

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ ЛОПАСТЕЙ ОРТОГОНАЛЬНОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

В.М. Лятхер, И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин

Описаны аэродинамические характеристики различных профилей лопастей ортогональных ветроэнергетических установок, приведены координаты наиболее технологичного профиля, результаты исследований его механических характеристик и производственных испытаний.

Ключевые слова: ортогональная ветроэнергетическая установка, профиль лопастей, оптимизация.

Созданная база расчетных методов и накопленный опыт испытаний осевых ортогональных (вертикально-осевых) ветроэнергетических установок позволяет провести оптимизацию машин подобного типа. Такая работа была проведена для ветроагрегатов мощностью 1–1,5 кВт, и прежде всего, по оптимизации профиля лопастей. Общий вид ротора ветроустановки показан на рис. 1.

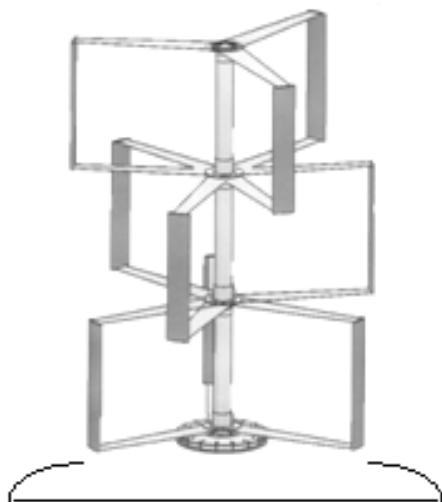


Рис. 1. Ротор ветроэнергетической установки

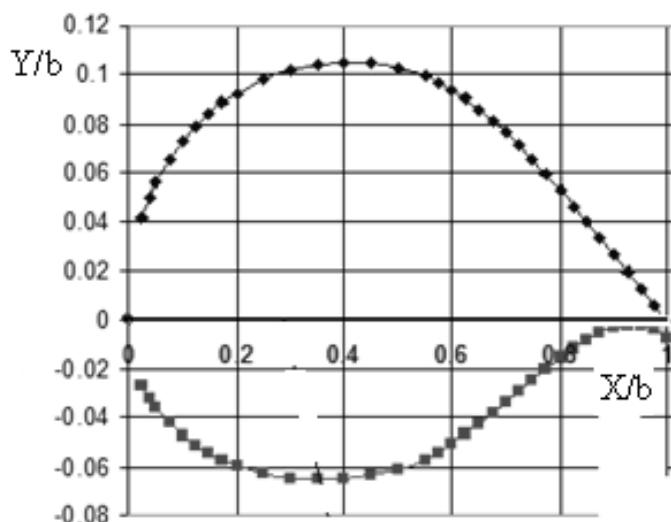


Рис. 2. Оптимальный профиль GAW-1, обеспечивающий максимальную тянущую силу: Y – координата профиля лопасти; X – расстояние от носка лопасти; b – хорда

В результате изучения аэродинамических характеристик различных профилей лопастей для таких установок был выбран профиль GAW-1, разработанный группой американских компаний [1], и отличающийся высокими аэродинамическими характеристиками. Относительные координаты профиля показаны на рис. 2.

На рис. 3 показан контур носка лопасти в сравнении с контурами стандартных профилей NASA, которые обычно принимались в конструкциях лопастей ортогональных машин.

Для ветроагрегатов малой мощности хорда лопасти была принята равной 160 мм, исходя из технологических ограничений, связанных с использованием наиболее производительного и экономичного метода экструзии при производстве лопастей.

Обычные профили NASA, широко применяемые в ветроэнергетике, имеют коэффициент тянущей силы, в досрывном обтекании не выше 0,25 при коэффициенте нормального давления до 1,1. Коэффициент тянущей силы C_t , рассчитанный для профиля GAW-1 почти во всем диапазоне углов атаки больше, чем у профилей NASA 0015, 0020 (рис. 4).

На профиле GAW-1 велика разница тянущих сил при положительном или отрицательном угле атаки (см. рис. 4), хотя при угле атаки, меньшем по модулю 12° , тянущая сила у профиля GAW-1 в любом варианте не меньше, чем у профилей NASA.

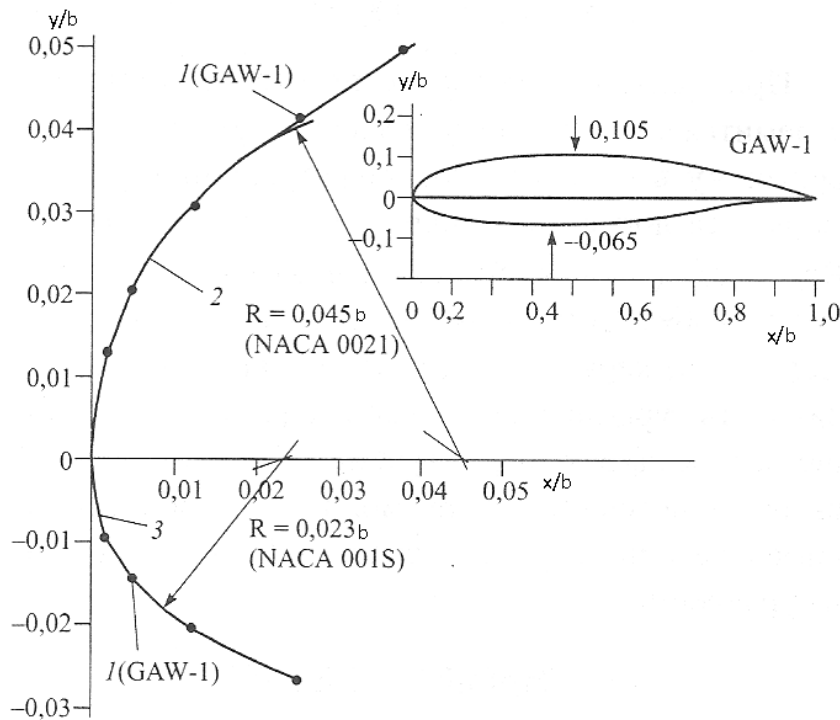


Рис. 3. Профиль GAW-1 (1) в сравнении с профилями NACA 0021 (2) и NACA001S (3) (носовая часть, формирующая тянущую силу)

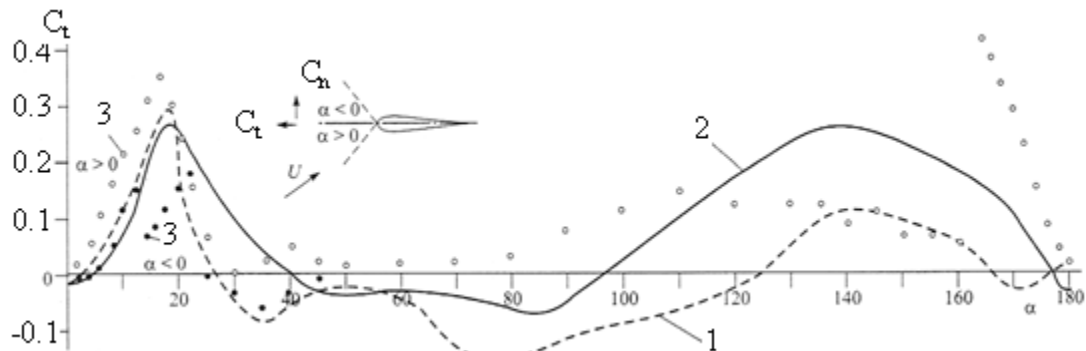


Рис. 4. Коэффициент тянущей силы для профилей NACA 0015 (1), 0020 (2) и GAW-1 (3) в зависимости от угла атаки. Пустые точки – положительный угол атаки (натекание со стороны вогнутой части профиля), черные точки – отрицательный угол атаки

При снижении чисел Re качество профиля GAW-1 резко снижается. Это проявилось при продувке модели крыла трапециевидальной формы с профилями GAW-1, для которой при числах $Re_c = 2,8 \cdot 10^5$; $4,2 \cdot 10^5$ и $5,6 \cdot 10^5$ коэффициенты подъемной силы CL не превысили 1,1, хотя при высоких значениях числа Рейнольдса они достигали 2 и более.

Лопать, имевшая трапециевидальную форму с поперечным сечением GAW-1, была изготовлена из сухого дерева, тщательно отполирована и покрыта лаком. С целью контроля ее аэродинамических качеств были произведены продувки неподвижной изолированной лопасти с разными углами атаки при скорости потока воздуха 20, 30 и 40 м/с (числа Рейнольдса $2,8 \cdot 10^5$; $4,2 \cdot 10^5$ и $5,6 \cdot 10^5$). Аэродинамические качества лопасти оказались высокими (рис. 5), хотя и не достигли тех значений, которые принимались в расчет для длинных лопастей прямоугольной формы (рис. 6).

Ортогональные ветроагрегаты отличаются тем, что под действием сопротивления, вносимого агрегатом, скорости течения внутри цилиндра, ометаемого лопастями, и за ним существенно меньше скорости набегающего потока. Поэтому углы атаки на лопастях на тыльном участке

Контроль и испытания

трассы по модулю заметно меньше, чем на фронтальном участке. Оба эти обстоятельства приводят к тому, что на тыльном участке трассы забор энергии от потока обычно значительно менее интенсивен, чем на фронтальном.

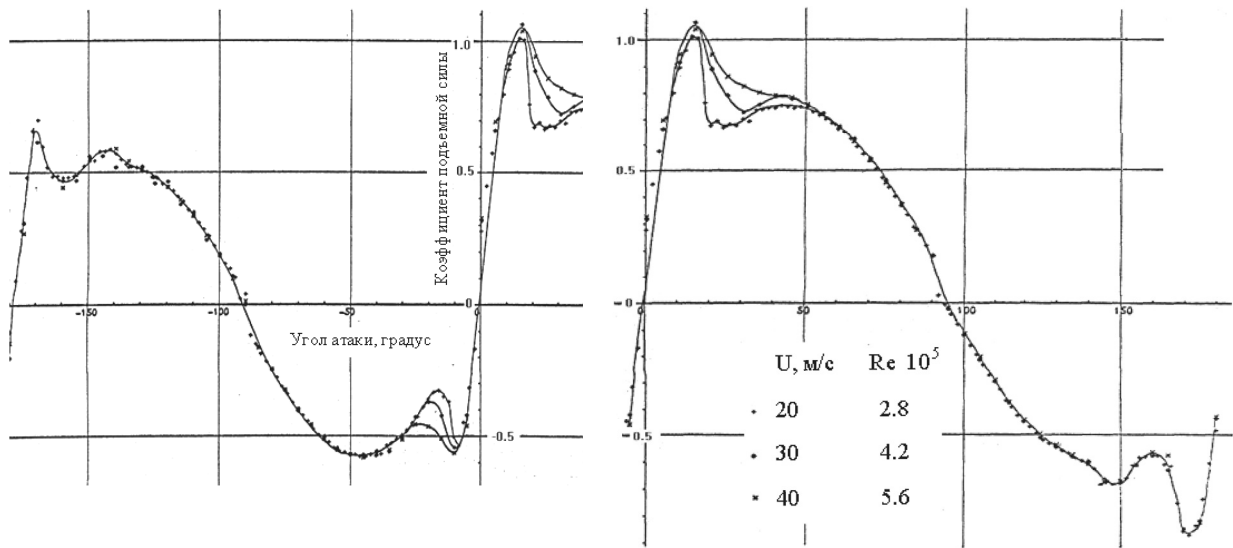


Рис. 5. Коэффициент подъемной силы лопасти трапециевидальной формы с профилем GAW-1

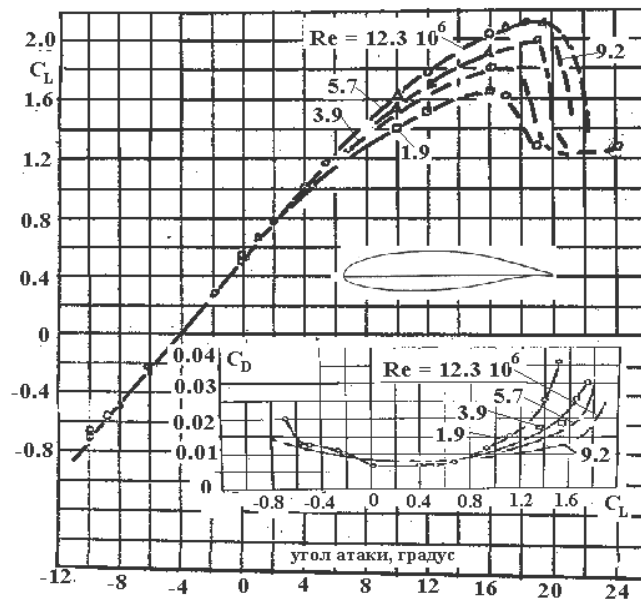


Рис. 6. Коэффициенты подъемной силы и сопротивления для профиля GAW-1

На рис. 7 представлены значения крутящих моментов и тянущих сил в функции угла поворота ротора диаметром 1,8 м с двумя лопастями с хордой 0,16 м и профилем NACA0018. Расчеты выполнены по программе ООО «Новая Энергетика», разработанной под руководством проф. С.М. Белоцерковского с использованием модели «дискретных вихрей». В оптимальном режиме при соотношении скорости лопастей V к скорости набегающего потока U , равном $V/U = 3,3$, этот ротор имеет эффективность около 28 %. Скорость течения по оси агрегата сразу за фронтом лопастей ($x = -0,7R$) составляет примерно 0,69 от скорости набегающего потока U , а перед тыльным строем лопастей ($x = 0,7R$) – всего лишь 0,46 U . За агрегатом ($x = 2,1R$) скорость потока в данном примере падает до 0,38 U . В результате тянущие силы лопасти на большей части тыльного участка трассы оказываются заметно ниже, чем на фронте (см. рис. 7).

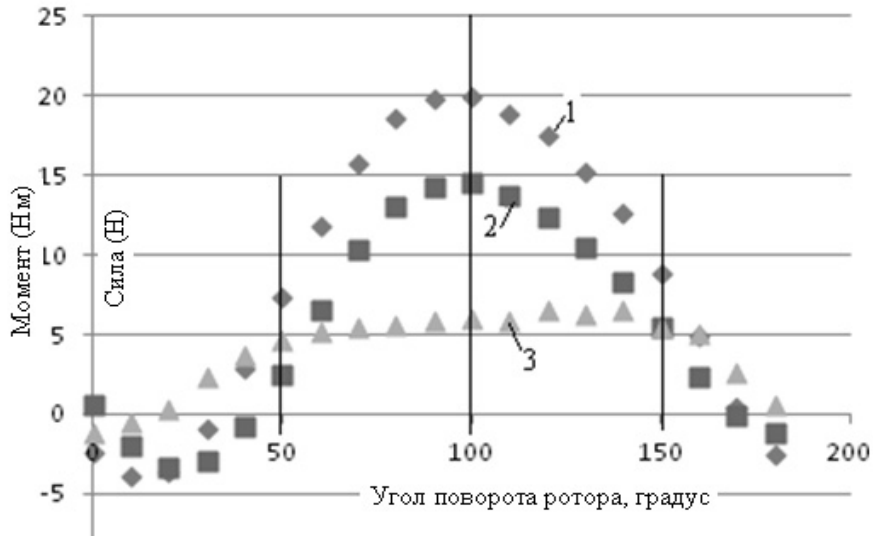


Рис. 7. Распределение по трассе ротора крутящего момента (Нм) – 1, тянущей силы на фронте(Н) – 2, на тыльном участке трассы – 3 двухлопастного ротора с профилем лопасти NACA 0018, $V/U = 3,3$, $U = 11$ м/с, ширина траверсы $b_t = 0,04$ м, толщина траверсы 2 мм, хорда лопасти $b = 0,16$ м, $D = 1,8$ м, $L = 0,9$ м. $C_p = 0,277$

Использование профиля GAW-1 (вогнутая сторона к оси вращения ротора) приводит к тому, что на тыльном участке трассы при малом положительном угле атаки тянущая сила возрастает и даже при меньшей реальной скорости течения отдача энергии на этом участке трассы растет. Эффективность ротора поднимается до 29,3 % (рис. 8).

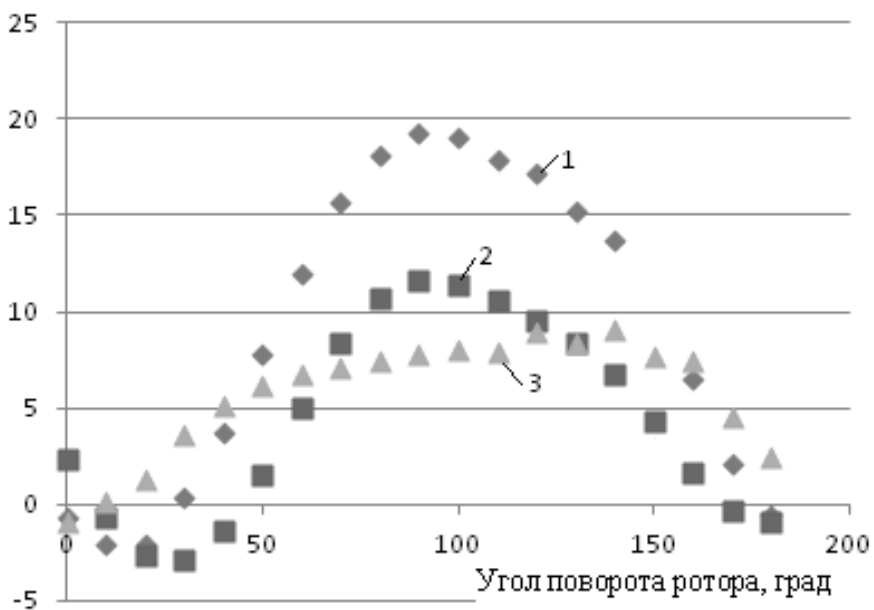


Рис. 8. Распределение по трассе ротора крутящего момента (Нм) – 1, тянущей силы на фронте (Н) – 2, на тыльном участке трассы – 3 двухлопастного ротора с профилем лопасти GAW-1, $V/U = 3,3$, $U = 11$ м/с, $b_t = 0,04$ м, толщина траверсы 2 мм, хорда лопасти $b = 0,16$ м, $D = 1,8$ м, $L = 0,9$ м. $C_p = 0,293$. Хорда лопасти совпадает с касательной в аэродинамическом центре

Разворот лопасти наружу на 2° от касательной в аэродинамическом центре еще более увеличивает угол атаки на тыльном участке трассы и повышает эффективность ротора до 30,1 % (рис. 9).

Для выбранного профиля лопасти было проведено конструирование из условия минимальной массы лопасти при обеспечении локальной жесткости и прочности. Технология изготовления лопастей разработана в двух вариантах – для лопастей из прочного пластика – путем выкладки

Контроль и испытания

в специальную форму с последующей термообработкой. Для лопастей из алюминиевого сплава – путем экструзии через матрицу заданной формы. При экструзии лопасти выполняются из алюминиевого сплава AD31-T1 и покрываются антикоррозионным материалом. Общий вид лопасти показан на рис. 10.

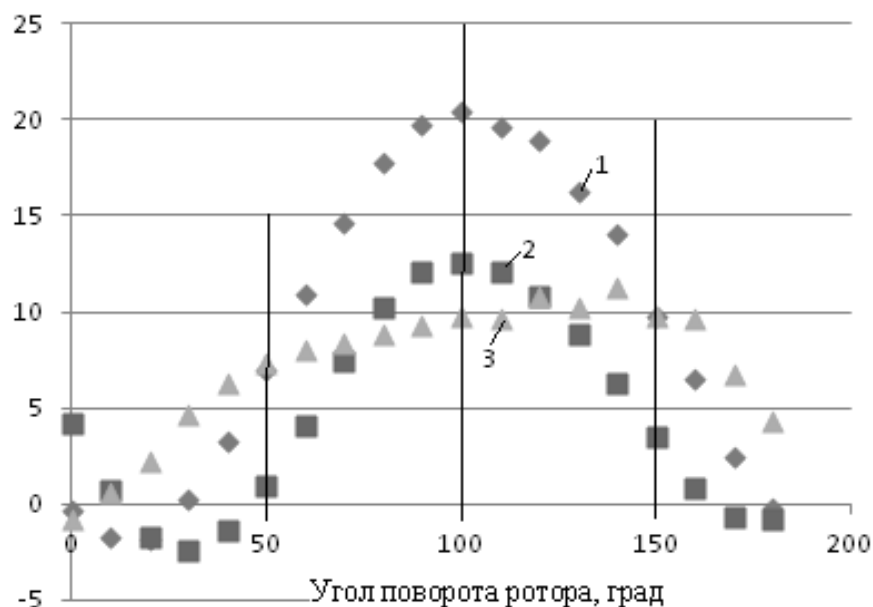


Рис. 9. Распределение по трассе ротора крутящего момента (Нм) – 1, тянущей силы на фронте (Н) – 2, на тыльном участке трассы – 3 двухлопастного ротора с профилем лопасти GAW-1, $V/U = 3,3$, $U = 11$ м/с, $b_t = 0,04$ м, толщина траверсы 2 мм, хорда лопасти $b = 0,16$ м, $D = 1,8$ м, $L = 0,9$ м. $S_r = 0,293$. Хорда лопасти развернута на 2° от касательной (наружу). $S_r = 0,301$

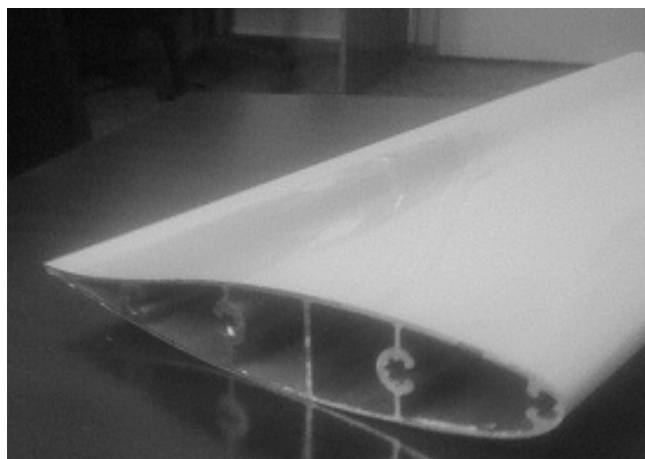


Рис. 10. Общий вид лопасти для ветроагрегата

Несущая способность лопасти при изгибе характеризуется максимальным допустимым изгибающим моментом, который составляет 764,4 Нм. Масса лопасти – 1,65 кг на погонный метр. Несущая способность определена тремя сериями испытаний. В первой серии лопасть длиной 900 мм на двух деревянных брусках нагружалась через деревянный брусок сечением 40×40 мм под прессом. Нагрузка увеличивалась до тех пор, пока сжатая сторона лопасти не потеряла локальной устойчивости. Это имело место при изгибающем моменте 764,4 Нм. В реальных условиях при распределенной нагрузке форма нарушения устойчивости будет иной, а несущая способность выше.

В другой серии опытов лопасть с пролетом 1,18 м была нагружена в центре распределенной силой 123 кгс, вызвавшей изгибающий момент 355,7 Нм (рис. 11). Прогиб составил 6 мм. Остаточных деформаций после многократных нагрузок-разгрузок не обнаружено.

В третьей серии испытаний для проверки узла крепления лопасти к траверсе были проведены опыты на разрывной машине (рис. 12). Два отрезка лопасти длиной по 0,3 м заделаны в соединительные профиля толщиной 2 мм с помощью саморезов из нержавеющей стали диаметром 5,5 мм, длиной 25 мм (один стык) или 38 мм (другой стык). Нагрузка доведена до 376 кгс (188 кгс на один стык, максимальный момент 276,4 Нм). Деформаций лопастей в местах соединений с траверсами и стыковочных узлов не наблюдалось.

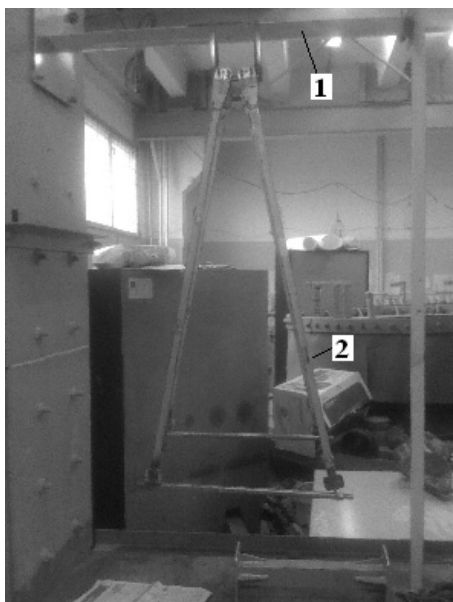


Рис. 11. Испытание лопасти локально распределенной нагрузкой: 1 – лопасть, 2 – каретка для загрузки



Рис. 12. Испытания узлов крепления лопасти на разрыв. При силе 376 кгс деформации узлов креплений нет

Коррозионная стойкость лопастей проверена длительным хранением на открытом воздухе, в воде и в агрессивной среде (морская вода). Следов коррозии не обнаружено.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали целесообразность использования для малых ветроэнергетических установок лопасти GAW-1, которая и предлагается к серийному производству.

Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» («Разработка и создание масштабируемой ветроэнергетической установки на основе оптимизационной методологии с организацией центра коллективного пользования»).

Литература

1. McGhee R., Reasley W., *Low Speed Aerodynamic Characteristics of a 17-percent-thick Airfoil Section Designed for General Aviation Applications*, NASA TN D-7428, 1973.

Лятхер Виктор Михайлович. Доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Новая Энергетика» (Москва), президент корпорации «Новая энергетика» (Кливленд, США). Область научных интересов – ветроэнергетика. E-mail: lyatkhervm@yandex.ru

Кирпичникова Ирина Михайловна. Доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Электротехника и возобновляемые источники энергии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – альтернативные и возобновляемые источники энергии. E-mail: ionkim@mail.ru

Соломин Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и возобновляемые источники энергии», Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск). Область научных интересов – ветроэнергетика. E-mail: nii-uralmet@mail.ru

**OPTIMIZATION OF BLADES PROFILE
OF THE ORTHOGONAL WIND TURBINE**

V.M. Lyatcher, I.M. Kirpichnikova, E.V. Solomin

Article describes a aerodynamic characteristics of the different profiles orthogonal blades of wind turbines, the coordinates of the most technologically sophisticated profile, the results of research of its mechanical characteristics and production testing.

Keywords: orthogonal balanced wind turbin, blades profile, optimization.

Victor M. Lyatkher. Doctor of technical sciences, professor, director general of New Energetic, LLC (Moscow), President of New Energetics Inc. (Cleveland, OH, USA). The area of scientific interests – wind energy. E-mail: lyatkhervm@yandex.ru

Irina M. Kirpichnikova. Doctor of technical sciences, professor, head of Electric Engineering and Renewable Sources of Energy Department, South Ural State University (Chelyabinsk). The area of scientific interests – alternative and renewable sources of energy. E-mail: ionkim@mail.ru

Eugeny V. Solomin. Associated Professor of Electric Engineering and Renewable Sources of Energy Department, South Ural State University (Chelyabinsk). The area of scientific interests – wind energy. E-mail: nii-uralmet@mail.ru

Поступила в редакцию 15 февраля 2013 г.