A photograph of an industrial facility at night, featuring large cylindrical tanks, complex piping, and scaffolding. The scene is illuminated by numerous bright lights, creating a high-contrast, industrial atmosphere. The sky is a deep blue, suggesting twilight or early evening.

В.Г. Цегельский


Струйные аппараты

BAUMANPRESS



ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

Техническая физика
и энергомашиностроение

A stylized, abstract blue graphic element in the bottom right corner, resembling a splash or a stylized letter 'B'.

В.Г. Цегельский

Струйные аппараты



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2017

УДК 621.527.4/.5
ББК 31.363
Ц45

Цегельский, В. Г.
Ц45 Струйные аппараты / В. Г. Цегельский. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 573, [3] с. : ил.

ISBN 978–5–7038–4666–7

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований двухфазных струйных аппаратов и газовых эжекторов с звуковыми и сверхзвуковыми соплами. Предложена общая теория, опирающаяся на термодинамику необратимых процессов и объясняющая с единых позиций протекающие в них процессы. Рассмотрены физические особенности течения как двухфазных, так и газовых сред в проточной части аппарата. Сформулирована аксиома о стремлении к совершенству процессов в природе, определяющая с позиции термодинамики необратимых процессов реализацию одного из нескольких возможных режимов работы как в однофазных газовых, так и двухфазных струйных аппаратах. Приведены методики расчета двухфазных струйных аппаратов эжекторного и инжекторного типов и газовых эжекторов с цилиндрическими и коническими камерами смешения. Показаны перспективы использования этих аппаратов в нефтегазодобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, в энергетике, космической и глубоководной технике.

Для научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями, проектированием и эксплуатацией струйных аппаратов. Может быть полезна аспирантам и студентам технических университетов и вузов.

УДК 621.527.4/.5
ББК 31.363

ISBN 978–5–7038–4666–7

© Цегельский В. Г., 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Из предисловия к первой книге	6
Основные обозначения	8

ЧАСТЬ I. ДВУХФАЗНЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

Глава 1. Общие сведения	13
1.1. Классификация и принципиальные схемы двухфазных струйных аппаратов	13
1.2. Области применения двухфазных струйных аппаратов	17
1.3. Обзор работ по исследованию двухфазных струйных аппаратов	18
Глава 2. Уравнения, описывающие течение потоков в двухфазном струйном аппарате.	25
2.1. Основные допущения, принятые при выводе уравнений	25
2.2. Уравнения эжекции двухфазного струйного аппарата	27
2.3. Расчет течения в соплах	38
2.4. Течение двухфазной смеси в диффузоре	44
2.5. Определение режима работы двухфазного струйного аппарата с использованием термодинамики необратимых процессов	50
2.6. Расчет параметров смеси за скачком уплотнения	59
Глава 3. Жидкостно-газовые струйные аппараты (ЖГСА)	63
3.1. Теоретический анализ возможных режимов работы ЖГСА	63
3.1.1. Три режима работы ЖГСА как результат термодинамического анализа	63

3.1.2.	Определение режимов работы струйного аппарата по разности кинетических энергий потоков на входе в камеру смешения и выходе из нее	75
3.2.	Рабочие характеристики ЖГСА	76
3.2.1.	Режимная характеристика ЖГСА	77
3.2.2.	Дроссельная характеристика ЖГСА	78
3.2.3.	Полная дроссельная характеристика ЖГСА	90
3.3.	Результаты экспериментального исследования рабочих характеристик и режимов работы ЖГСА	95
3.4.	Дополнительные допущения, принимаемые при расчете ЖГСА	112
3.5.	Теоретические предпосылки для определения динамического коэффициента связи $\Pi_{ж2}$ из эксперимента	113
3.6.	Расчет ЖГСА при незначительном потоке капель жидкости на стенку камеры смешения	120
3.6.1.	Вывод зависимости для расчета динамического коэффициента связи $\Pi_{ж2}$	120
3.6.2.	Нормальный закон распределения жидкости по радиусу и длине камеры смешения	124
3.6.3.	Расчетная модель	128
3.7.	Расчет ЖГСА с многоствольным жидкостным соплом	143
3.8.	Влияние неидеальности канала камеры смешения на режимы работы ЖГСА	148
3.9.	Расчет ЖГСА при значительном потоке капель жидкости на стенку камеры смешения	154
3.9.1.	Определение эквивалентного касательного напряжения на стенке камеры смешения	154
3.9.2.	Расчет динамического коэффициента связи $\Pi_{ж2}$	167
3.9.3.	Определение потерь давления на трение двухфазного потока о стенку камеры смешения на докритических режимах работы ЖГСА	180
3.10.	Зависимость между динамическим $\Pi_{ж2}$ и кинематическим $\Pi_{кин ж2}$ коэффициентами связи для жидкости	181
3.11.	Особенности расчета характеристик реального ЖГСА	182
3.12.	Установки для исследования двухфазных струйных аппаратов и методика проведения испытаний	186

3.13.	Анализ результатов расчета и экспериментального исследования ЖГСА	191
3.13.1.	Сопоставление результатов расчета с экспериментом	192
3.13.2.	Влияние свойств эжектируемого газа на характеристики ЖГСА	208
3.13.3.	Влияние температуры газа на характеристики ЖГСА	211
3.13.4.	Влияние температуры жидкости на характеристики ЖГСА	212
3.13.5.	Влияние формы сопла, геометрии камеры смешения и предыстории жидкостного потока на характеристики ЖГСА	213
3.13.6.	Выбор оптимальной длины камеры смешения ЖГСА	220
Глава 4. Жидкостно-газопаровые струйные аппараты (ЖГПСА)		226
4.1.	Теоретический анализ возможных режимов работы ЖГПСА	226
4.2.	Допущения, принимаемые при расчете ЖГПСА.	230
4.3.	Тепло- и массообмен при конденсации пара в камере смешения струйного аппарата в случае малых относительных скоростей течения фаз	231
4.3.1.	Постановка задачи	231
4.3.2.	Расчетная модель.	235
4.3.3.	Основные уравнения	237
4.3.4.	Аппроксимация дифференциальной задачи разностной схемой и ее решение	244
4.3.5.	Результаты расчета и эксперимента	248
4.4.	Тепло- и массообмен при конденсации пара в камере смешения струйного аппарата в случае больших относительных скоростей течения фаз	257
4.4.1.	Исходные предпосылки	257
4.4.2.	Определение касательного напряжения турбулентного трения на границе раздела фаз	260
4.4.3.	Интенсификация процессов тепло- и массообмена в камере смешения ЖГПСА.	263
4.4.4.	Результаты экспериментального исследования процесса уноса капель с поверхности жидкостной струи спутным потоком газа.	270

Глава 5. Парожидкостные и парогазожидкостные струйные аппараты (инжекторы)	275
5.1. Общие сведения	275
5.2. Термодинамический анализ возможных режимов работы парожидкостного струйного аппарата	277
5.3. Дроссельная характеристика инжектора. Статическое давление в камере смешения	284
5.4. Допущения, принимаемые при расчете инжектора	289
5.5. Влияние геометрических и режимных параметров на характеристики инжектора	291
5.5.1. Влияние площади горловины камеры смешения и полноты конденсации пара на характеристики инжектора	291
5.5.2. Влияние коэффициента эжекции и температуры жидкости на характеристики инжектора. Режим «запаривания»	293
5.6. Способы запуска инжектора	298
5.7. Зависимости для приближенного расчета инжектора	301
5.8. Термодинамический анализ работы парогазожидкостного струйного аппарата	305
Глава 6. Жидкостно-газовые струйные аппараты с активным двухфазным потоком	309
6.1. Общие сведения	309
6.2. Истечение двухфазного потока из сопла	310
6.3. Процессы, протекающие в жидкостно-газовом струйном аппарате с активным двухфазным потоком. Расчетная модель	315
6.4. Расчет жидкостно-газового струйного аппарата с активным двухфазным потоком	326
6.5. Экспериментальное исследование жидкостно-газового струйного аппарата с активным двухфазным потоком	332
6.5.1. Экспериментальная установка	332
6.5.2. Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик жидкостно-газового струйного аппарата с активным двухфазным потоком	333

Глава 7. Применение двухфазных струйных аппаратов в промышленности	344
7.1. Двухфазные струйные аппараты в нефтяной, газовой и нефтехимической отраслях промышленности	344
7.1.1. Двухфазные струйные аппараты для создания вакуума в ректификационных колоннах и других технологических емкостях	344
7.1.2. Струйные компрессоры	355
7.2. Двухфазные струйные аппараты в теплоэнергетике	368
7.3. Двухфазные струйные аппараты в энергетических установках подводных аппаратов	370
7.4. Двухфазные струйные аппараты как откачивающие устройства высотных стендов	381

ЧАСТЬ II. ГАЗОВЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ (ЭЖЕКТОРЫ)

Глава 8. Общие сведения	383
8.1. Области применения и схемы газовых эжекторов	383
8.2. Краткий обзор работ по исследованию газовых эжекторов	386
Глава 9. Уравнения, описывающие течение потоков в газовом эжекторе, и анализ возможных режимов его работы	390
9.1. Уравнения эжекции газового эжектора	390
9.2. Течение газа в соплах и на начальном участке камеры смешения. Первый критический режим	396
9.3. Течение смеси газов в выходном участке камеры смешения и диффузоре. Второй критический режим	404
9.4. Определение режимов работы газового эжектора с использованием термодинамики необратимых процессов	408
9.5. Теоретический анализ возможных режимов работы звукового и сверхзвукового эжектора с цилиндрической и конической камерой смешения	413
9.6. Определение режимов работы газового эжектора по разности кинетических энергий потоков на входе и выходе камеры смешения	425

Глава 10. Звуковые и сверхзвуковые газовые эжекторы с цилиндрической камерой смешения	427
10.1. Рабочие характеристики газовых эжекторов	427
10.1.1. Дроссельная характеристика эжектора и соответствующие ее участкам картины течения потоков в камере смешения	427
10.1.2. Режимная характеристика эжектора	436
10.2. Влияние геометрических параметров газового эжектора с цилиндрической камерой смешения на его характеристики	438
10.2.1. Влияние отношения минимальных площадей проходных сечений сопла активного газа и камеры смешения на характеристики эжектора.	438
10.2.2. Влияние степени расширения сверхзвукового сопла активного газа на характеристики эжектора	442
10.2.3. Влияние относительной длины камеры смешения на характеристики эжектора.	446
Глава 11. Сверхзвуковой газовый эжектор с конической камерой смешения	449
11.1. Два критических режима работы газового эжектора с конической камерой смешения как результат термодинамического анализа	449
11.2. Влияние длины конической камеры смешения и горловины диффузора на характеристики сверхзвукового газового эжектора	452
11.3. Методика расчета участка режимной характеристики, соответствующего первому критическому режиму работы газового эжектора с конической камерой смешения	470
11.4. Методика расчета сверхзвукового газового эжектора с идеальной конической камерой смешения	478
11.5. Анализ возможности реализации первого или второго критических режимов с позиции термодинамики необратимых процессов	493
11.6. Аксиома о стремлении к совершенству процессов в природе	499

11.7. Влияние геометрических и режимных параметров на характеристики идеального газового эжектора с конической камерой смешения	503
11.8. Экспериментальное исследование влияния предыстории потока пассивного газа на характеристики эжектора	507
11.9. Особенности работы сверхзвукового эжектора с конической камерой смешения при коэффициентах эжекции, близких к нулю	514
11.10. Расчет сверхзвукового эжектора с учетом незавершенности процесса смешения потоков в конической камере смешения и трения газа о стенку	517
11.10.1. Определение потери количества движения газового потока из-за трения о стенку камеры смешения	517
11.10.2. Зависимость между динамическим P_{C2} и кинематическим $P_{кин C2}$ коэффициентами связи в потоке газовой смеси	518
11.10.3. Определение производства энтропии из-за трения газового потока о стенку камеры смешения	520
11.10.4. Методика расчета сверхзвукового газового эжектора с реальной конической камерой смешения	522
11.11. Экспериментальное исследование влияния геометрических параметров эжектора с конической камерой смешения на его характеристики. Сопоставление эксперимента с расчетом	527
11.11.1. Влияние основного геометрического параметра на характеристики эжектора с конической камерой смешения	530
11.11.2. Влияние степени расширения сверхзвукового сопла на характеристики эжектора с конической камерой смешения	534
11.11.3. Влияние относительной длины конической камеры смешения на КПД эжектора	538
Список литературы	542

Изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований двухфазных струйных аппаратов и газовых эжекторов со звуковыми и сверхзвуковыми соплами. Предложена общая теория, опирающаяся на термодинамику необратимых процессов и объясняющая с единых позиций протекающие в них процессы. Рассмотрены физические особенности течения как двухфазных, так и газовых сред в проточной части аппарата. Сформулирована аксиома о стремлении к совершенству процессов в природе, определяющая с позиции термодинамики необратимых процессов реализацию одного из нескольких возможных режимов работы как в однофазных газовых, так и в двухфазных струйных аппаратах. Приведены методики расчета двухфазных струйных аппаратов эжекторного и инжекторного типов и газовых эжекторов с цилиндрическими и коническими камерами смешения. Показаны перспективы использования этих аппаратов в нефтегазодобывающей, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, в энергетике, космической и глубоководной технике.



Цегельский Валерий Григорьевич

Доктор технических наук. Окончил с отличием в 1972 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. В 1976 г. получил ученую степень кандидата технических наук, в 1990 г. — доктора технических наук и продолжает свою научную деятельность в должности главного научного сотрудника НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Является специалистом в области гидрогазодинамики двухфазных потоков и струйных аппаратов, автор более 150 научных трудов, в том числе монографии «Двухфазные струйные аппараты». Им получено более 100 авторских свидетельств и патентов ряда стран мира (Россия, США, Китай, Канада, нескольких ведущих европейских стран). Часть этих изобретений отражена в главе 7 монографии и внедрена в промышленность 11 стран мира.



ISBN 978-5-7038-4666-7



www.baumanpress.ru