

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

"Воронежский государственный технический университет"

(Кафедра нефтегазового оборудования и транспортировки)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ
НА ПЛАТФОРМЕ ANSYS WORKBENCH**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению практических работ по дисциплине
"Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли"
для студентов направления подготовки 21.04.01 "Нефтегазовое дело"
(программы «Моделирование и оптимизация рабочих процессов
в энергетических системах газонефтепроводов» и "Нефтегазовое дело")
всех форм обучения**

Воронеж 2021

УДК 681.3.06 (07)
ББК 32.97я7

Составители:

д-р техн. наук С. Г. Валюхов
канд. техн. наук Д. Н. Галдин
д-р техн. наук А. В. Кретинин

Моделирование и расчет на платформе ANSYS Workbench: методические указания к выполнению практических работ по дисциплине "Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли" для студентов направления подготовки 21.04.01 "Нефтегазовое дело" (программы «Моделирование и оптимизация рабочих процессов в энергетических системах газонефтепроводов» и "Нефтегазовое дело") всех форм обучения/ ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"; сост.: С. Г. Валюхов, Д. Н. Галдин, А. В. Кретинин. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. 26 с.

Целью указаний является выработка навыков работы с инструментарием ANSYS Workbench, применение современных расчетных комплексов для решения задач оптимизационного проектирования

Предназначены для студентов направления подготовки 21.04.01 "Нефтегазовое дело" (программы «Моделирование и оптимизация рабочих процессов в энергетических системах газонефтепроводов» и "Нефтегазовое дело") всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_ПР_ММ.pdf

Ил. 15. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.

УДК 681.3.06 (07)
ББК 32.97я7

Рецензент - Д. П. Шматов, канд. техн. наук, доц.
кафедры ракетных двигателей ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ТЕХНОЛОГИЯ ANSYS DESIGNXPLOER

Основным средством выполнения функций оптимизации в среде инженерного анализа ANSYS является программный модуль DesignXplorer.

Технология ANSYS DesignXplorer позволяет осуществлять управление параметрами для прогнозирования влияния параметрических или геометрических изменений на конструкцию. Совокупность технологии ANSYS DesignXplorer и инструментов для выполнения междисциплинарных расчетов ANSYS делает выполнение параметрического анализа возможным практически для каждого расчета.

Модуль обеспечивает проведение анализа планирования эксперимента для любого расчета, выполненного в среде ANSYS Workbench, в том числе, при наличии CAD-параметров.

Программное обеспечение ANSYS DesignXplorer поддерживает все области физики, доступные из схемы проекта ANSYS Workbench: механика деформируемого твердого тела (как неявная, так и явная), динамика жидкостей и газов, междисциплинарные расчеты. Также поддерживается комбинированный анализ, при котором расчеты из разных областей физики выполняются независимо или в сопряженном виде.

В модуле DesignXplorer предусмотрены следующие варианты оптимизационных исследований:

- прямая оптимизация;
- параметрические исследования;
- построение поверхностей отклика;
- оптимизация по поверхностям отклика;
- анализ 6-Сигм.

Прямая оптимизация (*Direct Optimization*) приведена на рис. 1.

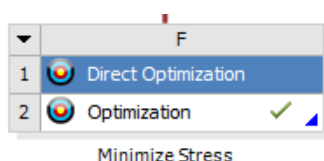


Рис. 1. Прямая оптимизация

- оперативное изменение критериев оптимизации и повторный запуск затруднительны;

- процесс и результаты оптимизации основаны на реальных решениях.

Основные этапы процедуры:

- определение области оптимизации (Optimization Domain);
- установка соотношений входных параметров (Input Parameter Relationships);
- определение целей и ограничений (Objectives and Constraints);

- выбор методов оптимизации (Optimization methods);
- пост-обработка (Convergence and Post-processing).

На этапе определения области оптимизации устанавливаются граница и типы параметров, а также реализуется возможность масштабирования интересующей области.

При установке соотношений входных параметров могут быть исключены незначащие / неосуществимые комбинации входных значений, которые приведены на рис. 2.

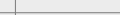
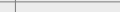
Optimization			2	Name	Lower Bound	Upper Bound	
Objectives and Constraints			3	P1 - WB_Thickness	1	3	
Minimize P3			4	P2 - WB_Radius	108	132	
Seek P4 = 3.5			5	Parameter Relationships			
Domain			6	Name	Left Expression	Operator	Right Expression
Microsoft Office Excel (A1)			7	P1 <= P2/60	P1	<=	P2/60
P1 - WB_Thickness	☒		8	P2 >= -60*P1+180	P2	>=	-60*P1+180
P2 - WB_Radius	☒		*	New Parameter Relationship	New Expression	<=	New Expression
Parameter Relationships							
P1 <= P2/60	☒						
P2 >= -60*P1+180	☒						

Рис. 2. Исключение незначущих / неосуществимых комбинаций входных значений

Далее определяются одна или несколько целей и ограничения с учетом следующего:

- некоторые алгоритмы не поддерживают множество целей;
- вес может быть отнесен к каждой из задач.

Типы целей:

- МИНИМУМ,
- МАКСИМУМ,
- ПОИСКОВАЯ.

Типы ограничений:

- значение $\leq$ предел;
- значение $\geq$ предел;
- нижний предел $\leq$ значение $\leq$ верхний предел.

На рис. 3 приведен пример оптимизации.

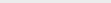
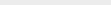
	Enabled	Monitoring
  Optimization		
 Objectives and Constraints		
 Minimize P3; $P3 \leq 9.85E+06$		
 Seek $P4 = 3.5$; $2.15 \leq P4 \leq 4.2$		

Рис. 3. Пример оптимизации

Параметрические исследования (*Parameters Correlation*) позволяют создавать матрицы корреляции, матрицы определения, планы разброса

корреляции и диаграммы чувствительности для определения входных параметров, кажущихся незначительными.

При планировании эксперимента количество расчетных точек увеличивается, что может понизить эффективность аналитического процесса. При этом рекомендуется исключить незначительные входные параметры из выборки.

Параметрические исследования эффективны, когда входных параметров больше, чем 15.

Поверхности отклика (*Response Surface*) – функции различной природы, где параметры выхода описаны с точки зрения входных параметров.

Поверхности отклика обеспечивают аппроксимированные величины параметров выхода, всюду в расчетном пространстве, без необходимости выполнения полного решения.

Построение поверхностей отклика целесообразно для задач, использующих до ~10-15 входных параметров.

При оптимизации на основе поверхностей отклика (*Response Surface Optimization*):

- используется планируемый эксперимент и поверхности отклика;
- обеспечиваются возможности оперативного изменения критериев оптимизации и повторного запуска;
- результаты оптимизации верифицируются фактическими решениями.

Метод анализа «б-сигм» предполагает фиксированное значение каждой входной величины и назначает коэффициент безопасности для учета данных предположений (детерминированный подход).

При этом используется алгоритм, учитывающий разброс точек на входе и обеспечения анализа влияния на отклик системы (вероятностный подход).

Цель планирования эксперимента (*Design of Experiments (DOE)*) состоит в получении представительной выборки для построения поверхности отклика, и в дальнейшем, проведении ее оптимизации.

Точность построенной поверхности отклика будет значительно зависеть от схемы DOE, и, особенно, ряда вычисленных точек проекта.

DesignXplorer предлагает несколько схем DOE. Точки проекта выбираются автоматически для эффективного исследования параметрического пространства.

Для детального изучения области оптимума и участков поверхности отклика со значительной кривизной линейная модель становится неадекватной. В таких случаях для математического описания может быть достаточно полинома второго порядка, реже третьего порядка, полученного используя планы соответственно второго и третьего порядков.

DesignXplorer предлагает несколько методов оптимизации (MOGA, NLPQL, однокритериальные и многокритериальные генетические алгоритмы, MISQP), которые могут быть использованы как для решения многокритериальных задач, так и задач с единственной целевой функцией. Для

многокритериальных задач доступна опция визуализации фронта Парето в 2D- и 3D-режимах. Группа методов последовательного квадратичного программирования (SQP, MISQP, NLPQL) является одними из наиболее распространённых и эффективных оптимизационных алгоритмов общего назначения, основной идеей которых является последовательное решение задач квадратичного программирования, аппроксимирующих данную задачу оптимизации.

Алгоритмы обеспечивают нахождение локального минимума при наличии ограничений в виде равенств и/или неравенств.

Для оптимизационных задач без ограничений алгоритмы преобразуются в метод Ньютона поиска точки, в которой градиент целевой функции обращается в ноль. Для решения исходной задачи с ограничениями-равенствами методы преобразуются в специальную реализацию ньютоновских методов решения системы Лагранжа.

Учитывая использование апробированных оптимизационных алгоритмов (метод последовательного квадратичного программирования Шитковского NLPQL, генетические алгоритмы и др.), применение модуля DesignXplorer в качестве базового средства оптимизации элементов МНН является обоснованным, и представляется целесообразным вследствие универсальности и возможности решения задач широкого спектра.

1. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

ПРОЦЕДУРА ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ НЕЗАМКНУТЫХ РАСЧЕТНЫХ БЛОКОВ

Далее изложены основные принципы работы с модулем DesignXplorer на примере оптимизации рабочего колеса магистрального нефтяного насоса с подачей 7500 м³/ч и напором 249 метров.

Вербальная постановка задачи оптимизации состоит в следующем - подобрать значения следующих геометрических параметров, определяющих профиль лопатки рабочего колеса: углы установки лопасти на входе и выходе (β_{1s} – угол установки лопасти на входе на покрывном диске, и β_2 – угол установки лопасти на выходе) такие, что гидравлический КПД насоса стремится к максимальному значению. При этом кавитационный запас насоса является ограничением и будет вычисляться для наилучшего варианта лопасти.

Сформированная параметризованная модель анализа, включающая инструменты Vista CPD, BladeGen, Geometry, TurboGrid и CFX, приведена на рис. 4:

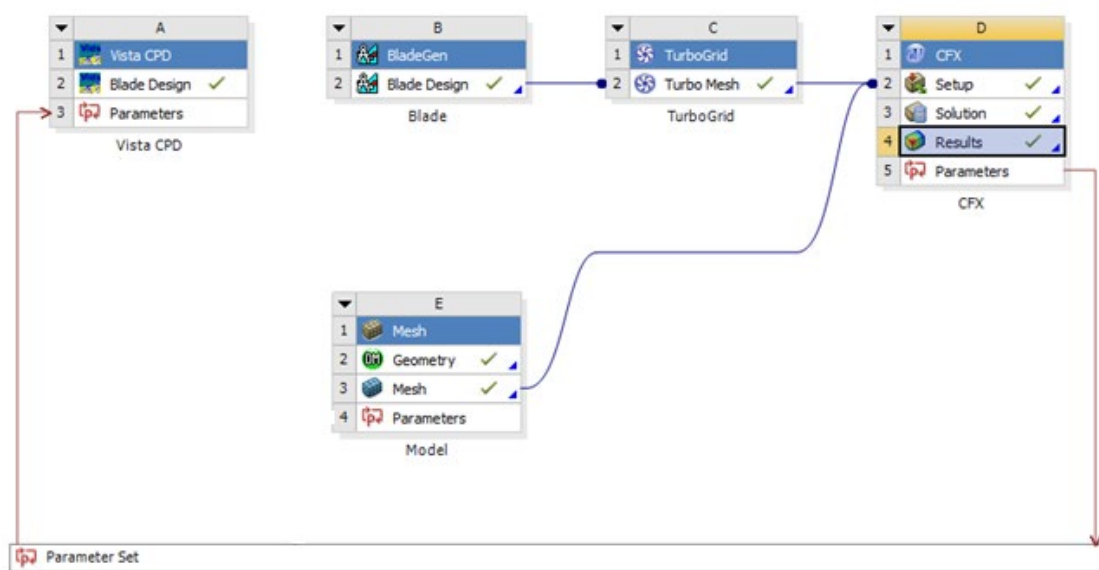


Рис. 4. Расчетный блок

Расчетный блок состоит из отдельных расчетных модулей. В модуле А используется инструмент Vista CPD для формирования меридионального сечения лопаточного колеса. Далее эти данные передаются в модуль В, где с помощью BladeGen проектируется лопастная система с лопатками двойной кривизны. Затем эти данные передаются в модуль С, где с помощью инструментов TurboGrid создается расчетная сетка. Далее сеточная модель колеса передается для моделирования в CFX (модуль D). Кроме того, готовые геометрии подвода, направляющего аппарата и отвода загружаются в модуль Е, где средствами DM и Mesh создаются сеточные модели и подгружаются в CFX

Pre модуля D. С помощью инструмента CFX Pre формируются граничные условия (на входе, выходе, стенках, интерфейсах), параметры моделирования (модель турбулентности, зависимости плотности, вязкости, давление насыщенных паров и пр.) и передаются в решатель CFX. В решателе задаются параметры алгоритма решения сеточных уравнений и запускается процесс решения. После сходимости системы сеточных уравнений результаты передаются в CFX Post, где обрабатываются и выводятся в качестве выходных критериев оптимизации.

Нужно обратить внимание, что между блоками Vista CPD и BladeGen в поле проекта не прорисована двунаправленная связь, как, например, между BladeGen и TurboGrid. Это значит, что расчетный блок, изображенный на рис. 1, является параметрически незамкнутым и не обеспечивает прямой интеграции с блоком оптимизации DesignXplorer. Поэтому для его использования разработана нижеследующая пошаговая инструкция.

Для углов установки лопасти осуществлялись параметрические исследования по двум факторам β_{1s} и β_2 . План эксперимента для параметрических исследований формируется с использованием ЛП_т-алгоритма. Для насоса МНН 7500.249 сгенерированы 16 точек ЛП_т-последовательности для углов установки лопасти в следующей области факторного пространства $\beta_{1s} \in [11, 21]$ и $\beta_{2s} \in [17, 27]$. Координаты этих 16 точек следующие: (16,22), (18.5,19.5), (13.5,24.5), (14.75,20.75), (19.75,25.75), (17.25,18.25), (12.25,23.25), (12.875,20.125), (17.875,25.125), (20.375,17.625), (15.375,22.625), (14.125,18.875), (19.125,23.875), (16.625,21.375), (11.625,26.375), (11.9375,21.6875).

Угол на входе – *shroudbladeangle* – первый параметр в скобках

Угол на выходе – под заголовком *trailingedgebladeangles* параметр *bladeangle* – второй параметр в скобках.

Критерии оптимизации вычисляются в программной среде ANSYS CFX.

Далее приводятся результаты параметрических исследований зависимости КПД насоса МНН 7500.249 от углов установки лопасти на входе и выходе. Результаты расчета в ANSYS CFX в 16 точках плана эксперимента представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета

№	β_{1s}	β_2	η_r
1	16	22	0.947524
2	18.5	19.5	0.942664
3	13.5	24.5	0.94536
4	14.75	20.75	0.9495
5	19.75	25.75	0.93047
6	17.25	18.25	0.946543
7	12.25	23.25	0.9837
8	12.875	20.125	0.951928

№	β_{1s}	β_2	η_r
9	17.875	25.125	0.937205
10	20.375	17.625	0.938231
11	15.375	22.625	0.946841
12	14.125	18.875	0.951914
13	11.625	26.375	0.9402
14	16.625	21.375	0.946316
15	19.125	23.875	0.936129
16	11.9375	21.6875	0.948014

После этого непосредственно можно переходить к оптимизации в среде ANSYS Workbench с использованием модуля DesignXplorer.

Запускаем ANSYS Workbench 15.0. В панели инструментов Toolbox раскрываем вкладку Design Exploration, далее выбираем Response Surface Optimization и дважды кликаем левой кнопкой мыши (ЛКМ). В поле Project Schematic появляется структура нашей модели.

В поле Project Schematic дважды кликаем ЛКМ по прямоугольнику Parameter Set.

С помощью ЛКМ входим в поле New Name строки New input parameter столбца Parameter Name таблицы Outline of All Parameters. Вводим имя параметра, например, Betta1. Справа в поле New Expression вводим значение угла, например, 16.

Аналогичным образом в строке New input parameter вводим второй параметр Betta2 и назначаем его значение, например, 22. Далее в строке output parameter, в столбце Value вводим сразу произвольное значение выходного параметра, например, 1.

В верхнем меню ANSYS нажимаем кнопку Project.

Нажимаем ЛКМ на поле Design of Experiments модуля Response Surface Optimization. В появившейся таблице Properties of Outline: Design of Experiment меняем тип плана эксперимента на Custom+Sampling. В нижеследующей строке оставляем число точек в плане эксперимента Total Number of Samples равное 1/

Нажимаем ЛКМ на поле Design of Experiments модуля Response Surface Optimization. Нажимаем правую кнопку мыши ПКМ. В выпадающем меню выбираем Update/

Дважды кликаем ЛКМ по полю Design of Experiments модуля Response Surface Optimization и входим в детализацию плана эксперимента.

В строке № 2 1(DP0) столбца P3 - Output Parameter таблицы Table of Schematic A2 нажимаем ПКМ и в выпадающем меню выбираем Set All Output Values as Editable.

Далее в таблицу Table of Schematic A2 переносим все значения из таблицы 1

Возвращаемся в общую структуру проекта, нажав в верхнем меню кнопку Project. В таблице Properties of Outline: Design of Experiment меняем число точек

в плане эксперимента Total Number of Samples на 16. Обновляем план эксперимента с помощью кнопки Update.

Нажимаем ЛКМ на поле Response Surface модуля Response Surface Optimization. В появившейся таблице Properties of Outline: Response Surface выбираем тип поверхности отклика Neural Network.

В этой же таблице оставляем число нейронов в сети равное по умолчанию 3 (Number of Cells).

Нажимаем ЛКМ на поле Response Surface модуля Response Surface Optimization. Нажимаем правую кнопку мыши ПКМ. В выпадающем меню выбираем Update.

Дважды кликаем ЛКМ по полю Optimization модуля Response Surface Optimization и входим в детализацию постановки задачи оптимизации. В таблице выделяем ЛКМ поле Objectives and Constraints. Тогда ниже появляется таблица.

Задаем выходной параметр P3 (рис. 5),

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
*		Select a Parameter					

Рис. 5. Значение выходного параметра

направление оптимизации – максимизация (рис. 6).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	P3	P3 - Output Parameter	No Objective		No Constraint		
*		Select a Parameter	No Objective				

Рис. 6. Значение направления оптимизации

Возвращаемся в главное окно проекта. Нажимаем ЛКМ на поле Optimization модуля Response Surface Optimization. В появившейся таблице Properties of Outline: Method выбираем метод последовательного квадратичного программирования NLPQL.

Нажимаем ЛКМ на поле Optimization модуля Response Surface Optimization. Нажимаем правую кнопку мыши ПКМ. В выпадающем меню выбираем Update. Запускается процесс оптимизации поверхности отклика.

Дважды кликаем ЛКМ по полю Optimization модуля Response Surface Optimization. Результаты оптимизации представлены в таблице Table of Schematic A4: Optimization, приведенной на рис. 7.

Table of Schematic A4: Optimization						
	A	B	C	D	E	F
1	Optimization Study					
2	Maximize P3	Goal, Maximize P3 (Default importance)				
3	Optimization Method					
4	NLPQL	The NLPQL method (Nonlinear Programming by Quadratic Lagrangian) is a gradient-based algorithm to provide a refined, local, optimization result. It supports a single objective, multiple constraints and is limited to continuous parameters. The starting point must be specified to determine the region of the design space to explore.				
5	Configuration	Approximate derivatives by Central Difference and find 3 candidates in a maximum of 20 iterations.				
6	Status	Converged after 30 evaluations.				
7	Candidate Points					
8		Starting Point	Starting Point (verified) (DP 0)	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
9	P1 - Betta1	16		11	11	14,785
10	P2 - Betta2	22		17	17,727	21,139
11	P3 - KPD	✖ 0,95148	★ ★ ★ 1	★ 0,96542	★ 0,96496	⇒ 0,95503

Рис. 7. Результаты оптимизации

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

ПРОЦЕДУРА ОПТИМИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ЗАМКНУТЫХ РАСЧЕТНЫХ БЛОКОВ

Рассмотрим пример оптимизации в ANSYS DesignXplorer с использованием параметрически замкнутых в ANSYS Workbench расчетных блоков.

Методика оптимизационного расчета изложена на примере оптимизации отвода рабочего колеса магистрального нефтяного насоса с подачей 7500 м³/ч и напором 249 метров. Вербальная постановка задачи оптимизации состоит в следующем - подобрать значения следующих геометрических параметров, определяющих профиль отвода: ширина отвода на входе и угол вращения корпуса (casing rotation angle) такие, что гидравлический КПД насоса стремится к максимальному значению.

Сформированная параметризованная модель анализа, включающая инструменты BladeGen, Geometry, TurboGrid и CFX, приведена на рис. 8.

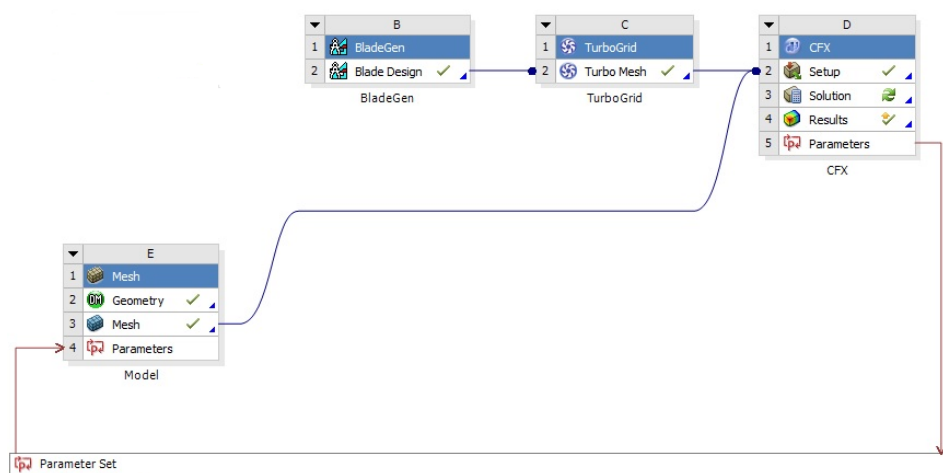


Рис. 8. Параметризованная модель анализа

Отличие данного расчетного блока от параметрически незамкнутого состоит в том, что геометрия лопатки не меняется при параметрических исследованиях и оптимизации, меняются параметры отвода, который создан в модуле Geometry, между которым и модулем CFX прорисована в проекте двунаправленная связь. Это значит, что после замены исходных параметров в таблице Parameter Set достаточно нажать кнопку Update Project, и весь расчет пройдет автоматически без вмешательства оператора.

Опишем процедуру прямой оптимизации с использованием параметрически замкнутого расчетного блока.

1. Запускаем ANSYS Workbench 15.0.

2. Вывести на рабочее поле *Workbench* элемент *VistaCPD*, запустить *BladeDesing*. Для того чтобы ввести исходные данные для расчета рабочего

колеса, в левом верхнем углу окна выбрать *Impeller*. На вкладке *Operating conditions* в поле *Rotational speed* ввести частоту вращения 2915 об/мин, в поле *Volume Flow Rate* ввести расход воды 3750 м³/ч, в поле *Density* ввести плотность воды 1000 кг/м³, в поле *Head Rise* ввести напор 249 м, остальные поля оставить без изменения.

3. Нажать кнопку *Calculate*.

4. Запустить *Blade Design* и из контекстного меню выбрать команду *Transfer Data to New – TurboGrid*. Будет создан элемент *TurboGrid*. Далее запустить *TurboMesh* и из контекстного меню выбрать команду *Transfer Data to New – CFX*.

5. Сетку для улитки из элемента *Mesh* соединить с CFX.

6. Нажать пункт верхнего меню *Update Project*.

7. Зайти в *Setup*, перейти в турборежим, меню *Tools – Turbomode*, установить тип машины – насос, *MachineType – Pump*, выбрать ось вращения *Z*, *RotationAxis – Z*, выбрать стационарный расчет *Type – Steady State*. Нажать *Next*, установить параметры зон, выбрать *RI – вращающаяся Type – Rotating*, частота *Value 2915 об/мин*, в элементе *Volumes* выбрать *Passage*, добавить зону, для этого правой кнопкой мыши на *Components* выбрать *Add Component...*, в поле *Name* ввести *S1*, *Type – Stationary – не вращающаяся*, на элементе сетке относящимся к улитке, в элементе *Volumes* выбрать *B75*. Нажать *Next*, установить параметры течения: среда – вода *Fluid – Water*, относительное давление *Reference Pressure 0 атм*, выбрать *Inflow: Stat. FrameTot. Pressure – RelativePressure*, *Value 400000 Па*, *Outlet: Mass Flow Rate* массовый расход через машину *Mass Flow – PerMachine*, *Mass Flow Rate 1041,67 кг/с*. Нажать три раза *Next*, потом *Finish*. Перейти в обычный режим.

8. Зайти в настройки решателя, *Solve control*: ввести число итераций *Max. Iteration 600*, нажать *Ok*.

9. Провести расчет в CFX. Запустить расчет, левой кнопкой мыши на *Solution* в элементе *CFX*. Появится окно *Define Run*, запустить *Start Run*. Запустится расчет.

10. Запускаем инструмент Results (CFX Post). Запускаем Macro Calculator и формируем Pump Report. Далее во вкладке Expressions находим искомый критерий эффективности - гидравлический КПД (effpower), нажимаем на него правой кнопкой мыши и в выпадающем окне выбираем Use as Output parameter in Workbench. В поле проекта прорисовывается структура, которая приведена на рис. 1.

11. В панели инструментов Toolbox раскрываем вкладку Design Exploration, далее выбираем Direct Optimization и дважды кликаем левой кнопкой мыши (ЛКМ). В поле Project Schematic появляется структура нашей модели.

Дважды кликаем ЛКМ в поле Optimization модуля Direct Optimization. В таблице Analysis Schematic F2: Optimization в столбце Enabled оставляем галочки у тех параметров, которые являются варьируемыми.

Выделяя в столбце A имена этих переменных, в появившейся таблице Properties of Outline A8 можно установить диапазоны изменения этих переменных. При постановке задачи оптимизации необходимо также выбрать критерий оптимизации, установить направление оптимизации (максимизация или минимизация) и установить ограничения (при наличии).

12. Возвращаемся в Workbench нажатием кнопки Project в верхнем меню. Кликаем ЛКМ в поле Optimization модуля Direct Optimization. В появившейся таблице Properties of Outline: Method в строке Method Name необходимо выбрать название используемого метода оптимизации, например, метод последовательного квадратичного программирования NLPQL.

Нажимаем кнопку Update Project. Запускается процесс оптимизации с использованием прямых обращений к параметрически замкнутой в ANSYS Workbench оптимизационной математической модели (расчетному блоку).

В графе C Monitoring таблицы Analysis Schematic F2: Optimization можно увидеть графики изменения варьируемых параметров и критериев в процессе оптимизационного расчета, а в таблице Table of Schematic F2: Optimization приведена вся история оптимизационного поиска.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В настоящем примере рассмотрена процедура параметрических исследований технологических процессов (ТП) формования экспериментальных образцов полимерных композиционных материалов для автоматизированной выкладки (ПКМAB) с заданными эксплуатационными характеристиками с помощью инструмента Response Surface

В качестве исходных данных приняты рабочие характеристик процессов, реализованные в структуре рассматриваемых ТП на базе Воронежского авиационно-строительного общества (ВАСО).

При планировании эксперимента были заданы следующие диапазоны изменения внешних факторов: температура формования (T_f) 160 – 180 °С, время формования (B_f) 120 – 210 мин, давление формования (P_f) 2 – 7 кгс/см², давление ролика (P_r) 7,23 – 13,25 кгс/см².

В качестве контролируемых использовались следующие параметры: температура окружающей среды, влажность воздуха, температура нагрева оснастки, натяжение препрега.

По итогам механических испытаний определены значения следующих прочностных характеристик материала:

- предел прочности (при комнатной температуре), МПа ($Sig1$);
- модуль упругости (при комнатной температуре), ГПа ($E1$);
- предел прочности при сжатии (при комнатной температуре), МПа ($Sig3$);
- предел прочности (сдвиг в плоскости листа), МПа ($Sig4$);
- модуль упругости (сдвиг в плоскости листа), ГПа ($E2$);
- предел прочности (межслоевой сдвиг), МПа ($Sig6$);
- предел прочности при отрыве от сот, МПа ($Sig7$).

Составлен план эксперимента с использованием процедуры Design of Experiments; создано 9 параметров, из которых 4 относятся к входным факторам, а 7 к зависимым параметрам.

План эксперимента, представленный на рис. 9, задан в табличном виде, используя окно Table of Schematic: Design of Experiments (Custom).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Name	P1 - Pr	P2 - Tf	P3 - Pf	P12 - Bf	P5 - Sig1	P6 - E1	P7 - Sig3	P8 - Sig4	P9 - E2	P10 - Sig6	P11 - Sig7
2	1 (DP 0)	7,23	180	5,5	180	1626,1	137,96	997,5	136,39	15,25	61,39	4,77
3	2	8,27	170	2	180	1887,2	135,56	1004,7	154,27	15,69	58,19	6,59
4	3	10,48	180	7	180	1759,6	131,81	892,2	160,12	16,72	89,87	6,03
5	4	13,65	180	2	120	1706,5	125,24	820,2	134,74	14,4	58,04	6,18
6	5	10,48	160	3	210	2038,8	146,83	917,4	175,06	14,4	86,28	7,27
7	6	7,23	180	2	180	1661,3	133,63	967,3	149,54	15,54	58,32	6,61
8	7	8,27	170	5,5	180	1723,5	136,14	998,7	142,75	15,37	60,41	4,93
9	8	10,48	170	7	120	1746,9	127,46	827,7	139,63	14,83	62,46	5,87
10	9	13,65	170	3	210	2097,6	146,92	986,3	176,32	15,97	87,93	7,35
11	10	8,27	180	3	210	1638,5	141,16	973,8	163,45	15,62	77,59	7,02
12	11	7,23	160	2	120	1538,7	114,77	754,1	118,88	13,8	51,14	5,12
13	12	8,27	160	7	180	1753,2	129,37	839,8	143,73	14,97	67,89	5,91
14	13	10,48	160	5,5	120	1513,5	118,93	789,4	123,19	13,76	57,39	4,93
15	14	13,65	160	3	180	1995,7	144,78	882,5	169,98	14,28	79,73	7,05
16	15	7,23	170	2	120	1657,3	123,94	803,3	132,11	14,37	59,61	5,68
*	New Design Point											

Рис. 9. План эксперимента

Предел прочности (при комнатной температуре), Sig1

Контролируемые параметры: температура формования (Tf), время формования (Bf), давление ролика (Pr).

Коэффициент детерминации параметра предел прочности для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным $R^2 \approx 0.97752$, т.е. практически в 97,75 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Критерий *Sig1* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров температура формования (Tf), время формования (Bf), давление ролика (Pr).

Критерий *E1* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров температура формования (Tf), время формования (Bf), давление ролика (Pr).

Предел прочности при сжатии (при комнатной температуре), Sig3

Контролируемые параметры: температура формования (Tf), время формования (Bf), давление формования (Pf)

Коэффициент детерминации параметра предел прочности при сжатии (при комнатной температуре) для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным $R^2 \approx 0.97559$, т.е. практически в 97,56 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Критерий *Sig3* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров температура формования (Tf), время формования (Bf), давление формования (Pf).

Предел прочности (сдвиг в плоскости листа), Sig4

Контролируемые параметры: давление ролика (Pr), время формования (Bf), давление формования (Pf)

Коэффициент детерминации параметра предел прочности (сдвиг в плоскости листа) для Response Surface в виде полного квадратичного полинома

получился равным $R^2 \approx 0.96049$, т.е. практически в 96,05 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Критерий *Sig4* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров давление ролика (Pr), время формования (Bf), давление формования (Pf).

Модуль упругости (сдвиг в плоскости листа), E2

Контролируемые параметры: температура формования (Tf), время формования (Bf), давление формования (Pf)

Коэффициент детерминации параметра модуль упругости (сдвиг в плоскости листа) для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным $R^2 \approx 0.96711$, т.е. практически в 96,71 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Критерий *E2* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров температуры формования (Tf), времени формования (Bf), давления формования (Pf).

Предел прочности (межслоевой сдвиг), Sig6

Контролируемые параметры: температура формования (Tf), время формования (Bf), давление ролика (Pr).

Коэффициент детерминации параметра предел прочности (межслоевой сдвиг) для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным $R^2 \approx 0.98838$ т.е. практически в 98,84 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Критерий *Sig6* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров температуры формования (Tf), времени формования (Bf), давления ролика (Pr).

Предел прочности при отрыве от сот, Sig7

Контролируемые параметры: давление формования (Pf), время формования (Bf), давление ролика (Pr).

Коэффициент детерминации параметра Предел прочности при отрыве от сот для Response Surface в виде полного квадратичного полинома получился равным $R^2 \approx 0.98163$, т.е. практически в 98,16 % случаев изменение критериев в функции отклика является неслучайным и описывается полученным уравнением регрессии.

Критерий *Sig7* при средних значениях параметров чувствителен к изменению параметров давления формования (Pf), времени формования (Bf), давления ролика (Pr).

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО КАВИТАЦИОННОГО ЗАПАСА МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЯНОГО НАСОСА

1. Задаем значение температуры перекачиваемой среды: например, $T=25^{\circ}\text{C}$.

2. Запустите *ANSYS Workbench 14.5*.

3. Вывести на рабочее поле *Workbench* элемент *VistaCPD*, запустить *Blade Desing*. Для того чтобы ввести исходные данные для расчета рабочего колеса, в левом верхнем углу окна выбрать *Impeller*. На вкладке *Operating conditions* в поле *Rotational speed* ввести частоту вращения 2915 об/мин, в поле *VolumeFlowRate* ввести расход воды 3750 м³/ч, в поле *Density* ввести плотность воды 1000 кг/м³, в поле *Head Rise* ввести напор 249 м, остальные поля оставить без изменения.

4. Нажать кнопку *Calculate*.

5. Запустить *Blade Desing* и из контекстного меню выбрать команду *Transfer Data to New – TurboGrid*. Будет создан элемент *TurboGrid*. Далее запустить *TurboMesh* и из контекстного меню выбрать команду *Transfer Data to New – CFX*.

6. Сетку для улитки из элемента *Mesh* соединить с CFX.

7. Нажать пункт верхнего меню *Update Project*.

8. Зайти в *Setup*, перейти в турборежим, меню *Tools – Turbomode*, установить тип машины – насос, *MashineType – Pump*, выбрать ось вращения *Z*, *RotationAxis - Z*, выбрать стационарный расчет *Type – SteadyState*. Нажать *Next*, установить параметры зон, выбрать *R1– вращающаяся Type - Rotating*, частота *Value 2915 об/мин*, в элементе *Volumes* выбрать *Passage*, добавить зону, для этого правой кнопкой мыши на *Components* выбрать *Add Component...*, в поле *Name* ввести *S1*, *Type–Stationary* – не вращающаяся, на элементе сетке относящимся к улитке, в элементе *Volumes* выбрать *B75*. Нажать *Next*, установить параметры течения: среда – вода *Fluid - Water*, относительное давление *ReferencePressure 0 атм*, выбрать *Inflow: Stat. Frame Tot. Pressure - Relative Pressure*, *Value 400000 Па*, *Outlet: Mass Flow Rate* массовый расход через машину *MassFlow – PerMachine*, *MassFlowRate 1041,67 кг/с*. Нажать три раза *Next*, потом *Finish*. Перейти в обычный режим.

9. Зайти в настройки решателя, *Solve control*: ввести число итераций *Max. Iteration 600*, нажать *Ok*.

10. Провести расчет в CFX. Запустить расчет, левой кнопкой мыши на *Solution* в элементе *CFX*. Появится окно *DefineRun*, запустить *StartRun*. Запустится расчет.

11. По окончании расчета снова зайти в *Setup*. В настройке проекта *General* выберите правой кнопкой мыши *Simulation-Materials* и выберите *Import Library Data*. Расширьте *Water Data*. Не отпуская клавишу *Ctrl*, выберите сразу два вещества *Water at 25 C* и *Water Vapour at 25 C*. Нажимаем *Ok*.

12. Модифицируем *Domain R1*. Конфигурируем следующие установки, представленные на рис. 10:

Tab	Setting	Value
Basic Settings	Fluid and Particle Definitions	Liquid Water
	Fluid and Particle Definitions > Liquid Water > Material	Water at 25 C ^[1]
	Fluid and Particle Definitions	Water Vapor
	Fluid and Particle Definitions > Water Vapor > Material	Water Vapour at 25 C
Fluid Models	Multiphase > Homogeneous Model	(Selected) ^[2]
Fluid Pair Models	Fluid Pair > Liquid Water Water Vapor > Mass Transfer > Option	Cavitation
	Fluid Pair > Liquid Water Water Vapor > Mass Transfer > Cavitation > Option	Rayleigh Plesset
	Fluid Pair > Liquid Water Water Vapor > Mass Transfer	2e-6 [m]
	> Cavitation > Mean Diameter	
	Fluid Pair > Liquid Water Water Vapor > Mass Transfer > Cavitation > Saturation Pressure	(Selected)
	Fluid Pair > Liquid Water Water Vapor > Mass Transfer > Cavitation > Saturation Pressure > Saturation Pressure	3574 [Pa] ^[3]

Рис. 10. Конфигурация установок

13. Для входной границы модифицируем значения (рис. 11):

Tab	Setting	Value
Fluid Values	Boundary Conditions	Water Vapor
	Boundary Conditions > Water Vapor > Volume Fraction > Volume Fraction	0
	Boundary Conditions	Liquid Water
	Boundary Conditions > Liquid Water > Volume Fraction > Volume Fraction	1

Рис. 11. Модификация значений

14. Закрываем окно *Setup*. Открываем расчет левой кнопкой мыши на Solution в элементе *CFX*. Продолжаем расчет с начальными условиями Current Solution Data.

15. По окончании расчета заходим в *Results CFX Post*. Выбираем *Insert - Location- Isosurface* и делаем следующие установки (рис. 12):

Tab	Setting	Value
Geometry	Definition > Variable	Pressure
	Definition > Value	3574 [Pa]

Рис. 12. Установки после окончания расчета

Нажимаем *Apply*. На рис. 13 представлен результат выполнения этой операции

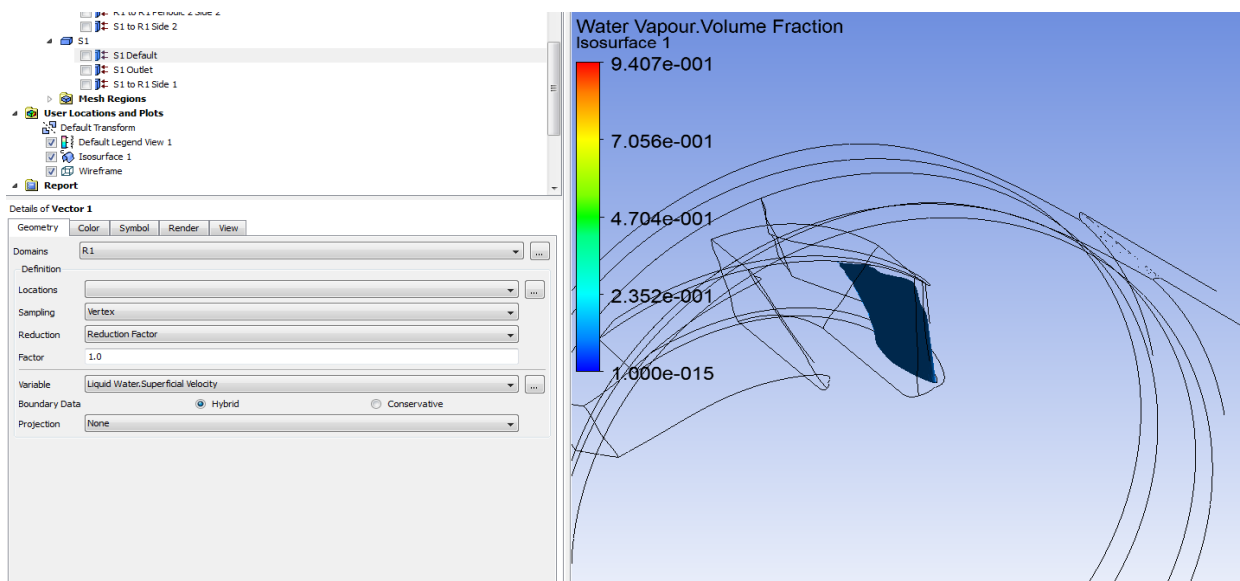


Рис. 13. Изолиния водяного пара с объемной долей 0.1

16. Далее, начиная с пункта 8 менять значение входного давления, выполнять расчеты по пунктам 8-15, определять параметры: напор (Head) и кавитационный запас (NPSH) (рис.14).

Name	Definition
Ptin	massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@Inlet
Ptout	massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@Outlet
Wden	996.82 [kg m ⁻³]
Head	(Ptout-Ptin)/(Wden*g)
NPSH	(Ptin- P _{vap})/(Wden*g)
Pvap	3574 [Pa]

Рис. 14. Таблица определения параметров

Гидравлический КПД вычисляется по формуле $\eta_z = \dot{m} \left(\frac{p_{0\text{вых}} - p_{0\text{вх}}}{\rho M_{\text{лон}} \omega} \right)$

17. Построить кавитационную характеристику насоса и по ней определить значение критического кавитационного запаса $\Delta h_{\text{кр}}$.

Далее приводится пример расчета критического кавитационного запаса для насоса с подачей 4500 м³/ч и напором 247 м.

В таблице приведены значения входного давления и соответствующие ему напор. Для каждого случая построена 3D модель изолиний, характеризующая водяной пар с соответствующей объемной долей.

Таблица 2

Кавитационная зависимость

Номер опыта	Входное давление (Па)	Напор (м)
1	240000	238,147
2	260000	239,77
3	270000	240,5
4	280000	241,07
5	290000	241,73
6	300000	242,181
7	320000	242,86
8	330000	243,127

Номер опыта	Входное давление (Па)	Напор (м)
9	350000	243,451
10	400000	243,75
11	500000	244,1
12	600000	244,345
13	750000	244,523
14	1000000	244,734
15	2000000	244,734

Кавитационная характеристика насоса имеет вид

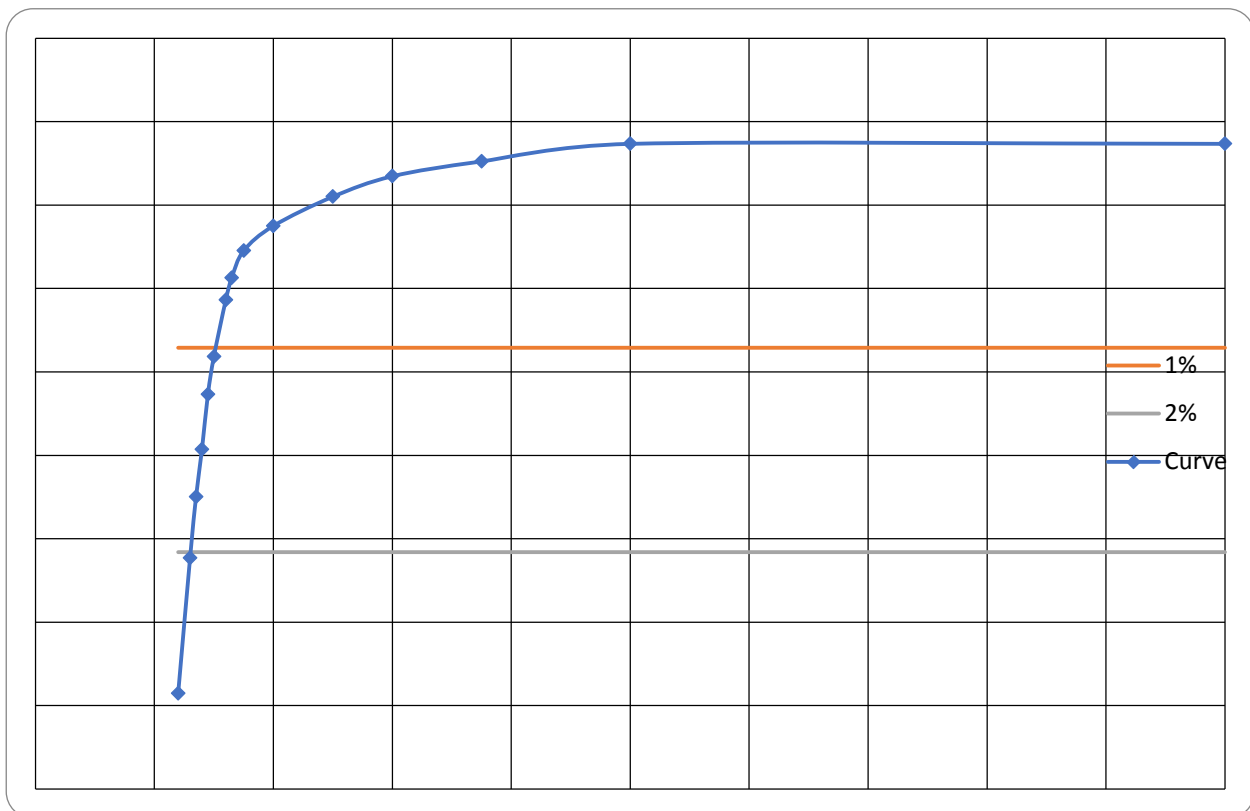


Рис. 15. Кавитационная характеристика насоса

Критический кавитационный запас насоса (такое значение напора жидкости на входе, при котором осуществляется 2% падение напора насоса) составляет 26,5 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящих методических указаниях представлены базовые сведения, необходимые для работы с программными модулями ANSYS CFX и DesignXplorer, реализующем комплекс процедур оптимизации в среде инженерного анализа ANSYS.

Сокращение сроков и повышение качества проектирования должно обеспечиваться путем автоматизации выполнения процедуры многокритериальной оптимизации при проведении гидравлических, прочностных, деформационных, тепловых и других видов расчетов высокотехнологичных изделий (процессов).

По итогам применения модуля DesignXplorer, реализующего методы численной оптимизации, достигаются следующие технико-экономические результаты:

- повышение качества выпускаемой продукции;
- учет индивидуальных требований заказчика готовой продукции;
- создание конкурентного преимущества за счет сокращения сроков выполнения заказов;
- изготовление опытной и серийной продукции мирового уровня;
- создание комфортных, способствующих плодотворному творческому процессу, условий труда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елисеев К.В. Вычислительная механика. Вычислительный практикум в системе ANSYS: учеб. пособие / К. В. Елисеев, А. К. Кузин, С. Г. Орлов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 90 с.
2. Release 11 Documentation for ANSYS.
3. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. - Изд-во: Либроком, 2009. - 272 с.
4. Валюхов С.Г., Кретинин А.В. Математическое моделирование гидродинамических процессов в проточной части центробежного насоса с использованием нейросетевых алгоритмов / Насосы. Турбины. Системы. 2011, № 1. С. 53-60.
5. Овсянников Б.В., Яловой Н.С. Моделирование и оптимизация характеристик высокооборотных насосных агрегатов. – М.: Машиностроение, 1992. 378 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Технология ansys designxplorer.....	3
1. Практическая работа № 1	
Процедура оптимизации с использованием параметрически незамкнутых расчетных блоков.....	7
2. Практическая работа № 2	
Процедура оптимизации с использованием параметрически замкнутых расчетных блоков.....	12
3. Практическая работа № 3	
Параметрические исследования технологических процессов.....	15
4. Практическая работа № 4	
Методика определения критического кавитационного запаса магистрального нефтяного насоса	18
Заключение.....	23
Библиографический список.....	24

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НА ПЛАТФОРМЕ ANSYS WORKBENCH

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ по дисциплине
"Математическое моделирование в задачах нефтегазовой отрасли"
для студентов направления подготовки 21.04.01 "Нефтегазовое дело"
(программы «Моделирование и оптимизация рабочих процессов
в энергетических системах газонефтепроводов» и "Нефтегазовое дело")
всех форм обучения

Составители:

Валюхов Сергей Георгиевич
Галдин Дмитрий Николевич
Кретинин Александр Валентинович

Компьютерный набор Д. Н. Галдина

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 07.12.2021.

Уч. изд. л. 1,6.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный технический университет"
394026, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84