

Поиск оптимальной формы узла лопастей энергоустановки *

Андреев С.В.¹, Бондарев А.Е.¹, Бондаренко А.В.², Визильтер Ю.В.², Галактионов В.А.¹, Гудков А.В.², Желтов С.Ю.², Жуков В.Т.¹, Иловайская Е.Б.², Князь В.А.², Мануковский К.В.¹, Новикова Н.Д.¹, Ососков М.В.², Силаев Н.Ж.², Феодоритова О.Б.¹

bond@keldysh.ru | vlgal@gin.keldysh.ru

Москва, Россия, ¹Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН;
²ФГУП ГосНИИАС

Работа посвящена вопросам организации разведочного поиска оптимальной формы узла лопастей энергоустановки с точки зрения силовой нагрузки. Рассматриваемая установка относится к энергетическим установкам вертикального типа и обладает сложной формой. Для поиска оптимальной формы узла лопастей используются разработанные ранее алгоритмы моделирования и визуального представления работы энергетической установки. Реализована полноценная технологическая цепочка алгоритмов, позволяющая проводить моделирование энергоустановки от построения исходной САД модели до организации визуального представления результатов в стереорежиме. Результаты численного моделирования являются основой для последующего решения задачи глобальной оптимизации формы энергоустановки с целью выработки оптимальных рабочих параметров. В ходе настоящего исследования проведено оценочное решение оптимизационной задачи. Данное решение является результатом разведочного параметрического поиска и позволяет определить нужные направления вариации ключевых геометрических параметров, определяющих свойства узла лопастей. В представленном докладе дано описание проведенных исследований по созданию расчетной методик и реализации разведочного параметрического поиска, приведен подход к определению нужных направлений вариации ключевых геометрических параметров узла лопастей с целью построения конфигурации, обеспечивающей максимальные силовые характеристики.

Ключевые слова: математическое моделирование, визуализация, оптимизационная задача, разведочный поиск

The Search for Optimal Shape of the Blades Assembly for Power Plant *

S. V. Andreev¹, A. E. Bondarev¹, A. V. Bondarenko², Y. V. Vizilter², V. A. Galaktionov¹,
A. V. Gudkov², S. Y. Zheltov², V. T. Zhukov¹, E. B. Ilovayaskaya², V. A. Knyaz²,
K. V. Manukovskii¹, N. D. Novikova¹, M. V. Ososkov², N. Zh. Silaev², O. B. Feodoritova¹

Moscow, Russia, ¹KIAM RAS; ²GosNIIAS

The paper considers the exploratory search for the optimal shape of the blades assembly for power plant in terms of power load. We consider vertical type of power plant having complicated shape. To organize the search of optimal shape elaborated before algorithms of mathematical modelling and visualization are applied. Complete technological pipeline that allows power plant simulation from constructing original CAD model up to visualization of results in stereo mode is implemented. The results of modelling are the base for further global optimization of the shape with purpose to find optimal parameters of exploitation. The paper presents approximated solution of optimization problem as the results of exploratory parametric search allowing to find needed directions for variation of key geometric parameters that determine the shape of the blade assembly.

Keywords: mathematical modelling, visualization, optimization problem, exploratory search

Введение

Целью данного исследования является поиск оптимальной формы узла лопастей энергетической установки с точки зрения энергонагрузки. Необходимо найти форму изделия, обеспечивающую максимальный вращающий момент, варьируя при этом три ключевых геометрических параметра, определяющих форму узла лопастей. Задачи подобного рода предполагают умение рассчитывать обтекание узла лопастей с целью определения силовых

характеристик узла при обтекании его потоком воздуха с заданной скоростью.

Данная работа опирается на предыдущие этапы исследования, представленные в работах [1-3], где изложены вопросы построения и методологии математического моделирования узла лопастей энергоустановки (ЭУ). Разработанная модель представляет единую технологическую цепочку алгоритмов, включающую в себя построение САД-модели для описания сложной геометрии узла лопастей, построение расчетной сетки на основе полученной геометрии, решение задачи моделирования обтекания на основе полной системы уравнений Навье-Стокса, а также визуализацию и анимацию результатов в моно- и стереорежимах. Визуализа-

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 16-01-00553а и 14-01-00769а). Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-07-20482.

ция являлась основным источником представления о физических процессах, происходящих при работе энергетической установки, и основным средством контроля, мониторинга и верификации получаемых результатов. В построенной технологической цепочке были реализованы различные формы визуального представления: статическая форма для тщательного изучения распределения газодинамических функций по поверхности установки и в расчетной области, динамическая форма для изучения процессов перераспределения газодинамических функций в процессе движения и объемная динамическая форма в виде стереопредставления [2,3].

Для реализации расчетов применялась открытая объектно-ориентированная библиотека OpenFOAM, написанная на языке C++, поддерживающая механизмы массивного распараллеливания и предназначенная для численного моделирования задач механики сплошной среды [4]. Библиотека основана на конечно-объемных аппроксимациях, написанных в операторной форме. Элементы OpenFOAM активно при численном анализе энергетических характеристик установок горизонтального типа. Все расчеты по решению задач математического моделирования обтекания энергоустановки проводились на гибридном вычислительном кластере К-100 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [5] в режиме параллельных вычислений.

В результате проведенных работ был разработана комплексная компьютерная технология, позволяющая проводить математическое моделирование узла лопастей энергоагрегата с конкретно заданными геометрическими параметрами и определять силовую нагрузку, действующую на агрегат в потоке воздуха. Этим была создана основа для дальнейших исследований по определению оптимальной формы узла лопастей с точки зрения ветровой нагрузки с учетом технологических ограничений.

В данной работе представлены результаты развездочного параметрического поиска, позволяющего определить нужные направления вариации ключевых геометрических параметров, определяющих свойства узла лопастей.

Реализация математического моделирования и визуального представления узла лопастей в единой технологической цепочке алгоритмов

Построение работоспособной и эффективной численной технологии включает в себя несколько необходимых этапов, к которым относятся ввод геометрической информации, ее обработка, построение сеточной модели, выбор специализированных алгоритмов расчета обтекания, анализ текущих результатов, расчет функционалов (сил и момен-

тов), визуальное представление результатов, обработка и анализ результатов многовариантных расчетов. Основой построения технологии является процесс математического моделирования узла лопастей энергоагрегата с конкретно заданными геометрическими параметрами под определенной энергонагрузкой. Все детали проведенных ранее исследований подробно описаны в работах [1-3]. В данном разделе указываются основные узлы разработанного технологического процесса.

Успешность расчета обтекания реального трехмерного объекта зависит от качества геометрической сетки, на которой производится расчет. Процесс построения сетки начинается с описания поверхности, ограничивающей рассматриваемое трехмерное тело. Как правило, поверхность реального трехмерного объекта сложной формы, полностью или частично импортируется из CAD-пакета и в случае необходимости может быть отредактирована. К поверхностям сеткам предъявляется ряд «очевидных» требований – отсутствие самопересечений, замкнутость и некоторые другие. Для достижения указанной цели используется ряд автоматических инструментов с широким набором средств контроля качества. Результирующая поверхностная сетка является основой для построения объемной сетки. Особенности численного моделирования течений жидкостей и газов диктуют некоторые правила построения объемных сеток. При решении таких задач объемная сетка, как правило, состоит из двух основных частей: призматической вблизи обтекаемых поверхностей и произвольной многогранной на удалении от поверхностей. Для создания пристеночного призматического слоя с заданным числом ячеек в направлении от стенки, с заданным законом роста размеров ячеек и полной толщиной слоя используется метод последовательного создания призматических слоев, который допускает модификацию поверхностной сетки текущего слоя (коллапс ребер, разрезание ячеек, оптимизация положения вершин и т.д.). Это позволяет создать слой призматических ячеек, проникающий значительно дальше от стенок вглубь расчетной области. Для заполнения внутреннего объема также могут использоваться различные конструкции: тетраэдры, усеченные ячейки (гексагональные во внутренней части и многогранные на границе расчетной области), а также многогранные ячейки во всей расчетной области. В наших численных расчетах применялись сетки с треугольными призматическими ячейками в пристеночных слоях и тетраэдрами во внутреннем объеме расчетной области. На рис. 1 показан фрагмент объемной сетки, построенной для полной компоновки узла лопастей. В качестве математической модели использовалась система уравнений Навье-Стокса [6], на основе которой в настоящее время изучается основная мас-



Рис. 1: Общий вид объемной сетки для полной модели узла лопастей

са течений газовой сплошной среды. Система уравнений дополнялась уравнением состояния идеального газа. В качестве базовой вычислительной модели использовалась модель rhoCentralFoam, реализующая «центрально-противопотоковую» схему и представляющая собой комбинацию центрально-разностной и противопотоковой схем [7]. Преимущество указанных схем состоит в том, что, применяя соответствующую технику уменьшения численной вязкости, можно добиться хорошей разрешимости и для разрывных решений (ударных волн в газовой динамике) и для решений, где основную роль играют вязкие явления. Суть центрально-противопотоковых схем состоит в специальном выборе контрольного объема.

Для контроля и верификации результатов расчетов использовались разнообразные варианты инструментов визуального представления. Для статического визуального представления использовалась концепция прозрачной счетной области и рендеринга распределения газодинамических функций (давление, температура) по поверхности неподвижного узла лопастей энергоустановки в потоке воздуха. Для одновременной оценки процессов распределения газодинамических функций на поверхности лопастей и в счетной области использовалась комбинация рендеринга по поверхности лопасти и в поперечном сечении, рассекающем узел лопастей (Рис.2). Анимированное представление реализовывалось с помощью двух подходов. В первом подходе камера фиксировалась в определенном положении, и вращение узла лопастей происходило перед камерой. Это позволяло наблюдать процесс изменения газодинамических характеристик на всем узле в целом во время движения узла. Вторым подход заключался в фиксации камеры в определенном положении относительно узла лопастей и вращении камеры вместе с узлом. Этот подход обеспечивал возможность контроля изменения газодинамических характеристик на просматриваемой лопасти в процессе движения. Для визуализации результатов расчетов в объемном виде (построение стерео-модели) использовалась угловая стереобаза.

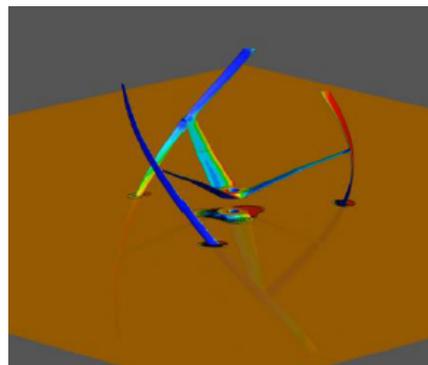


Рис. 2: Распределение давления по поверхности энергоустановки и в поперечном сечении

Бала разработана численная методика построения стереофильма путем создания последовательности стереопар, каждая из которых являлась стереокадром фильма [2,3].

Комплексная реализация методов визуального представления на всех этапах численного моделирования позволила контролировать распределение газодинамических функций во всех точках объекта, вовремя выявлять появление расчетных артефактов и отлаживать численные методы и схемы организации расчета.

Разработанная технологическая цепочка позволяет проводить полноценное численное исследование и последующий анализ работы энергетической установки, начиная от создания САД модели и заканчивая стереометрической визуализацией. Это дает возможность перейти к задачам оптимизации свойств энергоустановки, в частности к поиску оптимальной формы узла лопастей с точки зрения силовых характеристик.

Разведочный поиск оптимальной геометрической формы узла

Для решения задачи определения оптимальной формы геометрии ЭУ с точки зрения силовой нагрузки был построен ряд моделей узла лопастей с различной геометрией исследуемого объекта. Нами было выбрано три основных параметра, варьирование которых позволяет описать большое многообразие возможных геометрических форм. На рис. 3 схематически показаны эти изменяемые параметры: γ_1 – угол между направлением основной лопасти и вертикалью, γ_2 – угловой размер основной лопасти в направлении оси вращения, L – ширина основной лопасти. В целом задачу разведочного параметрического поиска можно сформулировать следующим образом: найти значения ключевых геометрических параметров узла лопастей γ_1^* , γ_2^* , L^* , обеспечивающие максимальное значение целевой функции $M^* = \max(\gamma_1^*, \gamma_2^*, L^*)$. В качестве целевой функции выбирались основные аэродинамические характеристики: полная аэродинамиче-

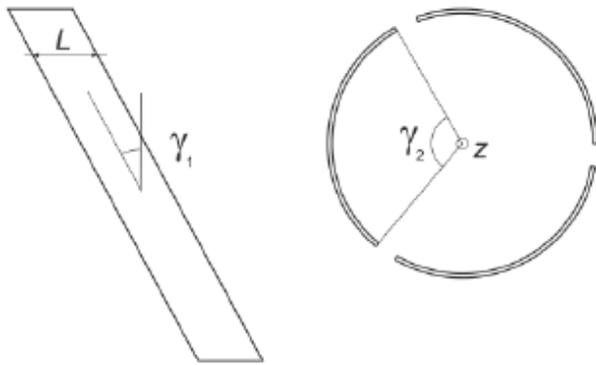


Рис. 3: Варьируемые геометрические параметры для определения оптимальной формы геометрии энергоагрегата

ская сила F и вращающий момент M . Значения угла γ_1 варьировались в диапазоне от 45 до 65 градусов с шагом 5 градусов. Значения угла γ_2 варьировались в диапазоне от 100 до 130 градусов с шагом 10 градусов. Ширина основной лопасти L варьировалась в сторону уменьшения и увеличения на 10 и 20 процентов от базового значения. В качестве базового варианта принимались значения для геометрии, полученной в результате лазерного сканирования опытного образца.

Результаты поиска представлены на рис. 4 для вращающего момента. Для каждого разведочного направления точки пронумерованы по возрастанию параметра. По оси абсцисс отложены номера точек, каждая из которых соответствует некоторому набору основных варьируемых геометрических параметров. Точка под номером 3 соответствует базовому варианту для всех трех разведочных направлений. Красным цветом отмечены значения момента (рис. 4) для вариации по углу γ_1 при фиксированных базовых значениях γ_2 и L . Синим цветом аналогично отмечены соответствующие значения для вариации по углу γ_2 , а зеленым – вариации ширины лопасти L . Представленные результаты позволяют сделать предположение, что при увеличении всех трех ключевых геометрических параметров γ_1 , γ_2 , L от значений базового варианта $\gamma_{1\text{баз}}$, $\gamma_{2\text{баз}}$, $L_{\text{баз}}$ происходит увеличение вращающего момента.

Следующая группа расчетов представляла вариацию углов γ_1 и γ_2 в диапазонах их изменения при фиксированном значении ширины лопасти L , равном значению базового варианта. По результатам расчетов была построена для суммарного момента картина его зависимости от вариации углов в виде функциональной зависимости $M(\gamma_1, \gamma_2)$, которая позволила сделать предположение о возрастании суммарного вращающего момента при одновременном увеличении углов γ_1 и γ_2 (Рис.5). По результатам результатов разведочного поиска был сделан вывод о том, что в рассматриваемом диапа-

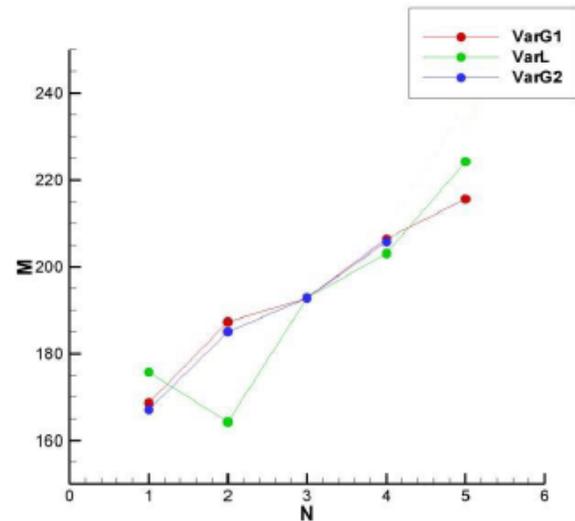


Рис. 4: Изменение модуля вращающего момента при вариациях по основным направлениям от базового варианта

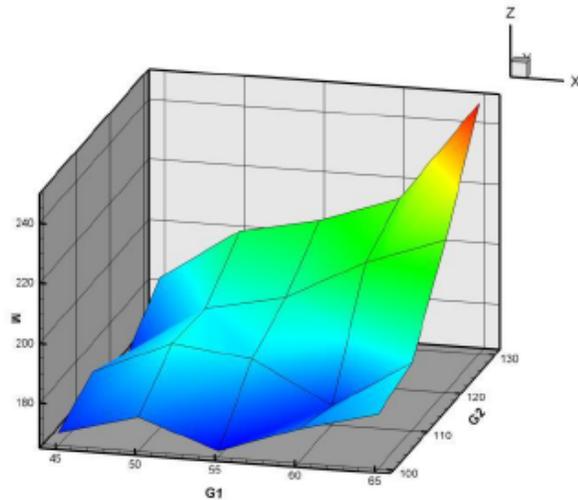


Рис. 5: Представление модуля крутящего момента при вариации по углам γ_1 и γ_2

зоне изменения геометрических параметров γ_1 и γ_2 при фиксированном базовом значении параметра L максимальный суммарный вращающий момент достигается при достижении параметрами γ_1 и γ_2 максимальных значений в диапазоне.

Оценочная экстраполяция показывает, что одновременное увеличение всех трех параметров в диапазонах, определенных в настоящей работе, позволит увеличить значение момента по сравнению с базовым вариантом геометрии изделия на 49.92%, практически почти в полтора раза. Для подтверждения данной предположительной оценки необходимо проведение дополнительных численных экспериментов по расчетам обтекания изделия при аналогичных слоях по углам γ_1 и γ_2 с варьируемой

шириной лопасти. Это позволит решить оптимизационную задачу более точно и определить глобальный максимум вращающего момента в получаемом многомерном массиве результатов для выработки производственных рекомендаций.

Заключение

В данной работе представлена вычислительная технология по созданию расчетной методики и реализации разведочного параметрического поиска с целью построения конфигурации, обеспечивающей максимальный вращающий момент.

Численные исследования по определению оптимальной формы узла лопастей проводились на основе построенной единой технологической цепочки алгоритмов, позволяющей проводить математическое моделирование узла лопастей ЭУ с конкретно заданными геометрическими параметрами и определять силовую нагрузку, действующую на агрегат в силовом потоке.

В ходе исследований отлажена методология поиска оптимальной (с точки зрения достижения максимального вращающего момента) формы узла лопастей ЭУ, проведено оценочное решение оптимизационной задачи. Данное решение является результатом разведочного параметрического поиска и позволяет определить нужные направления вариации ключевых геометрических параметров, определяющих свойства узла лопастей. Поиск глобального экстремума в массиве данных позволяет оценить оптимальное сочетание ключевых геометрических параметров узла лопастей.

Далее планируется организация верификационного расчета для полученного оптимального варианта. После получения верификационных данных будет реализовано вычисление распределения напряжений и деформаций в узле лопастей с целью выработки конкретных конструкторских рекомендаций.

Литература

- [1] Бондарев А.Е., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б. Разработка и организация математического моделирования обтекания неподвижной лопасти энергетической установки. – Препринт № 60 ИПМ им. Келдыша, 2014.
- [2] Андреев С.В., Бондарев А.Е., Бондаренко А.В., Визильтер Ю.В., Галактионов В.А., Гудков А.В., Желтов С.Ю., Жуков В.Т., Иловайская Е.Б., Князь В.А., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Ососков М.В., Силаев Н.Ж., Феодоритова О.Б., Бондарева Н.А. Моделирование и визуализация работы узла лопастей сложной формы в энергетической установке // Журнал «Научная визуализация», 2015, т. 7, № 4, С. 1-12.
- [3] Андреев С.В., Бондарев А.Е., Бондаренко А.В., Визильтер Ю.В., Галактионов В.А., Гудков А.В., Желтов С.Ю., Жуков В.Т., Иловайская Е.Б., Князь В.А., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Ососков М.В., Силаев Н.Ж., Феодоритова О.Б., Бондарева Н.А. Моделирование и визуализация работы энергетической установки сложной формы в режиме стереоанимации // Труды 25-й Международной Конференции по Компьютерной Графике и Зрению ГрафиКон'2015, Протвино, Россия, 22-25 сентября 2015 г., с. 183-187.
- [4] OpenFOAM <http://www.openfoam.com>.
- [5] Гибридный вычислительный кластер К-100. URL: <http://www.kiam.ru/MVS/resources> !!!
- [6] Л.Д.Ландау, Е.М. Лившиц. Гидродинамика. – Москва, Наука, 1986 .
- [7] A.Kurganov, E.Tadmor. New high resolution central schemes for nonlinear conservation laws and convection-diffusion equations, J.Comput. Phys., Vol.160, 2000, pp.241-282.