

СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ С МЕТАЛЛО-ПОЛИМЕРНЫМ АБСОРБЕРОМ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕПЛОХЛАДОСНАБЖЕНИЯ

Данько В.П., канд. техн. наук
Донецкий национальный университет экономики и торговли
им. М. Туган-Барановского, г. Донецк

Разработана новая модификация металло-полимерного жидкостного солнечного коллектора для солнечного теплоснабжения и для создания на его основе многофункциональных энергетических систем, в частности, солнечных холодильных систем. Проведен сравнительный эксперимент нескольких модификаций полимерных коллекторов с привлечением данных ряда зарубежных исследователей и доказана высокая эффективность новой разработки.

New modification of liquid-metal-polymer solar collector for solar heating and for creation of multifunctional energy systems on its basis, particularly solar refrigeration systems was developed. A comparative study of several modifications of polymer collectors involving data of a set of foreign researchers was made and high efficiency of the new elaboration was proven.

Ключевые слова: солнечный коллектор, полимерные материалы, энергоэффективность, теплоснабжение, хладоснабжение, кондиционирование воздуха, энергетические системы.

Вопрос о возможности использования полимерных материалов в конструкции солнечных коллекторов (СК) изучается рядом мировых исследовательских центров и фирм-производителей. Существует большое количество полимеров, которые потенциально могут быть использованы в конструкции плоского СК: — полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полисульфон, полиэстерсульфон, полиамид, аморфный полиамид, волокнистые пластики, поливинилхлорид, полиметилпропилен, акрил и др. Долгосрочное использование СК в открытой среде выдвигает ряд жестких требований к конструкционным материалам. Был выполнен анализ и выбор материалов для создания СК из полимерных материалов. Переход к полимерным материалам в конструкции коллектора обеспечивает снижение веса СК; снижение стоимости СК и гелиосистемы, снижение вредных экологических последствий в полном цикле «жизни» нового типа СК и системы в целом.

Теоретический и экспериментальный анализ полимерного СК с теплоприемником, выполненным из многоканальной сотовой полимерной структуры выполнен в работе [1]. Конструктивное оформление СК представлено на рис. 1А. На практике, при анализе работы СК вводится понятие эффективности коллектора F' , представляющей собой отношение термического сопротивления переносу теплоты от поглощающей пластины СК к окружающему воздуху к сопротивлению переносу теплоты от жидкости к окружающему воздуху. Величину F' для рассматриваемой конструкции многоканального СК можно рассчитать по формуле:

$$F' = \frac{1}{\frac{b \cdot U}{\pi \cdot D \cdot \alpha_{жс}} + \frac{b}{D + (b - D) \cdot F}}$$

где b — расстояние между центрами соседних каналов теплоприемника, м;

D — внутренний эквивалентный диаметр канала, м;

$\alpha_{жс}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки канала к жидкости, Вт/(м²·К), (обычно в расчетах принимают величину $\alpha_{жс} \approx 300$ для естественной, и ≈ 1500 для вынужденной конвекции);

F — эффективность ребра прямоугольного профиля (так как в многоканальной плите теплоприемника отсутствуют ребра, то принимаем $F = 1$).

Коэффициент полезного действия СК можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \tau \cdot \varepsilon_1 \cdot F' - U \cdot F' \cdot [0,5 \cdot (t_{oe1} + t_{oe2}) - t_0] / J,$$

где $t_{жс1}$ — температура жидкости на входе в СК, °С;

t_{oe2} — температура жидкости на выходе из СК, °С.

Если величины U и $F' = \text{const}$, зависимость $\eta_{СК}$ от $[0,5 \cdot (t_{oe1} + t_{oe2}) - t_0] / J$ представляет собой прямую линию. Величина $[0,5 \cdot (t_{oe1} + t_{oe2}) - t_0] / J$ называется приведенной температурой $T_{пр}$. Характеристики сравниваемых СК приведены в стандартном виде зависимости $\eta_{СК}$ от приведенной температуры, где:

$$\eta_{СК} = f \cdot (T_{ПП}), \quad \eta'_{СК} = Q / IF_{СК}; \quad T_{ПП} = [0,5 \cdot (t_{f1} + t_{f2}) - t_0] / J.$$

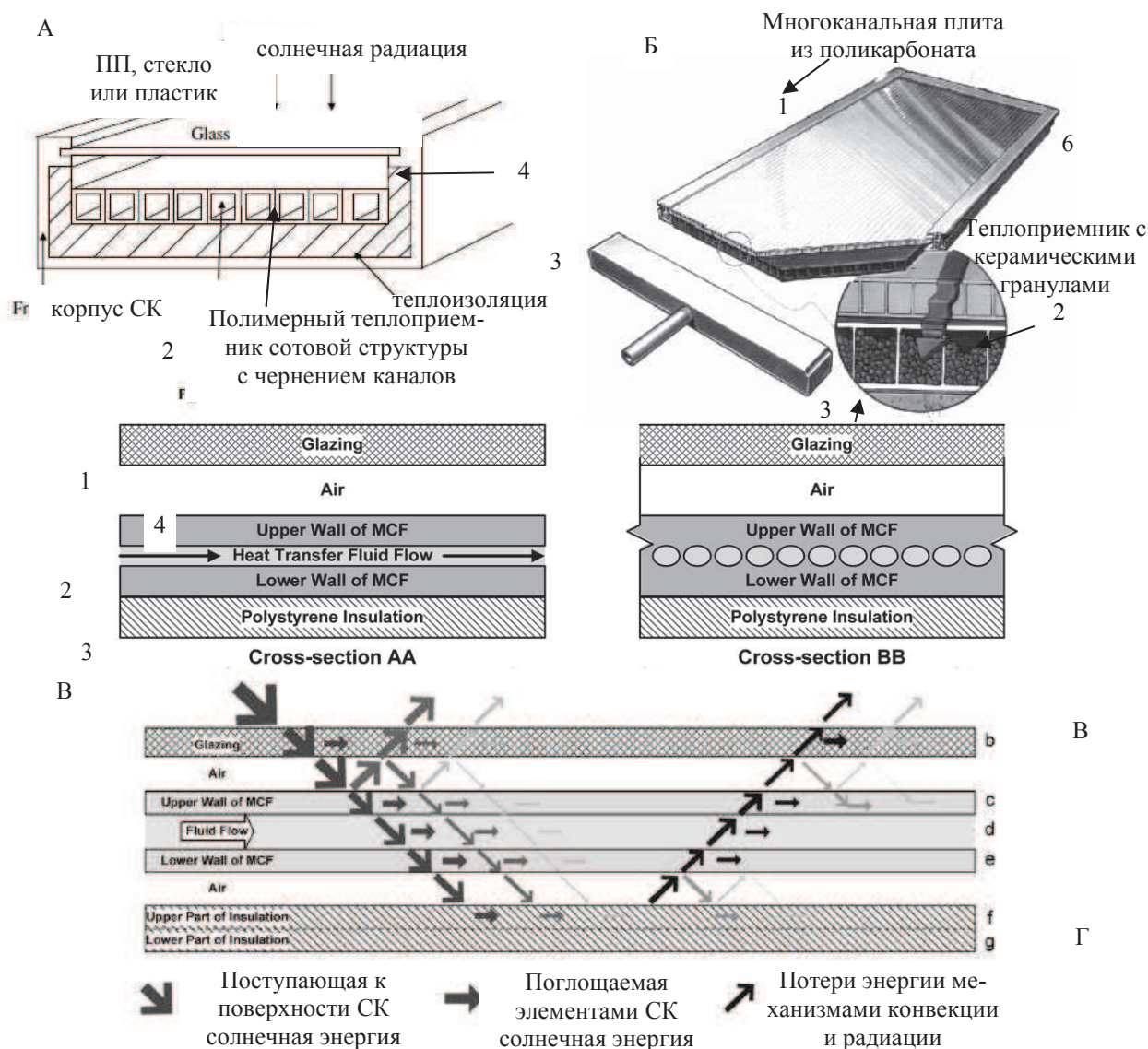


Рис. 1 – Основные варианты разрабатываемых плоских солнечных коллекторов на основе полимерных материалов.

А. Схема полимерного коллектора по работе [1]. Б. Конструкция полимерного коллектора по работе норвежских ученых Nielsen J.E. и Bezzel E [2]. В. Схема полимерного коллектора на основе полимерных микрокапиллярных структур по работе [3]. Обозначения: 1 – прозрачное покрытие; 2 – теплоприемник; 3 – теплоизоляция; 4 – воздушный зазор.

В работе норвежских ученых [2] исследованы солнечные системы, основанные на новом типе СК из конструкционных пластмасс (рис. 1Б). Верхний слой коллектора толщиной 6 мм (прозрачное покрытие) представляет собой двойной лист из поликарбоната в единой многоканальной структуре СК. Коллектор имеет теплоизоляцию нижней части из слоя минеральной ваты. В совместной работе английских (University of Cambridge) и южноафриканских (Stellenbosch University) исследователей [3] изучались теоретически и экспериментально характеристики полимерного коллектора (рис. 1В), созданного по особой технологии на основе полимерных микрокапиллярных структур «plastic microcapillary films» MCF. Этот материал называется микрокапиллярной пленкой и состоит из полученного выдавливанием гибкой пластиковой пленки с параллельным массивом полых капилляров, расположенных вдоль длины пленки.

Процесс производства MCF позволяет получать средний диаметр капилляра, лежащий в пределах 30...500 мкм, и отношение площади поперечного сечения капилляров к полной площади поперечного сечения пленки («пористость») в пределах от 11 % до 60 %.

Интересна композиция СК, в которой предусмотрено два воздушных зазора, призванных подавлять конвективные и радиационные потоки теряемой основными элементами энергии: традиционный, между верхней поверхностью теплоприемника и нижней пластиной прозрачного покрытия, и дополнительный, между нижней поверхностью теплоприемника и верхней границей теплоизоляции дня СК. Вопрос о таком устройстве СК требует дополнительного изучения, поскольку уровень потерь указанными механизмами естественно снижается в направлении «дна» СК, а дополнительный воздушный зазор приведет к увеличению толщины коллектора, росту его веса (за счет увеличения размеров корпусной части) и стоимости.

На рис. 1Г приведена классическая схема потоков энергии (солнечной радиации) приходящей к поверхности теплоприемника СК, поглощаемой основными элементами СК (прозрачным покрытием, абсорбером, теплоизоляцией) и теряемой каждым из этих элементов и отдельными частями каждого элемента конструкции. Вопрос об использовании полимерных микрокапиллярных структур («plastic microcapillary films» MCF) в качестве абсорбера (теплоприемника) СК также требует дополнительного изучения, поскольку при таких малых размерах «каналов» абсорбера (теплоприемника) можно ожидать существенный рост гидравлического сопротивления. Отметим здесь общую тенденцию последних лет к уменьшению размеров каналов теплообменной аппаратуры, имеющую место в современных разработках.

Основная масса выпускаемых в мире плоских СК, как показал проведенный обзор, производится из цветных металлов, в качестве прозрачного в них покрытия используется стекло, тяжелый и хрупкий материал. Использование ударопрочных стекол значительно удорожает производство СК. Основные задачи в этой части нашей работы: создать металло-полимерный тип СК/М-П, на основе полимерных материалов из плит сотовой структуры, используемых в качестве прозрачной изоляции ПП; оптимизировать основные геометрические параметры полимерного СК с целью минимизации потерь тепла и сокращения габаритов и веса.

Существует большое количество полимеров, которые потенциально могут быть использованы в конструкции плоского СК: полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полисульфон, полиэстерсульфон, полиамид, аморфный полиамид, различные волокнистые пластики, поливинилхлорид, полиметилпропилен, акрил и др. Долгосрочное использование СК в открытой среде выдвигает ряд жестких требований к выбору материала. При выборе полимерных материалов необходимо руководствоваться следующими требованиями: минимальная оптическая прозрачность материала должна быть не ниже 75 %; рабочие температуры (тепловая устойчивость материалов) должны лежать в диапазоне от -15 до $+150$ °С; материал должен обладать стабильностью к ультрафиолетовому излучению (УФИ). Анализ ПМ показывает, что лишь немногие из них пригодны для такого специфического применения. Полипропиленовые и полистироловые пластмассы непригодны из-за плохих оптических свойств, полисульфон и полиэстерсульфон стабильны к УФИ, но имеют нежелательный желтый цвет и слишком низкую оптическую прозрачность для такого применения. Аморфный полиамид можно сделать довольно прозрачным, но он чувствителен к гидролизу и нестабилен к УФИ. Акрил обладает отличной стойкостью к УФИ, но хрупок и используется только при температурах ниже 90 °С.

В качестве полимера, пригодного к использованию в конструкции металло-полимерного СК для формирования прозрачного покрытия ПП в настоящей работе был выбран поликарбонат, как и в ранее выполненном в ОГАХ исследовании [4]. Плита сотового поликарбоната представляет собой два параллельных листа с поперечными перегородками в цельной единой структуре как показано на рис. 2. Температурный диапазон эксплуатации для поликарбоната: от -40 до $+120$ °С, что позволяет использовать его в «открытых» системах. Максимальное термическое расширение (при $\Delta T = 80$ °С) составляет 2,5 мм/м. Светопропускная способность полимеров имеет большое значение при их выборе для использования в качестве прозрачного покрытия СК. Панели поликарбоната имеют светопропускание 70...82 %, в зависимости от их толщины. При длительном воздействии солнечного излучения принципиально важное значение имеет устойчивость материала к УФИ. Современные поликарбонатные панели производятся со специальным покрытием, предотвращающим попадание УФИ внутрь структуры панели. Ультрафиолетовые лучи (диапазон менее 390 нанометров), которые являются наиболее разрушительными, практически не проходят через эти панели. Пропускание лучей в крайней части инфракрасной зоны спектра (более 5000 нанометров), минимально, вследствие чего тепло, излучаемое теплоприемником СК, остается внутри коллектора. По сравнению с другими типами ПП той же толщины тепловые потери через сотовые панели из ПК значительно ниже и тепловая изоляция намного лучше, что определяет экономию топлива

и энергии. Сотовые панели из поликарбоната отличаются высокими механическими характеристиками, такими, как твердость и стойкость к ударным воздействиям при длительном содержании на открытом воздухе, поликарбонат устойчив ко многим химическим веществам, включая минеральные кислоты высокой концентрации, ко многим органическим кислотам, нейтральным и кислым растворам солей, многим жирам, парафинам, насыщенным алифатам и циклоалифатам, кроме метилового спирта. Поликарбонат разрушается водным или спиртовым раствором щелочей, аммиаком или его растворами и аминами. Степень чувствительности к воздействию химических соединений зависит от таких факторов, как концентрация, температура, продолжительность контакта с поверхностью панели, давления, а также напряжений в панели. Это делает поликарбонат приемлемым для создания солнечного коллектора СК-П и особенно коллектора-регенератора СК-Р, где имеет место прямой контакт материала и абсорбента.

Решение узла «прозрачная изоляция — воздушный зазор». В качестве материала для анализа и выбора ПП нами были использованы результаты, полученные В. Костенюком в 2010 году [4]. Работа была посвящена изучению влияния типа и геометрии прозрачного покрытия ПП. Были теоретически и экспериментально рассмотрены следующие варианты СК/П с прозрачным покрытием из полимерных материалов: листовой поликарбонат ПК в одиночном покрытии с воздушным зазором между абсорбером и ПИ (варианты №№ 5-6); схема СК/П по формуле: «теплоизоляция-абсорбер-воздушный зазор-прозрачная изоляция»; листовой поликарбонат ПК с двойным воздушным зазором между абсорбером и ПИ1, ПИ1 и ПИ2 (варианты №№ 7-8); поликарбонатные многоканальные плиты СПК с одним воздушным зазором и различной толщиной теплоизоляции (варианты СК/П №№ 1-4).

К сожалению, в работе [4] не варьировалась толщина ПП (10 мм во всех опытах) и высота воздушного зазора (11 мм). Важнейший для нас вывод по работе [4] касался шага в расположении прозрачных перегородок ПП. При малых значениях этого шага многочисленные перегородки в структуре прозрачного покрытия негативно сказываются на пропускательной способности ПП. Поэтому была принята формула: $l_{mn} \approx 2-4 h_{mn}$, при $l_{mn} = 6-10$ мм.

В работе [3] изучалась возможность оптимальной организации воздушного зазора, в целях подавления естественной конвекции, с помощью специальных вставок сотовой структуры различной геометрии. Общая высота воздушного зазора в опытах была примерно постоянной, составляя ≈ 60 мм, при этом сама сотовая вставка из поликарбонатной многоканальной структуры, с каналами квадратной формы со стороной, с каналами квадратной формы со стороной ≈ 10 мм располагалась на некотором расстоянии от нижней поверхности прозрачного покрытия (от 3 до 6 мм) и на некотором расстоянии от верхней поверхности абсорбера (от 3 до 12 мм). Всего было исследовано десять таких комбинаций. Общий вывод состоит в достоинствах такого оформления воздушного зазора и подавления конвективных потерь. Остается открытым вопрос о влиянии многочисленных вертикальных сотовых вставок на пропускательную способность верхней части коллектора (ПП и воздушного зазора).

Решение узла теплоприемника (абсорбера). Важнейшей характеристикой плоского солнечного коллектора является равномерность распределения теплоносителя по каналам теплоприемника.

Неравномерность распределения, как следствие непосредственной близости расположения гидравлических коллекторов (подводящего и отводящего теплоносителя к «трубному регистру» СК) к каналам теплоприемника, оказывается весьма существенной, что имеет следствием и значительную температурную неравномерность. Это может приводить к формированию кризисных ситуаций с теплоносителем, например к формированию паровых пробок в каналах с минимальным (резко сниженным) расходом теплоносителя. Это явление значительно усиливается при переходе к сплошной многоканальной структуре каналов в многоканальной плите теплоприемника и становится особенно опасным при использовании, в качестве материала для формирования теплоприемника, полимеров, что ставит под сомнение их использования. Этот важнейший вопрос требует специального изучения. Нами, для создания теплоприемника, была использована многоканальная тонкостенная плита из алюминия с размерами каналов, указанными на рис. 2.

Экспериментальные исследования металло-полимерных солнечных коллекторов СК/М-П. Принцип конструктивного оформления металло-полимерных СК/М-П и соответствующие геометрические характеристики его основных элементов приведены на рис. 2. Были разработаны и изготовлены два варианта СК/М-П, с одиночным и двойным прозрачным покрытием, соответственно. Размеры многоканальных плит ПП и высота воздушных зазоров были идентичны и приняты нами по результатам исследования [4]. Экспериментальный стенд был оснащен приборами для фиксации уровня солнечной активности, ветровой нагрузки, температуры и относительной влажности наружного воздуха и комплектом термодатчиков, обеспечивающим замеры температур в баке-теплоаккумуляторе, а также на входе и выходе из СК.

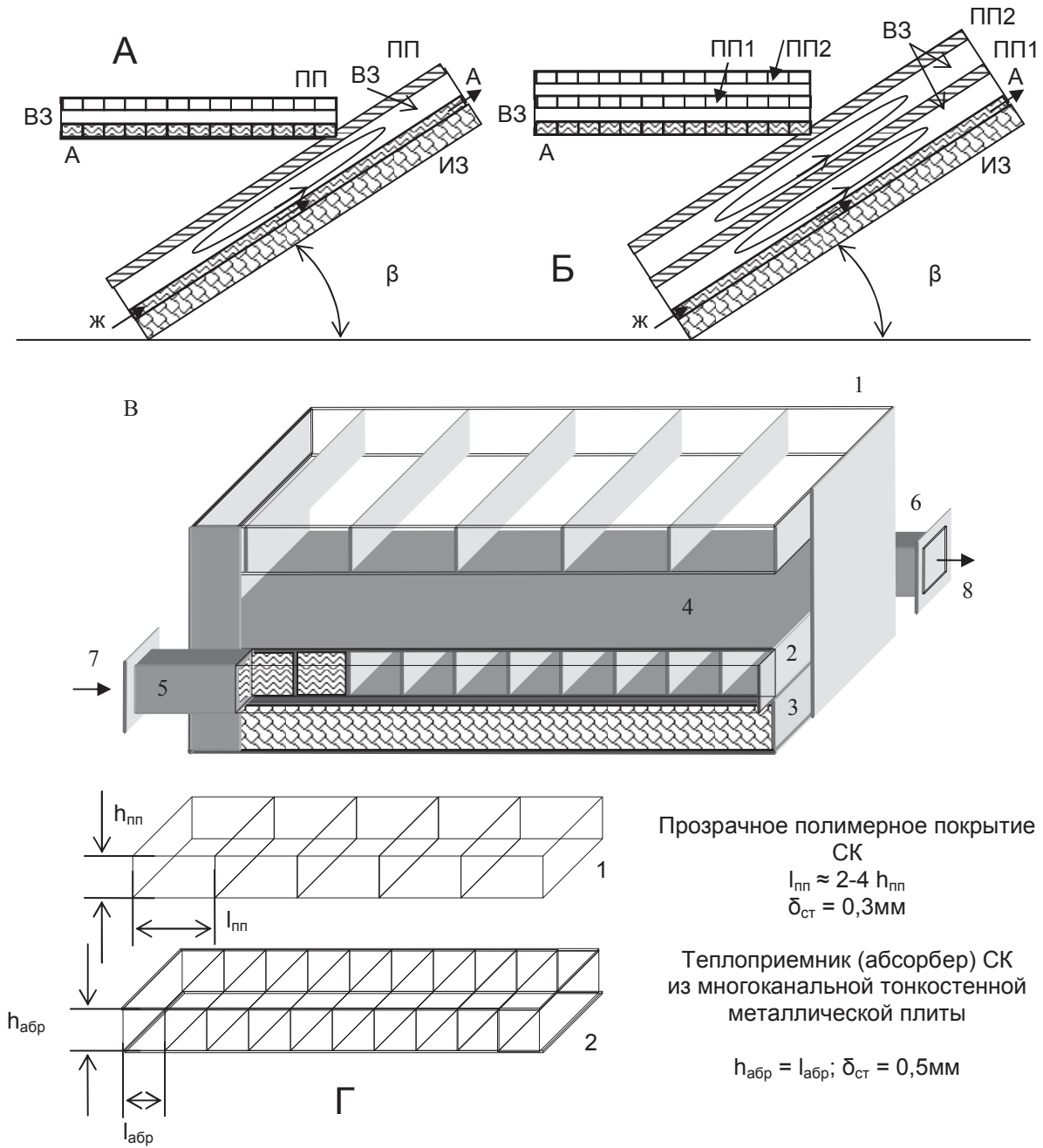


Рис. 2 – Разработанный тип плоского жидкостного металло-полимерного солнечного коллектора СК/М-П из многоканальных плит.

А, Б, В – схемные решения и компоновка СК с одиночным и двойным прозрачным покрытием, соответственно; Г – основные элементы солнечного коллектора СК/М-П. Обозначения: 1 – прозрачное покрытие; 2 – элементы (секции) теплоприемника (абсорбера); 3 – теплоизоляция; 4 – воздушный зазор между теплоприемником (абсорбером) и прозрачным покрытием; 5, 6 – гидравлический коллектор; 7, 8 – жидкий теплоноситель

Полученные результаты приведены на рис. 3. Они приведены в виде зависимости эффективности процесса трансформации солнечной энергии в тепловую энергию жидкого теплоносителя от приведенной температуры. В качестве фона для сравнения были использованы результаты исследований В. Костенюка [4] и работ последних лет, посвященных изучению возможностей использования полимеров в

конструкції СК. Это данные по работе Martinopoulos G. at al., [1] и данные по работе Sandnes B., Rekstad J. A [2]. Были дополнительно использованы результаты работы Ghoneim A.A. [3].

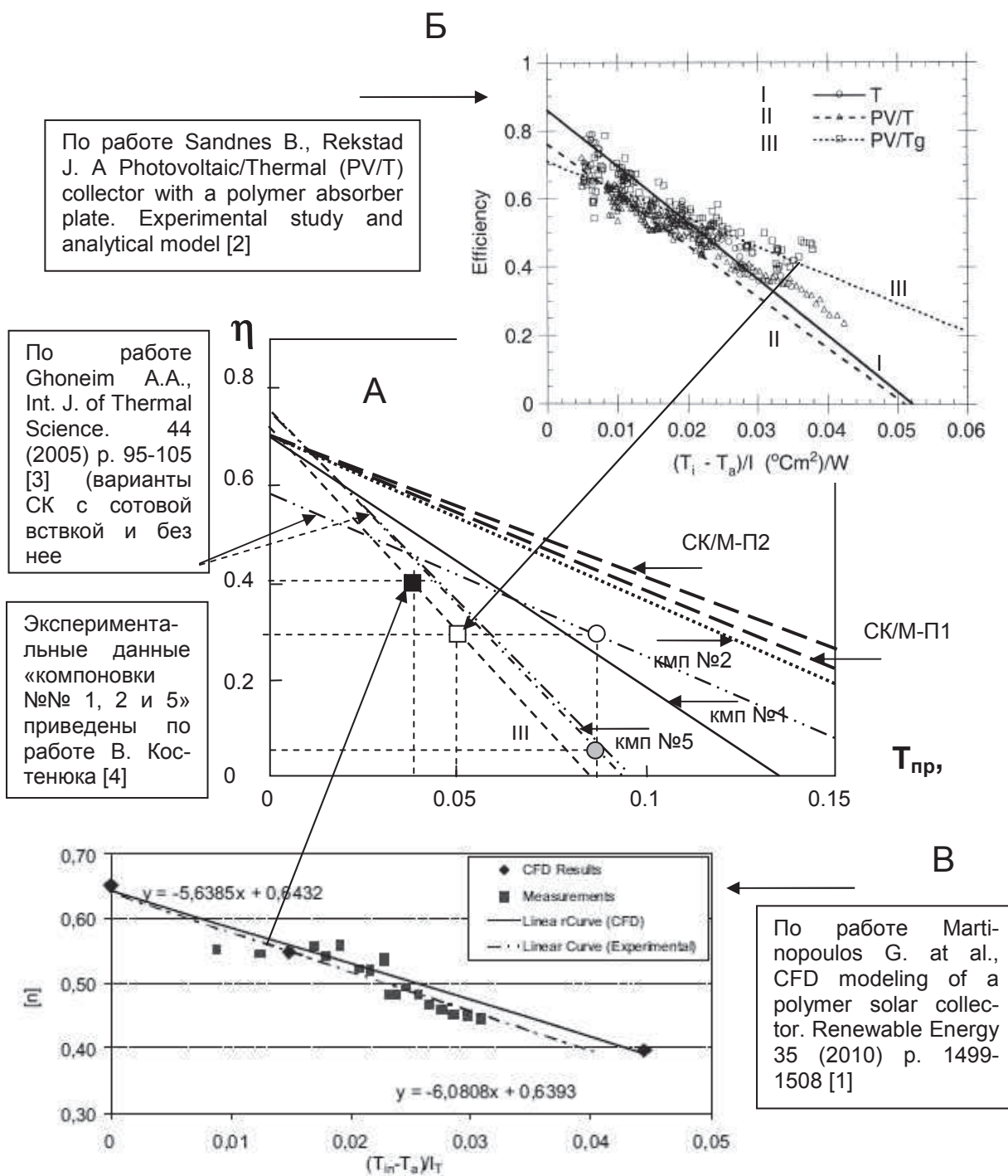


Рис. 3 – Сравнительная эффективность полимерных солнечных коллекторов (по работам В. Костенюка [4], Sandnes B., Rekstad J. [2], Martinopoulos G. at al. [1] и Ghoneim A.A. [3]). Экспериментальные данные по металло-полимерным модификациям СК/М-П приведены по данным автора [4]

Выводы

1. В целом, имеющиеся немногочисленные к настоящему времени экспериментальные данные по эффективности плоских СК с использованием в их конструкции полимеров, находятся в хорошем соответствии;

2. Использование вставок сотовой структуры в воздушный зазор, в целях подавления естественной конвекции, в целом аналогично применению многоканальных полимерных плит сотовой структуры в качестве прозрачного покрытия коллектора по работе [4]; общий вывод состоит в достоинствах такого оформления узла «прозрачное покрытие — воздушный зазор» в целях подавления конвективных потерь; остается открытым вопрос о влиянии многочисленных вертикальных стенок такой сотовой вставки на пропускательную способность верхней части коллектора (ПП и воздушного зазора).

3. Важнейшей характеристикой плоского солнечного коллектора является равномерность распределения теплоносителя по каналам теплоприемника; неравномерность распределения теплоносителя может иметь следствием и значительную температурную неравномерность, что может приводить к формированию кризисных ситуаций, например к формированию паровых пробок в каналах с минимальным расходом теплоносителя; это явление значительно усиливается при переходе к сплошной многоканальной структуре каналов и становится особенно опасным при использовании, в качестве материала для формирования теплоприемника, полимеров, что ставит под сомнение возможность их использования для формирования абсорбера СК, без дополнительного изучения вопроса.

4. Переход на металло-полимерный вариант СК/М-П ожидаемо улучшил характеристики преобразования солнечной энергии, сравнительно с лучшим вариантов СК/П по работе [4] (компоновка №2 по табл. 2.5 с максимальной толщиной теплоизоляции); этот выигрыш невелик, но в настоящее время оправдан отмеченным выше возможным влиянием неравномерности на устойчивость и надежность системы в целом;

5. Использование двойного прозрачного покрытия в конструкции СК/М-П повышает эффективность коллектора, но приводит к увеличению его толщины, веса и стоимости.

Литература

1. Martinopoulos G. et al., CFD modeling of a polymer solar collector. *Renewable Energy* 35 (2010) p. 1499-1508.
2. Sandnes B., Rekstad J. A Photovoltaic/Thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Solar Energy*. 72, №1 (2002) p. 63-73
3. Ghoneim A.A., Performance optimization of solar collector equipped with different arrangements of square-celled honeycomb. *Int. J. of Thermal Science*. 44 (2005) p. 95-105.
4. Костенюк В.В. Тепловые испытания полимерных солнечных коллекторов / В.В. Костенюк, А.В. Дорошенко // Холодильна техніка та технологія. – 2010. – №4. – С. 54-59.