



Методика оптимизации теплообменника зерносушильного комплекса с помощью программных комплексов FlowVision и IOSO

Кирилл Друтько, Андрей Войтик, Дмитрий Пахарев

Постановка задачи

Теплообменник зерносушильного комплекса предназначен для нагрева атмосферного воздуха, который в дальнейшем используется для сушки зерна.

В данной работе рассмотрен теплообменник производства компании ОАО «Амкодор» (г.Минск), который конструктивно состоит из четырех одинаковых секций (рис. 1). В секции теплообменника происходит нагрев проходящего сквозь нее атмосферного воздуха путем передачи тепла от дымовых газов через пакет труб, по которым непосредственно проходят дымовые газы.

Количество труб, их размеры и расположение существенно влияют на мощность и эффективность секции теплообменника. Существуют десятки тысяч возможных вариантов конфигурации пакета труб, но подбор «вручную» не позволяет гарантированно создать оптимальную и энергоэффективную

конструкцию теплообменника. Задача оптимизации конфигурации пакета труб является актуальной и практически значимой.

Моделирование исходного (базового) варианта в программном комплексе FlowVision

Расчетная геометрия теплообменника представлена в программном комплексе FlowVision (www.flowvision.ru) двумя подобластями, вложенными друг в друга:

1. Внешняя подобласть — область протекания атмосферных газов (рис. 2).
2. Внутренняя подобласть — область протекания дымовых газов (рис. 3).

Для подобласти атмосферных газов были заданы следующие граничные условия:

- Вход — Вход/Выход (температура 25 °С);

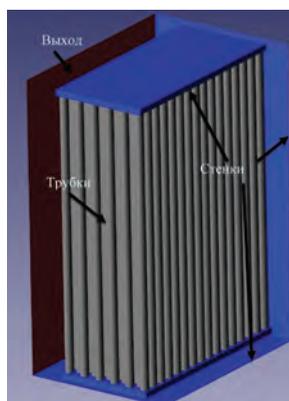


Рис. 2. Подобласть атмосферных газов

- Трубки — Связанный, адаптация два слоя, один уровень;
- Стенки — Стенка;
- Выход — Свободный выход (давление -200 Па);
- Рабочее тело — Воздух (из базы веществ FV).

Для подобласти дымовых газов были заданы следующие граничные условия:

- Вход — Вход/Выход (температура 600 °С);
- Трубки — Связанный, адаптация два слоя, один уровень;
- Стенки — Стенка;
- Выход — Свободный выход (давление -1900 Па);

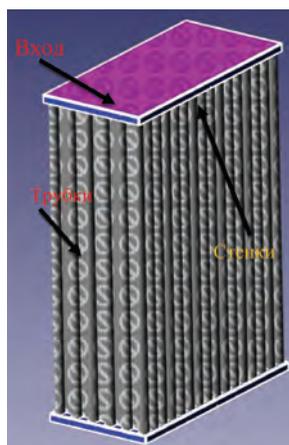


Рис. 3. Подобласть дымовых газов

Кирилл Друтько

Зам. директора ПВООО «ИРИОН», г.Минск.

Андрей Войтик

Инженер-конструктор 1-й категории ПВООО «ИРИОН», г.Минск.

Дмитрий Пахарев

Главный конструктор КБ ИР ОАО «Амкодор» управляющая компания холдинга, г.Минск.

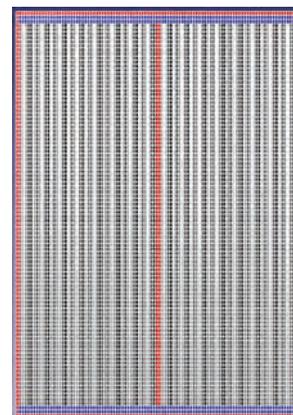


Рис. 4. Начальная расчетная сетка

- Рабочее тело — Угарный газ + Воздух, продукты (из базы веществ FV).

Начальная сетка равномерная (рис. 4). Применена адаптация расчетной сетки на граничное условие трубки.

Между подобластями происходит сопряженный теплообмен. Связывание подобластей произведено через граничное условие Трубки.

Результаты моделирования исходного (базового) варианта в программном комплексе FlowVision

На рис. 5-8 приведены распределения температуры дымовых

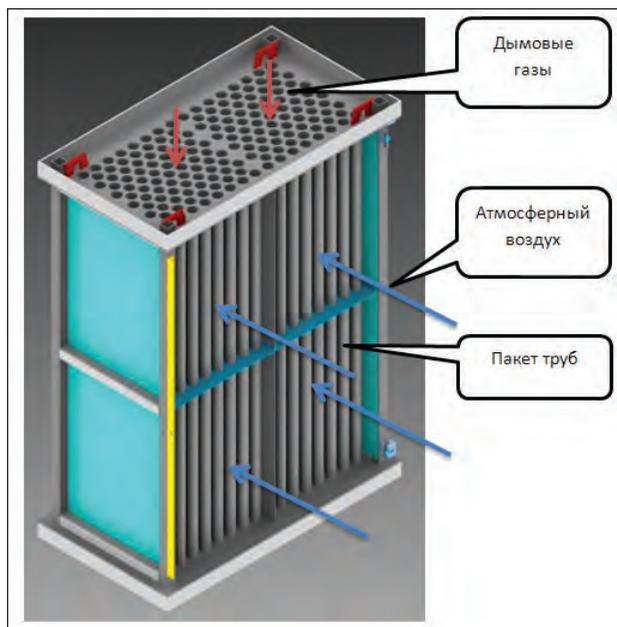


Рис. 1. Общий вид секции теплообменника

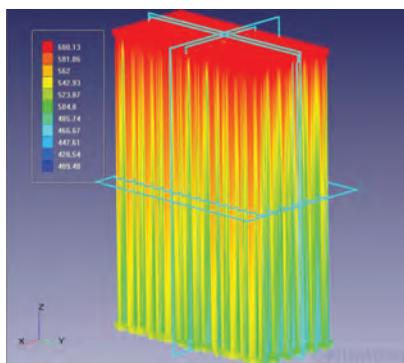


Рис. 5. Распределение температуры дымовых газов

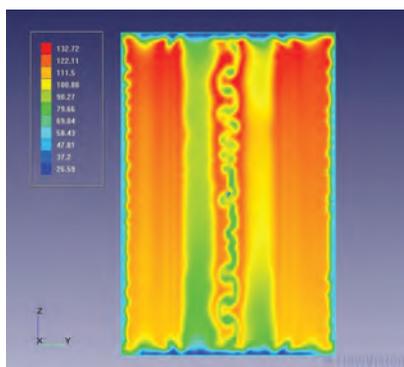


Рис. 6. Распределение температуры атмосферного воздуха на выходе из секции

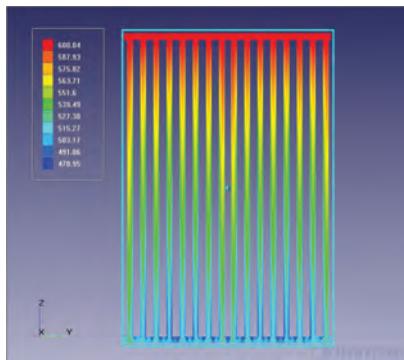


Рис. 7. Распределение температуры дымовых газов плоскости сечения, проходящей через центр секции

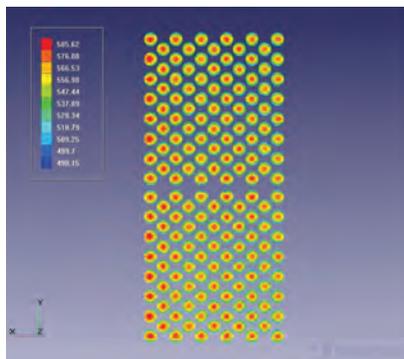


Рис. 8. Распределение температуры дымовых газов в поперечном сечении труб секции

газов в различных сечениях теплообменника, которые иллюстрируют качественную картину происходящего процесса теплообмена. Хорошо просматривается неравномерность температурного поля как в пространстве конструкции, так и на выходе теплообменника.

Создание параметрической модели теплообменника

С целью сокращения времени на поиск оптимального решения было принято решение проводить дальнейшее моделирование теплообменника в двумерной постановке. Расчет в двумерной постановке проводился

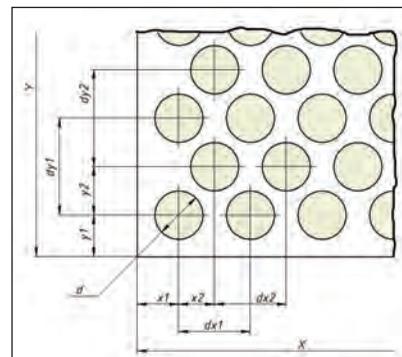


Рис. 9. Фрагмент параметрического эскиза поперечной плоскости теплообменника в программном комплексе SolidWorks

Parameter Name	Unit/Type	Equation	Nominal Value	Comment
Model Parameters				
Y	mm	668 mm	668.000000	Высота секции
d	mm	57 mm	57.000000	Диаметр труб
X	mm	1367 mm	1367.000000	Ширина секции
x1	mm	$(20.5 \text{ mm} + d / 2 \text{ ul})$	49.000000	Расст. от стенки до 1-го ряда по оси x
x2	mm	$dx1 / 2 \text{ ul}$	42.300000	Расст. от внеш. до внутр. ряда по оси x
y1	mm	x1	49.000000	Расст. от стенки до 1-го ряда по оси y
y2	mm	$dy1 / 2 \text{ ul}$	57.000000	Расст. от внеш. до внутр. ряда по оси y
nmy1	ul	ny	6.000000	Число внешних труб по оси y
dy1	mm	$(Y - y1 - y1) / (ny - 1 \text{ ul})$	114.000000	Шаг труб. внеш. ряда по оси y
nmx1	ul	nx	16.000000	Число внешних труб по оси x
dx1	mm	$(X - x1 - x1) / (nx - 1 \text{ ul})$	84.600000	Шаг труб. внеш. ряда по оси x
nmy2	ul	ny - 1 ul	5.000000	Число внутр. труб по оси y
dy2	mm	dy1	114.000000	Шаг труб. внутр. ряда по оси y
nmx2	ul	nx - 1 ul	15.000000	Число внутр. труб по оси x
dx2	mm	dx1	84.600000	Шаг труб. внутр. ряда по оси x
User Parameters				
nx	ul	16 ul	16.000000	Число внешних труб по оси x
ny	ul	6 ul	6.000000	Число внешних труб по оси y

Рис. 10. Фрагмент таблицы параметров теплообменника в программе SolidWorks

Model Para.	Unit	Value	Nominal Value
Y	mm	668 mm	668.0000
d	mm	40 mm	40.000000
X	mm	1367 mm	1367.0000
x1	mm	$(20.5 \text{ mm} + d / 2 \text{ ul})$	40.500000
x2	mm	$dx1 / 2 \text{ ul}$	64.300000
y1	mm	x1	40.500000
y2	mm	$dy1 / 2 \text{ ul}$	41.928571
nmy1	ul	ny	8.000000
dy1	mm	$(Y - y1 - y1) / (ny - 1 \text{ ul})$	83.857143
nmx1	ul	nx	11.000000
dx1	mm	$(X - x1 - x1) / (nx - 1 \text{ ul})$	128.6000
nmy2	ul	ny - 1 ul	7.000000
dy2	mm	dy1	83.857143
nmx2	ul	nx - 1 ul	10.000000
dx2	mm	dx1	128.6000
nx	ul	11 ul	11.000000
ny	ul	8 ul	8.000000

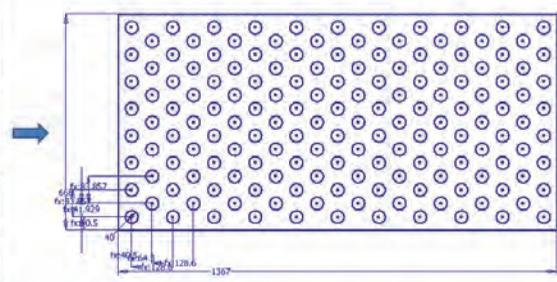


Рис. 11. Фрагмент таблицы с параметрами и эскиза теплообменника при заданных $d=40$, $nx=11$, $ny=8$

Model Para.	Unit	Value	Nominal Value
Y	mm	668 mm	668.0000
d	mm	30 mm	30.000000
X	mm	1367 mm	1367.0000
x1	mm	$(20.5 \text{ mm} + d / 2 \text{ ul})$	35.500000
x2	mm	$dx1 / 2 \text{ ul}$	34.192857
y1	mm	x1	35.500000
y2	mm	$dy1 / 2 \text{ ul}$	21.214286
nmy1	ul	ny	15.000000
dy1	mm	$(Y - y1 - y1) / (ny - 1 \text{ ul})$	42.842857
nmx1	ul	nx	20.000000
dx1	mm	$(X - x1 - x1) / (nx - 1 \text{ ul})$	68.210526
nmy2	ul	ny - 1 ul	14.000000
dy2	mm	dy1	42.842857
nmx2	ul	nx - 1 ul	19.000000
dx2	mm	dx1	68.210526
nx	ul	20 ul	20.000000
ny	ul	15 ul	15.000000

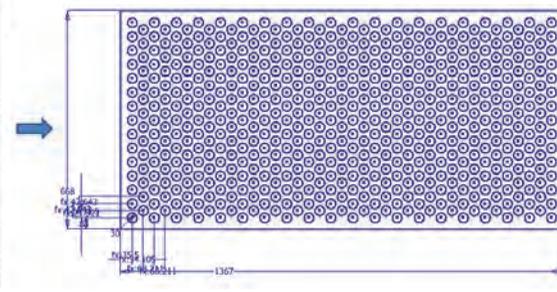


Рис. 12. Фрагмент таблицы с параметрами и эскиза теплообменника при заданных $d=30$, $nx=20$, $ny=15$

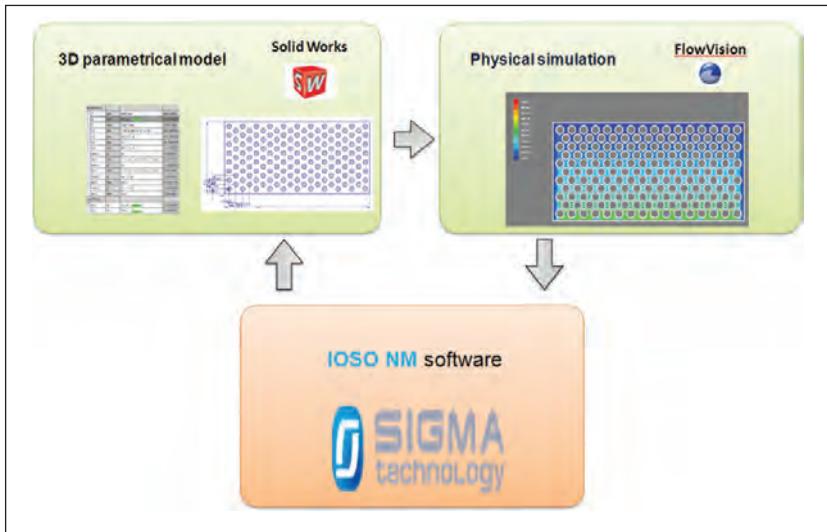


Рис. 13. Концепция проекта оптимизации теплообменника

в поперечной плоскости теплообменника, как показано на рис. 8.

Для организации проекта по оптимизации теплообменника необходимо наличие его параметрической модели.

В программном комплексе SolidWorks была создана параметрическая модель поперечной плоскости теплообменника (рис. 9).

Как видно из рис. 9, на эскизе теплообменника вместо численных значений размеров заданы соответствующие параметры. Всего было задано 17 параметров, из них три независимых: l_x — число труб по оси x ; l_y — число труб по оси y ; d — диаметр труб.

Таблица параметров в программе SolidWorks представлена на рис. 10.

Таким образом, задавая численное значение трех независимых параметров (l_x , l_y , d), можно получить большое множество конструктивных вариантов теплообменника (см. пример на рис. 11 и 12):

Создание проекта оптимизации в программном комплексе IOSO

Для организации проекта оптимизации теплообменника необходимо интегрировать созданные ранее физико-математические модели с программным комплексом многокритериальной и многопараметрической оптимизации IOSO. Концепция проекта оптимизации представлена на рис. 13.

Следует отметить, что всем процессом оптимизации управляет программный комплекс IOSO (www.iosotech.com/ru). На первом этапе запускается программа SolidWorks, в которой по заданным параметрам (l_x , l_y , d) происходит построение модели теплообменника. На втором этапе запускается программа FlowVision,

№	ID	Имя	Модель	Тип	Определение
1	IV2	d	Расчет ограниченный	Независимый	0.025<IV2<0.1
2	IV3	l_x	Расчет ограниченный	Независимый	10<IV3<35
3	IV4	l_y	Расчет ограниченный	Независимый	3<IV4<20

Рис. 14. Фрагмент окна программы IOSO с таблицей входных параметров

№	ID	Имя	Модель	Критерий
1	RS1	Температура	Модель Flow Vision	Максимизировать
2	RS2	Скорость потока	Модель Flow Vision	Максимизировать

Рис. 15. Фрагмент окна программы IOSO с таблицей выходных параметров

в которой происходит моделирование процесса тепломассообмена на основе созданной ранее в программе SolidWorks модели. На третьем этапе программа IOSO производит анализ результатов моделирования в FlowVision и принимает решение об изменении параметров (l_x , l_y , d) в программе SolidWorks. Далее происходит повторение описанной ранее итерации до момента нахождения оптимальных решений. Таким образом, оптимизация — это

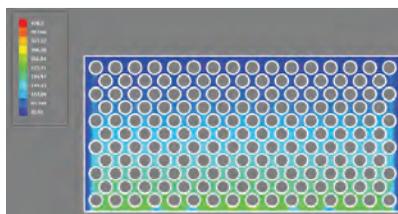


Рис. 16. Вариант сечения $d=57$ мм, $l_x=16$, $l_y=6$

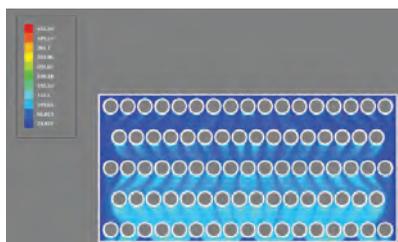


Рис. 17. Вариант сечения с $d=66$ мм, $l_x=17$, $l_y=3$

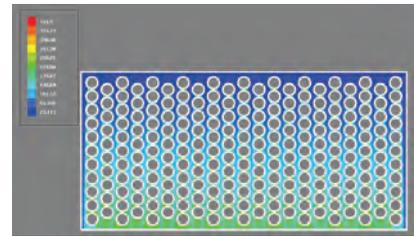


Рис. 18. Вариант сечения с $d=50$ мм, $l_x=11$, $l_y=11$

циклический процесс, состоящий из расчетных итераций.

Зададим пределы изменения входных параметров (в метрах) — рис. 14.

В качестве критериев оптимизации зададим среднюю температуру на плоскости выхода атмосферного воздуха и среднюю скорость потока на плоскости выхода атмосферного воздуха (рис. 15). Оба критерия требуется максимизировать.

Процесс оптимизации

В процессе оптимизации было выполнено более 700 расчетных итераций, то есть выполнен расчет и анализ более 700 конструктивных решений. На рис. 16-18 представлены результаты моделирования в программном комплексе FlowVision некоторых вариантов.

Результаты оптимизации

В результате оптимизации было найдено 20 точек Парето-решений (эти точки ограничивают область, за пределами которой невозможно улучшение одного критерия без ухудшения другого) — инженеру остается выбрать конечный вариант конструк-

Таблица 1. Точки Парето

№	T, %	V, %	P, %	S, %
1	168,0	-63,0	105,0	20,9
2	164,5	-50,5	113,9	17,5
3	155,8	-45,7	110,1	13,5
4	142,2	-41,3	100,9	9,5
5	132,5	-36,2	96,2	10,9
6	115,5	-29,2	86,2	6,2
7	96,0	-21,9	74,1	-6,4
8	71,3	-20,9	50,3	-12,4
9	55,4	-11,5	43,8	-13,2
10	42,1	-3,4	38,7	-28,9
11	27,9	0,1	27,9	-33,2
12	14,5	4,9	19,5	-33,7
13	0,3	11,1	11,4	-30,5
14	-10,5	16,4	5,9	-44,6
15	-23,9	28,8	4,8	-18,1
16	-30,0	35,6	5,6	-21,0
17	-37,4	45,9	8,5	-54,6
18	-45,1	59,7	14,5	-36,2
19	-46,8	69,5	22,6	-20,2
20	-51,6	73,4	21,8	-43,4

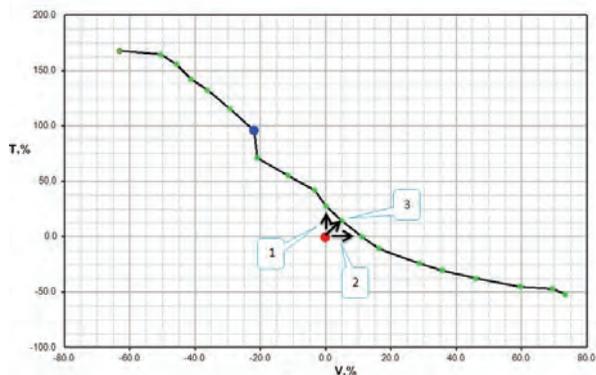


Рис. 19. График зависимости T (изменение температуры на выходе относительно базового варианта, %) от V (изменение скорости газов на выходе относительно базового варианта, %)

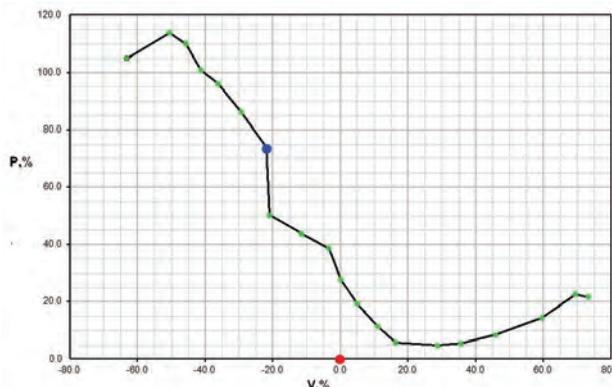


Рис. 21. График зависимости P (изменение мощности секции относительно базового варианта, %) от V (изменение скорости газов на выходе относительно базового варианта, %)

ции только из набора, приведенного в табл. 1.

В таблице представлены относительные значения следующих параметров: № — номер точки Парето; $T, \%$ — изменение температуры на выходе относительно базового варианта; $V, \%$ — изменение скорости газов на выходе относительно базового варианта; $P, \%$ — изменение мощности секции относительно базового варианта; $S, \%$ — изменение суммарной площади сечения пакета труб относительно базового варианта (данный параметр влияет на скорость потока дымовых газов).

На основе полученных точек Парето-решений был построен набор графиков, представленных на рис. 19-21. На всех графиках базовый вариант конструкции секции представлен в виде красной точки, рекомендуемое нами оптимальное решение — синей точкой.

Исходя из рис. 19 видно, что базовое решение лежит ниже фронта Парето. Это означает, что базовое решение неоптимально — то есть можно увеличить один или несколько критериев. В данном случае это значит:

1. Если «двигать» красную точку по оси x вверх до фронта Парето, то можно увеличить T базового варианта на 30% при сохранении V .
2. Если «двигать» красную точку по оси x вправо до фронта Парето, то можно

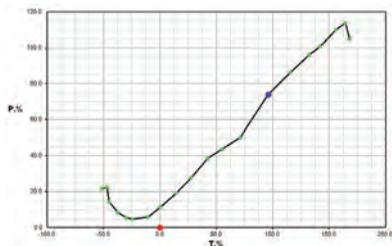


Рис. 20. График зависимости P (изменение мощности секции относительно базового варианта, %) от T (изменение температуры на выходе относительно базового варианта, %)

Таблица 2. Предлагаемый оптимальный вариант

№	$T, \%$	$V, \%$	$P, \%$	$S, \%$
7	96,0	-21,9	74,1	-6,4

увеличить V базового варианта на 10% при сохранении T .

3. Если «двигать» красную точку вправо и вверх до ближайшей точки Парето, то можно увеличить T на 12,5% и V на 5%. Подобный принцип возможного улучшения базового варианта применим и к остальным графикам (рис. 20 и 21).

После комплексного анализа результатов оптимизации в качестве окончательного варианта конструкции секции было предложено выбрать из табл. 1 точку № 7 —

мощность аппарата увеличена на 74,1%, но при этом снижена скорость выходных газов на 21,9%, суммарная площадь сечения труб при этом практически не изменилась (табл. 2).

Список литературы

1. Кондранин Т.В., Ткаченко Б.К. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа. Учебное пособие. М.: МФТИ, 2005.104 с.
2. Egorov I.N., Kretinin G.V., Fedechkin K.S. Robust Design Optimization Fan using 3D CFD code // Conference ASME Turbo Expo 2010, Glasgow, Scotland, UK, June 14-18, 2010.

Тезис

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ — В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

3D TransVidia — трансляция и проверка качества 3D моделей

SIMULIA Abaqus — прочность

FlowVision — гидродинамика

DEFORM — обработка металлов давлением

AutoForm — листовая штамповка

www.thesis.com.ru www.flowvision.ru

Тел/Факс: (495) 612 – 4422, 612 – 4262

E-mail: info@thesis.com.ru