

А.И.РУДАКОВ

**СТРУЙНЫЕ
НИЗКОВАКУУМНЫЕ
АППАРАТЫ**



Казань 2008

УДК 631.22: 631.17:532.5

ББК 40.715

P83

Печатается по рекомендации
Ученого совета
Казанского государственного аграрного университета

Научный редактор
профессор кафедры "Теория механизмов и машин"
Казанского аграрного университета, д.т.н. Мудров А.Г.

Рецензенты: профессор кафедры "Процессы и аппараты" Казанского технологического университета, д.т.н. Зиннатуллин Н.Х.
профессор кафедры "Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели" Казанского технического университета, д.т.н. Щукин А.В.

Рудаков А.И.

P83 Струйные низковакуумные аппараты. – Казань: Изд-во Казан. аграрного ун-та, 2008 – 341 с.
ISBN 5-7464-0762-3

В монографии поставлены и решены задачи проектирования высокоэффективных струйных низковакуумных аппаратов и технологических линий на их основе, а также совершенствования существующих струйных низковакуумных систем, которые связаны с движением жидкостей и газов. Рассмотрены методы оптимизации их технологических и технических параметров. Наряду с показом применения разработанных автором эффективных методов однокритериальной оптимизации особое внимание уделено современным методам многокритериальной оптимизации. Большой объем в монографии занимают экспериментальные исследования низковакуумных струйных аппаратов. В ней приведены сведения о пульсирующих и вихревых эжекторах.

Монография рассчитана на инженеров и научных работников, занимающихся проектированием и совершенствованием струйных низковакуумных аппаратов и технологических линий сельскохозяйственного производства на их основе.

ISBN 5-7464-0762-3

©Рудаков А.И., 2008

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Условные обозначения	4
Введение.....	7
1. Краткие сведения по низковакуумной технике и течению газов в каналах	9
1.1. Общие сведения по вакуумной технике.....	9
1.2. Пропускная способность вакуумных систем.....	11
1.2.1. Поток газа.....	11
1.2.2. Пропускная способность и сопротивление вакуумной системы	17
1.2.3. Области течения газа при низких давлениях	22
1.2.4. Истечение газа через малые отверстия	24
1.2.5. Скорость откачки.....	25
1.2.6. Продолжительность откачки.....	26
1.3. Основные сведения о конструкции и теории течения газа в низковакуумных газовых эжекторах.....	30
1.3.1. Течение газа во входном участке низковакуумного газового эжектора.....	31
1.3.2. Истечение газа через активное сопло (сопло активной среды)	32
1.3.3. Течение газа в диффузоре.....	35
1.3.4. Процессы в камере смешения	37
1.4. Основные сведения по теории газовых эжекторов	39
1.5. Основные сведения по термодинамике газов.....	42
1.5.1. Термодинамические свойства рабочего тела.....	42
1.5.1.1. Температура	42
1.5.1.2. Абсолютное давление.....	43
1.5.1.3. Удельный объем.....	43
1.5.1.4. Удельная теплоемкость	45

1.5.1.5. Удельная теплоемкость.....	46
1.5.1.6. Удельная энтальпия.....	46
1.5.1.7. Удельная энтропия.....	46
1.5.2. Основные уравнения термодинамики, используемые для расчета струйных низковакуумных аппаратов.....	47
1.5.2.1. Уравнение первого закона термодинамики.....	47
1.5.2.2. Уравнение энергии.....	48
1.5.2.3. Расчётное уравнение температуры в критическом сечении сопла.....	51
1.5.2.4. Уравнение адиабаты.....	52
1.5.2.5. Уравнение расхода.....	53
1.5.2.6. Уравнение импульсов.....	54
1.5.2.7. Уравнение термодинамического равновесия рабочего тела.....	56
Литературный комментарий к разделу 1.....	57
Литература.....	58
2. Создание низковакуумных струйных аппаратов на основе системного анализа и современных методов оптимизации.....	65
2.1. Основные положения системного анализа, используемые для проектирования и разработки струйных низковакуумных аппаратов, задачи оптимизации их параметров.....	64
2.2. Математическое моделирование и математические модели.....	67
2.2.1. Основные понятия о моделировании.....	67
2.2.2. Краткие сведения о способах моделирования.....	68
2.3. Формулирование задачи оптимизации струйных низковакуумных аппаратов.....	70
2.4. Укрупненная классификация задач поисковой оптимизации.....	73
2.4.1. Построение классификационной схемы.....	73

2.4.2. Классификация методов однокритериальной оптимизации.....	75
2.4.3. Классификация методы многокритериальной оптимизации.....	75
2.5. Методы однокритериальной оптимизации.....	78
2.5.1. Методы однопараметрического поиска ($n=1$).....	78
2.5.1.1. Метод касательных.....	78
2.5.1.2. Метод хорд.....	78
2.5.1.3. Метод деления отрезка пополам.....	78
2.5.1.4. Адаптивный метод.....	79
2.5.1.5. Метод стохастической аппроксимации.....	79
2.5.2. Методы многопараметрического поиска ($n > 1$).....	80
2.5.2.1. Покоординатный метод.....	80
2.5.2.2. Градиентный метод.....	80
2.5.2.3. Метод локального случайного поиска.....	80
2.5.3. Методы глобального поиска.....	81
2.5.3.1. Метод глобального, случайного поиска.....	81
2.5.3.2. Метод сглаживающего глобального поиска.....	81
2.6. Разработка методов оптимизации для определения оптимальных параметров струйных аппаратов.....	81
2.6.1. Разработка и обоснование методов однокритериальной оптимизации.....	83
2.6.1.1. Метод сканирования.....	83
2.6.1.2. Комплексный метод.....	84
2.6.2. Разработка и обоснование методов многокритериальной оптимизации.....	86
2.6.2.1. Проведение многокритериальной оптимизации методом исследования пространства параметров.....	90

2.6.2.2. Разработка и проведение многокритериальной оптимизации методом задачи линейного программирования	98
2.6.3. Разработка графических (графоаналитических) методов оптимизации параметров газоструйных низковакуумных эжекторов	105
2.7. Особенности задач оптимального проектирования	108
2.8. Стратегия оптимального исследования	109
2.8.1. Уровни моделирования	112
2.8.2. Формы представления модели	112
2.8.3. Методы поиска и оценка решений	112
2.9. Разработка общей теории взаимодействия жидких и газообразных сред со струйными низковакуумными аппаратами.....	113
2.9.1. Модель идеального вытеснения	114
2.9.2. Модель идеального смешивания	114
Литературный комментарий к разделу 2	117
Литература	121
3. Определение расчетных параметров и рабочих характеристик струйных низковакуумных аппаратов	129
3.1. Низковакуумные струйных аппаратов, используемых в промышленности и в сельскохозяйственном производстве	129
3.2. Анализ исследований и основные расчетные зависимости струйных низковакуумных аппаратов....	139
3.3. Классификационная схема и морфологический анализ струйных низковакуумных аппаратов.....	153
3.3.1. Классификация струйных низковакуумных аппаратов.....	153
3.3.2. Морфологический анализ струйных аппаратов.....	155

3.4. Определение расчетных параметров и рабочих характеристик струйных низковакуумных аппаратов.....	160
3.4.1. Определение параметров газоструйных эжекторов	160
3.4.2. Расчет рабочих характеристик газоструйного эжектора.....	170
3.5. Газоструйные вакуум-откачные средства	173
3.5.1. Газоструйные вакуум – откачные средства с предвключенным эжектором.....	173
3.5.2. Особенности расчета жидкостного эжектора – смесителя	174
3.6. Оптимизация параметров газоструйных эжекторов	177
3.7. Конструктивное оформление струйных низковакуумных аппаратов	185
Литературный комментарий к разделу 3	189
Литература	191
4. Экспериментальные исследования и производственные испытания разработанных струйных низковакуумных аппаратов.....	200
4.1. Программа проведения и математическое планирование экспериментов	201
4.1.1. Планирование натуральных экспериментов	202
4.1.2. Программа проведения и планирование экспериментальных исследований струйных низковакуумных аппаратов	203
4.2. Лабораторная экспериментальная установка для проверки теоретических положений оптимального проектирования струйных низковакуумных аппаратов.....	206
4.3. Разработка контрольной аппаратуры и измерительных приборов.....	211

4.3.1. Комплексный измерительный стенд для замера остаточных давлений, создаваемых струйными вакуум-откачными средствами.....	212
4.3.2. Контрольно-измерительные приборы для исследований пульсирующего движения газа и жидкости по трубам с помощью струйных аппаратов.....	213
4.4. Методика проведения, обработка и анализ результатов экспериментальных исследований предвключенных эжекторов объемных вакуумных насосов	220
4.4.1. Исследование оптимальных режимных и геометрических параметров предвключенных эжекторов.....	220
4.4.2. Определение статического давления вдоль конической камеры смешения	231
4.4.3. Исследование влияния характеристики вакуумного насоса на параметры предвключенного эжектора.....	232
4.5. Оценка погрешностей измерений и их влияния на результаты экспериментов	238
4.5.1. Погрешности определения удельных энергозатрат струйного аппарата, осуществляющего пульсирующее движение жидкостей и газов	238
4.5.2. Погрешность определения удельной объемной производительности низковакуумных струйных аппаратов.....	241
4.6. Промышленные низковакуумные струйные установки	242
4.6.1. Промышленная многоступенчатая струйно-вакуумная установка.....	243
4.6.2. Вакуум-откачные агрегаты с предвключенными эжекторами ВВН-12Э, ВВН-6Э и ВВН-3Э	250

4.6.3. Газо- и жидкостно струйные смесители промышленных установок получения аммиачной воды объемом 25 – 400 м ³	254
4.6.3.1. Стационарные установки горизонтального типа УПАВ-Э	255
4.6.3.2. Стационарная смесительная установка вертикального типа УПАВ-400Э	258
4.6.3.3. Переносные струйные смесители для обогащения аммиачной воды УОПАВ	261
4.7. Экспериментальная установка для исследования совместной работы вихревой трубы Ранка и диффузорно-конфузорного насадка	262
Литературный комментарий к разделу 4	265
Литература	268
5. Перспективные разработки низковакуумных струйных аппаратов	274
5.1. Струйные аппараты с устройствами стабилизации режимов их работы	274
5.1.1. Жидкостнокольцевой вакуумный насос	274
5.1.2. Молочно-вакуумная линия доильных установок	276
5.1.3. Эжектор для криогенных установок	279
5.1.4. Газоструйный эжектор	280
5.1.5. Струйный аппарат с уравнивающим механизмом	283
5.1.6. Эжектор с автоматическим поддержанием оптимального режима работы	284
5.1.7. Струйный аппарат	285
5.1.8. Газовый эжектор с коаксиальным диффузором	286
5.1.9. Эжектор с эластичной мембраной	288
5.1.10. Струйный аппарат с подвижным активным соплом	289
5.2. Пульсирующие струйные аппараты	291

5.2.1. Математическая модель расчета низковакуумных пульсирующих струйных аппаратов.....	292
5.2.2. Струйные пульсирующие аппараты с регулирующим элементом, совершающим возвратно-поступательное движение (эжекторы клапанного типа)	297
5.2.2.1. Пульсирующий эжектор	297
5.2.2.2. Пульсирующий струйный насос с подпружиненным активным соплом	300
5.2.2.3. Струйный насос с телескопическим диффузором.....	302
5.2.2.4. Импульсный струйный насос.....	304
5.2.2.5. Струйный насос с подъемной трубой....	306
5.2.2.6. Импульсный струйный насос.....	307
5.2.3. Струйные пульсирующие аппараты с регулирующим элементом, совершающим колебательное движение (эжекторы вращательного типа).....	309
5.2.3.1. Струйный аппарат с качающимся сопловым блоком.....	309
5.2.4. Использование стационарных и пульсирующих струйных низковакуумных аппаратов для смешивания и транспортирования газовоздушной смеси	310
5.2.4.1. Установка для приготовления аммиачной воды	310
5.2.4.2. Струйное устройство для смешивания жидкостей и газов в резервуарах	313
5.2.4.3. Применение струйных низковакуумных аппаратов для получения и перемещения сыпучих материалов.....	317
5.3. Струйные вихревые аппараты и вихревые трубы ...	320
5.3.1. Теоретические предпосылки вихревого эффекта.....	320

5.3.2. Вихревые струйные эжекторы и вихревые трубы.....	325
5.3.2.1. Вихревая труба с повышенным тепловым эффектом.....	325
5.3.2.2. Вихревая труба с изолированными газовыми потоками.....	326
5.3.2.3. Вихревая труба для работы на переменных режимах	327
5.3.2.2. Вихревая труба с кольцевыми камерами отбора горячего газа.....	309
Литературный комментарий к разделу 5	331
Литература	334
Приложение 1. Расчет параметров воздушного эжектора с заданными геометрическими размерами.....	342
Приложение 2. Расчет оптимальных параметров водовоздушного предвключенного эжектора жидкостнокольцевого вакуумного насоса.....	345
Приложение 3. Номограмма определения оптимальных параметров предвключенных эжекторов объемных вакуумных насосов	350
Приложение 3а. Блок-схемы.....	362
Приложение 4. Программа многокритериальной оптимизации методом ЗЛП (на примере расчета одноступенчатого предвключенного эжектора).....	384
СОДЕРЖАНИЕ	378