ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 224 за 2018 г.

ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Жуков В.Т., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б.

Численное моделирование низкоскоростных течений на примере энергоустановки с использованием комплекса NOISEtte

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Численное моделирование низкоскоростных течений на примере энергоустановки с использованием комплекса NOISEtte / А.Е.Бондарев [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 224. 20 с. doi:**10.20948/prepr-2018-224**
URL: **http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-224**

О р д е н а   Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й   а к а д е м и и   н а у к

А.Е.Бондарев, В.А.Галактионов, В.Т.Жуков,
Н.Д.Новикова, О.Б.Феодоритова

Численное моделирование низкоскоростных течений на примере энергоустановки с использованием комплекса NOISEtte

Москва - 2018

Бондарев А.Е., Галактионов В.А., Жуков В.Т., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б.

Численное моделирование низкоскоростных течений на примере энергоустановки с использованием комплекса NOISEtte

Приведены результаты численного моделирования обтекания узла лопастей энергоустановки с вертикальной осью вращения на основе исследовательского программного комплекса NOISEtte. Используемая техника предобусловливания уравнений динамики сжимаемой вязкой среды обеспечила проведение многовариантных оптимизационных расчетных исследований в условиях низких скоростей обтекания.

Ключевые слова: энергетическая установка, численное моделирование, программный комплекс NOISEtte.

Alexander Evgenyevich Bondarev, Vladimir Alexandrovich Galaktionov, Victor Timofeevich Zhukov, Natalia Dmitrievna Novikova, Olga Borisovna Feodoritova

Numerical simulation of low-speed flows around of power plant using NOISEtte

This work presents some results of numerical simulation of flow around the power plant with vertical axis of rotation based on the research code NOISEtte. The low Mach preconditioning approach is used to numerical solution of the system of compressible viscous equations and this NOISEtte option provides a set of multivariate calculations.

Key words: power plant, numerical simulation, power plant, NOISEtte code.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПМ им. М.В. Келдыша.

Оглавление

1. Введение

Успехи в развитии аэродинамики профилей, технологии материалов и в анализе их упруго-пластических свойств, создании роторов выдвигают ветровую энергетику в первые ряды источников альтернативной энергии. Аэродинамические эффекты ветровых энергоустановок (ЭУ) изучаются в течение уже длительного времени.

В работах [1–4] приведены предварительные исследования по поиску оптимальной формы узла лопастей энергетической установки с вертикальной осью вращения с точки зрения максимизации суммарного вращательного момента при обтекании узла потоком воздуха с заданной скоростью.

С точки зрения математического и вычислительного аспектов речь идет о решении класса задач, представляющих определённые трудности: о моделировании низкоскоростных течений, т.е. течений при малых числах Маха (при $M < 0.1$). Существуют различные подходы к решению таких задач, мы ограничимся рассмотрением двух подходов к моделированию низкоскоростных течений. Первая группа методов основана на переходе к модели несжимаемых течений (pressure-based methods), в которой на каждом шаге по времени производится коррекция давления с помощью решения уравнения. Типичным примером является алгоритм SIMPLE [5].

Вторая группа методов (density-based methods) рассматривает течения сжимаемые. При малых числах Маха амплитуда скорости течения мала по сравнению со звуковой скоростью, что делает систему жесткой. Количественная характеристика жесткости выражается отношением максимального и минимального собственных чисел невязкого якобиана системы уравнений и представляет отношение максимальной и минимальной скорости распространения возмущений. Поэтому численные модели, описывающие сжимаемые течения, теряют как точность получаемых стационарных решений, так и эффективность, что проявляется в ухудшении сходимости процесса установления по времени. Поэтому, как правило, методы этого семейства существует в двух вариантах: 1) добавление искусственной сжимаемости в уравнение неразрывности и 2) предобусловливание исходных уравнений для выравнивания порядков собственных чисел якобиана.

В предыдущих работах [1–4] при решении задач обтекания узла ЭУ использовался открытый программный комплекс OpenFOAM [5], работающий в интересующем нас диапазоне чисел Маха с алгоритмами типа SIMPLE, принадлежащими первому семейству методов (решатель pimpleFoam). Эти решатели позволяют моделировать низкоскоростные течения в модели несжимаемой среды.

В настоящей работе мы представляем результаты численного моделирования обтекания узла ЭУ на основе исследовательского программного комплекса NOISEtte [6, 7], который использует идеологию как раз второй группы подходов, т.е. использует предобусловливание [8] матрицы Якоби конвективных членов.

Результаты численного моделирования приведены для четырех значений скоростей набегающего потока: $5\,м/с$, $10\,м/с$, $25\,м/с$, $32\,м/с$. Скорость потока $32\,м/с$ является предельным значением для рабочего использования ЭУ, так как такая скорость характеризует ураганный ветер.

Данная работа опирается на предыдущие этапы исследования, представленные в [1–4], где изложены вопросы построения и методологии математического моделирования узла лопастей энергоустановки.

Все расчеты по решению задач математического моделирования обтекания энергоустановки проводились на гибридном вычислительном кластере К-100 в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [9] в режиме параллельных вычислений.

2. Вычислительная модель

Программный комплекс NOISEtte разработан в Институте прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН [6, 7]. Комплекс включает в себя численные методы решения систем уравнений Эйлера и Навье–Стокса для сжимаемого газа и предусматривает работу с числами Маха в широком диапазоне. С этой целью в коде существует ряд специальных алгоритмов. К ним относятся, во-первых, стационарные предобусловливатели, описанные в работе Туркеля [8], и схемы на основе решения приближенных задач Римана на границах локальных ячеек консервативности (схемы годуновского типа). Для этого численные потоки представляются в виде суммы конвективного и диссипативного потоков. Для решения проблем, связанных с малыми числами Маха, в схемах годуновского типа диссипативный член масштабируется с помощью функции, зависящей гладким образом от локального числа Маха.

Для моделирования турбулентности предусмотрены модели RANS, LES, DES, DDES и IDDES. Предполагается, что все сеточные функции заданы в узлах неструктурной сетки, включающей тетраэдры и гексаэдры, что позволяет работать с трехмерными областями сложной геометрической формы. При этом используется смешанный метод аппроксимации, а именно, члены конвективного переноса аппроксимируются с использованием метода конечных объёмов, а диффузионная часть уравнений Навье-Стокса – методом конечных элементов с использованием кусочно-линейных финитных базисных функций (P1-метод Галеркина). Конечно-объемные ячейки ассоциированы с узлами сетки, т.е. представляют собой дуальные ячейки по отношению к ячейкам исходной расчетной сетки.

Конечно-элементная дискретизация диффузионных членов строится по ячейкам исходной сетки; если такая ячейка не является тетраэдром, то она разбивается на тетраэдры, в каждом из которых строится линейный интерполяционный многочлен. Диффузионные потоки на границах дуальных ячеек записываются с использованием линейных восполнений в тетраэдрах, ассоциированных с соответствующей дуальной ячейкой.

Основу аппроксимаций конвективных членов составляют многопараметрические конечно-объемные схемы до шестого порядка аппроксимации включительно в зависимости от качества сетки. Говоря о порядках аппроксимации, в дальнейшем предполагаем, что речь идет о схемах высокой разрешающей способности, которые являются обобщением одномерных схем, обеспечивающих на гладких решениях указанный порядок аппроксимации.

Для интегрирования по времени используются различные явные и неявные схемы, в том числе явная классическая схема Рунге–Кутта четвертого порядка и неявная схема второго порядка с поточечной линеаризацией по Ньютону пространственной разностной системы уравнений. Получающаяся на каждом шаге ньютоновских итераций линейная система уравнений решается стабилизированным методом бисопряженных градиентов (BiCGstab).

Исходный код NOISEtte написан на языке C++ и использует двухуровневое распараллеливание MPI+OpenMP, что дает возможность проводить численное моделирование на сетках с большим числом элементов (до миллиарда степеней свободы) с использованием нескольких десятков тысяч процессорных ядер.

На основе комплекса NOISEtte проведен разведочный поиск вариации параметров ветровой установки $\gamma_1^{'}$, γ_2 и L, см. [2]. Варьируемые параметры: γ_1 – угол между направлением лопасти и осью вращения, γ_2 – угловой размер лопасти, L – ширина лопасти (см. рис. 1). Заметим, что всюду ниже результаты приводятся для тройки параметров ($\gamma_1^{'}$, γ_2, L), где $\gamma_1^{'} = 90^{\circ} - \gamma_1$.

В качестве базового набора выбран результат сканирования опытного образца: $\left(\gamma_1^{'},\ \gamma_2,\ L\right)_{баз} = (55^{o},\ \ 120^{o},\ \sim\ 20$ см). При вариациях параметр $\gamma_1^{'}$

принимает значения 45^o, 50^o, 55^o, 60^o, 65^o; параметр γ_2 – значения 100^o, $110^o, 120^o, 130^o$; ширина лопасти L выбирается из набора $0.8L_{баз}$, $0.9L_{баз}$, $L_{баз}$, $1.1L_{баз}$, $1.2L_{баз}$.

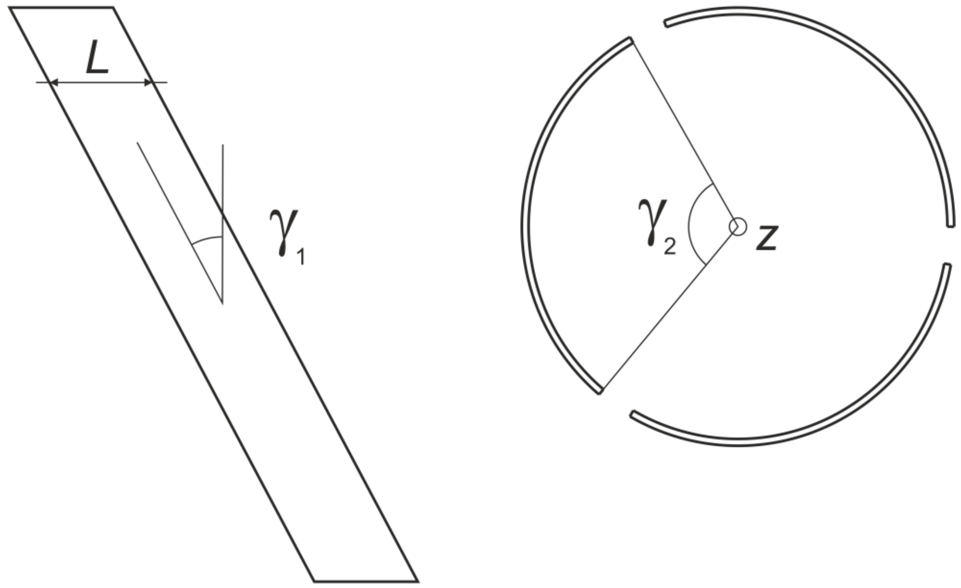

Рис. 1. Варьируемые геометрические параметры (γ_1, γ_2, L)

Проварьируем каждый из параметров при фиксированных двух остальных параметрах, т.е. исследуем три разведочных направления:

$$P_1 = \left(\gamma_1^{'}(N),\quad (\gamma_2)_{\text{баз}},\quad L_{\text{баз}}\right),$$

$$P_2 = \left(\left(\gamma_1^{'}\right)_{\text{баз}},\quad \gamma_2(N),\quad L_{\text{баз}}\right),$$

$$P_3 = \left(\left(\gamma_1^{'}\right)_{\text{баз}},\quad (\gamma_2)_{\text{баз}},\ L(N)\right),$$

где N – номер варианта из допустимого диапазона. Для каждого направления точки пронумерованы по возрастанию параметра N, при этом номер $N = 1$ присвоен базовому варианту, и увеличение параметра N соответствует увеличению принимаемых параметрами $\gamma_1^{'}$, γ_2, L значений.

3. Результаты численного моделирования

Ниже на рисунках 2 и 3 приведены модули аэродинамической силы и вращающего момента в зависимости от вариации определяющих параметров по основным направлениям. Направление P_1 отмечено красным цветом, направление P_2 – синим цветом и направление P_3 – зеленым.

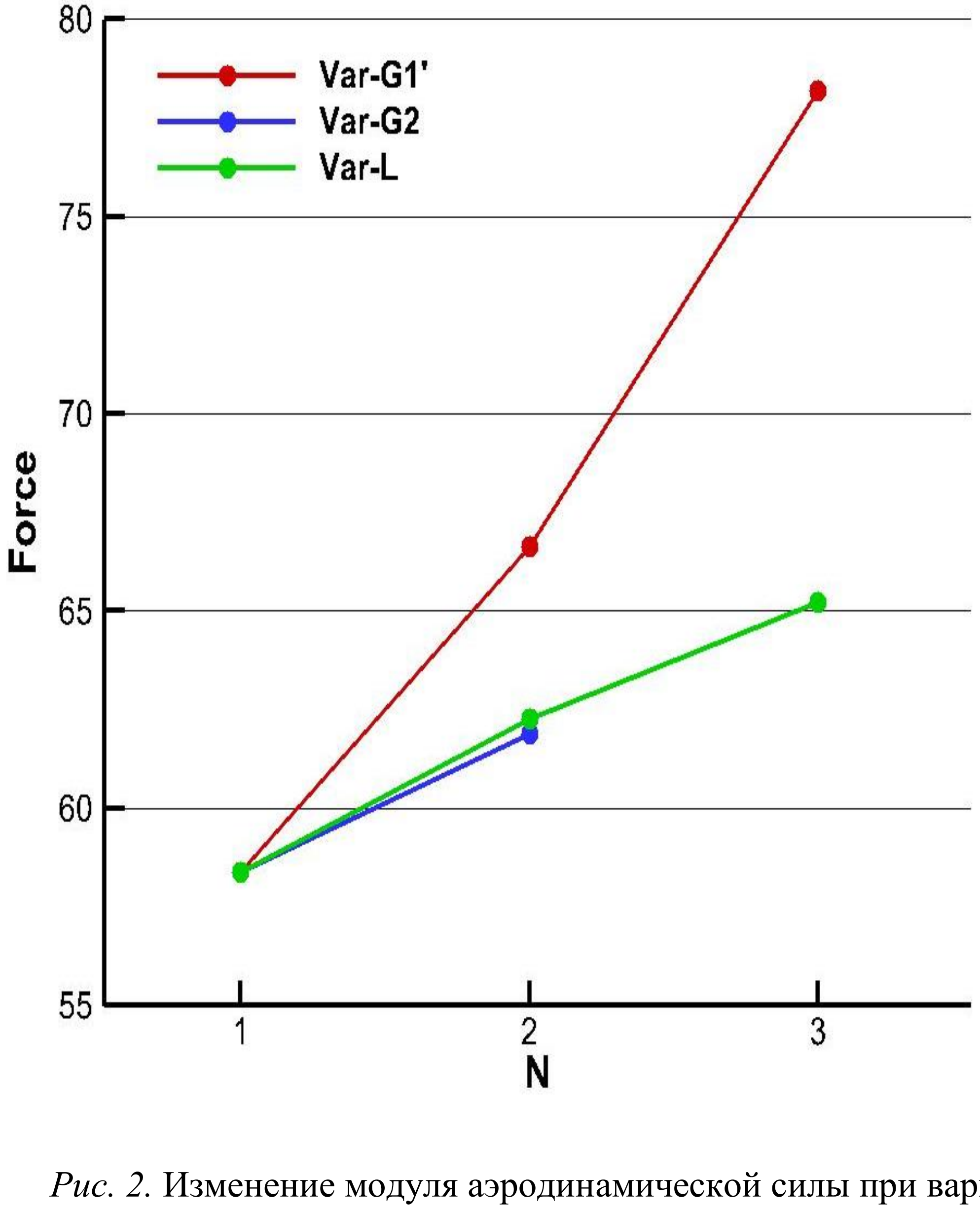

Рис. 2. Изменение модуля аэродинамической силы при вариациях по основным направлениям от базового варианта $(N = 1)$

При увеличении ширины лопасти L наблюдался устойчивый рост аэродинамической силы и вращающего момента, поэтому при дальнейших геометрических вариациях варьировались базовые углы, а ширина лопасти зафиксирована при значении $L = 1.2L_{баз}$.

Предполагается, что при вариации формы узла его масса и момент инерции не должны увеличиваться более чем на 10% от варианта $\left(\gamma_1^{'},\ \gamma_2,\ L\right)_0 = \left(\left(\gamma_1^{'}\right)_{баз},\ \left(\gamma_2\right)_{баз},\ 1.2L_{баз}\right) = (55^o, 120^o, \sim 24\text{см})$.

Считая постоянной плотность материала узла лопастей, учет ограничений по массе можно вести с помощью анализа объемов ЭУ.

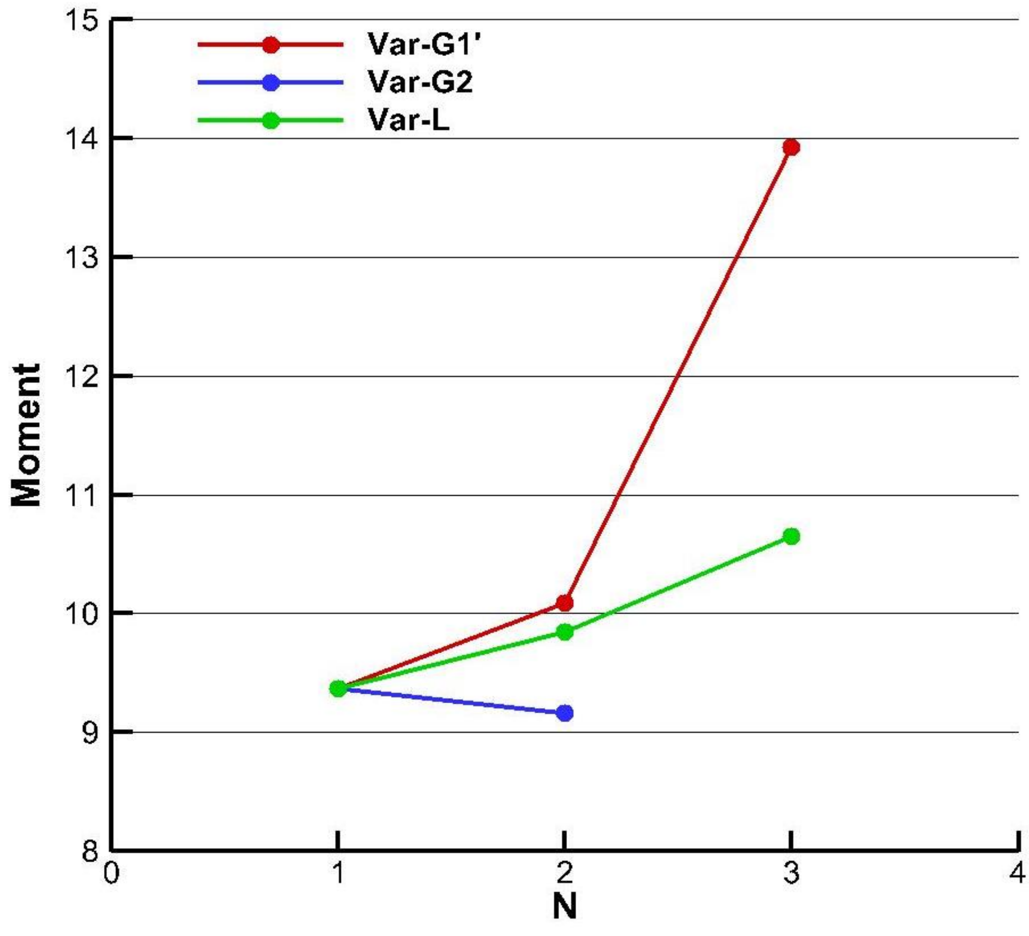

Рис. 3. Изменение модуля вращающего момента при вариациях по основным направлениям от базового варианта $(N = 1)$

По результатам разведочного поиска построена поверхность модуля аэродинамической силы и модуля вращающего момента в зависимости от углов $\gamma_1^{'}$ и γ_2 при фиксированном значении $L = 1.2L_{баз}$ (см. рис. 4, 5).

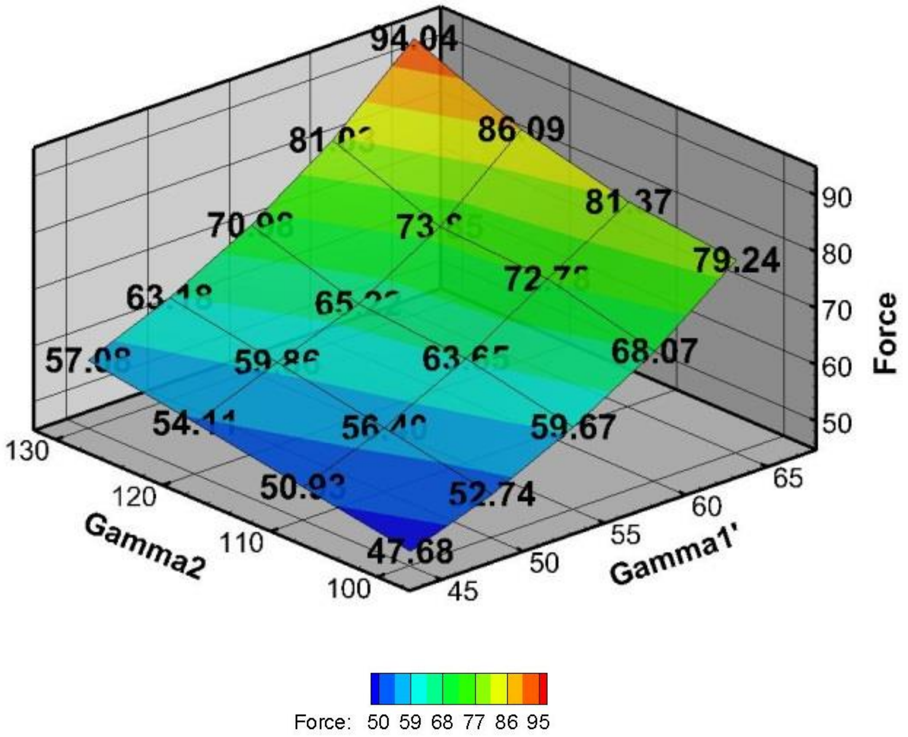

Рис. 4. Зависимость модуля аэродинамической силы от параметров $\gamma_1^{'}$ и γ_2 при фиксированном значении $L = L_0 = 1.2 L_{баз}$

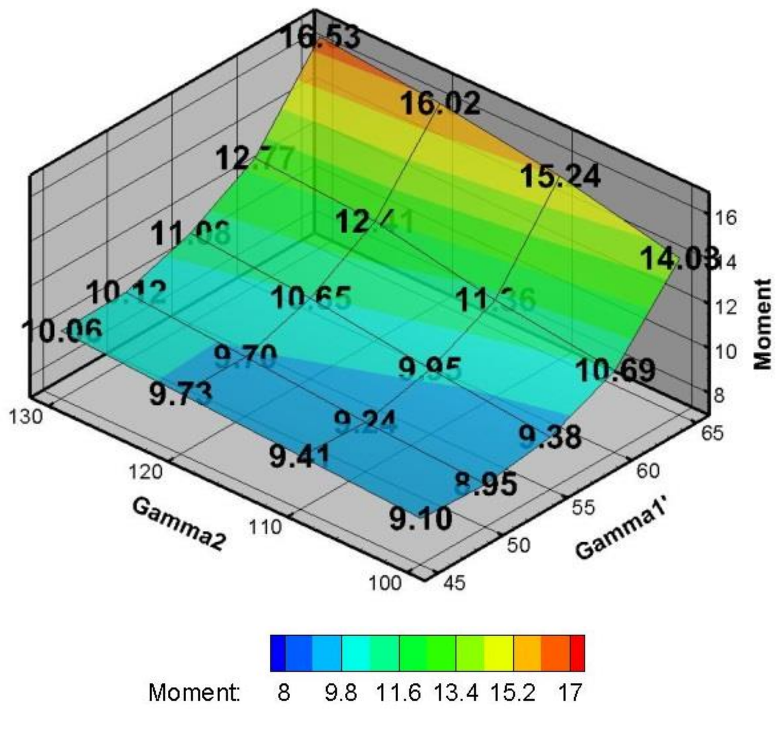

Рис. 5. Зависимость модуля вращающего момента от параметров $\gamma_1^{'}$ и γ_2 при фиксированном $L = L_0 = 1.2 L_{баз}$

На рис. 6 (слева) представлены объемы узла лопастей $V\left(\gamma_1^{'},\gamma_2\right)$ в зависимости от значений угловых параметров при фиксированном значении ширины лопасти $L = L_0 = 1.2L_{баз}$. Значения, лежащие в плоскости, ограниченной красным цветом, соответствуют вариантам узла лопастей, объем которых равен объему выбранного варианта $V = V_0$. Соответственно, плоскость, ограниченная синим, представляет ЭУ с увеличенным на 10% объемом $V = V_0 + 0.1V_0$. Линии пересечения обеих плоскостей с поверхностью значений объемов ограничивают вариацию формы изделия. На рис. 6 (справа) область допустимых значений при учете ограничений по объему заключена на плоскости вариации угловых параметров в области, ограниченной красной (V_0) и синей $\left(V_0 + 0.1V_0\right)$ линиями.

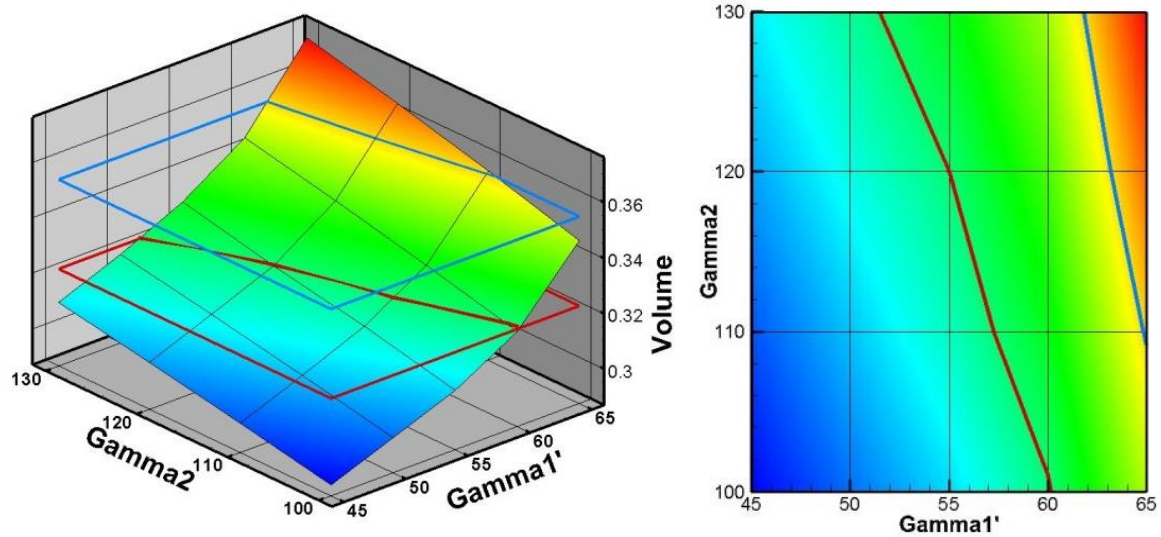

Рис. 6. Зависимость объема узла лопастей от $\gamma_1^{'}$ и γ_2 при $L = L_0 = 1.2L_{баз}$ (слева) и область ограничения по объему (справа)

Аналогичным образом определяются ограничения для момента инерции (см. рис. 7). На рис. 7 (слева) рассчитанные моменты инерции представляются в виде трехмерной поверхности $M_i\left(\gamma_1^{'},\gamma_2\right)$. Плоскость, выделенная красным цветом, соответствует значению момента инерции для выбранного варианта $(M = M_0)$, а плоскость, ограниченная синим цветом, соответствует значению момента инерции, увеличенному на 10% по сравнению с ним ($M = 1.1M_0$). Линии пересечения обеих плоскостей с поверхностью значений моментов инерции выделяют допустимую область вариации формы изделия. На рис. 7 (справа) эта область показана в плоскости изменения угловых параметров и расположена между красной и синей линиями.

Таким образом, для заданного слоя данных, соответствующего ширине лопасти $L = 1.2L_{баз}$, мы получили ограничения по объему (рис. 6, справа) и моменту инерции (рис. 7, справа). Пересечение этих областей соответствует интересующему нас диапазону изменения параметров $\gamma_1^{'}$, γ_2, позволяющему оставаться в рамках принятых ограничений.

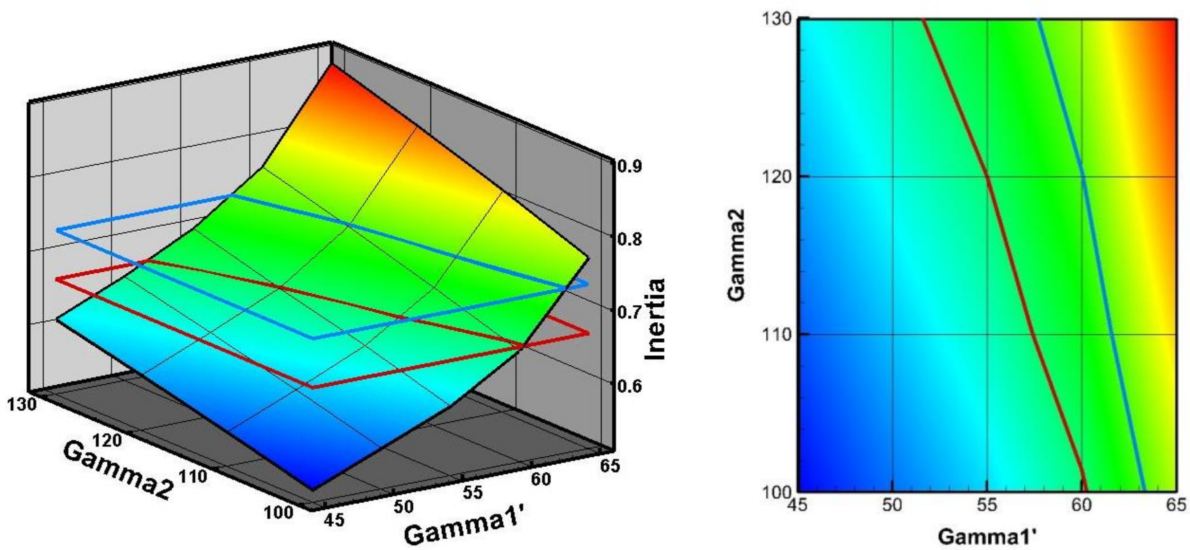

Рис. 7. Зависимость момента инерции (слева) и область ограничения по моменту инерции (справа) от вариации $\gamma_1^{'}$ и γ_2 при $L = L_0 = 1.2L_{баз}$

На рис. 8 совмещены ограничения по объему и моменту инерции, ранее представленные на рис. 6 и 7. Красными линиями обозначены ограничения по объему, а пунктирными голубыми линиями обозначены ограничения по моменту инерции. Как видно из рисунка, нижние ограничения по объему и моменту инерции практически совпадают, а верхние существенно разнятся. Очевидно, что ограничения по моменту инерции являются более жесткими, чем ограничения по объему. Таким образом, при суммарном учете ограничений по объему и моменту инерции необходимо выбрать диапазон вариации угловых параметров, заключенный между пунктирными голубыми линиями.

Для учета влияния полученных ограничений на вращающий момент, который мы рассматриваем как основную силовую характеристику узла лопастей, совместим поверхности вращающего момента при вариации угловых параметров (рис. 5) и полученного диапазона ограничений, представленного на рис. 8.

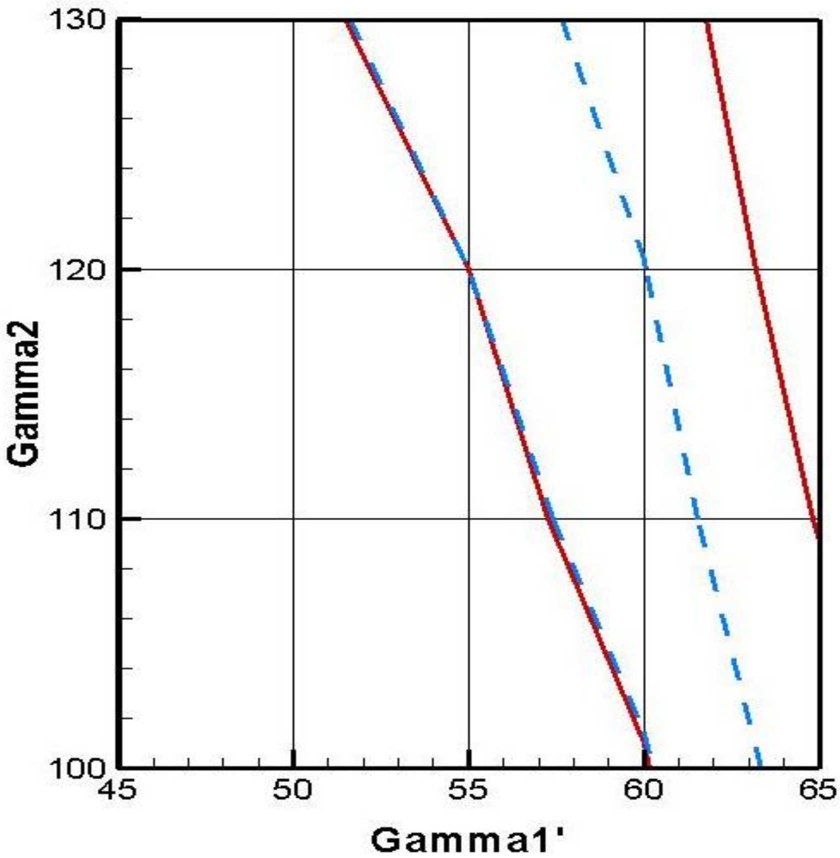

Рис. 8. Области ограничений по объему (красные линии) и моменту инерции (голубые линии) при вариации γ_1', γ_2 и $L = L_0 = 1.2L_{баз}$

Результат совмещения представлен в трехмерном виде на рис. 9. Распределение вращающего момента на рис. 9 (слева) представлено трехмерной поверхностью, а область ограничений расположена между вертикальными поверхностями, отсекающими нужный диапазон на поверхности момента. Двумерный вид (рис. 9 справа) дает возможность более точно определить диапазон вариации угловых параметров, обеспечивающий максимум вращающего момента с учетом наложенных ограничений на изменение объема и момента инерции узла лопастей. Можно утверждать, что при учете выбранных ограничений по объему и моменту инерции нужный диапазон заключается в пределах изменения угла $\gamma_1^{'}$ от 55 до 60, а угла γ_2 — от 120 до 125 градусов.

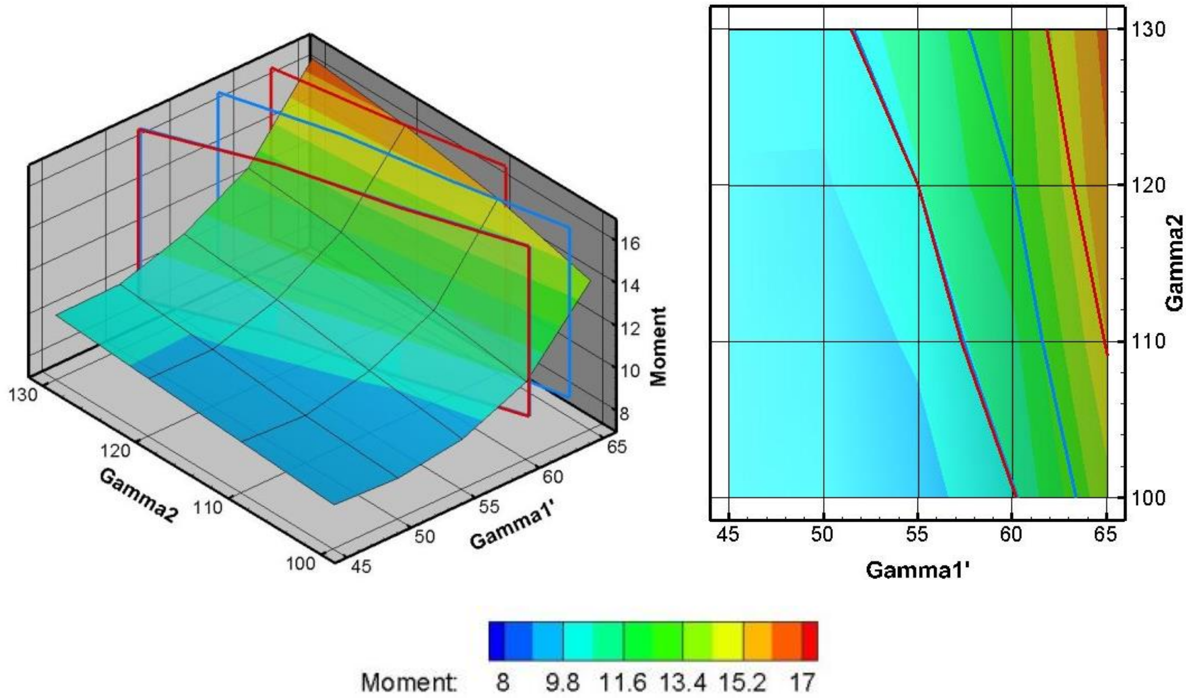

Рис. 9. Зависимость вращающего момента от параметров $\gamma_1^{'}$, γ_2 $L = L_0 = 1.2L_{баз}$) с учетом ограничений: 3D (слева) и 2D (справа)

В качестве оптимальной точки, представляющей сочетание угловых параметров, наиболее удобное для потенциального производства прототипного образца, выбраны параметры $\gamma_1^{'}$ = 60^o, γ_2 = 120^o, $L = 1.2L_{баз}$. Обозначим этот вариант $P_{опт}$. В этом случае ограничения по объему и моменту инерции при вариации углов соблюдаются. Следует заметить, что при этом объем узла лопастей равен $V = 0.338\,м^3$, а момент инерции

$M = 0.732\,кг\,м^3$, что на 16% и 38% больше соответствующих значений базового образца в выбранной ширины лопасти $L = L_0 = 1.2L_{баз}$. Ниже представлены результаты расчетов этого варианта узла ЭУ при четырех различных скоростях набегающего потока $U_\infty = 5,\ 10,\ 25,\ 32\,м/с$ с параметры $\rho_\infty = 1.21\,кг/м^3$, $T_\infty = 291^O K = 18^O C$, $p_\infty = 101330\,Па$.

При сравнении сосчитанных значений давлений торможения с теоретическими значениями $p_{теор} = p_\infty \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - p_\infty$ (см. табл. 1) наблюдается их хорошее согласование.

Таблица 1

Давление в точке торможения

U_∞, $м/с$	$p_{теор}$	$p_{NOISEtte}$
5	15.1207	16.3128
10	60.4915	61.7083
25	378.4951	382.158
32	621.4530	639.776

На рис. 10 – 13 для каждого варианта приведено поле давления $p - p_\infty$ в окрестности лопасти в одном из характерных сечений (плоскость z = -2.15).

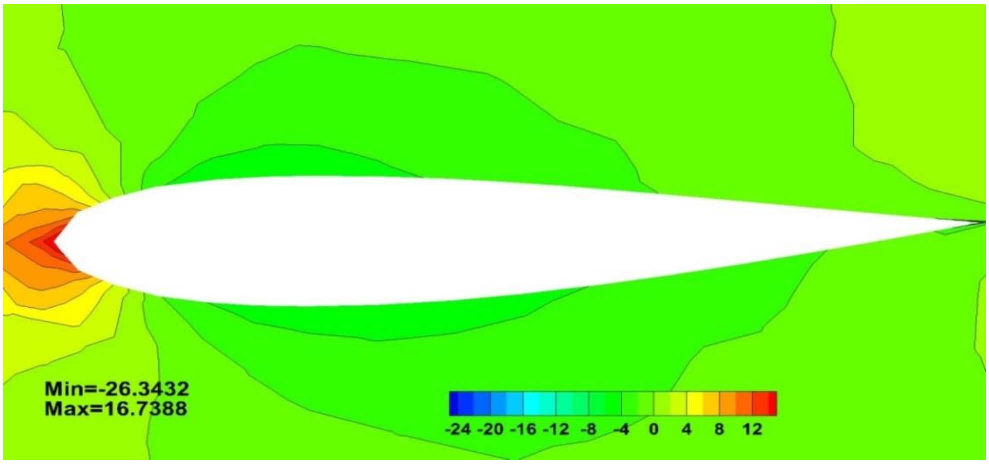

Рис. 10. Распределение давления $p - p_\infty$ в окрестности лопасти при $U_\infty = 5\,м/с$ для варианта $P_{опт}$ в плоскости сечения z = -2.15

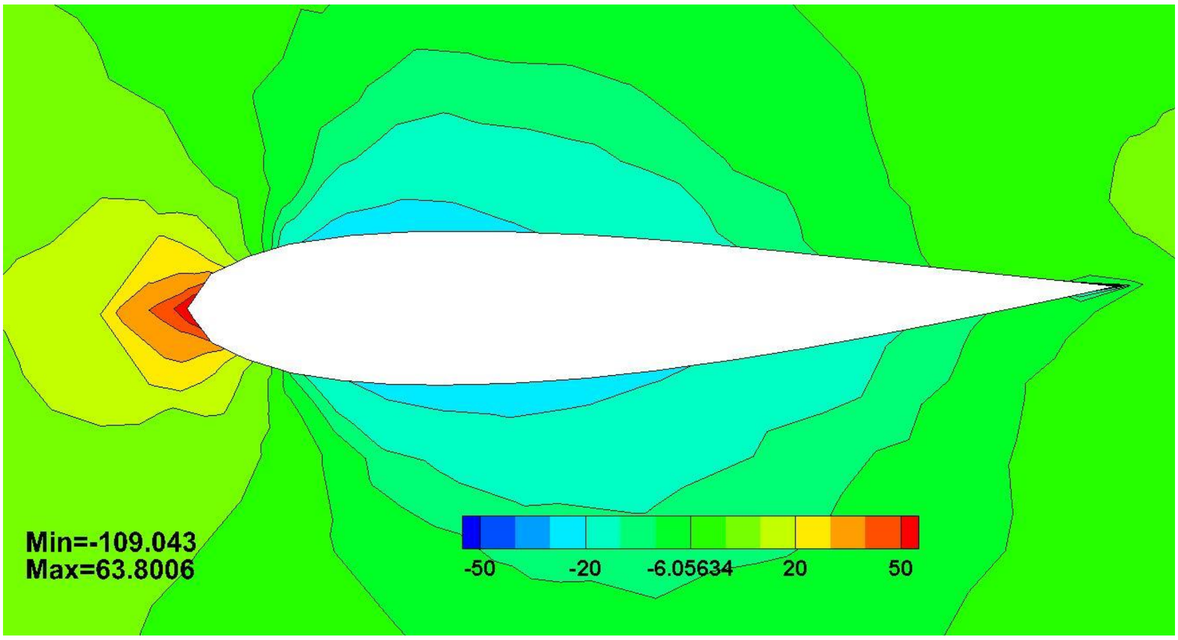

Рис. 11. Распределение давления $p - p_\infty$ в окрестности лопасти при $U_\infty = 10\,м/с$ для варианта $P_{опт}$ в плоскости сечения z = -2.15

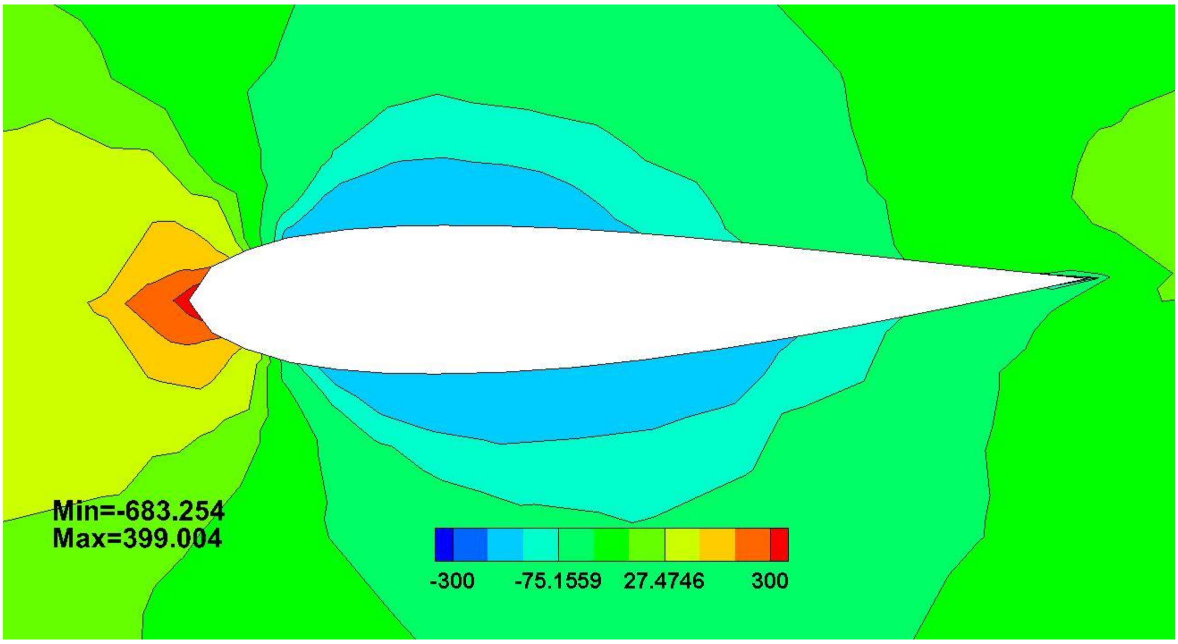

Рис. 12. Распределение давления $p - p_\infty$ в окрестности лопасти при $U_\infty = 25\,м/с$ *для варианта* $P_{опт}$ *в плоскости сечения z = -2.15*

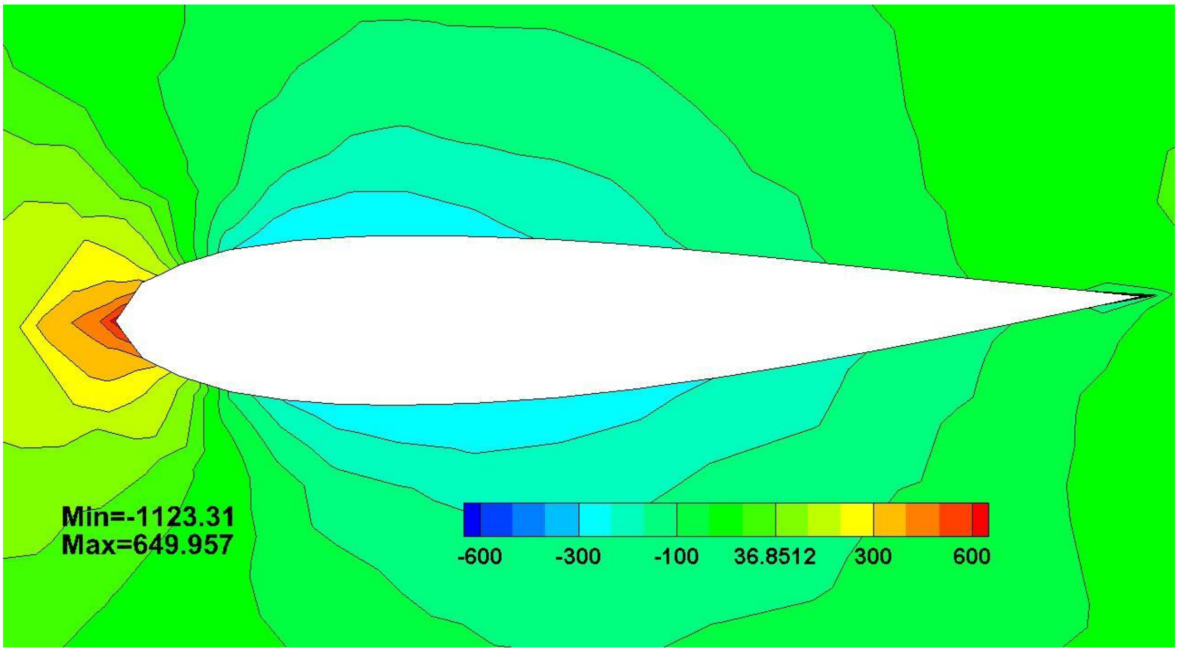

Рис. 13. Распределение давления $p - p_\infty$ в окрестности лопасти при $U_\infty = 32\, м/с$ для варианта $P_{опт}$ в плоскости сечения z = -2.15

Ниже на рис. 14, 15 приведены распределения давления на поверхности узла лопастей для оптимального варианта $P_{опт}$ при максимальной $U_\infty = 32\, м/с$ и минимальной $U_\infty = 5\ м/с$ скоростях набегающего потока.

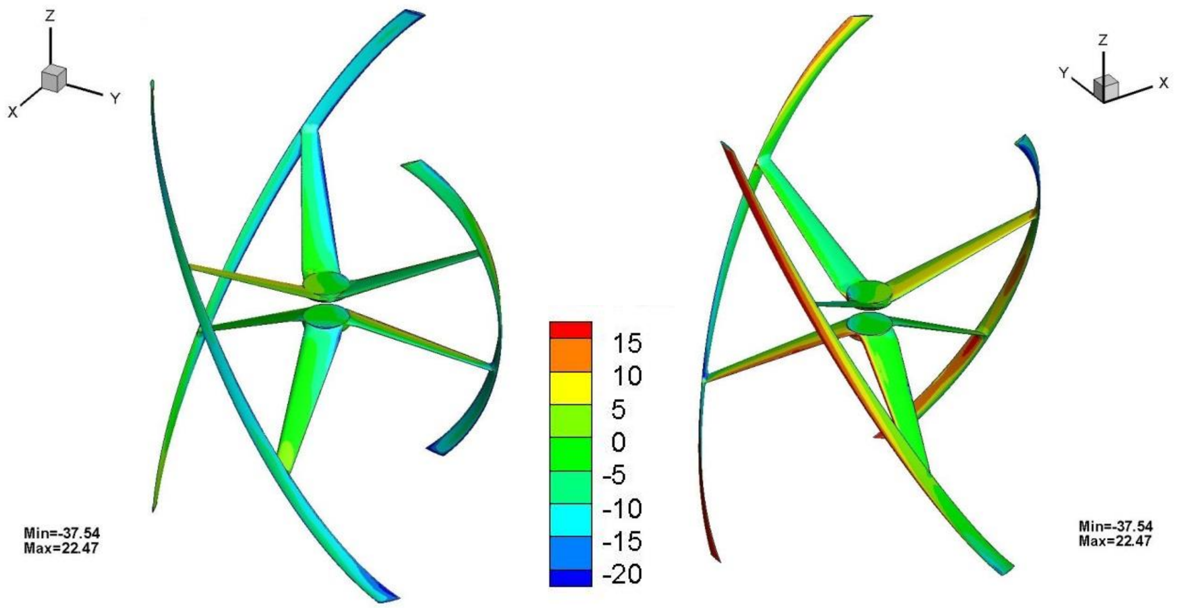

Рис. 14. Распределение давления $p - p_\infty$ на поверхности ЭУ при $U_\infty = 5\ м/с$ для варианта $P_{опт}$

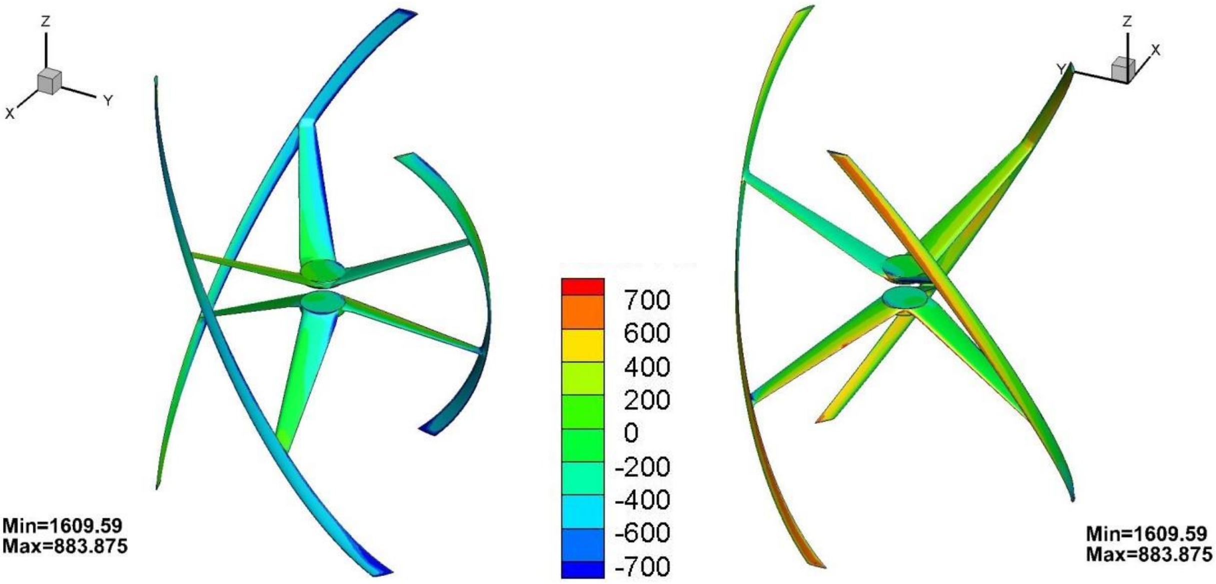

Рис. 15. Распределение давления $p - p_{\infty}$ на поверхности ЭУ при $U_{\infty} = 32\, м/с$ для варианта $P_{опт}$

В таблице 2 показана зависимость модулей аэродинамической силы и вращательного момента от скорости набегающего потока для оптимального варианта $P_{опт}$.

Таблица 2

Модули аэродинамической силы и вращательного момента

U_{∞}, $м/с$	Модуль аэродинамической силы, *Н*	Модуль вращательного момента, *Н*�*м*
5	73.85	12.41
10	295.58	50.05
25	1848.4	314.36
32	3029.4	515.09

4. Заключение

В данной работе представлены результаты численного моделирования обтекания узла энергетической установки с вертикальной осью вращения на основе уравнений динамики сжимаемой вязкой среды с использованием техники предобусловливания для обеспечения эффективных расчетов в условиях низких скоростей обтекания. Работа направлена на определение оптимальной формы узла лопастей и основана на технологии моделирования, включающей все этапы: создание САПР-модели на основе выбранной параметризации, построение поверхностных и объемных сеток заданного уровня разрешения, проведение параллельных расчетов с помощью эффективного исследовательского программного комплекса NOISEtte и визуализация результатов на современных стереоустановках. В итоге получены аэродинамические характеристики для узла лопастей ЭУ с вариацией геометрических параметров. В заданном диапазоне скоростей набегающего потока найдена область параметров, которая определяет практически оптимальную форму узла установки с точки зрения максимизации суммарного вращательного момента при обтекании узла потоком воздуха с заданной скоростью.

Многовариантные достаточно трудоемкие расчеты обтекания энергоустановки проводились на вычислительной системе К-100 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН в режиме многопроцессорных параллельных вычислений с помощью библиотеки MPI.

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность за помощь в выполнении данной работы Т.К. Козубской, зав. сектором вычислительной аэроакустики Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, и в особенности сотрудникам сектора П.А. Бахвалову, А.В. Горобцу, А.П. Дубеню, В.Г. Бобкову.

Библиографический список

1. Бондарев А.Е., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б. Разработка и организация математического моделирования обтекания неподвижной лопатки энергетической установки // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2014. № 60. 19 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2014-60

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. Организация разведочного поиска оптимальной формы узла лопастей энергоустановки // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 74. 21 с. URL: http://keldysh.ru/papers/2016/prep2016_74.pdf

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 узла лопастей сложной формы в энергетической установке // Журнал «Научная визуализация», 2015, т. 7, № 4, С. 1–12.

4. Андреев С.В., Бондарев А.Е., Бондаренко А.В., Галактионов В.А., Желтов С.Ю., Жуков В.Т., Иловайская Е.Б., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Ососков М.В., Феодоритова О.Б. Моделирование и визуализация работы энергетической установки сложной формы. Матем. моделирование, 2016, т. 28, № 9, С.125–136.

5. OpenFOAM http://www.openfoam.com

6. Абалакин И.В., Бахвалов П.А., Горобец А.И., Дубень А.П., Козубская Т.К. Параллельный программный комплекс NOISEtte для крупномасштабных расчетов задач аэродинамики и аэроакустики // Вычисл. методы и программирование. 2012. Т. 13. С. 110-125.

7. Абалакин И.В., Бобков В.Г., Козубская Т.К. Реализация метода расчета течений с малыми числами Маха в программном комплексе NOISEtte // Матем. моделирование, 29:4 (2017), С. 101–112.

8. Turkel E. Preconditioning Techniques in Computational Fluid Dynamics // Annual Review of Fluid Mechanics. 1999, v.32, pp. 385-416.

9. Гибридный вычислительный кластер K-100 URL: http://www.kiam.ru/MVS/resourses/k100.html