

УДК 621.311.243:697.329

**Кравченко Володимир Петрович,  
Дубковський Вячеслав Олександрович,  
Кравченко Єгор Володимирович**

*Одеський національний політехнічний університет  
Одеса, просп. Шевченка, 1. 65044*

**ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ  
СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В ЯКОСТІ ДЖЕРЕЛА НАДІЙНОГО  
ЖИВЛЕННЯ ПРИ ЗНЕСТРУМЛЕННІ АЕС**

*В якості одного з трьох каналів системи надійного живлення відповідальних споживачів реакторного відділення пропонується замість дизель-генератору використовувати напівпровідникову сонячну електростанцію (СЕС). Приведено розрахунок техніко-економічних показників такої електростанції. Визначено необхідну кількість електроенергії для відводу остаточного тепловиділення ядерного реактору впродовж трьох діб, необхідну площу сонячних модулів, ємність акумуляторних батарей. Врахована можливість зменшення потужності насосів із зменшенням потужності остаточного тепловиділення. Визначена собівартість електроенергії та термін окупності СЕС. Отримано прийнятні економічні показники.*

*Ключові слова: потужність остаточного тепловиділення, сонячна напівпровідникова електростанція, термін окупності*

**Кравченко Владимир Петрович,  
Дубковский Вячеслав Александрович,  
Кравченко Егор Владимирович**

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА  
НАДЕЖНОГО ПИТАНИЯ ПРИ ОБЕСТОЧИВАНИИ АЭС**

*Одесский национальный политехнический университет*

*Одесса, просп. Шевченко, 1. 65044*

*В качестве одного из трех каналов системы надежного питания ответственных потребителей реакторного отделения предлагается вместо дизель-генератора использовать полупроводниковую солнечную электростанцию (СЭС). Приведен расчет технико-экономических показателей такой электростанции. Определено необходимое количество электроэнергии для отвода остаточного тепловыделения ядерного ректора в течение трех суток, необходимую площадь солнечных модулей, емкость аккумуляторных батарей. Учтена возможность уменьшения мощности насосов с уменьшением мощности остаточного тепловыделения. Определена себестоимость электроэнергии и срок окупаемости СЭС. Получены приемлемые экономические показатели.*

*Ключевые слова: мощность остаточного тепловыделения, полупроводниковая солнечная электростанция, срок окупаемости*

**Kravchenko Vladimir, Dubkovsky Vyacheslav,**

**Kravchenko Iegor**

*Odessa national polytechnic university*

*Odessa, prosp. Shevchenko, 1. 65044*

## **FEASIBILITY STUDY OF SOLAR POWER PLANT USING AS A SOURCE OF RELIABLE POWER IN CASE OF NPP POWER FAILURE**

As one of three channels of the reliable feed system of responsible users of reactor separation it is suggested in place of diesel-generator to use semiconductor sun power plant (SPP). The calculation of economic indicators of such power plant is resulted. Certain necessary amount of electric power for taking of afterpower of nuclear reactor during three days, area of the sun modules, capacity of storage batteries. Possibility of diminishing of pumps power is taken into account with diminishing of afterpower. The prime price of electric power and term of recoupment of SPP is certain. Acceptable economic indicators are got.

Keywords: afterpower, semiconductor sun power plant, term of recoupment

## **Введение**

Опыт аварии в марте 2011 года на АЭС Фукусима-1 показал необходимость более надежного энергоснабжения оборудования реакторного отделения при обесточивании блока [1]. Причиной аварии явилось отсутствие энергоснабжения ответственных потребителей в результате повреждения дизель-генераторов цунами, образовавшегося в результате землетрясения.

Проведенный анализ положения на украинских АЭС показал, что отсутствие автономного питания при обесточивании АЭС приведет к аналогичным последствиям [2].

Согласно "Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ)" [3] составной частью системы аварийного энергоснабжения систем безопасности является резервная дизельная электростанция (РДЭС). Она предназначена для использования в качестве автономного аварийного, а также резервного источника электроснабжения ответственных потребителей атомной электростанции с ВВЭР-1000. Дизель-генераторы систем надежного питания в нормальном режиме АЭС не работают и не могут быть использованы для иных целей, кроме аварийного питания. Предусмотрена отдельная независимая дизель-электрическая станция для каждой системы безопасности. То есть, на одном блоке смонтировано три автоматизированных дизель-электрических установки типа АСД-5600, рассчитанные на работу без постоянного присутствия обслуживающего персонала [4]. Мощность дизель-генератора выбрана из расчета обеспечения каждым каналом безопасности надежного питания необходимого состава механизмов, участвующих в процессе аварийного расхолаживания реактора при любом виде аварии. Суммарная мощность потребителей, которые должны обеспечиваться за счет РДЭС, равна 5107 кВт. Отсюда и номинальная мощность дизель-генератора – 5,6 МВт.

Если пойти дальше в проектных требованиях, то следовало бы указать необходимость в разных принципах работы каждого из каналов системы

безопасности.

### **Цель работы**

В настоящей работе предложено в качестве надежного источника питания одного из каналов безопасности использовать полупроводниковую солнечную электростанцию (ПСЭС). Следует отметить, что в городе Щёлкино (Крым) в 1986 г. была построена СЭС башенного типа, именно в качестве резервного источника электроэнергии для планируемой там Крымской АЭС. Эта станция мощностью 5 МВт была экспериментальной. При ее эксплуатации было выявлено множество трудностей. Одна из них — система позиционирования отражателей практически полностью (95 %) расходовала энергию, вырабатываемую станцией. Также возникали трудности с очисткой зеркал. Вскоре эта станция прекратила своё существование [5].

На наш взгляд такое предложение имеет несомненное преимущество: тогда как РДЭС простаивает весь срок эксплуатации энергоблока, ПСЭС будет вырабатывать электроэнергию, окупая себя и повышая вероятностные показатели безопасности. Обслуживание и ремонт выработавших свой ресурс АСД-5600 сопоставимы с покупкой нового оборудования. Закупаемое топливо хранится определенное время, затем утилизируется и заменяется новым.

Для аварийного охлаждения реактора рассматривается использование струйных насосов [6], насосов пожарных машин, соединение энергоблоков специальным кабелем и другие способы [7].

Целью работы является определение технико-экономических характеристик соответствующей солнечной электростанции.

### **Определение требуемой мощности ПСЭС**

В связи с аварией на АЭС «Фукусима», как уже указывалось, был проведен анализ возникновения аналогичной ситуации с отказом РДЭС для блоков с ВВЭР. В результате этой работы было получено заключение о том, что при аварийной ситуации, приводящей к полному обесточиванию АЭС и

неработоспособности РДЭС, перевод блоков в безопасное состояние невозможен. Используемые системы безопасности, необходимые для ликвидации аварийных ситуаций и проектных аварий, ограничения их последствий и предотвращения перерастания в запроектные аварии не обеспечат выполнение своих функций в связи с отсутствием электропитания. В связи с этим был определен необходимый минимум систем, требующих электропитания при полном обесточивании:

- система ТХ (аварийный ввод питательной воды в ПГ) – 800 кВт;
- система ТQ (аварийный ввод бора в АЗ РУ) – 800 кВт;
- прочие системы, участвующие в отводе остаточного тепловыделения (ОТ) от теплоносителя – 150 кВт.

С учетом пусковых токов подключаемых нагрузок, мощность мобильной дизель-генераторной станции должна быть не менее 2,0 МВт.

Таким образом, минимальная необходимая мощность автономного источника энергии, в нашем случае ПСЭС, должна составлять 2 МВт.

### **Определение требуемых характеристик поля фотоэлектрических преобразователей**

Солнечные модули классифицируются по пиковой мощности в ваттах (Втп). Один пиковый ватт - техническая характеристика, которая указывает на значение мощности установки в определенных условиях, т.е. когда солнечное излучение в  $1 \text{ кВт/м}^2$  падает на элемент при температуре  $25^\circ\text{C}$ . Такая интенсивность достигается, когда Солнце в зените при хороших погодных условиях. Чтобы выработать один пиковый ватт, нужен один элемент размером  $10 \times 10 \text{ см}$ . Однако солнечная освещенность редко достигает величины  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Более того, на солнце модуль нагревается значительно выше номинальной температуры. Оба эти фактора снижают производительность модуля. В типичных условиях средняя производительность составляет около  $6 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$  в день и  $2000 \text{ Вт}\cdot\text{ч}$  в год на  $1 \text{ Втп}$

[8]. Приведенные данные соответствуют КПД 10 %. Современные солнечные элементы имеют КПД 17 %. То есть, 1 Втп имеет суточную производительность 10,2 Вт·ч.

Производительность солнечного модуля площадью 1 м<sup>2</sup> будет равна  $q_{\text{мод}}=1020 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{сут}$  или  $2000 \times 100 \times 17 / 10 = 340000 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{год} = 340 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$ .

Необходимая площадь солнечных коллекторов для обеспечения мощности 2 МВт:

$$F = Q_{\text{сут}} \cdot 1,2 / q_{\text{мод}} = 48000 \cdot 1,2 / 1,02 = 56470,6 \text{ м}^2, \quad (1)$$

где 1,2 – коэффициент, учитывающий потери энергии.

Для оценки размеров укажем, что такую площадь имеет квадрат со стороной 237,6 м (без учета площади для проходов между панелями).

### **Определение требуемой емкости и количества аккумуляторов**

Длительность работы дизель-генератора по регламенту равна десяти суткам [4]. Длительность обеспечения электроснабжения от ПСЭС принята равной трем суткам. Возможность низкой инсоляции в момент аварии компенсируется установкой аккумуляторов. Желательно применение щелочных аккумуляторов, имеющих большой ресурс работы, а также допускающих большое количество разрядок и зарядок. Применение аккумуляторов с большой емкостью позволяет снизить их удельную стоимость. В данной работе номинальная емкость аккумулятора принята 200 А·ч. При напряжении 12 В емкость аккумулятора будет равна 2400 Вт·ч.

По условиям допустимого перерыва в электропитании все потребители электроэнергии на собственные нужды разделены на 3 группы:

- первая группа не допускает перерыва в питании более чем на доли секунды;
- вторая группа допускает перерыв в питании на десятки секунд, но требует обязательного питания после срабатывания АЗ;

- третья группа допускает перерыв в питании и не предъявляет к нему особых требований.

К потребителям первой группы относятся системы контрольно-измерительных приборов и автоматики; приборы технологического контроля реактора и его систем. Для обеспечения этих потребителей при обесточивании используются аккумуляторные батареи. Кроме приборов БЩУ батареи питают еще некоторые системы радиационного контроля; электроприводы быстродействующих каналов и отсечной аппаратуры, обеспечивающих вступление в работу систем расхолаживания и локализации аварии, а также часть аварийного освещения; оперативные цепи управления, защиты и сигнализации; аварийные маслососы турбогенератора и уплотнения вала генератора. Время работы аккумуляторов – полчаса.

К потребителям второй группы относятся механизмы, обеспечивающие расхолаживание реактора. Именно об обеспечении потребителей этой группы и идет речь в данной работе.

Рассмотрим функцию изменения остаточного тепловыделения (ОТ) от времени. В табл. 1 приводятся значения ОТ, определенные по формулам Вэя-Вигнера, Уинтермайера-Уэлса [9] и взятые из альбома нейтронно-физических характеристик блока АЭС с ВВЭР-1000. Расчетный режим: четырехлетняя кампания топлива, на мощности 3000 МВт реактор работает 286 суток, а затем на мощностном эффекте реактивности при мощности 2500 МВт работает в течение 24 суток, длительность ППР 55 суток. Аппроксимация данных альбома НФХ степенной функцией дала следующее уравнение (величина достоверности аппроксимации  $R^2=0,9943$ ):

$$Q_{\beta\gamma} = 413,08 \cdot t^{-0,279}, \text{ МВт} \quad (2)$$

где  $t$  – время после остановки реактора, с.

Таблица 1 – Функция изменения остаточного тепловыделения со временем, МВт

Время после остановки	По формуле Взя-Вигнера	По ф-ле Уинтермайера-Уэлса	По альбому НФХ	По (2)
30	78,47	130,3		159,93
60	67,81	98,9	117	131,80
100	60,86	89,67		114,30
300	48,09	71,39	85	84,12
600	41,37	61,35	73	69,33
1000	36,98	54,69		60,12
1800	32,45	47,79	55	51,034
3600	27,75	40,6	45	42,06
7200	23,66	34,32		34,66
10800	21,52	31,03	31	30,95
21600	18,23	25,98	26	25,51
36000	16,09	22,68		22,12
43200	15,38	21,58	21	21,02
86400	12,88	17,75	17	17,33
172800	10,71	14,41		14,28
259200	9,56	12,65		12,75
432000	8,24	10,63	10,5	11,06

Для определения количества энергии, которую надо отвести от активной зоны на участке времени трое суток проинтегрируем функцию (2). Полученный результат совпал с результатом численного интегрирования: 1271,73 МВт·ч. Система энергоснабжения ответственных потребителей от дизель-генератора должна подать питание в течение 1 мин. Подача питания от аккумуляторов может быть практически мгновенна, принято 30 с. В этот момент времени мощность насосов составит 1,75 МВт (800+800+150 кВт). С течением времени мощность насосов будет уменьшаться с уменьшением



мощности остаточного тепловыделения. Необходимое количество энергии для привода насосов определим из пропорции:

$$159,9 \text{ МВт} \cdot 1271,73 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$$

$$1,75 \text{ МВт} - x$$

Откуда требуемая емкость аккумуляторов составит  $1271,73/159,9 \cdot 1,75 = 13,92 \text{ МВт}\cdot\text{ч}$ . Для аккумуляирования этого количества энергии потребуется  $13920/2,4 = 5800$  аккумуляторов.

### **Определение технико-экономических показателей полупроводниковой солнечной электростанции**

Цена солнечных элементов определяется исходя из 0,855 \$ за 1 Втп. Тогда стоимость 1 м<sup>2</sup> модуля с учетом опта будет равна 100 \$/м<sup>2</sup>. Размеры модуля  $1,2 \cdot 0,55 = 0,66 \text{ м}^2$ .

Общая стоимость фотоэлементов равна  $56470,6 \cdot 100 = 14,118 \cdot 10^6$  \$.

Количество солнечных модулей будет равно 85561 шт.

Размер панели определится из компоновки  $3 \cdot 3 = 9$  модулей, площадью  $3,6 \text{ м} \times 1,65 \text{ м} = 5,95 \text{ м}^2$ . Количество панелей равно 9507 шт. Число панелей в ряду 98 шт., 98 рядов.

Цена аккумуляторов типа DJM 12200, имеющих характеристики 200 А·ч, 12 В, равна 237,5 \$/шт. (при курсе 1 \$=22 грн.).

Стоимость всех аккумуляторов:  $5800 \cdot 237,5 = 1,3775 \cdot 10^6$  \$.

Стоимость кабеля в структуре общей стоимости незначительна и поэтому может не учитываться (удельная стоимость кабеля оценивается в 0,5 \$/м).

Удельная стоимость инвертора для преобразования постоянного тока, производимого ПСЭС, в переменный равна 0,5 \$/Вт.

Удельная стоимость средств контроля оценивается в 0,4 \$/Вт.

В табл. 2 приводится расчет оценочной стоимости оборудования ПСЭС.

Таблица 2 - Оценочная стоимость оборудования ПСЭС

Наименование оборудования или работ	Стоимость, \$	%
1. Фотоэлементы	$6,042 \cdot 10^6$	61,53
2. Аккумуляторы	$1,3775 \cdot 10^6$	14,03
3. Инвертор	$1,0 \cdot 10^6$	10,18
4. Средства контроля	$0,8 \cdot 10^6$	8,15
5. Строительная часть и монтаж (300 \$/кВт)	$0,6 \cdot 10^6$	6,53
Итого:	$9,8195 \cdot 10^6$	100,00

Удельные капвложения равны  $9,8195 \cdot 10^6 / 2000 = 4910$  \$/кВт.

Годовая выработка электроэнергии:

$$1020 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{сут}) \cdot 56470,6 \text{ м}^2 \cdot 365 \text{ сут} = 19,2 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При этих данных КИУМ ПСЭС будет равен:

$$\text{КИУМ} = 19,2 \cdot 10^6 / (1 \text{ кВт} / \text{м}^2 \cdot 56470,6 \text{ м}^2 \cdot 8760 \text{ ч} / \text{год}) = 0,042.$$

Затраты на производство электроэнергии складываются из следующих статей (с учетом дополнительных затрат на аккумуляторы и инвертор):

- амортизация (15 % стоимости ПСЭС):	$1,473 \cdot 10^6$ \$;
- зарплата 10 чел. персонала по 4400 \$/год:	44000 \$;
- общестанционные расходы (13 % от суммы амортизационных затрат и затрат на зарплату):	$0,228 \cdot 10^6$ \$;
Итого	$1,744 \cdot 10^6$ \$.

Себестоимость электроэнергии будет равна 0,0908 \$/кВт ч.

Зеленый тариф на электроэнергию, производимую солнечными электростанциями с 1.01.2015 года равен 1,84 грн/кВт·ч = 0,084 \$/кВт·ч.

Таким образом, при нынешнем соотношении цен использование ПСЭС оказывается нерентабельным.

Выбор типа аккумуляторов и, соответственно, цены вопрос не

однозначный. Строящиеся солнечные электростанции не комплектуются аккумуляторами. Без учета стоимости аккумуляторов экономические показатели будут выглядеть следующим образом:

- стоимость ПСЭС	8,442 млн \$;
- удельные капвложения	4221 \$/кВт;
- себестоимость	0,077 \$/кВт·ч;
- прибыль $(0,084-0,077) \cdot 19,2 \cdot 10^6$	$0,134 \cdot 10^6$ \$.

Следует также отметить устойчивую тенденцию снижения цены и увеличения КПД солнечных модулей, что может существенно улучшить экономические показатели использования ПСЭС.

В дальнейшей работе следует уточнить годовое количество энергии, падающее на 1 м<sup>2</sup> площади для конкретной АЭС.

### Выводы

1. Предложено в качестве одного из источников надежного питания ответственных потребителей реакторного отделения использовать солнечную электростанцию, обеспечивающую зарядку и поддержание в рабочем состоянии аккумуляторных батарей, от которых и происходит энергообеспечение насосов, участвующих в расхолаживании реактора при обесточивании.
2. Определены технические характеристики основного оборудования полупроводниковой солнечной электростанции (ПСЭС) мощностью 2 МВт:
  - площадь солнечных полупроводниковых модулей при КПД 17 % должна быть равна 56470,6 м<sup>2</sup>;
  - емкость аккумуляторных батарей для обеспечения трехсуточной работы необходимых насосов должна равняться  $13,92 \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 1,16 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{ч}$  (при напряжении 12 В).
3. С экономической точки зрения при зеленом тарифе 0,084 \$/кВт·ч ПСЭС с аккумуляторными батареями оказывается нерентабельной. Если аккумуляторные батареи отнести к системе безопасности, то эксплуатация

ПСЭС номинальной мощностью 2 МВт будет приносить прибыль 134 тыс. \$ в год.

### Список использованных источников

1. *Погосов А.Ю.* Физико-технический анализ латентных факторов развития аварийных процессов в энергоблоках АЭС Фукусима-1 / А.Ю. Погосов, В.П. Кравченко // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. - № 3. - С. 15-19.
2. Результаты экспертной оценки стресс-тестов действующих энергоблоков АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС "Фукусима-1" в Японии / Г.В. Громов, А.М. Дыбач, О.В. Зеленый и др. // Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. – № 1 (53). – С. 3 – 9.
3. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций — (ОПБ-88/97)(ПНАЭ Г-01-011-97).
4. Учебное пособие РДЭС АСД-5600 (QV). Часть 1. 00.УЦ.РО.Пс.510. – УТЦ ОП «ЗАЭС», 2006. – 109 с.
5. Последний солнца свет – история Крымской солнечной электростанции / <http://www.frontier.net.ua/2009/12/crimea-ses/> 10.04.2015
6. *Королев А.В.* Использование инжекторов в системе САОЗ для повышения ее функциональной надежности. – Ядерная и радиационная безопасность. – Т. 12. – Вып. 2. – 2009. – С. 38-39.
7. *Деревянко О.В.* Роторные элементы комбинированных турбонасосных агрегатов для автоматизированной системы аварийной подпитки теплообменного оборудования АЭС / О.В. Деревянко, А.В. Королёв, А.Ю. Погосов // Ядерна та радіаційна безпека.– 2014. – № 4(63). – С. 8-11.
8. *Верхивкер Г.П.* Теплоснабжение от атомных электростанций / Г.П. Верхивкер., В.П. Кравченко, В.А. Дубковский. – Одесса: ВМВ, 2010.– 410 с.
9. *Овчинников Ф.Я.* Эксплуатационные режимы водоводяных энергетических реакторов / Ф.Я Овчинников, В.В. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.

## Reference

1. *Pogosov A.Yu., Kravchenko V.P.* Physical and technical analysis of the latent factors of disturbance in the power plant Fukushima-1 // Nuclear and Radiation Safety. – 2011. - № 3. - C. 15-19. (Russian).
2. The results of the expert evaluation of the stress tests of operating NPPs of Ukraine taking into account the lessons of the accident at the nuclear power plant "Fukushima-1" in Japan / G.V. Gromov, A.M. Dybach, O.V. Green et al. // Nuclear and Radiation Safety. - 2012. - № 1 (53). - P. 3 - 9. (Russian).
3. General safety of nuclear power stations - (OPB-88/97) (PNAE G-01-011-97).
4. Textbook RDES SDA-5600 (QV). Part 1 00.UTs.RO.Ps.510. - UTC OP "Zaporizhzhya NPP", 2006. - 109 p. (Russian).
5. The last light of the sun - the history of the Crimean solar power / <http://www.frontier.net.ua/2009/12/crimea-ses/> 10.04.2015 (Russian).
6. *Korolev A.V.* Using injectors in emergency core cooling system to improve its functional reliability. - Nuclear and Radiation Safety. - T. 12. - Vol. 2 - 2009. - P. 38-39. (Russian).
7. *Derevyanko O.V., Korolev A.V., Pogosov A.Yu.* Rotary elements combined turbopump unit for automated emergency feedwater system of heat exchangers NPP // Nuclear and Radiation Safety. - 2014. - № 4 (63). - P. 8-11. (Russian).
8. *Verhivker G.P., Kravchenko V.P., Dubkovsky V.A.* Heat from nuclear power plants. - Odessa: WMW, 2010.- 410 p. (Russian).
9. *Ovchinnikov F.Ya., Semenov V.V.* Operating conditions water-water power reactors. - M.: Energoatomizdat, 1988. - 359 p. (Russian).

10.

Кравченко Владимир Петрович

Профессор, доктор технических наук,

Зав. кафедрой прикладной экологии и гидрогазодинамики Одесского  
национального политехнического университета

Т. 048-7058341

Mail: [vpkrav@rambler.ru](mailto:vpkrav@rambler.ru)

Дубковский Вячеслав Александрович

Професор, доктор технических наук

Зав. каф. Атомных электростанций Одесского национального  
политехнического университета

Т. 048-70586-88

Mail: [slaval@eurocom.od.ua](mailto:slaval@eurocom.od.ua)

Кравченко Егор Владимирович

Научная степень \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

Ученое звание \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_

Должность аспирант каф. АЭС ОНПУ

тел. 050-490-15-70

e-mail evksst@gmail.com