УДК 536.248.2:532.529.5

А.В. Дорошенко, В.А. Орлов
Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского
Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082.

СОЛНЕЧНЫЕ КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГО-, ТЕПЛО-, ХЛАДОСНАБЖЕНИЯ

Разработаны принципиальные схемные решения когенерационных солнечных систем для одновременной выработки электроэнергии, тепла (горячее водоснабжение), холода (испарительные охладители газов и жидкостей), осушения воздуха, кондиционирования воздуха (термовлажностная обработка воздушных потоков). Включение в разрабатываемые системы фотоэлектрических модулей обеспечивает электропитание вентиляторов и жидкостных насосов, существенно повышая автономность солнечных систем. Использование для охлаждения фотоэлектрических модулей имеющихся холодных отбросных потоков (в водоохладителях и воздухоохладителях испарительного типа) обеспечивает рост КПД фотомодулей без дополнительных затрат энергии на их охлаждение, что существенно повышает эффективность не только преобразователей но и самих солнечных систем в целом.
Ключевые слова: *Солнечные системы, Преобразователи солнечной энергии, Термические преобразователи, Электрические преобразователи, Абсорбционный цикл, Осушительный блок, Охладительный блок, Охлаждаемые фотоэлектрические модули,*

СОНЯЧНІ КОГЕНЕРАЦІЙНІ СИСТЕМИ ЕНЕРГО-, ТЕПЛО-, ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ

Розроблено принципові схемні рішення когенераційних сонячних систем для одночасного вироблення електроенергії, тепла (гаряче водопостачання), холоду (випарні охолоджувачі газів і рідин), осушення повітря, кондиціонування повітря (термовологісна обробка повітряних потоків). Включення в розроблювані системи фотоелектричних модулів забезпечує електроживлення вентиляторів і рідинних насосів, істотно підвищуючи автономність сонячних систем. Використання для охолодження фотоелектричних модулів наявних холодних отбросних потоків (у Водоохолоджувачі і повітроохолоджувачах випарного типу) забезпечує зростання ККД фотомодулів без додаткових витрат енергії на їх охолодження, що істотно підвищує ефективність не тільки перетворювачів а й самих сонячних систем в цілому.
Ключові слова: *Сонячні системи, Перетворювачі сонячної енергії, Термічні перетворювачі, Електричні перетворювачі, Абсорбційний цикл, Осушувальний блок, Охолоджувальний блок, Охолоджувані фотоелектричні модулі*

SOLAR COGENERATION SYSTEMS OF POWER-, HEAT-, AND COLD SUPPLY

Principal circuit decisions of solar cogeneration systems for the simultaneous production of electricity, heat (hot water), cold (evaporative chillers of gases and liquids), air drying, air conditioning (hydrothermal treatment of air streams) were developed. The inclusion of PV modules into the developed systems provides power to the fans and liquid pumps, significantly increasing the autonomy of the solar systems. Usage of available cold waste streams (in water coolers and evaporative air coolers) for PV modules cooling provides the growth of PV modules COP without additional expenses of energy on their cooling, that greatly increases the efficiency of not only the converters but also of the solar system as a whole.
Key words: *Solar Systems, Solar Power Inverters, Thermal Converters, Power Converters, Absorption Cycle, Drying Unit, Cooling Unit, Cooled Photovoltaic Modules*

I ВВЕДЕНИЕ

Многофункциональные системы, основанные на теплоиспользующем абсорбционном цикле, как правило, включают блок предварительного осушения воздуха и блок испарительного охлаждения газов и жидкостей. В осушительном блоке, состоящем из абсорбера и десорбера, используются растворы абсорбентов на основе композитов $LiBr{\cdot}H_2O$ (с добавками, обеспечивающими снижение коррозионного воздействия абсорбента на конструктивные материалы). Схемные решения приведены на рисунке 1-3. Осушение воздуха осуществляется в абсорбере, который для повышения эффективности дополнительно охлаждается водой от технологической градирни (в

© А.В. Дорошенко, В.А. Орлов, 2013

процессе поглощения водяных паров из воздуха выделяется тепло и процесс осушения протекает с нагревом, а технологическая градирня обеспечивает приближение процесса абсорбции к изотермичности). Восстановление концентрации абсорбента после абсорбера происходит в десорбере, где требуется подвод тепла от независимого источника на температурном уровне 50 - 80°С, в зависимости от решаемой задачи. Этой цели служит солнечная система с жидкостными коллекторами на основе многоканальных и многослойных полимерных структур, ранее разработанных авторами [6]. В схеме предусмотрен ряд теплообменников служащих для обеспечения внутренней регенерации тепла.

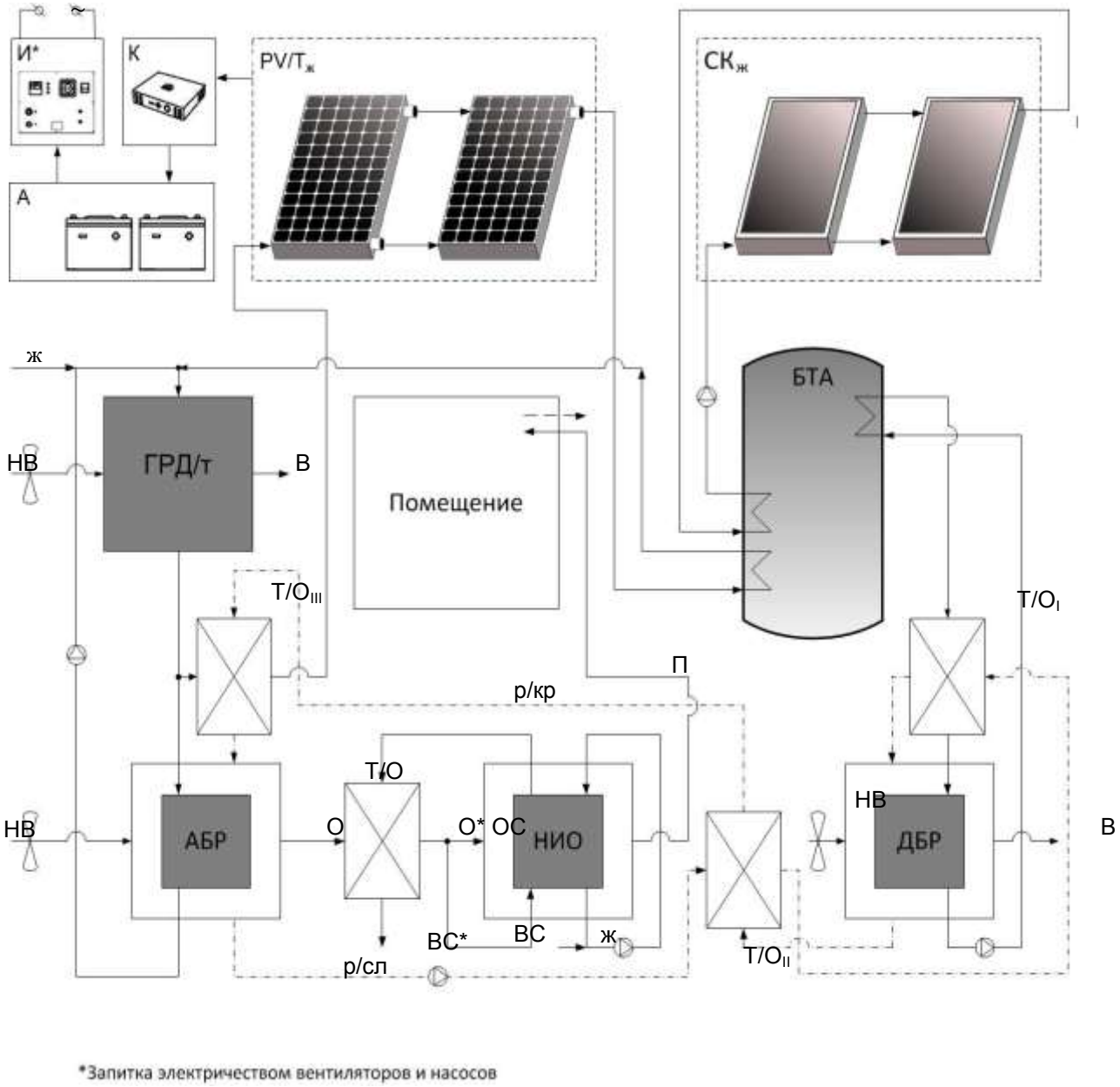


Рисунок 1 – Принципиальная схема солнечной системы кондиционирования воздуха иллюстрирующая способ охлаждения PV/T коллекторов потоком воды от градирни технологического назначения, обслуживающей абсорбер.

Обозначения: $PV/T_ж$ – фототермоэлектрические коллекторы (охлаждаемые фотомодули) жидкостного типа; $СК_ж$ – плоские солнечные коллекторы жидкостного типа; АБР – абсорбер-осушитель; ДБР – десорбер-регенератор; НИО – испарительный охладитель непрямого типа; БТА – бак-теплоаккумулятор; Т/О, T/O_I, T/O_{II}, T/O_{III} – теплообменники обеспечивающие внутреннюю регенерацию тепла; НВ – наружный воздух; О – осушенный воздушный поток; ОС, ВС – основной и вспомогательный воздушные потоки; В – отбросный поток; р/кр, р/сл – крепкий и слабый растворы абсорбента; ж – подпитка рециркуляционного водяного контура; П – к потребителю; А –блок аккумуляторных батарей; К – контроллер заряда/разряда аккумулятора; И — инвертор.

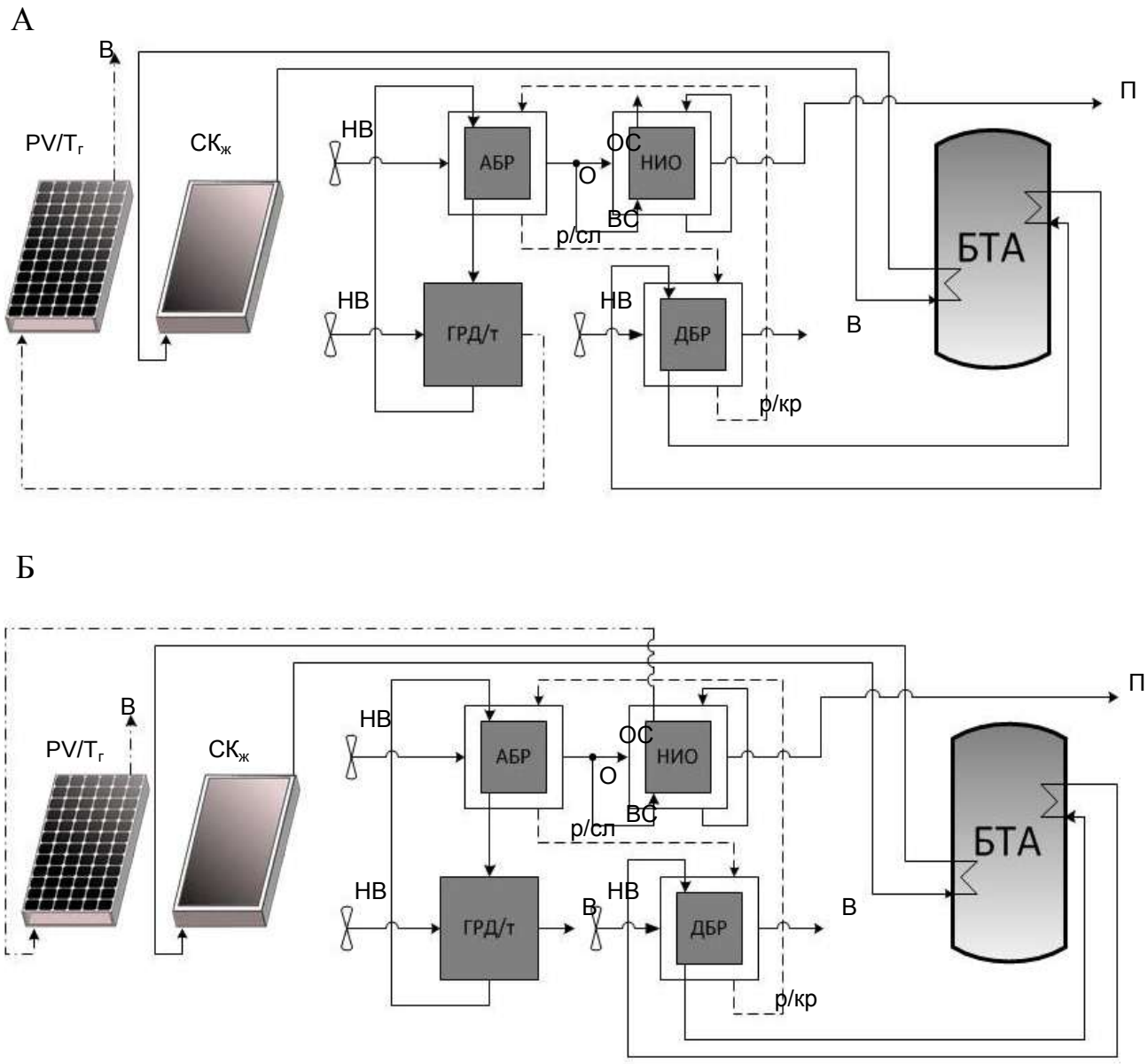
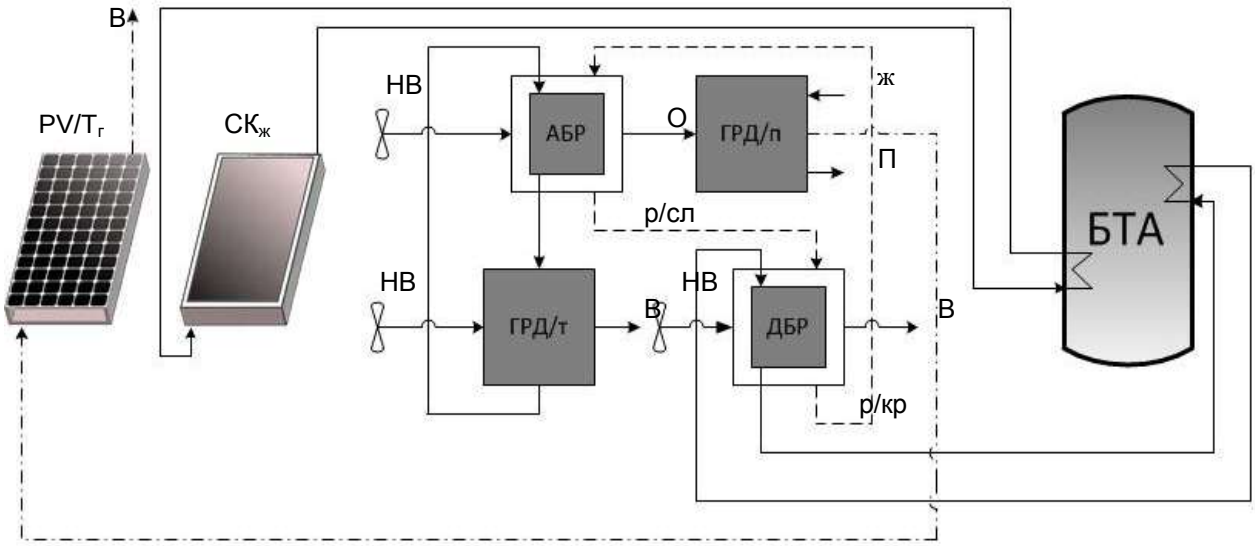


Рисунок 2 – Примеры интеграции PV/T коллекторов в составе когенерационных систем, в которых для его охлаждения используются (А) отбросной воздушный поток в технологической градирне, (Б) вспомогательный воздушный поток в аппарате непрямого испарительного охлаждения НИО.
Обозначения по рисунку 1, дополнительно: $PV/T_г$ – фототермоэлектрический коллектор газового типа.

А



Б

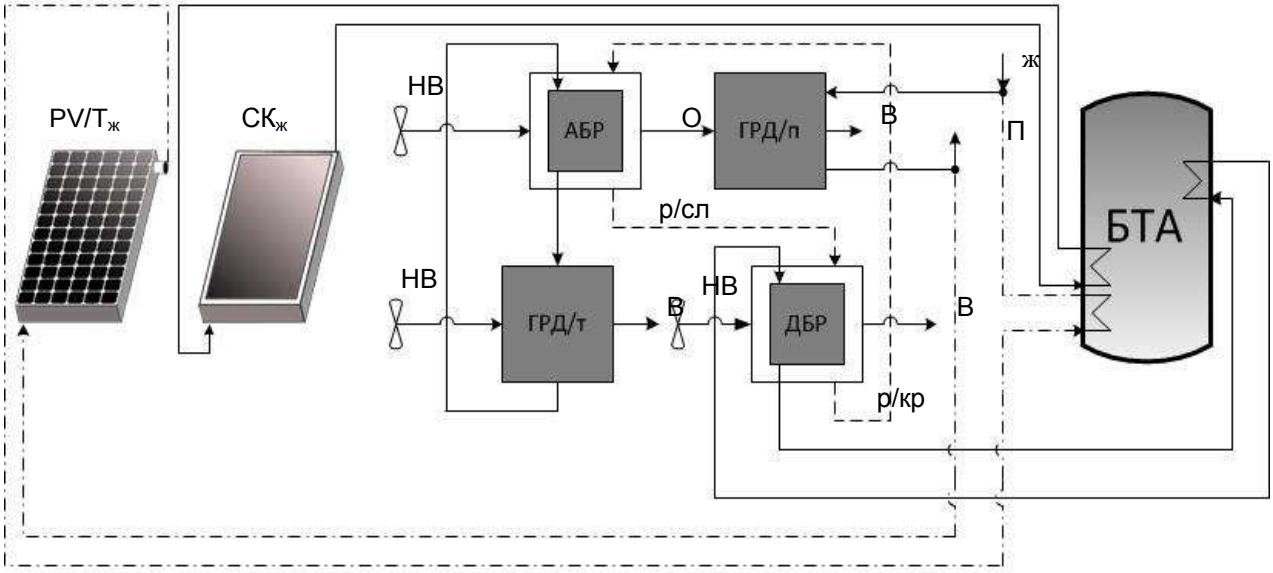


Рисунок 3 – Примеры интеграции PV/T коллекторов в составе когенерационных систем, в которых для его охлаждения используются (А) отбросной воздушный поток в «продуктовой» градирне, (Б) поток воды, охлаждённый в «продуктовой» градирне.
Обозначения по рисунку 1, дополнительно: $PV/T_г$ – фототермоэлектрический коллектор газового типа.

Автономность разрабатываемых систем обеспечивается $PV/T_ж$ коллекторами выполняющими роль источника электроэнергии для работы низконапорных вентиляторов и жидкостных насосов, перекачивающих воду и раствор абсорбента. Таким образом, впервые предлагается когенерационная солнечная система энерго-, тепло- и хладоснабжения обеспечивающая выработку как тепла ($СК_ж$ в составе системы горячего водоснабжения объектов), так и холода (испарительные охладители воды и воздуха в виде градирен $ГРД_п$ и испарительные воздухоохладители непрямого типа НИО [6]) в охладительном блоке, а также генерация электроэнергии в PV/T коллекторах, обеспечивающая полную автономность разрабатываемых солнечных систем.

На рисунках 1-3 приведены основные варианты разработанных когенерационных систем обеспечивающих энегро-, тепло- и хладоснабжение, а также кондиционирование воздуха (при использовании воздухоохладителя НИО в охладительном блоке).

II РАЗРАБОТКА ОХЛАЖДАЕМЫХ ФОТОМОДУЛЕЙ.

Основная проблема практического использования современных фотоэлектрических модулей заклю-

чается в снижении коэффициента преобразования с ростом рабочей температуры фотоэлемента (рис. 4). Традиционный кремниевый фотоэлектрический (PV) модуль преобразует 4–17% поступающей солнечной радиации в электроэнергию (преимущественно коротковолновая часть спектра излучения). Из оставшейся части солнечной энергии, более 50% преобразуется в тепло (за вычетом оптических потерь). Это приводит к росту рабочей температуры фотоэлементов до критических значений, при которых наблюдается падение КПД, по сравнению со значениями заявленными производителем для нормальных условий (в среднем, – 0,4% на один градус перегрева в фотоэлементах из монокристаллического кремния). Кроме того, работа в условиях экстремальных температур может приводить к разрушению конструкции PV модуля [1]. В итоге получается, что для любого кремниевого фотоэлемента с повышением рабочей температуры линейно падает его эффективность [2]. На рис. 1 показана зависимость эффективности PV модуля от рабочей температуры фотоэлемента. Главным образом она обусловлена процессами, протекающими внутри полупроводникового материала – кремния во время поглощения энергии фотонов, то есть необходимо учитывать, что наряду с преобразованием в электричество имеет место рассеивание энергии в виде тепла, а это в свою очередь обусловливает наличие конвекции и излучения. Рабочая температура также зависит от многих других, внешних факторов, среди которых погодные условия, такие как температура окружающей среды, скорость ветра, величина потока солнечного излучения, а также характеристики, зависящие от материала и конструкции, например, пропускательная способность прозрачного покрытия, степень черноты фотоэлементов и т.д [7]. Отношение η_T/η_{Tref} – это коэффициент эффективности PV панели, где η_T – действительный КПД PV модуля, η_{Tref} – при нормальных условиях (при температуре окружающей среды 25°С и величине потока солнечного излучения равного 1000 Вт/м^2); β_{ref} – температурный коэффициент, показывающий на сколько падает эффективность выработки электроэнергии при повышении температуры на один градус.

Количество производимой электроэнергии можно повысить путём охлаждения PV модуля потоками воздуха или воды, а отводимое при этом тепло можно затем использовать, например, для нагрева воздуха в помещении. Таким образом увеличивается общий съём энергии (тепловой и электрической) с единицы площади под установку, будь то земельный участок или же крыша здания. Эти обстоятельства обусловили появление солнечных когенерационных систем на основе использования гибридных фототермоэлектрических солнечных коллекторов или иначе – PV/T коллекторов (от англ. – Hybrid Photovoltaic/Thermal collectors).

В общем виде PV/T коллектор представляет собой PV панель, интегрированную в плоский солнечный тепловой коллектор, где PV панель играет роль теплопоглощающей пластины (хотя в ряде случаев имеется и отдельная металлическая пластина-теплоприемник, на которую приклеивается (прикрепляется) PV панель или, как это было в прошлом, сами фотоэлементы). В зависимости от вида теплоносителя PV/T коллекторы делятся на жидкостные, газо-жидкостные и газовые. Так как наряду с самыми распространёнными теплоносителями – водой и воздухом, существуют и другие, то соответственно приняты обозначения PV/$T_ж$, PV/$T_{г/ж}$ и PV/$T_г$. Важным моментом в классификации являются наличие/отсутствие верхнего прозрачного покрытия и характер движения теплоносителя. Охлаждение фотоэлементов может осуществляться сверху, снизу или с обеих сторон, в один или два захода. На рис. 6, 7 представлены основные типы PV/T коллекторов [1]. Верхнее прозрачное покрытие, например стеклянное, как и в традиционном плоском солнечном коллекторе образует воздушный зазор над теплоприемником, в данном случае PV панелью. Это способствует подавлению радиационных и конвективных потерь с одной стороны, и обеспечивает естественную циркуляцию теплоносителя с другой. На рис. 7А показан случай, когда через воздушный зазор проходит канал движения теплоносителя, что позволяет обеспечить режим естественной циркуляции. В остальных случаях воздух нагнетается вентилятором (рис. 7Б, 7В, 7Г).

Чтобы поддерживать электрическую эффективность на приемлемом уровне прибегают к методам, которые улучшают отвод тепла от PV панели. С этой целью внутри воздушного канала помещают гофрированный лист, проволочную сетку или ребра. На фиг.4 представлены два из таких решений: установка алюминиевого листа посреди воздушного канала (TMS – Thin Metal Sheet) и оребрение (FIN – ребро). Собраны эти конструкции одинаковым образом, в теплоизолированном коробе, у которого внутренняя поверхность выложена листовым металлом. Ребра расположены на дне рабочего канала, хотя эффективнее было бы расположить их непосредственно с тыльной стороны PV панели, что в свою очередь усложнило бы её производство. Тепло поступает от PV панели к оребрённой задней части воздушного канала по боковым стенкам путем теплопроводности, а затем уносится потоками воздуха с поверхности ребер. В результате исследования [3] было выяснено, что эффективнее использовать оребрение; конструкцию с TMS целесообразно использовать только как средство дополнительного экранирования тыльной стороны коллектора для подавления тепловых потерь, хотя в некоторой степени эффективность оказывается выше, чем у канала без модификаций (REF). Все конструкции были представлены как в вариантах с прозрачным покрытием (GL – glazed), так и без него (UNGL – unglazed). Стеклянное прозрачное покрытие обусловливает более высокую тепловую эффективность вследствие подавления тепловых потерь, но

из-за него падает производительность PV панели как следствие опять того же большего количества получаемого тепла и оптических потерь в прозрачном покрытии.

В последнее время интерес к PV/T системам обусловлен развитием строительной промышленности, а именно широким распространением фотоэлектрических систем интегрированных в ограждающие конструкции зданий (BIPV – от англ. Build-Integrated Photovoltaic). В процессе работы подобных систем выделяется низкопотенциальное тепло (порядка 35°С), которое можно использовать тут же, для кондиционирования помещений. В литературных источниках приводятся и другие способы утилизации этого тепла. Например, его достаточно для поддержания температуры оптимальной для жизнедеятельности метаногенных бактерий в биогазогенераторе [4]. PV/T коллектор может выполнять функции испарителя теплонасосной системы кондиционирования воздуха [5] (стоит отметить, в данном случае температура PV панели будет ниже температуры окружающей среды, что обусловливает её высокую эффективность).

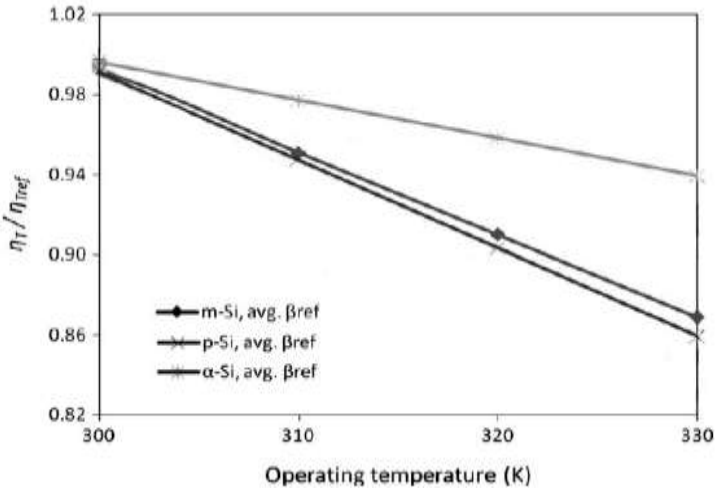


Рисунок 4 – Графики зависимости электрической эффективности различных видов фотоэлементов от рабочей температуры [2].
Обозначения: η_T/η_{Tref} — отношение электрической эффективности PV модуля, при данной рабочей температуре, к эффективности при нормальных условиях (at reference conditions); β_{ref} – температурный коэффициент материала, из которого изготовлен фотоэлемент; m-Si, p-Si, a-Si – соответственно обозначение фотоэлементов из монокристаллического, поликристаллического и аморфного кремния.
(обычно T_{ref} = 25°С, η_{ref} ≈ 0.12, β_{ref} ≈ 0.0045°С$^{-1}$, G = 1000 Вт/м^2, но могут варьироваться в зависимости от производителя)

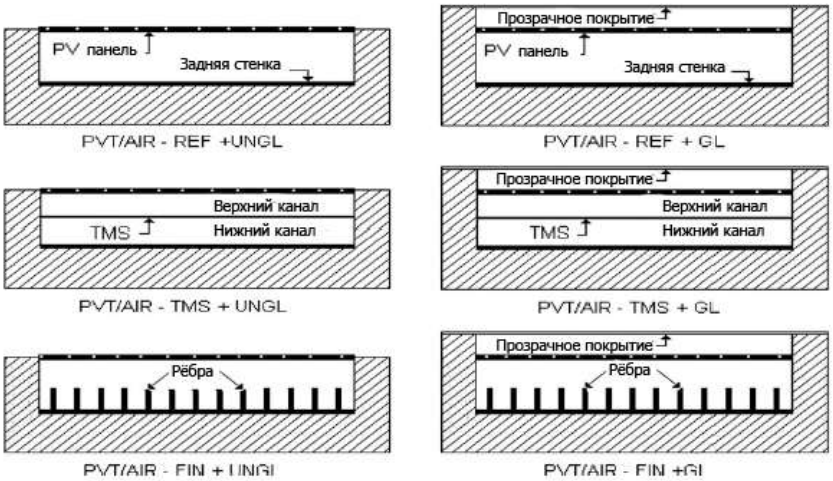


Рисунок 5 – Изображение PV/T$_г$ коллекторов в поперечном сечении, где показаны некоторые способы модификации поверхности воздушного канала [3].

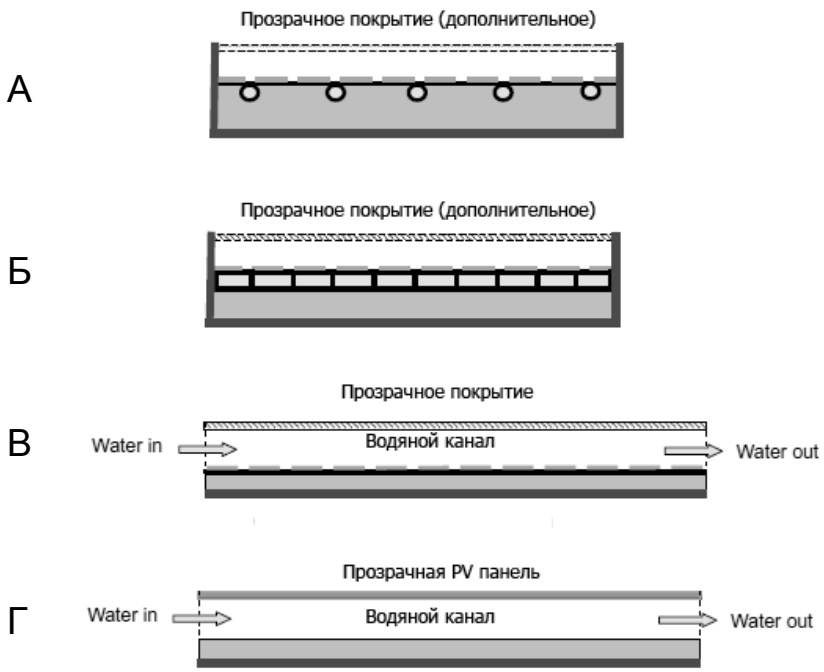


Рисунок 6 – Принципиальные схемы основных типов жидкостных PV/T коллекторов [1].
*Типы конструкций:*А – с пластинчато-трубчатым абсорбером; Б – абсорбер с каналами прямоугольного сечения; В – фотоэлементы расположены на дне водяного канала; Г – водяной канал снизу прозрачной PV панели.

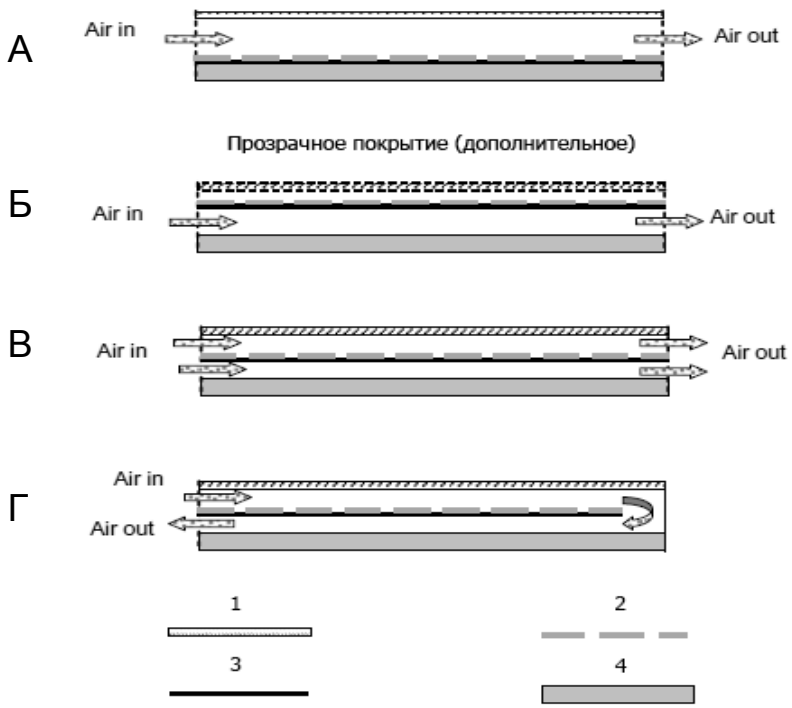


Рисунок 7 – Принципиальные схемы основных типов газовых PV/T коллекторов [1].
Типы конструкций: А – фотоэлементы обдуваются сверху; Б – фотоэлементы обдуваются снизу; В – фотоэлементы обдуваются с обеих сторон за один проход; Г – фотоэлементы обдуваются с обеих сторон за два прохода.
Обозначения (рис.6,7):
1-стеклянное покрытие, 2-электроизолированные фотоэлементы, 3-теплопоглощающая плита, 4-тепловая изоляция, water (air) in-вход теплоносителя, water (air) out-выход теплоносителя.

III ПРИНЦИПЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ В КОГЕНЕРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Интеграция охлаждаемого фотоэлектрического модуля в составе когенерационных систем представляется особенно перспективной потому что в охладительном блоке системы имеются холодные потоки воды и воздуха, которые могут быть использованы для обеспечения оптимального температурного режима работы PV/T без дополнительных затрат на систему охлаждения модуля и без ущерба для холодопроизводительности системы. Это касается использования отбросного воздушного потока в градирне технологического назначения, обслуживающей абсорбер (рисунок 1); использования отбросного воздушного потока в «продуктовой» градирне по рисунку 2А (температурный уровень выбрасываемого влажного воздушного потока здесь существенно ниже температуры окружающей среды); а также вспомогательного воздушного потока в аппарате непрямого испарительного охлаждения НИО показанного на рисунке 2Б.

Описанная в разделе II система охлаждения PV/T модулей, как правило, требует дополнительных энергозатрат, например, на привод вентилятора обеспечивающего движение воздушного потока в рабочем канале, то есть фактически в такой автономной системе мы дополнительную выработку энергии используем для решения задач охлаждения фотомодуля. Интегрирование PV/T модулей в составе разработанных солнечных систем обеспечивает, наряду с повышением их автономности, рост эффективности этих систем, поскольку в выбрасываемых в окружающую среду холодных воздушных потоках заключена часть энергозатрат, затраченных на организацию работы системы. В обычных схемных решениях эти холодные потоки от НИО и $ГРД_п$ не могут быть направлены в кондиционируемое помещение в виду их высокой относительной влажности.

IV ВЫВОДЫ

1. Когенерация электроэнергии, холода и тепла, обеспечивая полную автономность солнечных систем, решает основные задачи жизнеобеспечения: горячего водоснабжения, охлаждения сред и кондиционирования воздуха, а также осушения воздуха для применения в различных технологических процессах производства.

2. Охлаждение фотоэлектрических модулей предотвращает падение КПД преобразования солнечной энергии в электрическую с разогревом фотоэлементов (по данным работ [1;2] это снижение в среднем составляет 0,4 % на один градус перегрева).

3. Включение охлаждаемых фотоэлектрических модулей в состав многофункциональных солнечных систем обеспечивает оптимальный уровень их рабочей температуры без дополнительных энергозатрат извне и повышает эффективность когенерационных систем в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chow T.T.** A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. Applied Energy 87, 2010, pp. 365–379
2. **Skoplaki E., Palyvos J.A.** Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. Renewable Energy 34, 2009, pp. 23–29
3. **Tonui J.K.**, Tripanagnostopoulos Y. Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements. Solar Energy 81, 2007, pp. 498–511
4. **Prabhakant, Mishra R. K., Tiwari G.N.** Performance of hybrid photovoltaic thermal (HPVT) biogas plant. World Renewable Energy Congress, Linköping, Sweden, 8-13 May 2011, source: <http://www.ep.liu.se/ecp_article/index.en.aspx?issue=057;vol=14;article=018>
5. **Fang G., Hu H., Liu H.** Experimental investigation on the photovoltaic–thermal solar heat pump air-conditioning system on water-heating mode. Experimental Thermal and Fluid Science 34, 2010, pp. 736–743
6. **Дорошенко А.В., Глауберман М.А.** Альтернативная энергетика. солнечные системы теплохладоснабжения: моногр. – Одесса: Одесск. национ. ун-т им. И.И. Мечникова, 2012. – 447 с.
7. **Даффи Д.А., Бекман У.А.** Тепловые процессы с использованием солнечной энергии; пер. с англ. Малевского Ю.Н. – М.: Мир, 1977. – 566 с.

Получена в редакции 14.05.2013, принята к печати 04.06.2013