

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯОП-УСТАНОВКИ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЯДЕРНЫХ ОТХОДОВ

А.В. Карелин  
(ФГУП ЦНИИмаш)

Л.А. Амелин  
(ОАО «НИИЭМ»)

И.Н. Хиблин  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

*Рассмотрены экономические характеристики ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов. Приведён сравнительный анализ экономических показателей ЯОП-установки и хранилищ сухого и мокрого типа. Показано, что срок окупаемости хранилища составляет 8 лет без перезагрузки ОЯТ, экономический эффект достигается за счёт отпуска тепла потребителю.*

**Ключевые слова:** ядерно-оптический преобразователь, радиоактивные отходы, утилизация, теплоноситель, газовая смесь, аргон – азот, активная зона (хранилище), сфера.

По мере обеспечения радиационной безопасности и в силу экономических обстоятельств в XXI веке ядерная индустрия неизбежно должна увеличить свою долю в производстве электрической и тепловой энергии. Существенную роль при этом имеет оптимальность решения проблем, связанных с обращением с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО). Определённый интерес представляют технологии утилизации ОЯТ и РАО.

Целью настоящей работы является оценка экономической эффективности установки по утилизации радиоактивных отходов на основе ядерно-оптических преобразователей [1 – 3].

ОЯТ после извлечения из реактора обладает наведённой активностью в несколько млн. Ки на тонну, обусловленной содержанием 3 – 10 % и более осколочных элементов, в основном короткоживущих. Из-за высокой скорости распада продуктов деления и радиоактивности использовать эту энергию непосредственно для производственных процессов или для отопления непрактично. При хранении в течение 2 – 4 месяцев его активность падает на два – три порядка, затем спад замедляется. Все ядерные реакторы для хранения ОЯТ имеют бассейны, в которых обеспечивается снижение уровня активности и тепловыделения, причём слой воды обеспечивает защиту персонала от облучения. Через несколько лет ОЯТ в составе транспортно-контейнера поступает во вне реакторное хранилище. Известно, что применение оболочек из циркониевого сплава в состоянии обеспечить хранение ОЯТ в бассейне не менее 50 лет. ОЯТ может находиться как в отдельных тепловыделяющих сборках (ТВС), так и в составе многоэлементных систем ТВС в контейнерах. Для выгрузки контейнеров используется два вида процессов. «Мок-

рая» выгрузка, обычно используемая для ОЯТ легководных ядерных реакторов, производится под водой. Для «сухой» выгрузки используют специальные боксы. По стоимости сухое хранение существенно дешевле мокрого. В табл. 1 приведён пример типичных расходов на промежуточное хранение ОЯТ в долларах на кг<sub>ТМ</sub> (т. е. на кг тяжёлого металла) в предположении 40-летней нормальной эксплуатации хранилища и при 54-летнем сроке от начала строительства до окончания демонтажа [4].

В соответствии с этим чистые удельные расходы на хранение 1 кг<sub>ТМ</sub> ОЯТ в течение 40 лет составят 320 долларов/кг<sub>ТМ</sub> или ~8 долларов/кг<sub>ТМ</sub> в год.

В США величина предварительных расходов для создания сухого хранилища на площадке АЭС оценивается от 9 до 12 млн. долларов в зависимости от специфических особенностей ОЯТ, предполагаемого для хранения. Стоимость закупки и загрузки контейнеров для сухого хранения, включая оплату труда, оценивается в 60 – 80 долларов за 1 кг<sub>ТМ</sub>.

Таблица 1

**Удельные расходы на промежуточное хранение ОЯТ в Японии (долларов/кгТМ)**

Расходы	«Сухое» хранилище	«Мокрое» хранилище
Капитальные затраты, в том числе	261	312,5
стоимость строительства	21	265,8
стоимость контейнеров	238	20
демонтаж	2	26,7
Операционные расходы	47	279,5
Транспортные расходы	12	8
Всего	320	600

Поскольку типичная загрузка ОЯТ в контейнере составляет 10 т, то на 1 единицу хранения (1 контейнер) придется затраты в (0,6 – 0,8) млн. долларов, соответственно 60 долларов/кг<sub>ТМ</sub>.

Операционные расходы невелики, поскольку с загруженным контейнером в эксплуатационный период практически ничего не требуется делать. Основные операционные расходы связаны с обеспечением работы системы безопасности и мониторинга, предписываемым действующим лицензированием. Для большинства площадок хранилищ, непосредственно связанных с действующим реактором, такие расходы во многом относятся к эксплуатационным операциям самого реактора. Поэтому дополнительные операционные работы для такой площадки составляют 0,75 млн. долларов в год (независимо от количества хранящегося ОЯТ).

Для независимых площадок хранения или площадок хранения на территории закрытых реакторов эксплуатационные расходы значительно выше и оцениваются на уровне (3 – 4) млн. долларов в год. Для сравнения отмечается, что если после закрытия реактора ОЯТ необходимо продолжать держать в бассейне (без изменения стандартных процедур), то эксплуатационные расходы составят на это ~9 млн. долларов в год.

В соответствии с этим чистые затраты на создание и эксплуатацию хранилищ на площадке действующей АЭС в течение 40 лет составят ~110 млн. долларов (в расчёте на 1000 т<sub>ТМ</sub> ОЯТ), а на площадке для закрытого реактора 200 млн. долларов. В соответствии с этим чистые удельные расходы на хранение 1 кг<sub>ТМ</sub> ОЯТ в течение 80 лет составят ~310 долларов/кг или ~4 долларов/кг в год.

Исходя из приведённых выше затрат, для создания и эксплуатации вне реакторного сухого хранилища, примем:

- эксплуатационные расходы 47/40 ≈ 1,2 доллара/(кг<sub>ТМ</sub>·год);
- капитальные затраты 260 долларов/кг<sub>ТМ</sub>;
- транспортные расходы 12 долларов/кг<sub>ТМ</sub>.

Отметим, что эти экономические характеристики относятся к типовому непереработанному ОЯТ с глубиной выгорания ≈5% (после энерговыработки в 40,5 ГВт·сут/т<sub>ТМ</sub> из низкообогащенного оксидного уранового топлива с типичным содержанием <sup>235</sup>U от 3,2 до 4,4 % и хранения в бассейне при АЭС в течение 3 лет); γ-активность такого ОЯТ (1,33 ... 3) · 10<sup>13</sup> Бк/кг<sub>ТМ</sub>, т. е. ≈(1,5 ... 3,4) · 10<sup>17</sup> Бк/м<sup>3</sup> соответственно плотности UO<sub>2</sub> 11·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>; основным источником проникающей радиации отработанного топлива ядерных реакторов является

γ-излучение <sup>137</sup>Cs (период полураспада T<sub>1/2</sub> = 30 лет) с энергией E<sub>γ</sub> = 662 кэВ.

Общая удельная нейтронная активность такого топлива 8·10<sup>8</sup> нейтр/с·т(U); удельная мощность тепловыделения 3,8 ... 2,6 кВт/т U ≈ 38 ... 26 кВт/м<sup>3</sup>.

При изменении глубины выгорания МОХ-топлива реактора ВВЭР-1000 от 10 до 58 МВт·сут/кг (U - Pu) результирующая нейтронная активность изменяется от 3,47·10<sup>8</sup> до 5,16·10<sup>10</sup> нейтр/с·т (U - Pu), что заметно больше нейтронной активности облученного диоксида урана [5].

Использование ядерного топлива и обращение с ОЯТ упрощается, если они имеют достаточную теплопроводность. Повышение теплопроводности топлива на основе UO<sub>2</sub> с 6 до 12 Вт/м·град при 100 – 200 °С возможно путём усовершенствования процесса осаждения полиураната аммония [6].

К настоящему времени для реакторов на тепловых нейтронах используется топливо от природного урана до обогащенного урана и плутония. Ядерное топливо бывает металлическим, керамическим, дисперсионным, керметным и др. Ядерное горючее для гетерогенных атомных реакторов изготавливается в виде порошка, сфер или таблеток. Наиболее распространено топливо в виде таблеток из спечённого диоксида урана UO<sub>2</sub> (слегка обогащённого <sup>235</sup>U) диаметром 9 – 10 мм, которые помещены в цилиндрическую защитную оболочку, изготовленную, например, из циркониевого сплава. Соответственно приведённые выше затраты для создания и эксплуатации вне реакторного сухого хранилища ОЯТ имеют оценочный смысл.

Для утилизации ОЯТ и РАО в ядерно-оптических преобразователях (ЯОП) с дальнейшей конверсией оптического излучения в электроэнергию с помощью фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) необходимо ОЯТ или РАО, обладающие гамма-активностью со скоростью  $f = 8,6 \cdot 10^{16}$  распадов/(м<sup>3</sup>·с) [1].

Исходя из удельной мощности объёмного тепловыделения в газе  $q_v = 5,5$  МВт/см<sup>3</sup> при полном расчетном КПД смеси  $\eta = 6\%$ , объёмная мощность излучения составляет 330 Вт/м<sup>3</sup> с примерно равным распределением энергии между диапазонами длин волн 350 – 410 и 750 – 1050 нм.

Существенное значение имеет вопрос радиационной стойкости ФЭП. Наименее подвержены воздействию радиации по своим вольт-амперным характеристикам тонкоплёночные фотоэлектрические преобразователи на основе халькопиритов – Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIS или CIGS).

Значение порогового флюенса быстрых, тепловых и надтепловых нейтронов, вызывающего ухудшение характеристик в германиевых и кремниевых полупроводниках, около  $10^{18}$  нейтр/м<sup>2</sup> [7]. Но показано, что при потоках  $\Phi < 10^{21}$  гамма-квант/м<sup>2</sup> ( $E = 1,25$  МэВ) фотоэлектрические параметры гетеропереходов  $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$  практически не изменяются, и обнаружена возможность их применения при потоках до  $\Phi \approx 2 \cdot 10^{23}$  квант/м<sup>2</sup>, при которых такие гетеропереходы сохраняют радиационную стойкость [8].

В ЯОП-установке, использующей 216 бочек ОЯТ или РАО с гамма-активностью со скоростью  $f = 8,6 \cdot 10^{16}$  распадов/(м<sup>3</sup>·с) в центральной части сферического хранилища с радиусом 15 м, предполагается установка ФЭП  $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$  (CIGS) общей площадью 4000 м<sup>2</sup> [3]. Для упомянутых выше ФЭП с гетеропереходами  $n\text{-ZnO}/p\text{-CuIn}_3\text{Se}_5$  время, в течение которого сохраняется радиационная стойкость по порядку величины:

$$10^{23}/(3600 \cdot 24F) = 400 \text{ суток}, \quad (1)$$

где  $F$  – поток гамма-квантов на расстоянии  $R = 10$  м от центра хранилища

$$F = \frac{fV_{\Sigma}}{4\pi R^2} = 2,9 \cdot 10^{15} \text{ Бк/м}^2, \quad (2)$$

где  $V_{\Sigma}$  – общий объём 216 бочек.

Однако в области разработки фотоэлектрических преобразователей наблюдается существенный прогресс, что позволяет предположить возможность решения вопроса о радиационной стойкости ФЭП в течение 5 – 10 лет [9].

Рассмотрим затраты на сооружение основных конструкций, приобретение и установку систем в ЯОП. Затраты на сталь для хранилища объёмом  $V = 14137$  м<sup>3</sup> в виде сферического газгольдера (рис. 1) с газораспределителем, опоры сферического хранилища (выполняются в виде стоек-колонн) и трубы для циркуляции газа показаны в табл. 2. Известно, что затраты в денежном выражении на возведение объекта из металла в 2 – 2,5 раза превышают затраты на сталь и другие материалы [10].

Затраты на сооружение фундаментов (под колонны (рис. 2), теплообменники, вентиляторы и насосы – всего 666 м<sup>3</sup>) при стоимости железобетона 20 тыс./м<sup>3</sup> составят 13,3 млн. руб.

Для заправки хранилища аргоном (точнее смесью с соотношением концентраций  $[\text{Ar}]:[\text{N}_2] = 45:1$ ) сначала закачивают 217 т аргона (чтобы в объёме

14670 м<sup>3</sup> создать давление 1 МПа), затем полученную смесь газов (массовая доля аргона – 92,5%) стравливают до атмосферного давления и закачивают 239 т аргона (до давления 1 МПа и массовой доли воздуха 0,7%). При повторении стравливания и закачки расход аргона будет около 241 т, а массовая доля воздуха в смеси будет убывать в 10 раз.

При цене аргона 65 руб./кг на заправку хранилища аргоном, обеспечивающую массовую долю воздуха не более 0,07%, затраты оцениваются в 45,3 млн. руб.

Кожухотрубчатые теплообменники для ядерно-оптических преобразователей можно изготовить на имеющемся оборудовании (ООО ПензГидромаш, УралТехКомплектация и др.). Каждый теплообменник имеет в цилиндрическом кожухе (внутренний диаметр 1500 мм, длина 5000 мм) теплообменные алюминиевые трубы (внешний диаметр 25 мм, толщина стенки 2,5 мм, длина одной трубы – 4,6 м, число труб  $4 \times 68$ ) для воды, число ходов труб для воды – 4; площадь поверхности труб около 100 м<sup>2</sup>, коэффициент оребрения трубок – 19. Теплообменник при противотоке обеспечивает отвод 2,4 МВт тепла от аргона (расчётное давление 1,6 МПа, расход аргона – 6 т/ч, потеря давления аргона – 1700 Па), охлаждая аргон от 133 до 30 °С; расход воды – 38 т/ч, вода нагревается от 20 до 75 °С; потеря давления воды – 2285 Па [2]. Фактически эти теплообменники больше «освоенных» на 25% по диаметру кожуха и поверхности труб, не считая оребрения. Исходя из цен 2012 г., затраты на изготовление и доставку 36 кожухотрубчатых теплообменников составят примерно  $36 \cdot 1,7 = 72$  млн. руб.

Подача охлажденного до 30° С аргона из теплообменника производится герметичными вентиляторами (рис. 3). Все 36 вентиляторов располагаются вне хранилища (после теплообменников) и должны создавать напор 2100 Па (16 кгс/м<sup>2</sup> – приведено к нормальной плотности воздуха  $\rho_0 = 0,122$  кгс·с<sup>2</sup>/м<sup>4</sup>) при расходе  $36 \cdot 2,1$  м<sup>3</sup>/с. Эти условия можно выполнить, выбрав соответствующий вентилятор [11]. Если частоту вращения принять равной 450 об/мин и взять за основу аэродинамическую схему центробежного вентилятора ЦАГИ ЦЗ-81; при внутреннем диаметре входного патрубка 594 мм для геометрически подобного вентилятора диаметр колеса получается 870 мм (по концам лопаток) при диаметре выходного патрубка 528 мм, мощность затрачиваемая вентилятором 5 кВт (коэффициент полезного действия 82%), габариты вентилятора –  $1,4 \times 1,7 \times 0,8$  м. Стоимость вентилятора (нерж. сталь 12X18Н10Т) в комплекте с

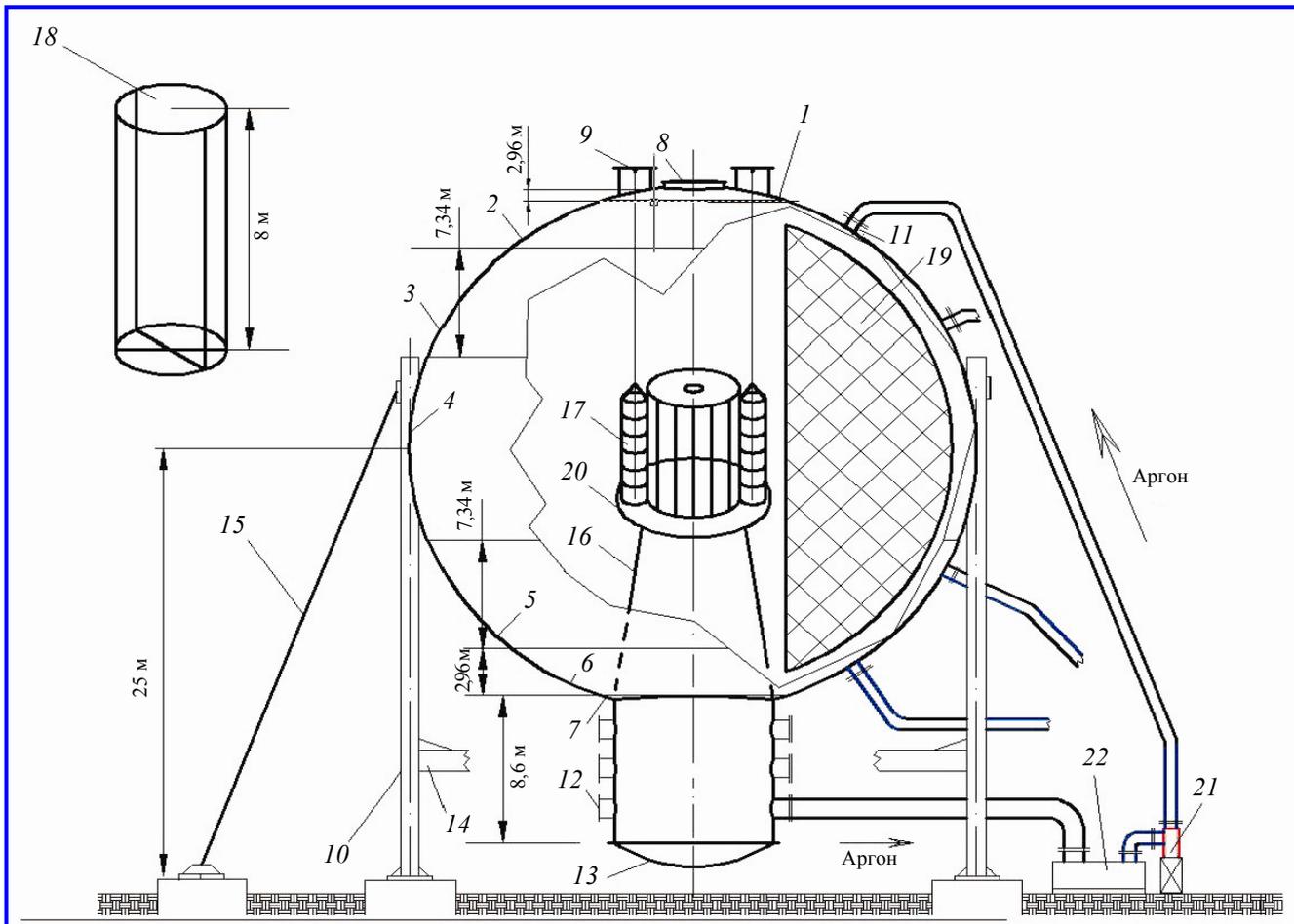


Рис. 1. Оболочка хранилища состоит из поясов 1 – 7, имеет люки 9 (Ø 1,75 м, 12 шт.) для подъёма и опускания корзин с бочками, люки 8 (Ø 3,2 м) и 13 (Ø 5 м), патрубки 11 (Ø 0,64 м, 36 шт.) для подвода газа и патрубки 12 для отвода газа (Ø 1,1 м, 36 шт.); 10 – опоры хранилища (30 м, 12 шт.); 14 – кольцевая рама; 15 – растяжки (12 шт.); 16 – газораспределитель; 17 – корзины (12 шт.) с бочками; 18 – конструкция корзины; 19 – модуль ФЭП (12 шт.); 20 – основание контейнера для корзин; 21 – вентилятор (36 шт.); 22 – теплообменник (36 шт.). Водяной контур не показан

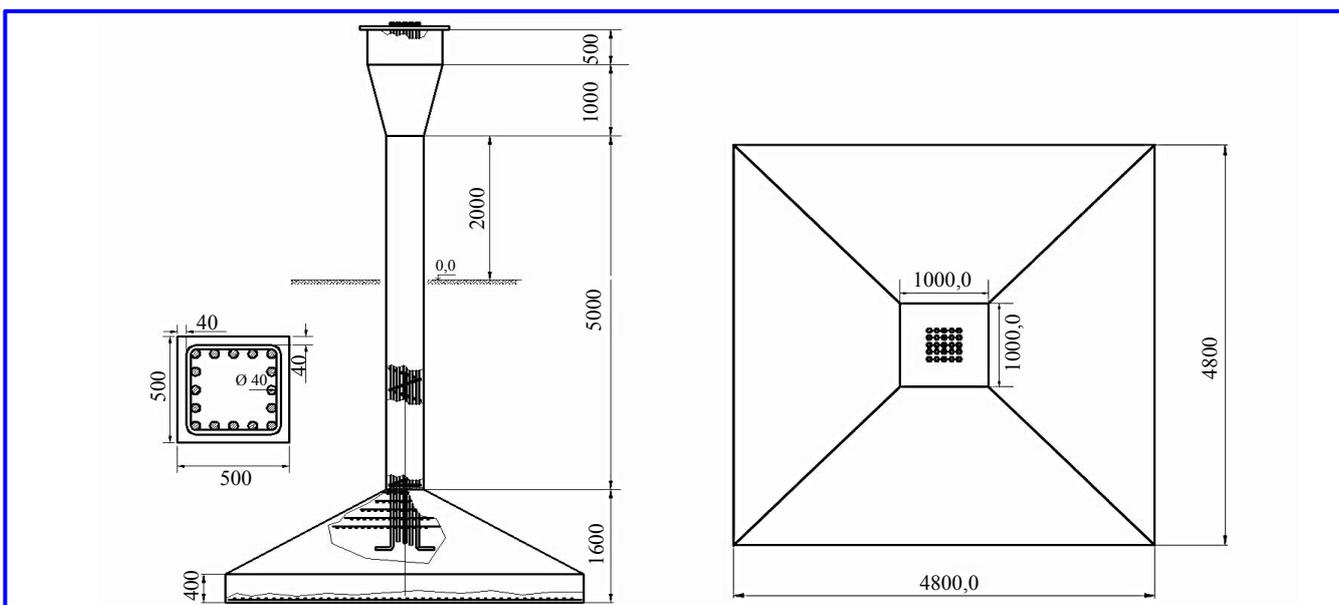


Рис. 2. Внешний вид и габариты колонн (12 шт.) фундамента, удерживающих активную зону ЯОП-установки

Таблица 2

## Стоимость материалов на 2012 г.

Элемент конструкции	Материал	Цена, руб/т без НДС	Количество, т	Стоимость, млн. руб
Оболочка хранилища: диаметр 30 м, толщина 50 мм	Сталь 08Х18Н10Т. Лист горячекатаный. ГОСТ 7350-77 М5Г	200 000	1120	224
Газоотвод: цилиндр – диаметр 8,6 м, высота 8,6 м, толщина 50 мм; конус – диаметры 8,6 и 2,5 м, высота 12,5 м, толщина 50 мм			113,5	22,7
Опорные колонны: 12 шт – высота 30 м, толщина 10 мм, масса 90 т	Труба нержавеющая Электросварная. Сталь 12Х18Н10Т. Диаметр 1020 мм	540 000	90	48,6
Газоотводящие трубы (из хранилища и из теплообменников)	Труба нержавеющая Электросварная. Сталь 12Х18Н10Т. Диаметр 620 мм, толщина 10 мм, длина 900 м	540 000	137	74,0
Газоподводящие трубы (в хранилище из вентиляторов)	Труба нержавеющая Электросварная. Сталь 12Х18Н10Т. диаметр 550 мм, толщина 10 мм, длина 1099 м	540 000	148	79,92
Отводящие и подводящие воду трубы:  кольцевые трубопроводы	Труба нержавеющая Электросварная. Сталь 12Х18Н10Т. Диаметр 350 – 300 мм, толщина 10 мм, длина 157 м. Труба бесшовная. ГОСТ 8732 -78 г. д. Диаметр 350 – 300 мм, толщина 10 мм, длина 2000 м	540 000	25	14
трубопровод внешний		50 000	323	16
Итого				479
Затраты на возведение объекта из металла (п. 1 – 6)				1200

электродвигателем около 215 тыс. руб. (с НДС) – ООО «Торговый Дом «Муссон», затраты на вентиляторы составят 8 млн. руб. (36 шт).

Расход воды на все теплообменники – 0,4 м<sup>3</sup>/с. В ЯОП-установке используется вода с начальной температурой 20°C; температура воды после теплообменников – до 75°C. Из вырабатываемой в ЯОП-установке электроэнергии (1 МВт) затраты электрической мощности ЯОП установки – около 280 кВт – на обеспечение непрерывной работы насосов, вентиляторов и других агрегатов; затраты мощности на прокачку воды через все теплообменники – 2 кВт. Используя прямоточную систему водоснабжения (с последующим сбросом воды) от промышленных скважин, со-

оруженных близко от ЯОП-установки, можно вырабатывать около 720 кВт электроэнергии для продажи (если КПД фотоэлектрических преобразователей ≈20%). При тарифе 3,6 руб./кВт·ч за электроэнергию получится выручка ≈22,7 млн. руб./год.

Однако стоимость горячей воды, вырабатываемой в ЯОП-установке (если её использовать для теплоснабжения) во много раз больше, чем стоимость электроэнергии. При отпускной цене 1000 руб./Гкал = 2,4·10<sup>-7</sup> руб./Дж [12] на теплоснабжение ЯОП – установка вырабатывает тепла (87 МВт) на сумму 658,5 млн. руб./год (за первый год) – в 29 раз больше, чем электроэнергии при мощности 720 кВт.

Максимальный КПД лабораторных образцов,

достигнутый к настоящему времени – 31% (трёхкаскадные арсенид-галлиевые фотоэлектрические преобразователи), причём их максимальный теоретический КПД 42% [13]. Когда КПД фотоэлектрических преобразователей достигнет  $\approx 35\%$ , то даже при продолжительности сезона отпуска тепла или горячей воды равной 2 месяцам в год выручка за круглогодичный отпуск электроэнергии будет в 4,8 раза меньше.

Поэтому отводимое из теплообменников тепло целесообразно утилизировать. Для теплоприемников местных систем теплоснабжения характерно расчетное рабочее давление 0,6 ... 1,0 МПа [14]. В подающем трубопроводе за выходными задвижками на источнике теплоты рабочее давление теплоносителя при работе сетевых насосов следует принимать не менее 1,0 МПа [15], чему соответствуют минимальные затраты на прокачку воды при присоединении местной системы теплоснабжения – 500 кВт.

Расход воды на все теплообменники –  $0,4 \text{ м}^3/\text{с}$  =

$= 1426 \text{ м}^3/\text{ч}$ , требуемый напор – не менее 105 м вод. ст. Схема подвода воды ко всем теплообменникам, в который предполагается использовать насосы Д1600-90а, показана на рис. 4. Имея ряд преимуществ по сравнению с другими типами насосов, центробежные насосы типа Д – горизонтальные с осевым горизонтальным разъемом корпуса с полуспиральным подводом жидкости к рабочему колесу двустороннего входа – удовлетворяют всем перечисленным требованиям. При последовательном включении два насоса Д1600-90а обеспечивают подачу  $1450 \text{ м}^3/\text{ч}$  при напоре 2,75 м вод. ст.; максимальная потребляемая мощность при работе двух насосов – 2,380 кВт. Стоимость насоса Д1600-90а в комплекте с эл. двигателем на общей фундаментной раме около 430 тыс. руб. (с НДС); производство ОАО «Ливгидромаш». Затраты на насосы составят  $4 \cdot 430 \approx 1,72$  млн. руб.

Для оценки затрат на водозабор при прямоточной

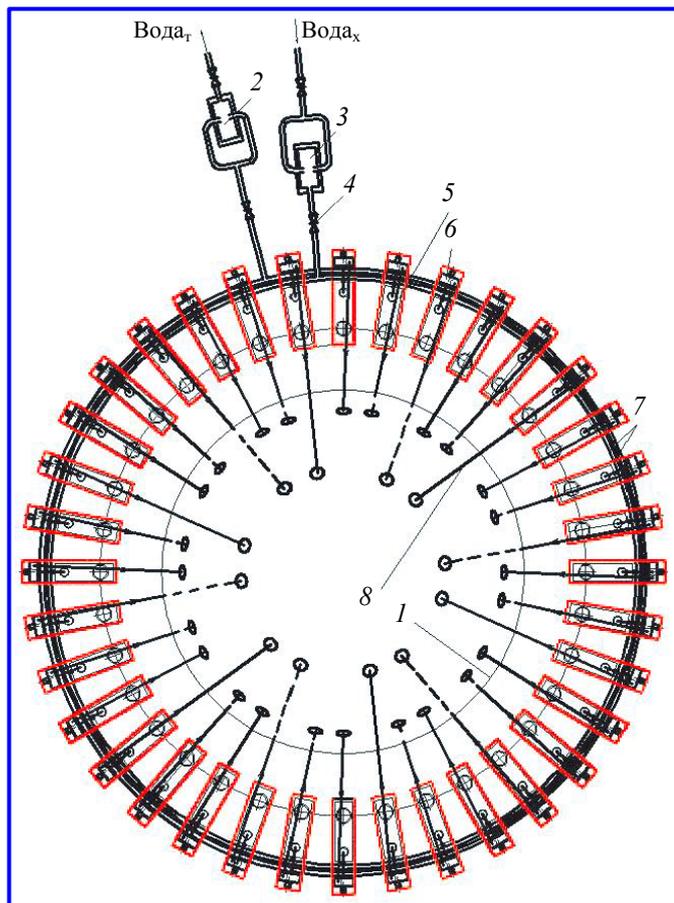


Рис. 3. Оболочка (1) хранилища (вид сверху); 2, 3 – насосы Д1600-90а (показаны только основные); 4 – задвижка; 5 – теплообменник (36 шт.); 6 – вентилятор; 7 – кольцевые трубопроводы подвода и отвода воды; 8 – трубопроводы для подвода охлаждения газа. Верхние люки и трубопроводы для отвода газа не показаны

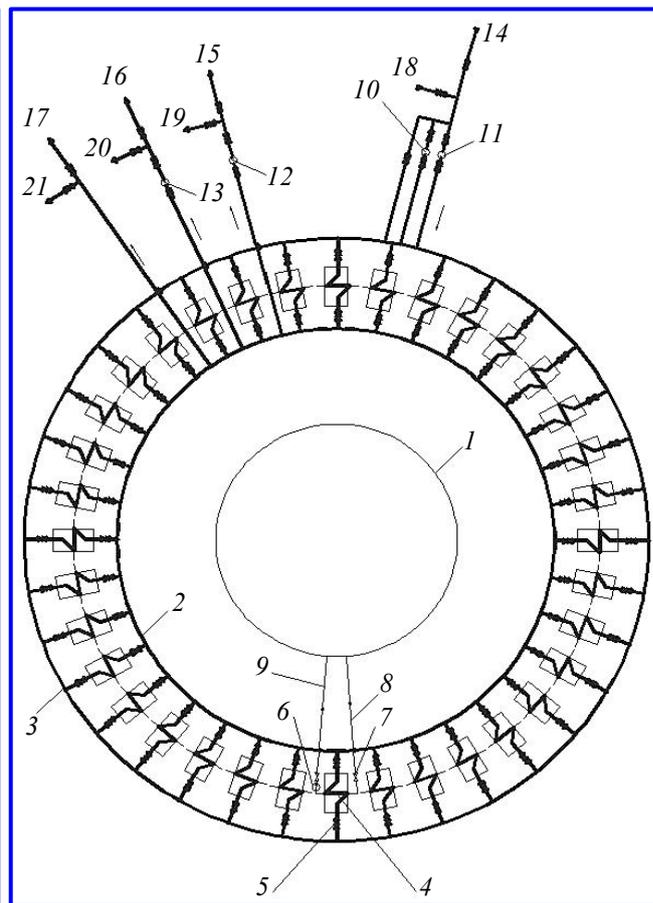


Рис. 4. Схема отвода тепла из хранилища; 1 – хранилище; 2, 3 – кольцевые трубопроводы подвода и отвода воды; 4 – теплообменник (36 шт.); 5 – задвижка; 6 – вентилятор; 7 – вентиль; 8, 9 – трубопроводы для газа; 10 – 13 – насосы Д1600-90а; 14 – 17 – ответвление к теплосети; 18 – 21 – ответвление к разомкнутой системе водоснабжения

системе водоснабжения рассмотрим использование глубоких промышленных скважин, технологические преимущества которых очевидны: незамерзающая слабоминерализованная чистая холодная вода постоянных параметров от 30 до 50 лет. Достаточно большое потребление воды (35 000 м<sup>3</sup>/сут) требует создания промышленных скважин на воду с диаметрами до 600 мм и глубинами до полукилометра. На скважинах с глубинами от 120 м появляется необходимость установки двойных бесшовных обсадных труб (56 000 руб. за погонный метр). Стоимость работ по бурению промышленных скважин – до 30 000 руб. за погонный метр скважины. В итоге одна промышленная скважина глубиной 500 м обойдётся в 43 млн. руб. По соображениям надёжности необходимо иметь ещё один незамерзающий источник воды; на наш взгляд – ещё одну скважину. В районах вечной мерзлоты для гарантированного водоснабжения потребуется использование подрусовых вод и/или плавить лёд в зоне водозаборного устройства. Освоено несколько способов водозабора из ледохранилища: с помощью пара, теплой воды или электрокабелей. По экономическим соображениям в районах вечной мерзлоты наиболее благоприятно использование подрусовых вод. Но оценка затрат на водозабор из реки, озера и т. п. источников требует привязки к местности и, с учётом обеспечения надёжности в любой сезон, получается, что обычно (кроме чистых источников в теплой местности) капитальные гидротехнические сооружения и их об-

служивание (чистка, ремонт) «съедают» гораздо больше, чем сооружение промышленных скважин. Более того, именно места, где затраты на водоснабжение из поверхностных источников приемлемы, густо заселены. Поэтому сооружение надёжной прямооточной системы водоснабжения стоит ≈86 млн. руб.

Прямоточную систему водоснабжения выгодно использовать для отпуска горячей воды промышленному предприятию с постоянным расходом. При оборотной системе водоснабжения выгодно присоединение местной системы теплоснабжения. Желательно, чтобы в любой сезон потребитель имел постоянный расход тепла (скорее это промышленное предприятие). В любом из штатных режимов ЯОП-установка должна автоматически поддерживать достаточную подачу холодной воды в теплообменники, используя частично или полностью прямооточную систему водоснабжения – точнее прямооточный режим водоснабжения.

В настоящее время стоимость 1 Вт электроэнергии, получаемая при использовании ФЭП, изготовленных из различных материалов, составляет 30 – 60 руб. (капитальные затраты) [16]. Самые дешёвые (и наименее подверженные воздействию радиации) ФЭП – тонкоплёночные, изготовленные на основе материалов с высоким коэффициентом поглощения, таких как CdTe, Cu(In,Ga)Se, которые применяются в виде поликристаллических плёнок. Наблюдаемые тенденции свидетельствуют о том, что ценовой паритет со стоимостью энергии, получаемой традиционным путём, будет достигнут

Таблица 3

Ресурс	Первоначальные затраты, млн. руб	Эксплуатационные расходы, млн. руб/год	Срок службы, лет
Хранилище (опорные колонны, оболочка, газотвод, трубопроводы, фундаменты)	1213,3	0,5	50
Система генерации и преобразования электроэнергии	114	0,1	10
Теплообменники, 36 шт.	72	0,3	10
Заправка хранилища аргоном	45,3	0,5	10
Здание, 120 м <sup>2</sup>	30	0,2	70
Персонал, 10 чел.	–	6	–
Вентиляторы, 36 шт.	8	0,3	2,3
Насосы Д1600-90а, 4 шт.	1,72	0,2	2,3
Водозабор	86	0,2	40-50
Покупка и оформление земельного участка, сооружение забора	184	–	–
Сооружение подъездной дороги	164	0,5	–
Контрольно-информационная система	1,5	0,1	10
Транспортные и операционные расходы	54	0,2	–
Итого	1974	9,1	–

в ближайшее десятилетие. В ЯОП-установке ФЭП  $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$  (CIGS) на основе металлической фольги общей площадью  $4000 \text{ м}^2$  смонтированы на 12 решётках (с двух сторон каждой решётки), контурная рама решётки закрепляется на оболочке хранилища; решётки стянуты между собой – для уменьшения низкочастотной вибрации. Каждый полностью собранный модуль ФЭП представляет собой сегмент (радиус 14 м, от хорды до центра дуги – 9 м), закреплённый в меридиональной плоскости.

Стоимость модуля ФЭП определяется в основном стоимостью отдельных поставляемых с завода блоков фотоэлектрических преобразователей ( $12\,000 \text{ руб./м}^2$ ); для оснащения 12 модулей (всего  $4000 \text{ м}^2$ ) потребуется 48 млн. руб.; стоимость несущих конструкций – 10 млн. руб.; в итоге, включая стоимость монтажа 50 млн. руб. и приобретения 2 инверторов (48В→380 В, 500 кВт) стоимостью по 3 млн. руб., затраты на систему генерации и преобразования электроэнергии 114 млн. руб. По соображениям надёжности в ЯОП-установке имеется автономный источник электропитания для информационной системы, связи, освещения и т. п. – батарея из 1280 аккумуляторов тяговых АКБ Tjojan 225 (ёмкость батареи 36000 А·ч, 48 В), что обеспечивает более 3 ч работы (380 В 30 А на выходе инвертора). Стоимость аккумуляторной батареи – 840 000 руб.

Для размещения персонала (10 чел.), пульта управления с возможностью нести вахту, 2 инверторов и аккумуляторной батареи, лаборатории контроля газовой и водной среды должно быть построено здание площадью  $120 \text{ м}^2$  и гараж стоимостью  $\approx 30$  млн. руб.

Затраты на площадку для строительства ЯОП-установки определяется в основном следующими факторами. Если предполагается постоянный отпуск горячей воды – желательно небольшое превышение уровня площадки над источником. Требуется низкий уровень грунтовых вод – не менее 5 м от поверхности земли. Во избежание значительного объёма земляных работ площадка не должна иметь больших неровностей, уклон – не более 0,5 – 1,0 %. Расчётное сопротивление грунта основания – не хуже 200 кПа (пески мелкие средней плотности); в районах вечной мерзлоты площадка выбирается или на скальном основании или на возвышенности с непросадочным, крупнообломочным или песчаным грунтом. Близость к существующим железным дорогам и жилым поселкам позволяет рассчитывать на приемлемые затраты на доставку конструкций, аппаратов и т. д., а также на

комплектование рабочей силы в период строительства. Площадка должна иметь размеры, достаточные для размещения не только объектов ЯОП-установки, но и необходимой радиус санитарной зоны – не менее 4 км, что соответствует площади 5027 Га. Анализ средней рыночной стоимости земли промназначения вне областей вокруг мегаполисов показывает, что на расстоянии более 200 км от черты города имеются предложения по продаже крупных земельных участков по 30000 руб./Га, т. е. 151 млн. руб. за 5027 Га. Бетонный забор высотой два метра и несколькими воротами с калиткой обойдется в 43 млн. руб. (1700 руб./м). Цена указана с учётом оплаты труда рабочих.

Подъездная дорога должна иметь ширину проезжей части 6 м и обеспечивать интенсивность движения до 100 грузовых автомобилей в сутки грузоподъёмностью свыше 14 т при нагрузке на одиночную наиболее нагруженную ось двухосного автомобиля 10 тс (дорога IV категории по СНиП 2.05.02-85).

Каждый километр шоссейной дороги, удовлетворяющей требованиям по габаритам, прочности и устойчивости к климатическим воздействиям [17] стоит в среднем 41 млн. рублей, затраты на сооружение подъездной дороги минимальной протяженности – 164 млн. руб.

Первоначальные затраты на сооружение и пуск ЯОП-установки и текущие расходы сведены в табл. 3.

Сравним в предположении 40-летней нормальной эксплуатации расходы на промежуточное вне реакторное сухое хранение ОЯТ (т. е.  $8 \cdot 30 = 240$  руб. в год на  $\text{кг}_{\text{тм}}$ ) хранилища и на ЯОП-установку. За 40 лет расходы на ЯОП-установку составят 3438,2 млн. руб., т. е.  $3438,2 \cdot 10^6 / (40 \cdot 216 \cdot 600) = 663,2$  руб. в год на  $\text{кг}$  высокоактивных отходов.

Отметим, что даже за 40 лет расходы на ЯОП-установку в разы меньше первоначальных расходов на сооружение и пуск ТЭЦ той же мощности (13 290 млн. руб., 78 МВт – Железногорская ТЭЦ-2012 г.). Средние расходы на эксплуатацию ЯОП-установки, включая замену и ремонт оборудования 36,6 млн. руб./год.

Рассмотрим подробнее окупаемость ЯОП-установки, работающей с местной системой теплоснабжения в режиме максимальной постоянной мощности отпуска тепла, предполагая, что не происходит изменений отпускных цен на горячую воду и затрат на текущие расходы; в этом режиме можно вырабатывать не более 220 кВт электроэнергии для продажи. Это, очевидно, экономически самый выгодный режим; при тарифе 3,6 руб./кВт·ч, если

непрерывно отпускается электроэнергия (220 кВт), за первый год получится выручка 6,9 млн. руб., а за снабжение непрерывно теплом за первый год получится выручка 658,5 млн. руб., т. е. максимальная выручка от непрерывной работы ЯОП-установки 658,5 + 6,9 млн. руб. Сумма  $V(t)$  капитальных затрат и осреднённых эксплуатационных расходов (млн. руб.) и выручка  $p(t, D)$  от отпуска тепла (87 МВт) рассчитаны по формулам:

$$V(t) = 1974 + 36,6t, \tag{3}$$

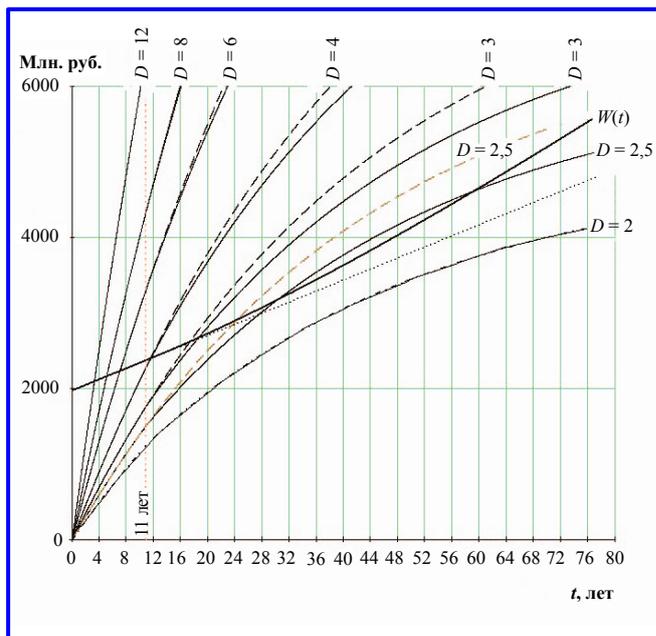
$$p(t, D, El, Em) = \frac{T}{\ln 2} \left( 1 - 2^{-\frac{t}{T}} \right) \times \left( 658,5 \frac{D}{12} + El \frac{D}{12} + Em \frac{12-D}{12} \right), \tag{4}$$

где  $t$  – время эксплуатации ЯОП-установки, лет;  $D$  – продолжительность сезона отпуска тепла или горячей воды от 12 до 2 месяцев в год в предположении, что ОЯТ не перегружалось;  $T = 30$  лет – период полураспада  $^{137}\text{Cs}$ ;  $El = 6,9$  млн. руб. – выручка за электроэнергию (220 кВт) за первый год в режиме непрерывного отпуска тепла;  $Em = 22,7$  млн. руб. – выручка за электроэнергию (720 кВт) за первый год в режиме без отпуска тепла.

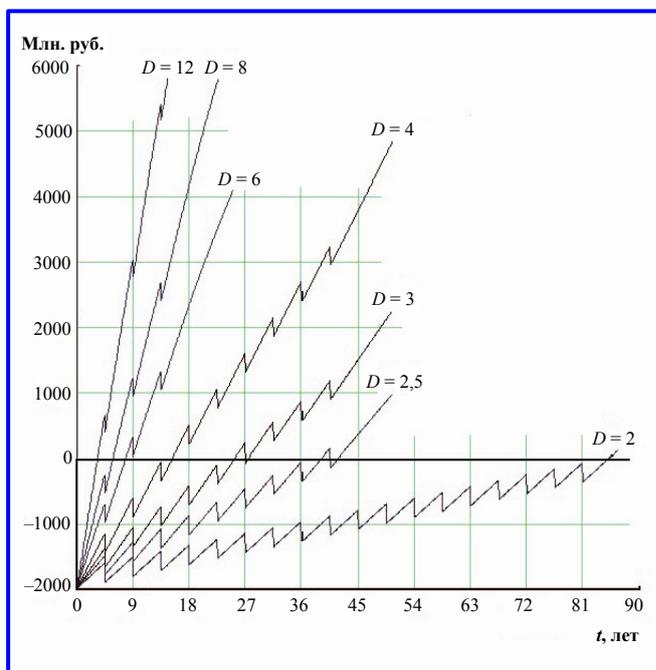
Формулы (3) и (4) пригодны при  $t \lesssim 11$ : после 11 лет работы теплоснабжение происходит за счёт потребления электроэнергии из внешних источников (на прокачку воды).

Если непрерывно отпускается электроэнергия (начиная с 220 кВт) и тепло (87 МВт) в течение 12 месяцев в году, то через 4,5 года предприятие, имеющее ЯОП-установку, получит прибыль около 706 млн. руб. Однако мощность отпускаемой электроэнергии уменьшится до 927 – 280 – 500 = 147 кВт (табл. 4), где 500 кВт – затраты на прокачку воды через местную систему теплоснабжения, 280 кВт – собственные затраты ЯОП-установки. При непрерывном снижении мощности отпускаемой электроэнергии целесообразно её продавать кампани, имеющей регулируруемую электросеть.

Рассмотрим теперь режим, при котором вместе с отпуском тепла в течение  $D$  месяцев в году непрерывно отпускается электроэнергия (начиная с 220 кВт), в течение остального времени (12 –  $D$  месяцев в году) отпускается только электроэнергия (начиная с 720 кВт); срок окупаемости в этом случае отодвигается (см. табл. 4 и рис. 5). Затраты на прокачку воды (500 кВт) через местную систему теплоснабжения снижать нецелесообразно, поэтому



**Рис. 5.** Рост затрат и выручки в зависимости от времени (без перегрузки ОЯТ):  $V(t)$  – сумма затрат без учёта потребления электроэнергии из внешних источников;  $W(t)$  – сумма затрат с учётом потребления электроэнергии из внешних источников; кривые выручки снабжены величиной продолжительности  $D$  сезона отпуска тепла или горячей воды (от 12 до 2 месяцев), сплошные линии построены с учётом потребления электроэнергии из внешних источников



**Рис. 6.** Прибыль в случае регулярной перегрузки ОЯТ для продолжительности  $D$  сезона отпуска тепла или горячей воды, равной 12 – 2 месяцам (электроэнергия отпускается непрерывно)

постепенное уменьшение мощности ЯОП-установки (за счёт распада <sup>137</sup>Cs) приводит не только к снижению параметров теплоснабжения и уменьшению выручки, но и к необходимости уменьшать мощность отпускаемой электроэнергии (см. табл. 4). Поскольку доля выручки от отпуска электроэнергии мала, то это уменьшение слабо влияет на прибыль; после 11 лет работы электрическая мощность ЯОП-установки становится меньше 780 кВт, чего недостаточно для прокачки воды через местную систему теплоснабжения и (280 кВт) для обеспечения непрерывной работы насосов, вентиляторов и других агрегатов ЯОП-установки. В этой ситуации возможно либо отпускать только электроэнергию, что экономически не самый выгодный режим, либо продолжать теплоснабжение за счёт потребления электроэнергии из внешних источников (на прокачку воды). В последнем случае сумма  $W(t)$  капитальных затрат и осреднённых эксплуатационных расходов (млн. руб.) и выручка  $Q(t, D)$  от отпуска тепла и электроэнергии рассчитаны по формулам

$$W(t) = V(t) + E_g [t - t_k - \frac{T}{\ln 2} (1 - 2^{-\frac{t-t_k}{T}})]. \quad (5)$$

$$Q(t, D) = p(t_k, D, El, Em) + p(t, D, 0, 0) - p(t_k, D, 0, 0), \quad (6)$$

где  $t_k = 11$  лет – время эксплуатации ЯОП-установки, за которое электрическая мощность

ЯОП-установки становится равной 780 кВт;  $E_g = 24,6$  млн. руб./год – расходы на электроэнергию (780 кВт) за год.

Формулы (5) и (6) пригодны при  $t > 11$  лет.

На рис. 5 показан (рассчитанный по формулам (3) – (6)) рост затрат и выручки в зависимости от времени (для наглядности) при различной продолжительности сезона отпуска тепла или горячей воды в предположениях, что ОЯТ не перегружалось, но после 11 лет работы теплоснабжение происходит за счет потребления электроэнергии из внешних источников (на прокачку воды).

В табл. 4 нетрудно видеть, какова полная электрическая мощность ЯОП-установки, вырабатываемая к сроку окупаемости. Отметим, что при продолжительности  $D$  сезона отпуска тепла или горячей воды равной 2 месяцам (без перегрузки ОЯТ и замены фотоэлектрических преобразователей) электроэнергии достаточно для собственных нужд ЯОП-установки вплоть до 55 лет (если предположить возможность разработки фотоэлектрических преобразователей со стабильными характеристиками), но затраты на ЯОП-установку не окупаются. Работа без доступа в хранилище (для перегрузки ОЯТ) порождает технические проблемы (при замене фотоэлектрических преобразователей, при осмотре и ремонте и т. п.) и проблемы сбыта тепла, которые являются сутью экономической основы окупаемости ЯОП-установки. Для поддержания мощности

Таблица 4

Продолжительность сезона отпуска тепла или горячей воды $D$ , мес.	Работа без перегрузки ОЯТ				Остаток прибыли и окупаемость после перегрузки ОЯТ, млн. руб.				
	Срок окупаемости $t_0$ , лет	Полная электрическая мощность $P(t_0) 1000 \cdot 2^{-t/30}$ , кВт	Отпускаемая мощность электроэнергии во время теплоснабжения, кВт	Доля выручки от отпуска электроэнергии, %	После I-й перегрузки	после II-й перегрузки	после III-й перегрузки	Срок окупаемости $t_1$ , лет	Количества о перегрузок за $t_1$ лет
12	3,27	927	147	1,1	406	2785	5165	3,27	0
8	5,07	889	109	2,7	-510	954	2418	5,75	1
6	7,03	850	70	4,3	-968	38	1044	7,78	1
4	11,57	765	0	0	-1426	-878	-330	15,2	3
3	18,59	685	0	0	-1655	-1336	-1017	25	5
2,5	30,16	498	0	0	-1769	-1565	-1360	39	8
2	-	-	0	0	-1884	-1794	-1703	85,5	18

ЯОП-установки на уровне не хуже 90% целесообразно перегружать ОЯТ каждые  $\approx 4,5$  года; стоимость перегрузки ОЯТ и сопутствующих работ (контроль состояния конструкции, заправка хранилища аргоном, замены в системе генерации и преобразования электроэнергии, замена вентиляторов и насосов, транспортные и операционные расходы) оценивается  $\approx 300$  млн. руб. Результаты расчётов по формулам (3) и (4) показаны в табл. 4 и на рис. 6, откуда следует, что работа ЯОП-установки экономически привлекательна при продолжительности  $D$  сезона отпуска тепла или горячей воды не менее 4 – 6 месяцев в год, что вполне реально в северных широтах и для промышленного потребления.

В результате проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. Расходы на ЯОП-установку (сооружение и 40 лет эксплуатации) в разы меньше первоначальных расходов на сооружение и пуск ТЭЦ той же мощности.

2. Из вырабатываемой в ЯОП-установке электроэнергии (1 МВт) затраты на обеспечение непрерывной работы насосов, вентиляторов и других агрегатов электрической мощности ЯОП установки –  $< 280$  кВт.

3. Если продолжительность сезона отпуска тепла или горячей воды не менее 6 месяцев в год, то все затраты на ЯОП-установку окупаются за время не более 8 лет без перегрузки ОЯТ; за счёт деградации фотоэлектрических преобразователей за такое время мощность вырабатываемой в ЯОП-установке электроэнергии не сможет уменьшиться ниже 280 кВт.

4. Максимальная мощности ЯОП-установки по отпуску электроэнергии –  $\approx 720$  кВт (без отпуска тепла). Экономически самый выгодный режим – работа на систему теплоснабжения (непрерывный отпуск тепла  $\approx 85$  МВт), в этом случае непрерывный отпуск электроэнергии –  $\approx 220$  кВт.

5. Для поддержания мощности ЯОП-установки на уровне не хуже 90% целесообразно перегружать ОЯТ каждые  $\approx 4,5$  года.

ЯОП-установка при нормальной эксплуатации не выделяет вредных веществ.

### Литература

1. Карелин А. В. Теплофизические ограничения ЯОП-установки для утилизации радиоактивных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010. – Т. 117. – № 4. – С. 43 – 51.  
2. Карелин А. В. Расчёт активной зоны и теплообменника ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов с учётом теплофизических ограничений / А. В. Карелин,

И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 122. – № 3. – С. 41 – 53.

3. Особенности конструкции сферического хранилища ЯОП-установки для утилизации ядерных отходов / А. В. Карелин, И. Н. Хиблин, Л. А. Амелин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2011. – Т. 127. – № 2. – С. 49 – 53.

4. Обзор проблем обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом / И. А. Андрушин, Ю. А. Юдин. – Саров, 1990. – 97 с.

5. Нейтронно-физические аспекты проблемы обращения с облученным ядерным топливом с повышенной глубиной выгорания / И. В. Шаманин, П. М. Гаврилов, С. В. Беденко [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – Железнодорожск : Томский политехнический университет, 2008. – Т. 313. – № 2. – С. 62 – 66.

6. Свойства модифицированного диоксида урана / И. С. Курина, В. В. Попов, В. Н. Румянцев // Ядерная энергетика. – Обнинск : ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, 2007 № 1. – С. 34 – 41.

7. Конструкционные материалы: справочник / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М. : Машиностроение, 1990. – 688 с.

8. Исследование влияния  $\gamma$ -облучения на фоточувствительность гетеропереходов  $ZnO/CuIn_3Se_5$  / Б. Х. Байрамов, И. В. Боднар, В. В. Емцев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – СПб. : Санкт-Петербургская издательская фирма «Наука» РАН, 2006. – Т. 40. – № 1. – С. 67 – 69.

9. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков. – СПб. : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 168 с.

10. Металлические конструкции. Специальные конструкции и сооружения / Под ред. заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, д-ра техн. наук, проф. В.В. Горева. – М. : Высшая школа, 2002. – 544 с.

11. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: справочник / Т. С. Соломахова, К. В. Чебышева. – М. : Машиностроение, 1980. – 179 с.

12. Южно-уральская панорама – региональная общественно-политическая газета: спецвыпуск / Издание правительства и Законодательного Собрания Челябинской области. – 2012, сентябрь.

13. Международный проект по халькогенидным тонкопленочным солнечным батареям / П. П. Гладышев, С. В. Филин, В. Ф. Гременок [и др.] // Всероссийская научно-практическая конференция «Принципы и механизмы формирования национальной инновационной системы Российской Федерации». – Дубна, 2010.

14. СНиП41-02-2003 Тепловые сети. – Взамен СНиП 2.04.07-86; введ. 2003-09-01. – М. : Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (ГОССТРОЙ РОССИИ), 2004. – (Система нормативных документов в строительстве. Строительные нормы и

правила Российской Федерации).

15. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети : учеб. для вузов по спец. «Пром. теплоэнергетика» / Е. Я. Соколов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 360 с.

16. Долгая дорога к солнцу / Ольга Ашпина // The Chemical Journal. – 2009, Июнь – июль. – С. 59.

17. Проектирование автомобильных дорог / Под ред. заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. Г. А. Федотова, д-ра техн. наук, проф. П. И. Поспелова. – М. : Информавтодор, ВиАрт Плюс, 2007. – 815 с. – (Справочная энциклопедия дорожника: в 5 т / Том V). – ISBN: 5-900121-27-5.

*Поступила в редакцию 07.12.2012*

*Александр Витальевич Карелин, д-р физ.-мат. наук, начальник отдела, т. (985) 121-84-49, e-mail: avkarelin@mail.ru.*

*Леонид Алексеевич Амелин, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотрудник, т. (495) 994-54-88, e-mail: am-leonid@mail.ru.*

*Иван Николаевич Хиблин, нач. лаборатории, т. (495) 366-14-11, e-mail: nilbix@mail.ru.*