УДК 630.37 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-87-90

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КРЫЛЬЧАТКИ РАДИАТОРА ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

Кононов И.Т., Тихонов Е.А.
Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск

Ключевые слова: реинжиниринг, крыльчатка радиатора, терхмерное сканирование, параметрическое моделирование, CFD-моделирование.

Аннотация. Повышение энергоэффективности двигателей внутреннего сгорания лесозаготовительной техники требует совершенствования систем охлаждения, поскольку привод вентилятора в пиковых режимах может потреблять до 8-15% эффективной мощности двигателя. Аэродинамическая оптимизация крыльчатки в связи с этим является актуальной научно-технической задачей, обеспечивающей снижение паразитных потерь и уровня шума. Цель работы – разработка и апробация методики реинжиниринга серийной крыльчатки вентилятора двигателя Д-260 на основе данных трёхмерного сканирования для создания параметрической модели, пригодной для многовариантной газодинамической оптимизации. Объект исследования – серийная полимерная крыльчатка АМК700.001.00.000 диаметром 700 мм с двенадцатью лопастями радиально-осевого типа. Оцифровка выполнялась оптическим 3D-сканером Artec Eva; обработка облака точек – в Ansys SpaceClaim; твердотельная модель одной лопасти строилась по десяти радиальным сечениям; параметризация – в SolidWorks; описание лопаточного венца – в ANSYS BladeGen. Верификация реконструированной поверхности показала, что после корректировки среднеквадратичное отклонение не превышает 0,1 мм, а максимальные локальные погрешности в зонах сложных сопряжений кромок – 0,3 мм, что удовлетворяет требованиям макроскопического CFD-моделирования. Полученная модель пригодна для автоматизированной генерации расчётной сетки и многовариантных численных экспериментов.

METHODOLOGY FOR CONSTRUCTING A PARAMETRIC MODEL OF AN ENGINE COOLING FAN IMPELLER BASED ON OPTICAL SENSOR DATA

Kononov I.T., Tihonov E.A.
Petrozavodsk State University, Petrozavodsk

Keywords: reverse engineering, radiator fan, 3D scanning, parametric modeling, CFD modeling.

Abstract. Improving the energy efficiency of internal combustion engines in logging machinery requires enhancements to cooling systems, as the fan drive can consume up to 8-15% of the engine's effective power during peak operating modes. Consequently, the aerodynamic optimization of the fan impeller is a pressing scientific and technical challenge for reducing parasitic losses and noise levels. The objective of this study is to develop and validate a re-engineering methodology for the mass-produced D-260 engine fan impeller, utilizing 3D scanning data to create a parametric model suitable for multi-variant gas-dynamic optimization. The subject of the study is the standard AMK700.001.00.000 polymer impeller (700 mm diameter) featuring twelve mixed-flow (radial-axial) blades. Digitization was performed using an Artec Eva optical 3D scanner, and point cloud processing was conducted in Ansys SpaceClaim; a solid model of a single blade was constructed based on ten radial sections, with parameterization performed in SolidWorks and the blade row defined in ANSYS BladeGen. Verification of the reconstructed surface demonstrated that, following adjustments, the root-mean-square deviation did not exceed 0.1 mm, while maximum local errors in complex edge-junction zones were within 0.3 mm – values that satisfy the requirements for macroscopic CFD modeling. The resulting model is suitable for the automated generation of computational meshes and for conducting multi-variant numerical experiments.

Энергетическая эффективность двигателей внутреннего сгорания (ДВС) определяется стабильностью теплового режима, обеспечиваемого системой охлаждения. Привод вентилятора – один из наиболее энергоёмких агрегатов: в пиковых режимах его мощность достигает 8-15% эффективной мощности ДВС, а в стандартных циклах – не менее 5%. Аэродинамическая оптимизация крыльчатки даёт существенный технико-экономический эффект. Значительная доля лесных машин в РФ оснащается двигателями семейства Д-260, штатная крыльчатка которых диаметром 700 мм не проходит глубокой вычислительной оптимизации. Традиционные контактные методы обмера лопаточных аппаратов трудоёмки и не всегда корректно описывают криволинейные поверхности пера. Альтернатива – бесконтактное оптическое сканирование, однако прямая конвертация облака точек в CAD-модель сопряжена с топологическими артефактами [1]. Цель работы – разработка и апробация методики реинжиниринга крыльчатки вентилятора на основе 3D-сканирования с использованием Ansys SpaceClaim, SolidWorks и ANSYS BladeGen для подготовки геометрии к многовариантной газодинамической оптимизации.

В качестве объекта использовалась серийная крыльчатка АМК700.001.00.000 диаметром 700 мм из полимерного материала с двенадцатью лопастями радиально-осевого типа, предназначенная для двигателей Д-260 с гидроприводом вентилятора (до 2460 об/мин). Сканирование выполнялось 3D-сканером Artec Eva с заявленной точностью 0,1 мм; на поверхность наносились светоотражающие маркеры для привязки кадров. Получено плотное облако точек, содержащее информацию о ступице, лопастях и элементах крепления (рис. 1).

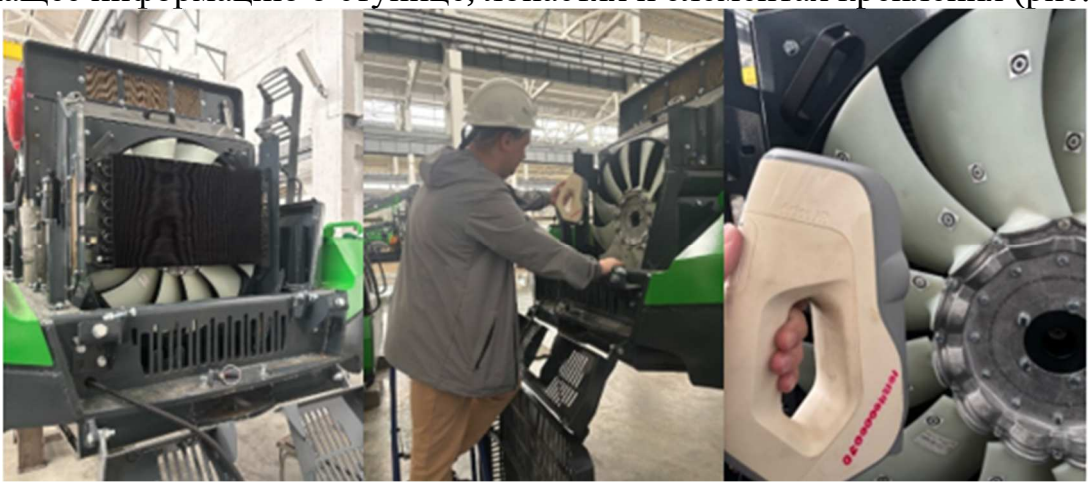


Рис. 1. Процесс сканирования крыльчатки АМК700.001.00.000

Облако точек экспортировалось в Ansys SpaceClaim и преобразовывалось в полигональную сетку. Ввиду вращательной симметрии реинжиниринг выполнялся только для одной лопасти с частью ступицы. Создавались десять равноотстоящих радиальных сечений; на каждом строился эскиз пересечения плоскости с сеткой, аппроксимированный сплайнами третьего порядка. По сечениям с направляющими кривыми строилось твёрдое тело лопасти. Далее геометрия переносилась в SolidWorks (формат Parasolid), где создавались параметрические эскизы сечений: хорда, углы установки, толщина профиля, координаты средней линии и форма кромок. Все размеры задавались как управляемые переменные.

Затем параметры импортировались в ANSYS BladeGen, где генерировалась специализированная модель лопаточного венца [2].

Верификация реконструированной модели относительно исходного облака точек выявила неоднородность погрешности: центральная часть пера имела отклонения до 0,1 мм, а периферийные зоны у входной и выходной кромок – от 0,7 до 1,55 мм, что превышает допустимый порог 0,3 мм для макроскопического CFD-моделирования. Карта отклонений представлена на рисунке 2.

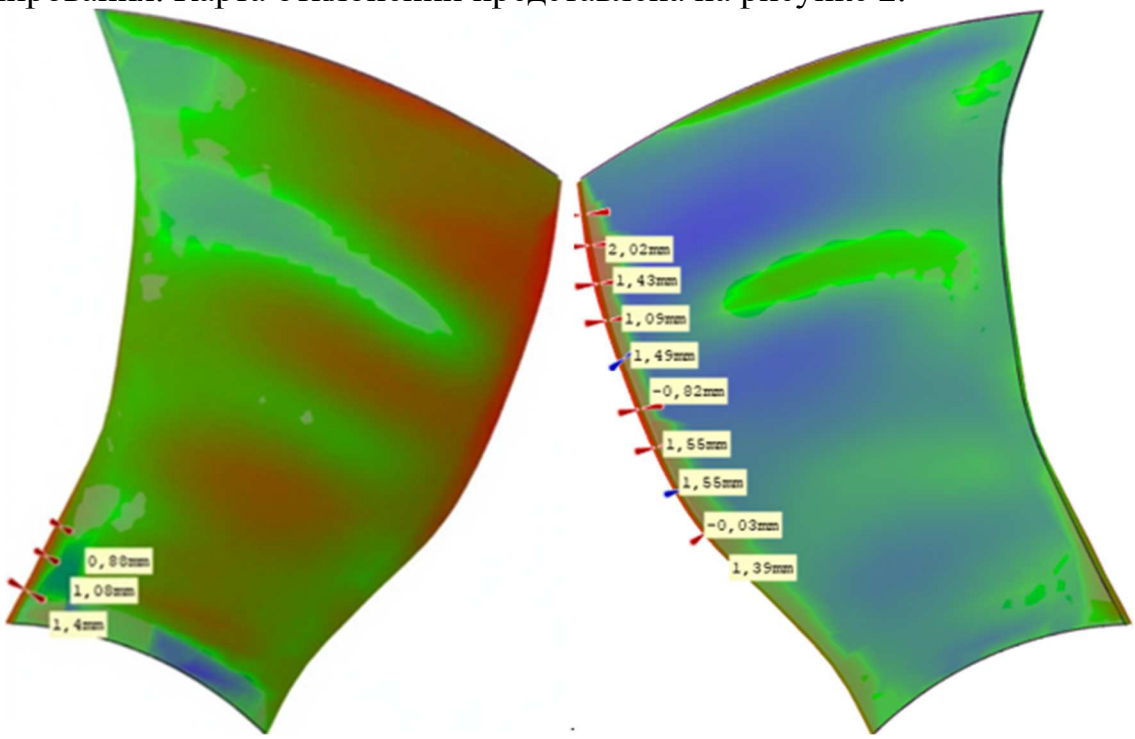


Рис. 2. Карта линейных отклонений между реконструированной параметрической моделью и исходным облаком точек

Анализ показал, что причиной несоответствия является не линейное смещение, а угловой перекос выходной кромки (0,32°-1,5° в зависимости от сечения). Для коррекции использовалась формула, связывающая тангенс угла отклонения с относительным смещением кромки:

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{z + \Delta}{y}, \qquad (1)$$

где y – горизонтальная проекция хорды профиля (расстояние от оси вращения до кромки); z – вертикальная проекция высоты профиля; α – исходный угол установки кромки, заданный в параметрической модели; β – измеренное угловое отклонение (перекос) выходной кромки; Δ – искомое линейное смещение, необходимое для компенсации выявленного углового рассогласования.

Таким образом, получена параметрическая модель, геометрически аутентичная исходному образцу и пригодная для генерации расчётной сетки и многовариантного CFD-анализа в ANSYS BladeGen. Методика работоспособна и может тиражироваться для других типоразмеров крыльчаток. Практическая значимость – готовый инструмент для численных экспериментов по минимизации мощности привода вентилятора при сохранении расходно-напорной характеристики. Следующий этап – генерация сетки в ANSYS TurboGrid и расчёты

в ANSYS CFX, оптимизация углов установки и профиля лопаток, валидация по стендовым испытаниям [3].

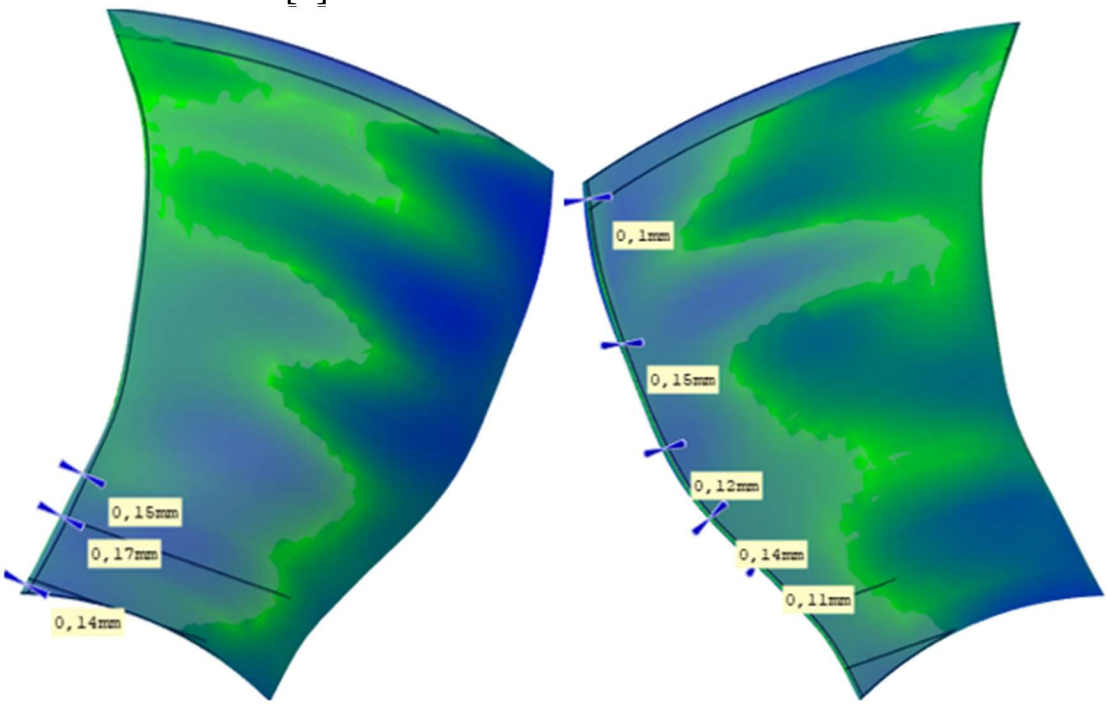


Рис. 3. Карта линейных отклонений после коррекции

Финансирование. Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия.

Список литературы

1. Погосян А.Ж., Трегубов П.П., Демченко М.В., Чертовских С.В., Бердин В.К. Реверсивный инжиниринг рабочего колеса центробежного насоса К20/30 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – №5. – С. 200-208.
2. Шаблий Л.С., Колмакова Д.А., Кривцов А.В. Параметрическое моделирование лопаточных машин при оптимизации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, №6(4). – С. 1013-1018.
3. Замолодчиков Г.И., Тумашев Р.З. Повышение эффективности вентилятора на различных рабочих режимах путем изменения формы лопатки направляющего аппарата // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронный журнал. – 2017. – №1. – С. 20-36.

Сведения об авторах:
Кононов Иван Тимурович – аспирант;
Тихонов Евгений Андриянович – д.т.н., профессор.