

DOI: 10.5862/JPM.225.13

УДК: 621.38

Ю.С. Чумаков ¹, В.Д. Румянцев ²,
Ю.В. Ащеулов ², А.В. Чекалин ²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА ПЛОСКУЮ И СТУПЕНЧАТУЮ КОНСТРУКЦИИ ТРЕКЕРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

В работе проведены сравнительные экспериментальные исследования аэродинамических процессов обтекания воздушными потоками, и соответственно появления дополнительных динамических нагрузок на платформу, концентраторных фотоэлектрических модулей (КФЭМ) для двух разных по конструкции схем расположения отдельных модулей: плоской и ступенчатой. Последующий сравнительный анализ аэродинамических свойств этих схем показал существенное преимущество ступенчатого варианта расположения КФЭМ над плоским в отношении уменьшения ветровых нагрузок на платформу. По результатам измерений получены значения коэффициентов сопротивления для разных схем расположения модулей на платформе, и на их основе рассчитаны в качестве примера значения сил, действующих на реальные платформы. Представленные в статье подробные испытания различных моделей солнечных установок с использованием аэродинамической трубы и аэродинамических весов проведены впервые.

ВЕТРОВАЯ НАГРУЗКА, КОНЦЕНТРАТОРНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОДУЛЬ, КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ, АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТРУБА.

Введение

В многокаскадных солнечных фотопреобразователях на основе материалов A_3B_5 достигнуты значения КПД более чем 45 % в условиях концентрирования солнечного излучения [1, 2]. Широкое применение таких фотопреобразователей в наземных условиях возможно только при использовании недорогих в производстве интегральных оптических концентраторов, способных фокусировать излучение Солнца на небольшую поверхность (2×2 мм) многокаскадных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) [3, 4]. Для получения максимального количества энергии оптическая ось пары концентратор-фотоэлемент должна быть направлена точно на Солнце. На практике, при кратности концентрирования порядка 1000 Солнц и более, точность взаимного расположения составляющих такой пары и точность направления на Солнце должны

быть достаточно высокими (не хуже $0,1^\circ$) и стабильными [5]. В связи с наличием таких требований концентраторная фотовольтаика развивается с некоторым отставанием по сравнению с другими подходами, направленными на преобразование солнечного излучения. Однако у нее имеется существенный потенциал для дальнейшего повышения эффективности. Его можно реализовать путем оптимизации структуры и конструкции всех компонентов энергоустановок, таких как ФЭП, концентраторные модули, а также конструкции солнечных трекеров (последние обеспечивают работоспособность всей системы фотопреобразования).

Общепринятый способ размещения модулей на раме трекера предполагает формирование светоприемной поверхности солнечной установки в виде интегральной плоской панели. При вырабатываемой электрической мощности в десятки ки-

ловатт плоская панель, состоящая из отдельных модулей ФЭП, испытывает весьма значительные ветровые нагрузки. Как правило, при превышении определенной скорости ветра, рама с модулями должна переводиться в горизонтальное положение для предотвращения разрушения установки. Однако и при сравнительно небольших, но переменных во времени нагрузках, во-первых, существует опасность возникновения усталостных явлений в материалах рамы и других механических частях трека и, во-вторых, такие нагрузки приводят к увеличению ошибки направления платформы на Солнце [6], что в конечном итоге приводит к существенному уменьшению количества вырабатываемой электроэнергии. Таким образом, задача снижения ветровых нагрузок на солнечные установки с системами слежения за Солнцем является весьма актуальной [7, 9, 10].

Цель настоящей работы – экспериментально установить влияние ветровых нагрузок на платформу с КФЭМ для двух различных схем размещения отдельных модулей на этой платформе.

Концентраторные фотоэлектрические системы

В лаборатории фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А.Ф. Иоффе Рос-

сийской академии наук на протяжении последних лет ведется разработка всех компонентов концентраторных фотоэлектрических систем, включая концентраторные модули и солнечные трекеры [3, 4]. Предполагаемые к размещению на трекарах модули имеют конструкцию, называемую SMALFOC [6], и она имеет много общих черт с конструкцией обычных плоских модулей без концентраторов как по виду основных используемых материалов, так и по технологии изготовления. Схематический разрез фрагмента такого модуля представлен на рис. 1.

В мировой практике в солнечных концентраторных модулях в основном используются концентраторы в виде линз Френеля, изготовленные из прозрачного акрилового материала методом горячей штамповки. Акрил прозрачен в видимой области, но имеет полосы поглощения в ближней ИК области спектра. Вместо акрила сотрудники ФТИ им. А.Ф. Иоффе предложили применять прозрачный силиконовый компаунд [4]. Механической основой линзовой панели в этом случае служит лист силикатного стекла – дешевого высокопрозрачного материала, стойкого к абразивному воздействию. На внутренней стороне стекла располагают тонкий слой силикона, на котором формируется профиль френелевских линз.

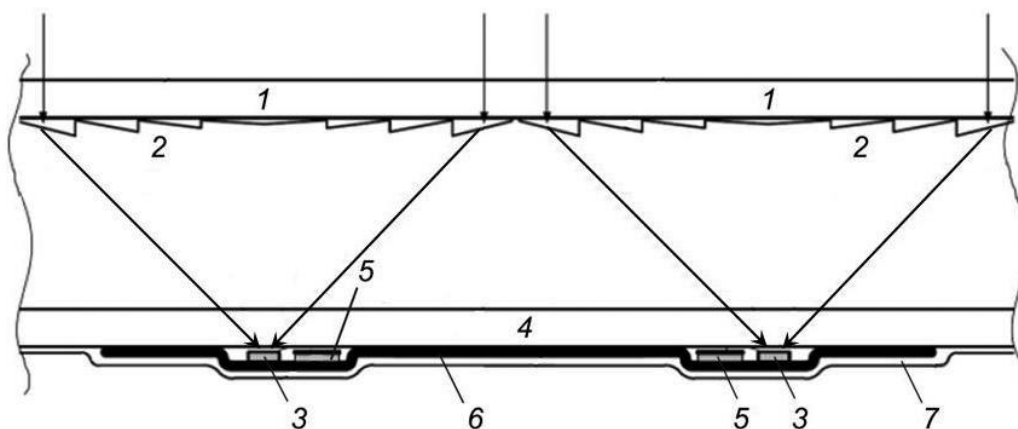


Рис. 1. Схематический разрез модуля SMALFOC-конструкции:

1 – фронтальная стеклянная пластина, 2 – силиконовые линзы Френеля, 3 – фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), 4 – тыльная стеклянная пластина (интегральное защитное стекло), 5 – токосборная шина, 6 – теплоотводящая стальная шина, 7 – ламинирующая пленка из этиленвинилацетата (ЭВА).
Стрелки указывают ход оптических лучей

В модуле, имеющем фронтальную панель 1 линзовых концентраторов, солнечные элементы 3 объединяются в фотоприемную панель, отстоящую от линзовой панели на расстоянии, равном фокусному расстоянию линз 2 (см. рис. 1). Таким образом, формируется концентраторный модуль панельного типа с «малоразмерными» единичными «субмодулями». Герметизация и защита фотоэлементов 3 от воздействия внешней среды осуществляется простым способом, состоящим в использовании ламинирующей пленки 7. Размеры фотоприемной поверхности стандартного модуля — 480 × 960 мм, его выходное напряжение — 48 В при токе 2,5 А. Такие параметры обеспечиваются шестнадцатью последовательно соединенными сборками по 8 ФЭП, соединенных параллельно. Применение перспективных ФЭП с эффективностью порядка 43 % позволяет получать значения КПД всего модуля на уровне 34 %. Для достижения подобной эффективности необходима точная фокусировка изображения диска Солнца на приемной площадке каждого фотопреобразователя. При этом достаточно обычной технологической точности сборки отдельного модуля, точной юстировки всех

модулей на общем основании для совмещения их оптических осей, точного наведения платформы на Солнце и, наконец, сохранения стабильности этих технологических параметров в течение всего времени эксплуатации станции (до 25 лет). Отсюда следует вывод о необходимости учета действия ветровых нагрузок, которые вызывают динамическую деформацию платформы с модулями, для сохранения высоких значений эффективности всей солнечной энергоустановки [7, 11].

Анализ влияния ветровых нагрузок

Для уменьшения влияния ветровых нагрузок в лаборатории ФТИ им. А.Ф. Иоффе был предложен способ ступенчатого размещения модулей на солнечном трекере (рис. 2). Вращаясь вокруг вертикальной оси от направления на восход Солнца до направления на его закат, рама с КФЭМ в течение светового дня поворачивается вокруг горизонтальной оси на предельные углы не более $\pm 45^\circ$ по отношению к горизонту; это позволяет изготавливать раму в виде жесткой трехмерной конструкции с возможностью обеспечения статической балансировки. Предполагается, что при таком способе

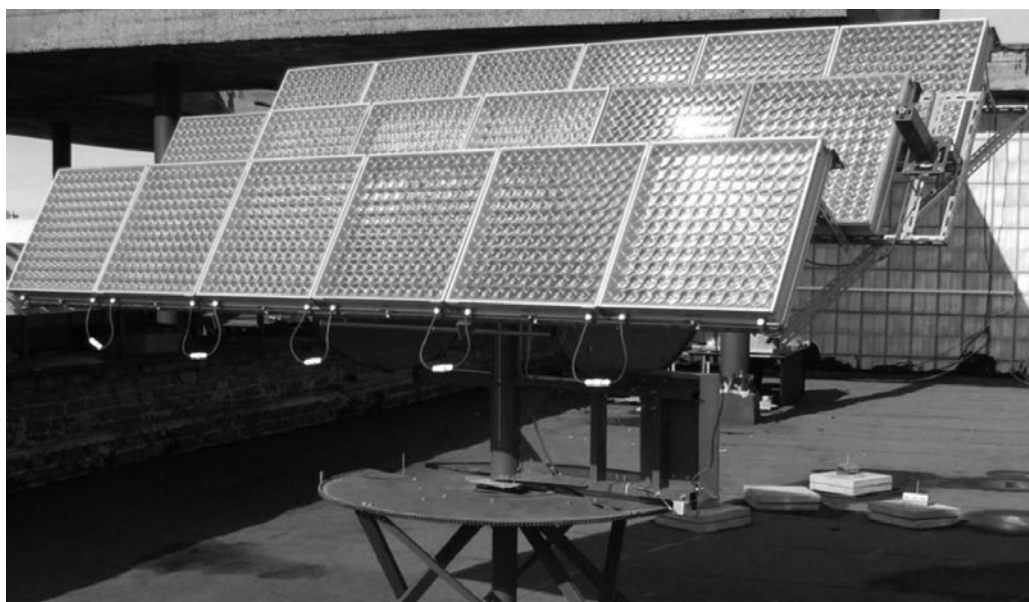


Рис. 2. Фотография одной из экспериментальных солнечных энергоустановок, созданных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Суммарная мощность концентраторных модулей составляет 1 кВт



размещения модулей ветровые нагрузки на фотоэлектрические установки могут быть существенно снижены.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования моделей двух типов конструкций с различным расположением КФЭМ на платформе трекера. Модель исследуемого объекта помещалась в рабочую часть аэродинамической трубы, и с помощью аэродинамических весов определялись нагрузки на модель со стороны воздушного потока при различных его скоростях и различных положениях модели относительно направления вектора скорости. Для сравнительного анализа полученных результатов все продувки моделей с плоским и ступенчатым расположением модулей проводились при абсолютно одинаковых внешних условиях: места размещения в трубе, однородности потока, температуре и влажности воздуха. В качестве критерия оценки эффективности той или иной модели в отношении минимума сопротивления воздушному потоку выступает коэффициент сопротивления c_x , который обычно вводится следующим образом:

$$F = c_x \frac{\rho V^2}{2} S, \quad (1)$$

где F – сила сопротивления, определяемая с помощью аэродинамических весов; c_x –

коэффициент сопротивления (для плохо обтекаемых тел он может достигать значений более единицы); S – площадь «миделевого сечения» (площадь проекции панели модулей на плоскость, перпендикулярную направлению вектора скорости); ρ – плотность воздуха; V – скорость воздушного потока.

В процессе испытаний основное внимание уделялось влиянию угла между направлением вектора скорости набегающего потока и нормалью к плоскости модулей на величину силы сопротивления. Обозначим этот угол через β (именуется далее углом атаки); диапазон его изменения составляет от 0 до 90° . При этом $\beta = 0^\circ$ соответствует ориентации модуля на линию горизонта при восходе/закате Солнца, а $\beta = 90^\circ$ соответствует ориентации при зенитальном расположении солнечного диска, т. е. при ситуации, которая реализуется в полдень для солнечных установок, размещенных в экваториальном поясе Земли. На рис. 3 схематично представлены возможные варианты положения ступенчатой и линейной конструкций солнечной энергоустановки по отношению к вектору скорости ветра.

Предварительный анализ конфигурации скоростного поля, которое формируется в результате взаимодействия воздушного потока со ступенчатой конструкцией, был

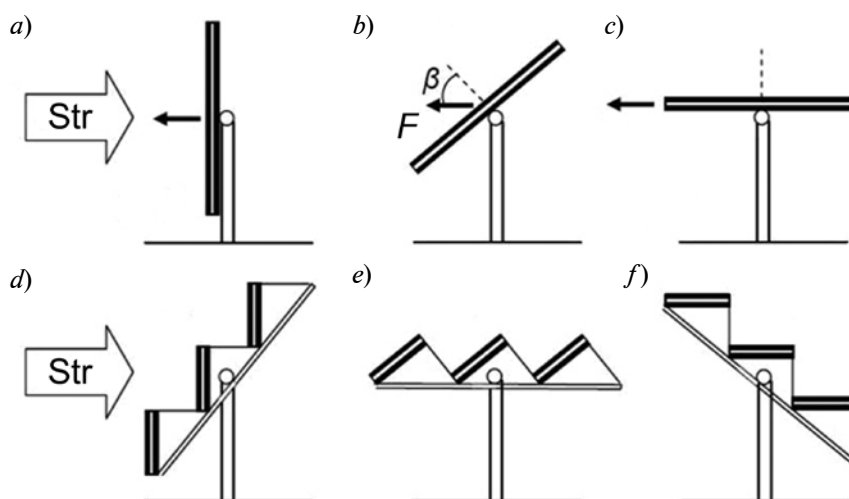


Рис. 3. Возможные варианты расположения на платформе фотоэлектрических модулей по отношению к ветровому потоку (Str) в течение светового дня (при различных значениях угла β): в виде плоской панели (a, b, c) и в виде ступеней (d, e, f); $\beta = 0^\circ$ (a, d), 45° (b, e), 90° (c, f); F – сила сопротивления потоку

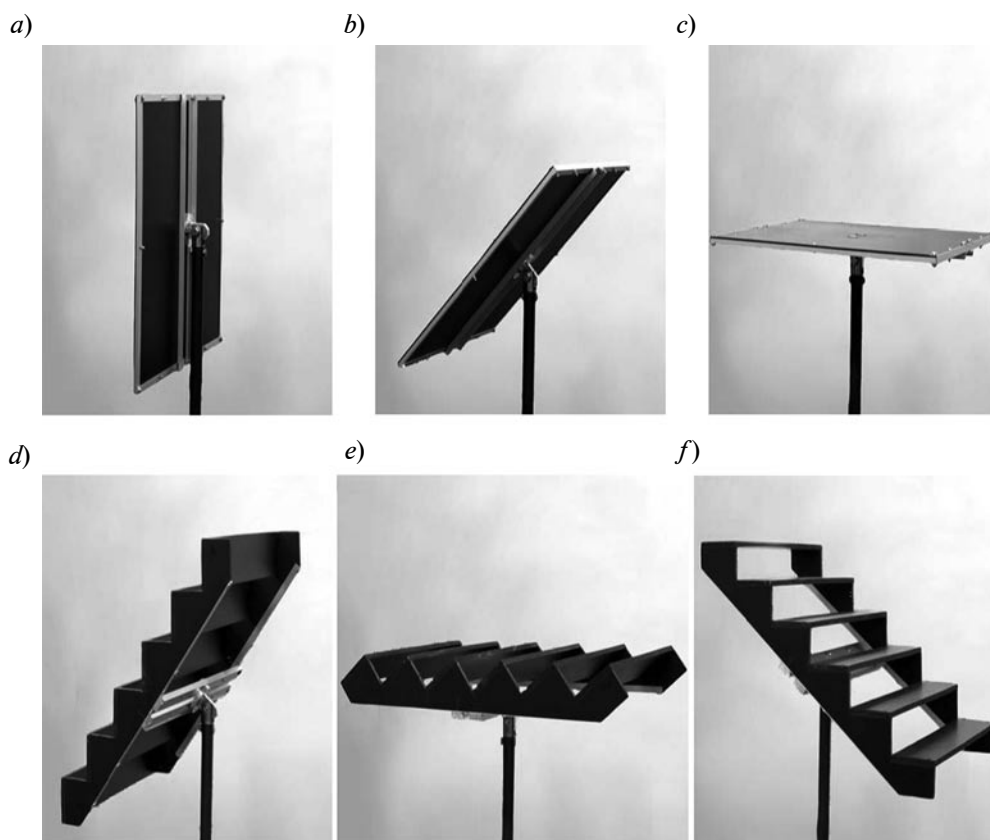


Рис. 4. Фотографии моделей солнечных энергоустановок, выполненных в масштабе 1 : 20, с расположением модулей на трекере в виде плоской панели (*a – c*) и в виде шести ступеней с той же суммарной площадью модулей (*d – f*) (см. рис. 3)

проведен с помощью численного моделирования (на основе решения полных уравнений Навье – Стокса в двумерном приближении). Необходимо отметить, что даже в подобной, существенно упрощенной, постановке задачи требуются весьма значительные затраты машинного времени. Поэтому следует признать более эффективным и возможно более точным проведение экспериментального исследования на моделях солнечных энергоустановок с использованием аэродинамической трубы для сравнения сил сопротивления ветровому потоку в моделях различной конфигурации.

Для лабораторных экспериментов были изготовлены модели солнечных энергоустановок в масштабе 1 : 20 с расположением модулей на трекере в виде плоской панели размерами 6×6 м и в виде ступеней (рис. 4). Толщина материала, имитирующего концентраторные модули, – 8 мм, что

соответствует толщине SMALFOC-модулей и продольных элементов их крепления на раме трекера.

Продувка моделей проводилась в аэродинамической трубе (расположена в лаборатории Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого) с открытой рабочей частью диаметром 2 м и длиной 3 м, в диапазоне скоростей ветрового потока 4 – 12 м/с. Выбранный диапазон соответствует реальным условиям эксплуатации солнечных станций с КФЭМ. В экспериментах изменялись углы наклона моделей, т. е. варьировался угол атаки. Сила F , возникающая при взаимодействии воздушного потока с моделью, измерялась с помощью аэродинамических весов. Модели обдувались как с фронтальной, так и с тыльной сторон (диапазон углов атаки составлял $0 - 180^\circ$), перпендикулярно горизонтальной оси вращения моделей. Па-

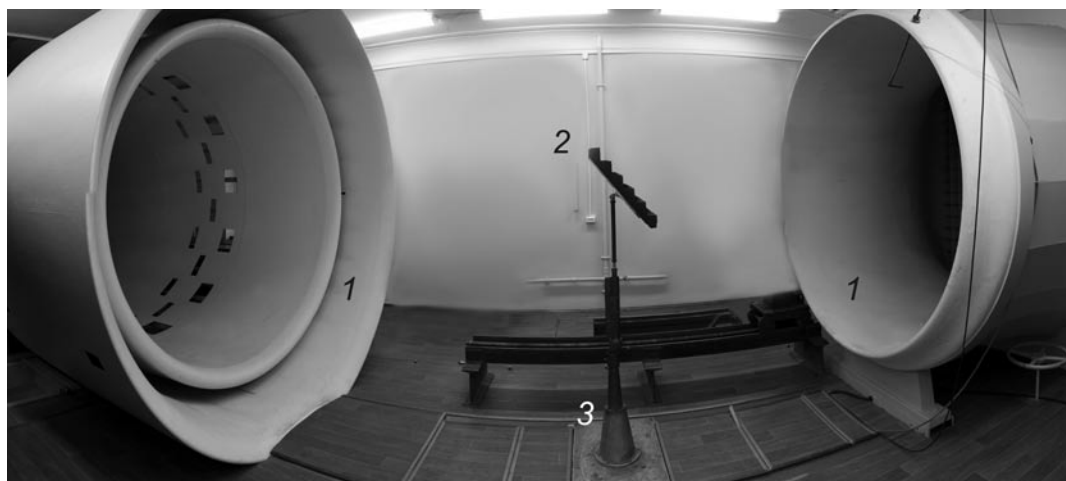


Рис. 5. Панорамная фотография установки для продувных испытаний:
 1 – фрагменты аэродинамической трубы, 2 – модель солнечной энергоустановки, 3 – аэродинамические весы

панорамная фотография фрагмента аэродинамической трубы с расположенной в центре моделью солнечной энергоустановки представлена на рис. 5.

На рис. 6 представлены экспериментальные результаты продувных испытаний двух моделей солнечных установок с различным расположением модулей. Измерялись зависимости коэффициента сопротивления

c_x от угла атаки при различных значениях скорости воздушного потока V .

Сравнительный анализ результатов позволяет сделать следующие выводы. Для обеих моделей солнечных энергоустановок наибольшее значение коэффициента сопротивления c_x достигается при нулевом угле наклона ($\beta = 0$), т. е. при ориентации модулей «на восход/закат», причем значе-

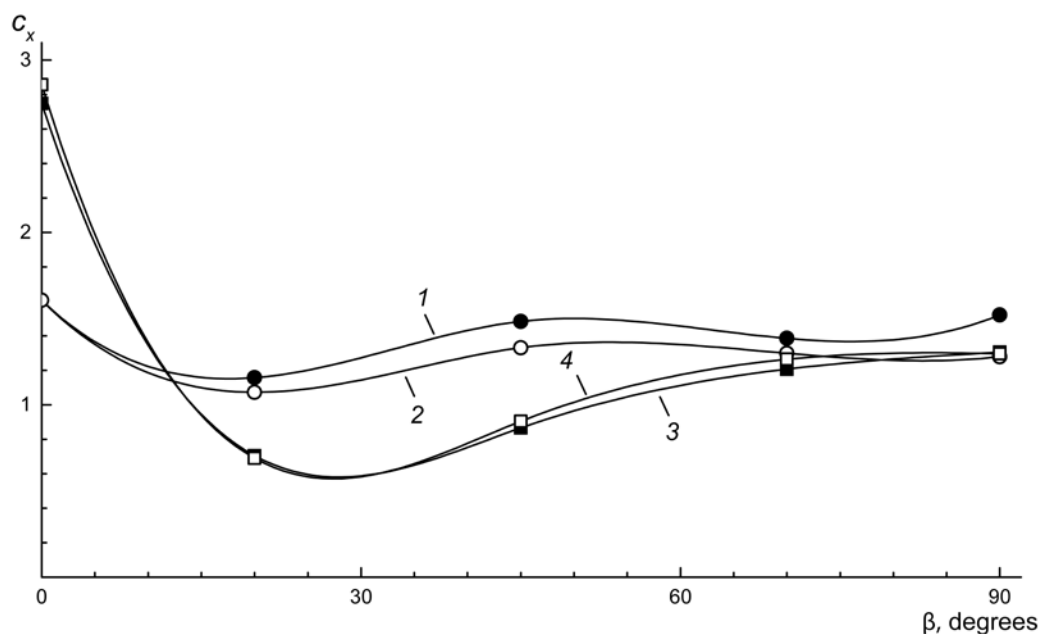


Рис. 6. Зависимости коэффициентов сопротивления от угла атаки для моделей солнечных энергоустановок с плоскостным (1, 2) и шестиступенчатым (3, 4) расположением модулей при двух значениях скорости воздушного потока V , м/с: 8,2 (1, 4) и 11,5 (2, 3)

ния коэффициента примерно одинаковы для обеих конфигураций. При увеличении угла атаки коэффициент сопротивления снижается быстрее для модели со ступенчатым расположением модулей, достигая минимума при углах наклона порядка 30° , а затем этот коэффициент незначительно растет вплоть до зенитального расположения модулей. Для модели с плоской панелью модулей коэффициент сопротивления снижается почти монотонно вплоть до зенитального положения рамы, превышая при этом соответствующее значение коэффициента для случая ступенчатой модели практически на всем интервале изменения угла. Наиболее существенное различие в значениях коэффициентов сопротивления (до 20 %) наблюдается при средних положениях модулей (угол атаки $20 - 60$), составляющих до 70 % от всего времени работы энергоустановок в течение светового дня. Этот результат указывает на наиболее важное преимущество ступенчатого расположения модулей над плоскостным.

Для иллюстрации полученных результатов в таблице представлены сравнительные значения сил сопротивления F , рассчитанные для реальных платформ с КФЭМ для двух значений скоростей воздушного потока. При использовании соотношения (1) в качестве коэффициента сопротивления c_x были использованы экспериментальные значения, полученные в настоящей работе. При этом было принято допущение о слабой зависимости этого коэффициента от числа Рейнольдса, что обычно имеет место для плохо обтекаемых тел.

Из анализа табличных данных следует,

что в отношении снижения аэродинамических нагрузок ступенчатая модель многократно превосходит плоскую.

Заключение

Проведенные сравнительные экспериментальные исследования аэродинамических характеристик моделей платформ с КФЭМ показали, что каскадная схема размещения отдельных солнечных модулей на платформе имеет существенное преимущество над моделью в виде интегральной плоской панели. При этом снижение коэффициента сопротивления c_x для ступенчатой конструкции наблюдается при средних положениях модулей, характерных для наиболее протяженных во времени режимов работы солнечных энергоустановок в течение всего светового дня. Снижение коэффициента c_x (до 20 %) и уменьшение миделевого сечения модели с каскадным размещением КФЭМ приводит к уменьшению ветровых нагрузок в несколько раз. Полученный результат позволяет прогнозировать существенное увеличение продолжительности функционирования реальной станции с максимально возможным КПД в неблагоприятные в отношении ветровых условий дни, а также дает возможность снизить опасность возникновения усталостных явлений в материалах рамы и других механических частях трекера. Это позволяет рекомендовать предложенную ступенчатую конструкцию солнечных энергоустановок как предпочтительную общепринятым моделям, в которых концентраторные модули располагаются в виде плоских панелей.

Таблица

Рассчитанные значения силы сопротивления моделей ветровому потоку для двух значений его скорости

V , м/с	F , Н	
	Плоская модель	Ступенчатая модель
8,2	1546	274
11,5	2594	547

Примечание. Расчет выполнен для реальных платформ с КФЭМ размером 6×6 м и значением угла атаки $\beta = 45^\circ$.

Кроме того, следует отметить, что современные методы гидроаэродинамики дают возможность исследовать особенности взаимодействия воздушного потока с моделями различного расположения отдельных КФЭМ на платформе солнечной

станции и провести вполне объективную качественную и количественную оценку преимуществ той или иной модели.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-29-00178).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Friedman D.J., King R.R., Swanson R.M., et al.** Editorial: Toward 100 Gigawatts of Concentrator Photovoltaics by 2030 // IEEE Journal of Photovoltaics. 2013. Vol. 3. No. 4. Pp. 1460–1463.
- [2] **Wesoff E.** Sharp Hits Record 44.4% Efficiency for Triple-Junction Solar Cell. Available at <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Sharp-Hits-Record-44.4-Efficiency-For-Triple-Junction-Solar-Cell> (accessed June, 2014)
- [3] **Rumyantsev V.D.** Terrestrial concentrator PV systems // Concentrator Photovoltaics. Springer Series in Optical Sciences. 2007. Vol. 130. Pp. 151–174.
- [4] **Rumyantsev V.D.** Solar concentrator modules with silicone-on-glass Fresnel lens panels and multijunction cells // Optics Express. 2010. Vol. 18. No. S1. Pp. A17–A24.
- [5] **Luque A., Hegedus S.** Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England, 2003. P. 307.
- [6] **Lin C.K., Lin C.Y., Wu J.C.** Simulation of deformation induced sun tracking error in a high concentrated photovoltaic system // AIP Conf. Proc. 2010. Vol. 1277. Pp. 149–152.
- [7] **Wu J.C., Lin K.H., Lin C.K.** Wind load analysis of a solar tracker for concentrator photovoltaics // AIP Conf. Proc. 2010. Vol. 1277. P. 145.
- [8] **Rumyantsev V.D., Andreev V.M., Chekalin A.V., et al.** Progress in developing HCPV modules of SMALFOC-design // AIP Conf. Proc. 2013. Vol. 1556. P. 185.
- [9] **Scaletchi I., Visa I., Velicu R.** Modeling wind action on solar tracking PV platforms // Bulletin of Transilvania of Brasov. Series I: Engineering Sciences. 2010. Vol. 3. Pp. 52–57.
- [10] **Velicu R., Moldovean G., Scaletchi I., Butuc B.R.** Wind loads on an azimuthal photovoltaic platform. Experimental study // International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada (Spain). 23–25 March, 2010. Pp. 145–148.
- [11] **Cosoiu C., Damian A., Damian R., Degeratu M.** Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel // Proceedings of the 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystem and Sustainable Development. Algarve, Portugal. 2008. Pp. 74–80.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЧУМАКОВ Юрий Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры гидроаэродинамики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
chymakov@yahoo.com

РУМЯНЦЕВ Валерий Дмитриевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
vdrum@mail.ioffe.ru

АЩЕУЛОВ Юрий Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
yuriascheulov@yandex.ru

ЧЕКАЛИН Александр Викторович – младший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
chekalin@mail.ioffe.ru

Chumakov Yu.S., Rumyantsev V.D., Ascheulov Yu.V., Chekalin A.V.
A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE WIND PRESSURE ON THE FLAT AND STAIR-STEP CONSTRUCTIONS OF SOLAR PLANT TRACKERS.

The article describes a comparative experimental research of aerodynamic processes and forces occurring due to airflow moving past by concentrator photovoltaic (CPV) modules assembled on a flat and stair-step frame. The subsequent analysis of aerodynamic properties of these design schemes has revealed significant advantage of stair-step arrangement of CPV modules over the flat ones concerning smaller wind loads affecting the platform. In order to calculate the value of the forces operating on full-size solar installations, values for aerodynamic resistance for different schemes of an arrangement of the modules have been obtained. The detailed research of various solar installation models utilizing a wind tunnel and aerodynamic scales is carried out for the first time.

EXPERIMENTAL STUDY, WIND LOADS, PV PLATFORM, FORCE COEFFICIENT, AIR TUNNEL, FLOW VISUALIZATION.

REFERENCES

- [1] **D.J. Friedman, R.R. King, R.M. Swanson, et al.**, Editorial: Toward 100 Gigawatts of Concentrator Photovoltaics by 2030, *IEEE Journal of Photovoltaics*. 3(4) (2013) 1460–1463.
- [2] **E. Wesoff**, Sharp Hits Record 44.4% Efficiency for Triple-Junction Solar Cell. Available at <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Sharp-Hits-Record-44.4-Efficiency-For-Triple-Junction-Solar-Cell> (accessed June, 2014).
- [3] **V.D. Rumyantsev**, Terrestrial concentrator PV systems. *Concentrator Photovoltaics*, Springer Series in Optical Sciences. 130 (2007) 151–174.
- [4] **V.D. Rumyantsev**, Solar concentrator modules with silicone-on-glass Fresnel lens panels and multijunction cells, *Optics Express*, 18(S1) (2010) A17–A24.
- [5] **A. Luque, S. Hegedus**, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, England (2003) 307.
- [6] **C.K. Lin, C.Y. Lin, J.C. Wu**, Simulation of deformation induced sun tracking error in a high concentrated photovoltaic system, *AIP Conf. Proc.* 1277 (2010) 149–152.
- [7] **J.C. Wu, K.H. Lin, C.K. Lin**, Wind Load Analysis of A Solar Tracker For Concentrator Photovoltaics, *AIP Conf. Proc.*, 1277 (2010) 145.
- [8] **V.D. Rumyantsev, V.M. Andreev, A.V. Chekalin, et al.**, Progress in developing HCPV modules of SMALFOC-design, *AIP Conf. Proc.* 1556 (2013) 185.
- [9] **I. Scaletchi, I. Visa, R. Velicu**, Modeling Wind Action on Solar Tracking PV Platforms, *Bulletin of Transilvania of Brasov, Series I: Engineering Sciences*. 3 (2010) 52–57.
- [10] **R. Velicu, G. Moldovean, I. Scaletchi, B. R. Butuc**, Wind loads on an azimuthal photovoltaic platform. Experimental study, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Granada (Spain)*. 23-25 March (2010) 145–148.
- [11] **C. Cosoiu, A. Damian, R. Damian, M. Degeratu**, Numerical and experimental investigation of wind induced pressures on a photovoltaic solar panel, *Proceedings of the 4th IASME/WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystem and Sustainable Development, Algarve, Portugal* (2008) 74–80.

THE AUTHORS

CHUMAKOV Yuri S.

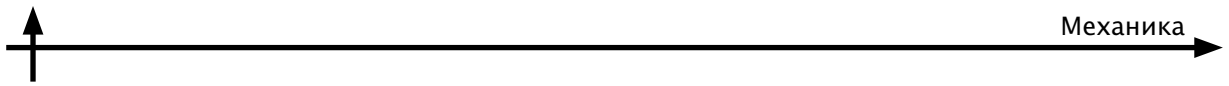
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
 29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
 chymakov@yahoo.com

RUMYANTSEV Valery D.

Ioffe Physical Technical Institute
 26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
 vdrum@mail.ioffe.ru

ASCHEULOV Yuri V.

Ioffe Physical Technical Institute
 26 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation
 yuriascheulov@yandex.ru



CHEKALIN Alexander V.

Ioffe Physical Technical Institute

26 Politekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russian Federation

chekalin@mail.ioffe.ru