). Such an energy complex makes it possible

*to increase the capacity factor of a nuclear reactor, as well as to solve the problem of lack of fresh water. The thermo-economic efficiency of this energy complex can be determined both by the complete and simplified algorithm by introducing the "thermo-economic index". Wherein the multi-product energy complex with steam supply from the turbine of the nuclear power plant to the DDP with HTFE should be compared with the version of work from special steam boiler plants (SBP). When analyzing the results of calculations using a simplified algorithm based on the thermo-economic index, the effect of the distillate cost factor on the market is noticeable, as well as the less efficient operation of the desalination plant fed with steam from the SBP as opposed to the steam extraction from the nuclear power plant, especially with increasing the number of hours of operation of the DDP of the HTFE..*

**Key words:** nuclear power station, water desalination, desalination plant, net present value, thermoeconomic index.

В настоящее время в связи с быстрым развитием промышленности непрерывно увеличивается потребление технической и питьевой воды. Уровень водопотребления вырос настолько, что в некоторых маловодных районах мира местных ресурсов уже не хватает для покрытия возрастающих потребностей (особенно относится к таким странам Ближнего Востока и Африки). Поэтому развитие технологий опреснения морской воды является серьезной обещающей альтернативой. Но следует отметить, что процесс опреснения воды требует большого количества энергии, соответственно рост опреснения морской воды приведет и к серьёзному увеличению энергопотребления [1,11].

Для пополнения водных ресурсов предлагается использовать технологии опреснения воды: мембранные (электродиализ, обратный осмос) или термодистилляционные (установки на базе испарителей с естественной циркуляцией, принудительной циркуляцией, установки мгновенного вскипания, дистилляционно-опреснительные установки с горизонтально-трубным плёночным испарителем, работающие под вакуумом, а также с вертикально-трубным испарителем).

Например, электродиализ целесообразно применять для опреснения слабоминерализованных и сточных вод, концентрирования рассолов и получения из них кислот и щелочей. Но в то же время применение их на ТЭС или АЭС невозможно, так как нужны установки большой единичной мощности с бессточными схемами, а также из-за проблем, возникающих в процессе их эксплуатации. Более подробно о работе, преимуществах и недостатках каждого вида установок сказано в [1, 12, 13]. Вместе с тем использование опреснительных установок с горизонтально-трубным плёночным испарителем, в сравнении с другими установками, имеет ряд преимуществ:

- 1) широкий диапазон работы испарителя по рабочему давлению;
- 2) малая металлоёмкость;
- 3) получаемый дистиллят имеет температуру, близкую к температуре воздуха (среднегодовой для жаркого климата);
- 4) стабильность и высокий уровень качества получаемого дистиллята, обусловленные малыми объёмами перерабатываемой жидкости, находящейся в аппарате, и, тем самым, исключаемость многих вредных последствий (например, при переходе с одного режима на последующий);
- 5) простота конструкции и компактность.

Ниже, в табл.1 и табл. 2 представлены технические характеристики и стоимость выпускаемых ДОУ ГТПИ в России (приведены данные по установкам малой, средней и высокой производительности [8].

Стоимость собственно ДОУ ГТПИ и дополнительного оборудования станции подготовки питьевой воды (СППВ) определена укрупненно по методике завода ЗАО НПП “МАШПРОМ”.

Таблица 1.

Технические характеристики ДОУ ГТПИ (производство РФ)			
Характеристика	ДОУ-50	ДОУ-400	ДОУ-700
Дистиллят:			
производительность, м <sup>3</sup> /ч	50	400	700
массовая концентрация солей, мг/л	1–10	1–10	1–10
давление, МПа	0,4	0,4	0,6
Пар:			
для осуществления опреснения:			
давление, МПа	0,15–1	0,15–1,4	0,15–1,4
расход, т/ч	3,5	26	45,0
для создания и поддержания вакуума:			
давление, МПа не менее	0,6	1,0	1,0
расход, т/ч	0,3	1,5	3,3
Габариты установки:			
длина, м	15,0	21,0	38,0
ширина, м	5,0	26,0	26,0
высота, м	7,4	21,0	28,0

В связи с расширением географии сооружения новых АЭС с ВВЭР в страны с жарким климатом и малым запасом пресных вод (“Кудан-Кулам” Индия, “Аккуйю” Турция, “Руппор” Бангладеш, “Бушер” Иран, Иордания, Египет, Саудовская Аравия и т.д.) уже сейчас следует проанализировать условия экономичности подключения к отборам ПТУ АЭС мощных ДОУ ГТПИ.

Тем более что в СССР и РФ накоплен реальный опыт эффективного использования атомной энергии с целью опреснения малосоленых вод Каспийского моря при подготовке промышленного дистиллята для технических целей и на станции СППВ – для питьевых нужд (г. Шевченко, Шевченковская АЭС с БН-350 со станциями опреснения и кондиционирования дистиллята).

Отметим, что окончание эксплуатации Шевченковской АЭС не имело никаких причинных связей с какими-либо технологическими трудностями, но скорее со старением оборудования ядерной части Шевченковского энергокомплекса, а также с возникновением трудностей при передаче собственности новым субъектам (Казахстан).

Городская ТЭЦ обеспечивала отборным паром опреснительные установки – «Самовары», которые, в свою очередь, с расходом 120 000 м<sup>3</sup>/сутки (или 5000 м<sup>3</sup>/час) пресной водой снабжали как г. Шевченко (ныне Актау) с населением почти 170 000 чел. (данные на 1991 год), так и Прикаспийский горно-металлургический комбинат по добыче и переработке урановой руды. Добыча руды выполнялась открытым способом, что резко снижало ее себестоимость. Комбинат был принят государственной комиссией в эксплуатацию 16 января 1945 г. Впоследствии для опреснения морской воды Каспия была сооружена атомная ТЭЦ с РУ типа БН-350. В турбинах АЭС свежий пар расширялся не до давления в конденсаторе, как на обычных конденсационных АЭС, а до давления 0,7 МПа, и затем весь пар направлялся на «Самовары», то есть были установлены противодавленческие турбины. Если как на одного жителя города приходилось в час более 29 литров пресной воды (при норме для жаркого климата – 14,75 л/час), то отсюда следует, что опреснительная установка была рентабельна и необходима для города Шевченко.

Таблица 2

Стоимость опреснительной установки с учетом затрат (уровень цен 2016г.)

Наименование	Стоимость комплект. установки, млн. руб.	Разработка тех. докум., тран. расходы и монтаж, млн. руб.	Пуско-наладочные работы, млн. руб.	Итого, млн. руб.	Итого с невл. затр. в 20%, млн.руб	Итого с невл. затр. в 70%, млн.руб
1	2	3	4	5	6	7
ДОУ-50	48,0	34,3	3,0	85,3	102,36	145,01
ДОУ-400	450,0	296,0	7,5	753,5	904,2	1280,95
ДОУ-700	725,0	398	8,5	1131,5	1357,8	1923,55
СППВ-50	7,5	8,05	0,8	16,35	19,62	27,78
СППВ-400	80,0	44	1,2	125,2	150,24	212,84
СППВ- 700	110,0	60	1,2	171,2	205,44	291,04
ДОУ- 50+ СППВ-50	55,5	40,6	3,8	101,65 (2,03)*	121,98 (2,44)	172,81 (3,46)
ДОУ- 400+ СППВ-400	530,0	340	8,7	878,7 (2,20)	1054,44 (2,64)	1493,79 (3,73)
ДОУ- 700+ СППВ-700	835,0	458	9,7	1302,7 (1,86)	1563,24 (2,23)	2214,59 (3,16)
*В скобках указана удельная стоимость опреснительной установки на кубический метр производимого дистиллята.						

При многообразии условий уже выигранных по тендеру площадок для сооружения АЭС российской архитектуры за рубежом необходимо рассматривать как оптимистичный (колонка 6), так и пессимистичный (колонка 7) варианты, уточняя результат по критерию Сэвиджа (при наличии достаточно достоверных данных):

$$\Delta \mathcal{E} = \alpha \Delta \mathcal{E}_{\max} + (1 - \alpha) \Delta \mathcal{E}_{\min}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – вероятность верхней и нижней оценки стоимостей ДОУ ГТПИ.

В выражении (1) под верхней оценкой стоимости следует понимать итоговый результат с невлеченными затратами в ДОУ ГТПИ в 70%, под нижним – 20%.

Критерий Сэвиджа рекомендует в условиях неопределенности выбирать ту стратегию, при которой величина риска принимает наименьшее значение в самой неблагоприятной ситуации (когда риск максимален). Поскольку в данном случае наличие определенного риска вполне понятно (невключенные затраты, например, не могут быть на начальной стадии исследования заданы точно и т.д.).

Источником энергии для опреснительных установок кроме АЭС могут являться традиционные источники энергии. Однако в этих технологиях имеется ряд недостатков. Во-первых, непрерывный рост цен на органическое топливо, и особенно на газ. Во-вторых, значительное увеличение расходования энергии для целей опреснения вызовет дополнительное потребление нефти и газа и рост затрат на их транспорт, что тоже повлияет на рост цен на эти ресурсы.

Не следует забывать, что увеличение количества сжигаемого топлива ведет к увеличению выброса в атмосферу парниковых газов, что отрицательно сказывается на общемировой экологии (то есть на потеплении климата на Земле, что возможно, будет приводить к дальнейшему снижению запасов пресной воды).

В-третьих, многие описываемые технологии опреснения морских, солоноватых и соленых вод на сегодня недооценены по затратности. Это означает, что при расчётном “завышении” стоимости ДОУ ГТПИ, например, на поправку на невлеченные затраты,

возрастает “поле устойчивости”, то есть позитивных результатов по оценке эффективности применения теплоты нерегулируемых отборов паротурбинных установок АЭС для целей опреснения.

Технология использования теплоты отборов АЭС для опреснения воды сегодня является, пожалуй, единственным, широкодоступным и относительно эффективным технологическим решением.

Тем более, это решение становится все более реальным в связи с вышеперечисленными ранее в статье уже достоверно утвержденными площадками АЭС с РУ российской архитектуры в целом ряде жарких стран с малым запасом пресных вод. Отметим, что в предварительных соглашениях по ряду южных площадок Заказчиком предварительно заявлены в составе АЭС установки ДООУ ГТПИ.

Использование опреснительных установок для атомных электростанций позволяет решать задачи не только широкомасштабного водоопреснения, но и таких частных внутрестанционных задач, как очистка брызгального бассейна (ББ), подготовка добавочного конденсата, а при наличии теплофикационной установки (ТФУ), подготовка сетевой воды (особенно при открытой системе теплоснабжения). Попутно с решением этих задач [2]:

- 1) повышается КИУМ ядерного реактора (по тепловой мощности) при одновременном участии энергоблока АЭС в покрытии переменной части графика нагрузки;
- 2) на базе теплофикационного потока производится дистиллят и снижаются потери в конденсаторе;
- 3) с применением ДООУ ГТПИ малой мощности сравнительно малозатратно достигается подпитка изолированного “брызгального бассейна” для целей охлаждения реакторной системы (патент СГТУ №2285808) [7] (рис.1).



Рис. 1. Принципиальная схема продувки брызгального бассейна РУ АЭС

Данная схема работает следующим образом: отборный пар от АЭС и вода на очистку из брызгального бассейна поступают на опреснительную установку. В процессе работы установки помимо основного продукта дистиллята (отборный пар также преобразуется в дистиллят), выделяется кубовый остаток (соленая вода). Дистиллят направляется далее в брызгальный бассейн, а кубовый остаток проходит последующую термообработку до полного упаривания. С помощью химцеха компенсируется потеря только рабочего тела (пар) в турбинном цехе (возвращение рабочего тела от опреснительной установки обратно в турбинный цех возможно в виде чистого конденсата). Брызгальный бассейн является источником радиоактивности, а также потерь с капельным уносом и кубовым остатком,

поэтому для восполнения воды в ББ следует использовать отдельно работающую ДОУ ГТПА малой производительности. Поэтому можно пренебречь инфильтрацией воды через дно бассейна в связи с уплотнением его дна.

Отметим, что достаточный мировой опыт охлаждения конденсаторов АЭС морской циркуляционной водой на сегодня уже имеется. Однако для восполнения рабочего тела мощности химцеха может оказаться недостаточно. Это имеет место, когда отборный пар на ДОУ ГТПИ переносит свою стоимость, в конечном счете, на стоимость дистиллята и питьевой воды при широкомасштабном их производстве.

При расчете турбины К-1200-6,8-3000 для суточного графика нагрузок были построены расходно-энергетические характеристики в условиях подключения к нерегулируемым отборам опреснительных установок. В расчетах учитывалось изменение КПД блока АЭС при различных задаваемых энергетических и тепловых нагрузках. Рассмотрим пример совмещения суточного графика электрической нагрузки с работой ДОУ-700 (рис. 2), то есть заполнение ночного провала графика тепловой нагрузки РУ нагрузкой опреснения – выработкой пресной воды в бездефицитные часы графика. При этом не только “дозаполняется” график тепловой мощности РУ, но и улучшается экономичность выработки электроэнергии в ночной период, частично осуществляемой в этом случае на тепловом потреблении.

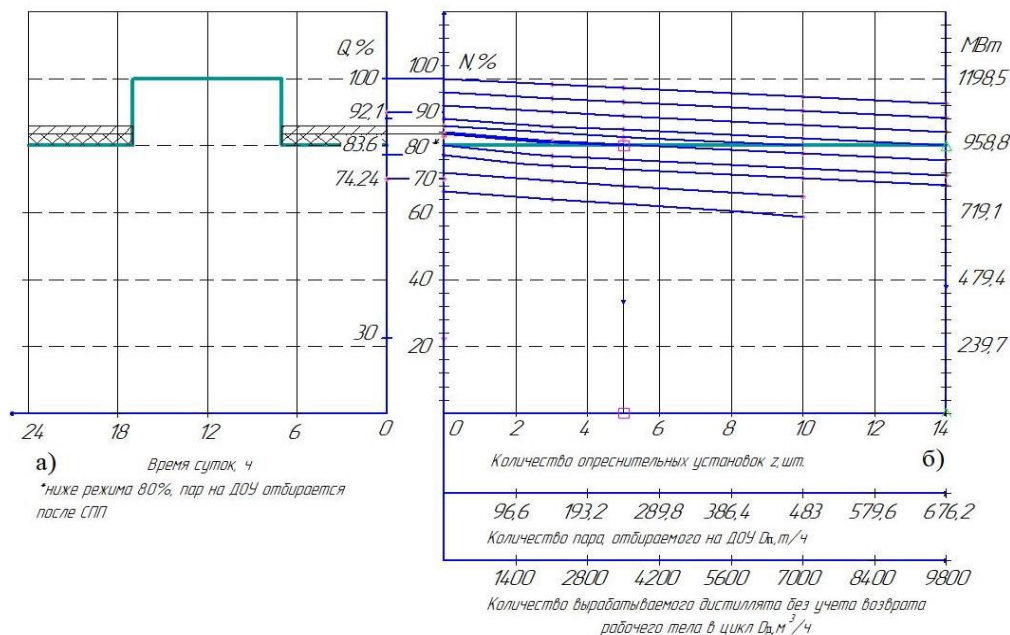


Рис. 2. Работа турбины К-1200-6,8-3000 по задаваемому суточному графику (а) и режимная диаграмма (расчет) снижения мощности при отпуске тепла на ДОУ ГТПИ (б)

Как пример расчета и “ключ” к использованию диаграммы (рис. 2, б) показано сопоставление двух энергетически сопоставляемых проектов, включающих действующую АЭС по диспетчерскому графику: днем – 100%  $N_{\text{ном}}$ , ночью – 80%  $N_{\text{ном}}$  и работающую на опреснение воды ДОУ одинаковой суммарной производительностью по дистилляту (ДОУ ГТПИ-700). Но в первом случае ДОУ питается от нерегулируемого отбора пара ПТУ АЭС, во втором – от группы паровых котельных на газовом топливе. В первом случае (в работе 5 ДОУ ГТПИ) в период провала, обеспечивая заданную электрическую мощность  $N=80\%$  и отбор на ДОУ, необходимо поддерживать более высокую мощность РУ от  $Q_{\text{ру}}=83,5\%$   $Q_{\text{ном}}$

до  $Q_{\text{ру}}=86,6\% Q_{\text{ном}}$ , то есть рост среднегодового значения КИУМ по тепловой мощности ядерного реактора увеличивается с 0,904 до 0,922.

Для пояснения процедуры сопоставления двух вариантов в условиях требования равного их энергетического эффекта предложена следующая блок-схема (рис.3).

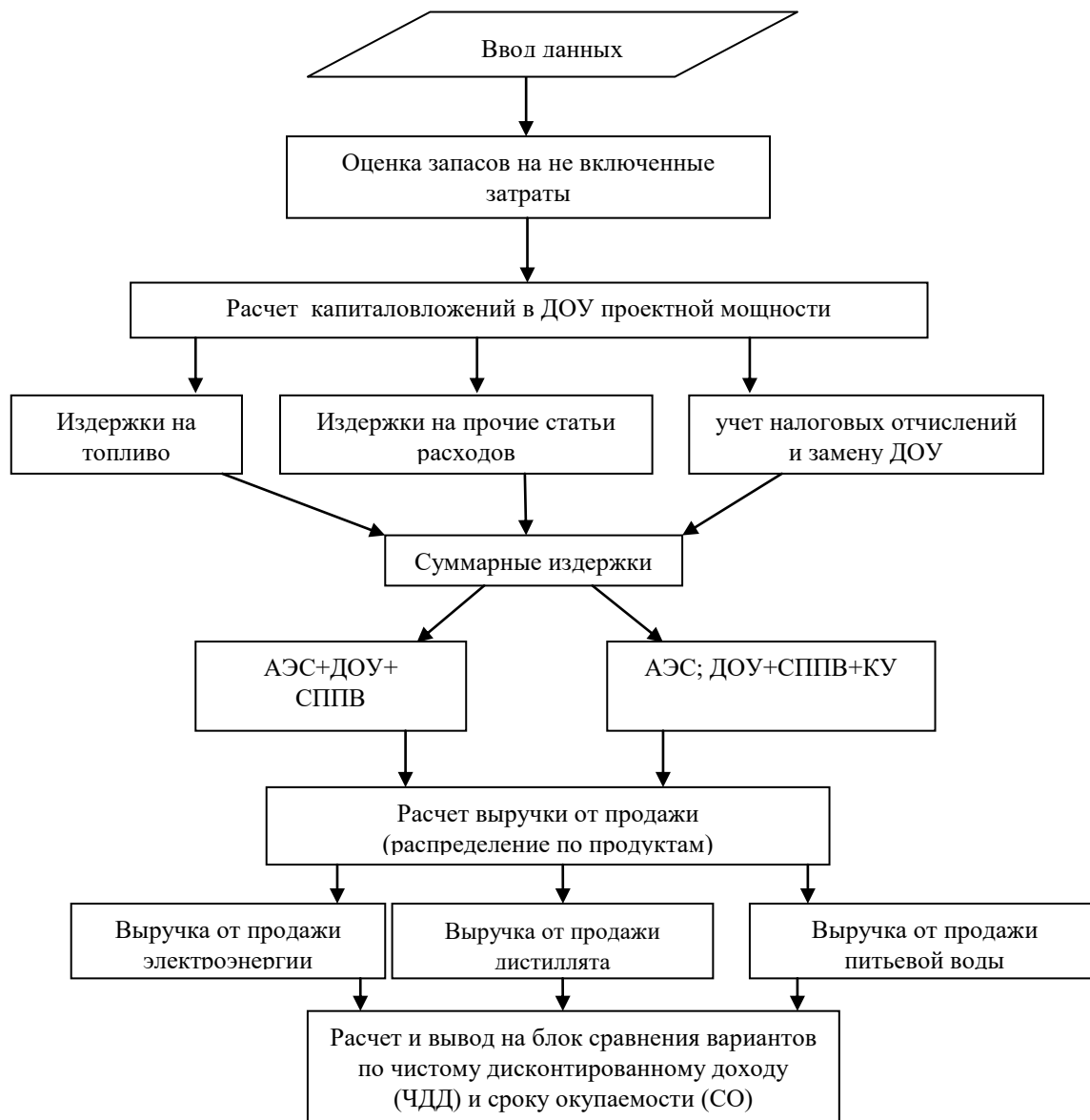


Рис.3 Блок-схема расчета и сравнения технико-экономических показателей проектов  
1– АЭС+ДОУ+СППВ; 2– АЭС; ДОУ+СППВ+КУ

В [3, 4] показано, что в данной ситуации для экспресс-анализа и нахождения лучшего варианта можно применить упрощенный алгоритм, который назван методикой предварительной оценки эффективности на основе термoeкономического индекса.

Это становится возможным, когда в обоих проектах одинаковы затраты в основную и дополнительную часть оборудования (АЭС и ДОУ), а изменяются затраты на топливо и тарифы на вырабатываемые продукты.

Возможность варьировать валовую прибыль от продажи электроэнергии по суточному тарифному меню, а также цену за дистиллят и питьевую воду в зависимости от региона по уравнению термоэкономического индекса (2) [3]:

$$\eta_{т/э}^{(1)} = \frac{\bar{\tau}_{пр} (N_{пр} \Pi_{э\bar{э}}^{пр} + z(1 - \alpha_{пв})(D_{д} - D_{п})\Pi_{дв} + z\alpha_{пв}(D_{д} - D_{п})\Pi_{пв}) + \bar{\tau}_{баз} N_{баз} \Pi_{э\bar{э}}^{баз}}{(Q_p^{баз} \bar{\tau}_{баз} + Q_p^{пр} \bar{\tau}_{пр}) \frac{\Pi_{я}}{q_{я}} + D_{п} z_{хц}} \quad (2)$$

Здесь  $\bar{\tau}_{баз}$ ,  $\bar{\tau}_{пр}$  – относительные периоды (в расчете на 1ч) работы энергоблока АЭС с включенными ДОУ ГТПИ ( $\bar{\tau}_{пр}$ ) и при работе только на генерацию электроэнергии ( $\bar{\tau}_{баз}$ ), нормированную на единицу;  $\Pi_{э\bar{э}}^{пр}$ ,  $\Pi_{э\bar{э}}^{баз}$  – отпускные тарифы на электроэнергию с шин АЭС в провальный и базовый период, руб./МВт\*ч;  $N_{пр}$ ,  $N_{баз}$  – электрическая мощность турбины в часы провала и в базовом режиме соответственно, МВт;  $Q_p^{баз}$ ,  $Q_p^{пр}$  – тепловая мощность РУ в базовой части графика, а также в провальной его части с учетом отпуска пара из отбора ПТУ АЭС на присоединенных ДОУ ГТПИ, МВт(т);  $\alpha_{пв}$  – количество дистиллята для переработки в питьевую воду (принимается в зависимости от требований в заданном регионе);  $D_{д}$  – выработка дистиллята ДОУ, т/ч;  $D_{п}$  – количество отбираемого пара на ДОУ, т/ч;  $\Pi_{дв}$ ,  $\Pi_{пв}$  – отпускная цена на дистиллированную воду и питьевую воду, руб./т;  $\Pi_{я}$  – стоимость ядерного горючего, руб./кг  $UO_2$ ;  $q_{я}$  – теплотворная способность ядерного горючего (1200 МВт\*ч/кг  $UO_2$ ), принимаемая на основе данных по выгоранию топлива В (МВт\*сут./ кг  $UO_2$ ) в РУ [14];  $z_{хц}$  – удельные ожидаемые затраты в подготовку рабочего тела (дистиллят) в химцехе, руб./т;  $z$  – принятое количество опреснительных установок, шт.

Для такой же технологии опреснения в ДОУ ГТПИ, но с использованием пара на ДОУ от специальной паровой котельной (в данном примере считаем, что паровая котельная необходимой мощности в данном регионе имеется) формула для  $\eta_{т/э}^{(2)}$  второго варианта будет отличаться только лишь затратной частью, то есть знаменателем. При этом следует учесть затраты на газовое топливо для котельной (в экспортных ценах) и снижение тепловой мощности РУ при работе в провальной части без нагрузки по пару для ДОУ (числитель из формулы (2) обозначим – К):

$$\eta_{т/э}^{(2)} = \frac{K}{(Q_p^{баз} \bar{\tau}_{баз} + Q_p^{пр} \bar{\tau}_{пр}) \frac{\Pi_{я}}{q_{я}} + D_{п} z_{хц} + Q_{доу} \bar{\tau}_{пр} \frac{\Pi_{г}}{q_{г}}} \quad (3)$$

где  $Q_{доу}$  – тепловая мощность РУ АЭС в провальной части без подключенных опреснительных установок, МВт(т);  $\Pi_{г}$  – экспортная цена газа, руб./м<sup>3</sup>;  $q_{г}$  – теплотворная способность газа в КУ.

Для расчета термоэкономического индекса для второго варианта принималось: теплотворная способность газа в КУ с учетом КПД котла  $q_{г} = 31,5$  МДж/м<sup>3</sup>, или 0,00875 МВтч/м<sup>3</sup>; экспортная цена на газ оценивалась в диапазоне 250–350 \$ США за 1000 м<sup>3</sup> газа, или 14,5–20,3 руб./м<sup>3</sup> [14].



Для расчетов по более полному алгоритму, представленному в блок-схеме (рис. 3), основной показатель, который будет влиять на термоэкономическую эффективность – издержки на топливо, определяются по формуле [4]:

$$I_T^{AЭС} = \frac{N_T \tau_{\varepsilon}}{24B \frac{0,123}{b_{\varepsilon}}} \cdot \Pi_{AЭС}, \quad (4)$$

$$I_T^{KY} = Q_{доу}^{год} \cdot b_{рк} \cdot \Pi_{газ} \quad (5)$$

Чтобы показать термоэкономическую эффективность сравниваемых проектов, применим показатели чистого дисконтированного дохода и дисконтируемого срока окупаемости [4]:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T (R_t - Z_t) \alpha_t - K_0. \quad (6)$$

При ЧДД=0 определяется срок окупаемости.

Для расчета термоэкономического индекса принимался одинаковый временной график производства воды в обоих сопоставляемых вариантах. Для двухпродуктовых энергокомплексов сопоставление с соблюдением равного энергетического эффекта следует провести с учетом достижения заранее оптимальности каждого из них. В этом случае можно отказаться от требования сопоставимости временных графиков производства второго продукта – пресной воды, оставив это требование только для электроэнергии, как нескладируемого продукта, потребляемого, к тому же, по тарифному меню, зависящему от времени. Тогда второй вариант можно предварительно улучшить, выровняв его с 1-ым только по общему объему опреснения воды, распределив её производство равномерно в течение суток.

В табл. 3 приведены результаты расчетов по упрощенному и более правильному полному алгоритму сопоставления вариантов.

Таблица 3

Технико-экономические показатели вариантов

Число часов работы опреснительной установки, час/сутки		6	10	14	24		
Варианты сравнения*		5 ДОУ-700 (АЭС)			А	Б	В
Термоэконом. индекс	$\Pi_{д}=100$	13,13	13,29	13,46	9,2	7,7	6,59
	$\Pi_{д}=300$	14,03	14,83	15,68	9,84	8,6	7,68
	$\Pi_{д}=500$	14,94	16,38	17,90	10,47	9,49	8,76
Тепловая мощность, МВт/сутки		1082,25	1787	2553,6	1082,25	1787	2553,6
Капвложения, млн.руб.	в ДОУ	7816,2			2090,46	3248,46	4689,72
	в РК				118,92	191,1	276,64
	общее				2209,38	3439,56	4966,36
Расход топлива	кг я.т./сутки	0,4737	0,7895	1,1053			
	кг газ/сутки				66594,5	109971,7	157144,6
Издержки на топливо, млн.руб.		12,62	21,04	29,45	243,1	669,0	1338,4

Продолжение таблицы 3

Себестоимость дистиллята, руб./м <sup>3</sup>		132,8	80,98	58,85	158,59	138,04	129,28
Укрупненный срок окупаемости $CO = (K_{опр} + I_T) /$ ЧП, лет	$\Pi_d = 100$	-	38,8	12,99	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	7,62	3,49	2,26	1,94	2,00	2,41
	$\Pi_d = 500$	3,47	1,83	1,24	0,98	1,00	1,15
Чистый дисконтирован ный доход $E_{вн} = 0,08$ , млн.руб	$\Pi_d = 100$	-	-	4218	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	9881	26189	42496	15803	25739	32434
	$\Pi_d = 500$	26286	53530	80775	32208	53081	70712
Чистый дисконтирован ный доход $E_{вн} = 0,1$ , млн.руб	$\Pi_d = 100$	-	-	1665	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	6308	19679	33049	12480	20367	25522
	$\Pi_d = 500$	19758	42095	64433	25930	42783	56906
Чистый дисконтирован ный доход $E_{вн} = 0,12$ , млн.руб	$\Pi_d = 100$	-	-	-	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	3790	15157	26524	10178	16646	20727
	$\Pi_d = 500$	15225	34215	53206	21613	35705	47409
Срок окупаемости при учёте $E_{вн} = 0,08$ , лет	$\Pi_d = 100$	-	-	15,78	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	9,92	5,73	4,2	3,98	3,88	4,15
	$\Pi_d = 500$	5,76	3,98	2,49	2,96	2,89	2,98
Срок окупаемости при учёте $E_{вн} = 0,1$ , лет	$\Pi_d = 100$	-	-	20,82	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	11,11	6,15	4,65	4,09	3,99	4,27
	$\Pi_d = 500$	6,06	4,08	3,46	3,00	2,93	3,03
Срок окупаемости при учёте $E_{вн} = 0,12$ , лет	$\Pi_d = 100$	-	-	-	-	-	-
	$\Pi_d = 300$	13,09	6,2	4,73	4,2	4,1	4,4
	$\Pi_d = 500$	6,39	4,18	2,5	3,04	2,97	3,07

Примечание: \*В варианте А в работе находится 1 ДОУ-700 и 1 ДОУ-200 (которая находится на ТО 3 часа в сутки) для выравнивания вариантов по выработке дистиллята. В варианте Б в работе находится 2 ДОУ-700 и 1 ДОУ-50 (часть суток работает с увеличенной мощностью). В варианте В в работе находится 3 ДОУ-700 (одна из которых находится на ТО 2 часа в сутки).

#### Выводы

1. В условиях быстрого развития атомной энергетики и растущего спроса на энергоблоки АЭС российской архитектуры со стороны развивающихся стран сегодня следует повышать эффективность энергокомплексов АЭС с ВВЭР путем комбинирования с дистилляционными опреснительными установками для условий жаркого климата и маловодных местностей. По расчетам с 5 установками ДОУ ГТПИ выработка дистиллята равна 3250 м<sup>3</sup>/ч, тогда как на Шевченковском энергокомплексе выработка была 5000 м<sup>3</sup>/ч. Однако, из рис. 2, б видно, что можно установить до 14 установок ДОУ ГТПИ, которые дадут выработку дистиллята 9100 м<sup>3</sup>/ч.

2. При экспресс-анализе сравнения двух проектов видно, что у первого проекта термозаконономический индекс выше, чем у второго. Также у второго проекта при увеличении числа часов работы термозаконономический индекс падает (при цене за дистиллят 300 руб./м<sup>3</sup>, цене на газ 14,3 руб./м<sup>3</sup> и 6 часах работы термозаконономический индекс составляет 9,84, а при 14 часах работы термозаконономический индекс составляет 7,61).

3. При более полном сравнении пять опреснительных установок, питаемые паром от АЭС, эффективнее при большем числе часов работы опреснительной установки в провале, чем питаемой паром от КУ. Но при меньшем числе часов работы из-за высоких капложений в опреснительную установку работа установок от КУ эффективнее, чем от АЭС (то есть при работе установки 14 часов в провале от АЭС показатель ЧДД выше, но меньше срок окупаемости по сравнению с работой установки от КУ). Поэтому в конкретном случае необходимо рассматривать уточненные исходные данные для выбора наиболее выгодного варианта совместного энергоснабжения и производства пресной воды.

#### Литература

1. Колодин М.В. Экономика опреснения воды. М.: Наука, 1985.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. Хрусталева В.А., Сучков В.М., Симонян А.А. Повышение эффективности АЭС в энергосистемах созданием на их основе комбинированных энергокомплексов // Совершенствование управления промышленной и экологической безопасностью производственных объектов в свете новых правил и нормативных правовых актов. Саратов: СГТУ, 2016.
4. Рогалева Н.Д., Зубкова А.Г., Мастерова И.В. Экономика энергетики: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
5. Клименко А.В., Зорина В.М. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочная серия. - 4 изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
6. Евсюкова К.А., Иноземцев И.В. Современные проблемы опреснения морской воды // Современные проблемы гуманитарных и общественных наук. 2014. №2. с. 52–55.
7. Способ работы охлаждающей системы тепловых и атомных электростанций с водоёмами-охладителями: пат.2285808 Рос. Федерация: МПК F01D 25/08 G21C 15/18 / В.А. Хрусталева, В.Л. Подберёзный, В.А. Писанец; заявитель и патентообладатель Саратовский Государственный Технический Университет(СГТУ).- № 2005100230/06; заявл. 11.01.2005; опубл. 20.10.2006, Бюл. №29.- 6с.
8. Установки дистилляционные опреснительные горизонтально-трубные пленочные. ЗАО НПП "МАШПРОМ", Екатеринбург, 2004.
9. Баклушин Р.П. Эксплуатационные режимы АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.

10. Десятов А.В., Колесников А.В., Якушин Р.В., Попель О.С. Автономные установки для опреснения морской воды с применением возобновляемых источников энергии // Вода: химия и экология. 2014. Том 12, №77. С. 34–40.
11. Дефицит пресной воды // <http://thewallmagazine.ru/> URL: <http://thewallmagazine.ru/lack-of-fresh-water/>.
12. Мелинова Л.В. Исследование, разработка и совершенствование термодистилляционных опреснительных установок для энерготехнологических комплексов : дис. канд. техн. наук: 05.14.01. М., 2004.
13. IAEA TECDOC-574. “Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination”. Vienna, 1990.
14. Региональная эффективность проектов АЭС / Басов В.И., Хрусталева В.А., Ипатов П.Л. и др. М.: Энергоатомиздат, 2005.

#### Авторы публикации

**Хрусталева Владимир Александрович** – докт. техн. наук, профессор кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Сучков Владимир Михайлович** – аспирант кафедры «Тепловая и атомная энергетика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

#### References

1. Kolodin M.V. Economics of desalination of water. M.: Science, 1985.
2. Zorin V.M. Nuclear power plant: study guide.–M.: Publishing house MPEI, 2012.
3. Khrustalev V.A., Suchkov V.M., Simonyan A.A. Improving the efficiency of nuclear power plants in power systems, creation on their basis of combined energy systems // Improving of the management of industrial and environmental safety. Saratov.:SSTU, 2016
4. Rogalev N.D., Zubkova A.G., Masterova I.V. Energy economics: guide for high school. M.: Publishing house MPEI, 2011.
5. Klimenko A.V., Zorin V.M. Thermoenergy and thermotechnics: Reference series. M.: Publishing house MPEI, 2007.
6. Evsykova K.A., Inozemtsev I.V. Modern problems of sea water desalination// Modern problems of the humanities and social sciences. - 2014. - №2. - p. 52-55.
7. Patent 2285808 (RU). МПК F 01D 25/08. Method for operation of cooling system for thermal and nuclear power stations with cooling water bodies / V. A. Khrustalev, V. L. Podbereznyj, V.A. Pisanets // Date of publication: 20.10.2006. Bull. № 29.
8. Horizontal-tube film desalination plants JSCSPE “MASHPROM”, Ekaterinburg, 2004.
9. R.P. Baklushin Exploitation modes of NPP.–M.: Publishing house MPEI, 2011.
10. A.V. Desyatov, A.V. Kolesnikov, R.V. Yakushin, O.S. Popel Autonomous units for desalination of sea water using renewable energy sources // Water: chemistry and ecology. - 2014. – tom 12, №77–p.34-40
11. Lack of freshwater // <http://thewallmagazine.ru/> URL: <http://thewallmagazine.ru/lack-of-fresh-water/>
12. Melinova L.V. Research, development and improvement of thermal distillation desalination plants for energy technology complexes: dis. cand. eng. sciences: 05.14.01. - M., 2004.
13. IAEA TECDOC-574. “Use of Nuclear Reactors for Seawater Desalination”. Vienna, 1990.
14. Regional efficiency of NPP projects / Basov V.I., Khrustalev V.A., Ipatov P.L. и др. - М.: Energoatomizdat, 2005.

#### Authors of the publication

**Vladimir A. Khrustalev** – doctor of tech. sciences, professor of the Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

©В.А. Хрусталев, В.М. Сучков

**Vladimir M. Suchkov** – postgraduate student of the Department of Thermal and Nuclear Power Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**Поступила в редакцию**

**20 марта 2018 г.**