

*К 150-летию Научно-учебного комплекса
«Энергомашиностроение»*

Техническая физика и энергомашиностроение



Редакционный совет

А.А. Александров (председатель), д-р техн. наук
А.А. Жердев (зам. председателя), д-р техн. наук
В.Л. Бондаренко, д-р техн. наук
А.Ю. Вараксин, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН
К.Е. Демихов, д-р техн. наук
Ю.Г. Драгунов, д-р техн. наук, член-корреспондент РАН
В.И. Крылов, канд. техн. наук
М.К. Марахтанов, д-р техн. наук
В.А. Марков, д-р техн. наук
С.Е. Семёнов, канд. техн. наук
В.И. Хвесюк, д-р техн. наук
Д.А. Ягодников, д-р техн. наук

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 : Изда-
тельство 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

ПРЕДИСЛОВИЕ

Первая книга автора, вышедшая в 2003 г. с названием «Двухфазные струйные аппараты», была дополнена значительной частью, посвященной однофазным струйным аппаратам, а именно газовым эжекторам, в связи с чем изменилось название книги.

Теория и расчет как однофазных, так и двухфазных струйных аппаратов различных типов в книге излагаются с единой методической позиции и подкрепляются представленными многочисленными экспериментами. На основании экспериментальных и теоретических исследований этих аппаратов установлено многообразие режимов их работы и определены условия, при которых реализуется каждый из режимов.

Первая часть монографии посвящена двухфазным струйным аппаратам. В нее вошли незначительно доработанные главы первой книги автора. Приведенное ниже предисловие к первой книге относится к этой части монографии.

Во второй части монографии представлены экспериментально-теоретические исследования газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения. Предложена методика расчета звуковых и сверхзвуковых газовых эжекторов, учитывающая все возможные режимы их работы. Сформулирована аксиома о стремлении к совершенству процессов в природе, не противоречащая теореме Пригожина и объясняющая с позиции термодинамики необратимых процессов возможность реализации в газовых эжекторах с конической камерой смешения при одном и том же коэффициенте эжекции двух критических режимов работы, отличающихся как структурой течения потоков в проточной части, так и эффективностью эжектора при работе на этих режимах. Показано удовлетворительное согласование результатов расчета с представленным экспериментом.

Наряду с автором в экспериментальных исследованиях газовых эжекторов участвовали М.В. Акимов, Т.Д. Сафаргалиев, В.Н. Астафьев. Огромная благодарность им за оказанную помощь, а также ООО «Техновакуум», которое на протяжении многих лет финансировало исследования струйных аппаратов в МГТУ им. Н.Э. Баумана и оплатило издание этой книги. Выражаю также благодарность А.Е. Крыловскому, Н.В. Черновой, Н.А. Цегельской за помощь при оформлении рукописи к печати.

Москва, 2017

Доктор технических наук В.Г. Цегельский

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПЕРВОЙ КНИГЕ

Двухфазными струйными аппаратами (СА) называются устройства, в проточной части которых происходит смешение струй, находящихся в разных фазовых состояниях, с образованием смеси, полное давление которой превышает полное давление одной или обеих смешиваемых фаз. В первом случае двухфазный СА называют эжектором, а во втором – инжектором. В инжекторе происходит процесс преобразования тепловой энергии парового потока в энергию давления смеси (термокомпрессия). Двухфазные СА нашли широкое применение во многих областях народного хозяйства: в тепловой и атомной энергетике, нефтехимии, при нефтегазодобыче и нефтепереработке, в космической и глубоководной технике и т.д.

Широкое использование двухфазных СА в промышленности объясняется, главным образом, простотой их конструкции, отсутствием подвижных металлических элементов, высокой надежностью и повышенным ресурсом работы, малыми габаритами и массой, легкостью обслуживания, а также экономичностью применения по сравнению с некоторыми агрегатами, способными заменить эти аппараты в ряде установок.

Книга написана на основе многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, проведенных под руководством и при непосредственном участии автора, который на протяжении многих лет разрабатывал и внедрял в промышленность двухфазные СА.

В монографии автор предлагает читателю познакомиться с разработанной им теорией двухфазных СА и ее применением к различным типам этих аппаратов. Теория базируется на трех основных уравнениях сохранения, записанных в интегральном виде для турбулентного квазистационарного течения смеси с неравномерным распределением параметров по сечению канала, и на термодинамике необратимых процессов. Дифференциальный аппарат используется при расчете тепло- и массообменных процессов между смешиваемыми струями. Разработанная на базе теоретических зависимостей методика расчета двухфазного СА позволяет учитывать влияние на его характеристики формы и размеров камеры смешения (КС), формы жидкостного сопла, предыстории жидкостного потока, термодинамических параметров и физических свойств рабочих компонентов на входе в аппарат, паросодержание газового компонента и ряд других факторов. Она объясняет многообразие режимов работы двухфазных СА и определяет условия, при кото-

рых эти режимы реализуются, позволяет рассчитывать аппараты, работающие в режимах эжектора и инжектора.

Результаты экспериментальных исследований в лабораторных и промышленных условиях двухфазных СА в широком диапазоне изменения их геометрических и режимных параметров, теплофизических и термодинамических свойств смешивающихся струй подтверждают применимость предложенной в книге методики расчета. В качестве жидкого компонента СА в экспериментах использовали воду, дизельную фракцию, вакуумный газойль, нефть, газовый конденсат, водный раствор моноэтаноламина, кремнийорганическую жидкость и др. Проведенные исследования распада жидкой струи, истекающей в ограниченный стенками спутный поток газа, показали, что при определенных параметрах газового потока начинается интенсивный распад струи, приводящий к интенсификации тепло- и массообменных процессов между смешивающимися потоками. К сожалению, из-за ограниченного объема книги в ней представлены только наиболее общие и интересные с точки зрения автора экспериментальные результаты.

Полученный экспериментальный и теоретический материал позволил автору совместно с сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО «Техновакуум» разработать вакуумные гидроциркуляционные агрегаты для создания разрежения в ректификационных колоннах нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств, струйно-компрессорные установки для утилизации факельных газов нефтеперерабатывающих заводов и нефтегазоконденсатных месторождений, а также струйно-абсорбционные установки рекуперации паров нефти; использовать двухфазные СА в качестве эксгаустерных систем высотных стендов; показать перспективность применения этих аппаратов в тепловых энергосиловых установках для освоения гидрокосмоса и в других областях. Использованию двухфазных СА в некоторых областях техники посвящена целая глава монографии.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a	– скорость звука; температуропроводность
a_K	– критическая скорость
$a_{K.A}, a_{K.П}$	– критическая скорость активного и пассивного газов
$a_{ж}, a_T$	– молекулярная и турбулентная температуропроводность жидкости
a_C	– параметр
a_Z, a_W, a_p, a_M	– коэффициенты в формуле распределения удельного потока жидкости в распыленной струе
B	– коэффициент
$B_{III} = G_{III} / G_{CT}$	– интегральный параметр коагуляции
B_V	– коэффициент изменения осевой скорости
B_d	– коэффициент среднего диаметра отраженных от стенки капель
C	– степень конденсации; коэффициент
$C_{ж}$	– удельная теплоемкость жидкости
C_p	– удельная теплоемкость при постоянном давлении
C_V	– удельная теплоемкость при постоянном объеме
d	– диаметр
d_0	– диаметр выходного сечения сопла жидкости; диаметр струи
E	– энергия; мощность; отношение полных давлений
$\text{erf}(U)$	– функция ошибок
F	– площадь; сила
$F_{кр}$	– площадь критического сечения сопла
f_A	– коэффициент расширения сверхзвукового сопла
f_C	– коэффициент сжатия струи
$f_{ГЖ}$	– коэффициент трения на границе раздела двух фаз
G	– массовый расход
g	– ускорение свободного падения; удельный поток жидкости
h	– высота; шаг сетки
J	– количество движения
i	– энтальпия
K	– коэффициент эжекции
K_1, K_2	– коэффициент эжекции на первом или втором критическом режиме, соответственно
$K_{2\lambda}$	– коэффициент эжекции на втором критическом режиме при $\lambda_{C2} = 1$
K_Q	– объемный коэффициент эжекции
K_T	– температурный коэффициент связи
l	– длина

$\bar{l}_{КС}$	– безразмерная (относительная) длина камеры смешения
M	– масса
m_V	– коэффициент отношения скоростей
n	– показатель адиабаты; показатель процесса расширения
n_D	– степень расширения диффузора
P	– давление
Q	– объемный расход; теплота
$q_{П}$	– массовая доля пара в парогазовой смеси
$q_{ГА}$	– массовая доля газа в жидкостно-газовой смеси на срезе сопла активного потока
R	– газовая постоянная или комплекс, включающий ее
r	– радиус
r_0	– теплота парообразования в тройной точке; радиус жидкостной струи на срезе сопла
r_U	– внутренняя теплота фазового перехода в тройной точке
$r_{П}$	– скрытая теплота парообразования
S	– энтропия; площадь боковой поверхности
S^0	– энтропия в точке начала ее отсчета
$S^{(F)}$	– поток энтропии
T	– абсолютная температура
T_0	– температура начала отсчета внутренней энергии
t	– время
t_1	– период осреднения
U	– удельная внутренняя энергия; отношение массовых расходов газа и жидкости в дисперсной смеси; параметр
$U_{П}$	– степень влажности пара
V	– скорость
$V_{СР}$	– среднерасходная скорость
$V_{ГСРi}$	– i -я средняя скорость газа ($i = 1 \dots 4$)
ϑ	– удельный объем
Y	– отношение скоростей
Z	– осевая координата струйного аппарата
z	– параметр
α	– геометрический параметр струйного аппарата
$\alpha_{КС}$	– угол конусности камеры смешения
α_D	– угол расширения диффузора
$\alpha_{ЦЭ}$	– геометрический параметр струйного аппарата с эквивалентной цилиндрической камерой смешения
$\beta = F_2/F_1$	– степень конусности камеры смешения
$\gamma_{П}$	– объемная доля пара в парогазовой смеси
δ	– толщина пленки
$\tilde{\delta} = F_{\delta}/F_1$	– безразмерная площадь торцов сопел

ΔS	– производство энтропии
ΔW	– разность кинетических энергий потока на входе в камеру смешения и на выходе из нее
ε	– коэффициент корреляции; безразмерная константа
$\eta, \eta_{из}$	– КПД и изотермический КПД, соответственно
θ	– коэффициент отношения температур; безразмерная переменная
θ_1	– угол наклона оси камеры смешения к вектору ускорения свободного падения
$\lambda = V/a_K$	– приведенная скорость
$\lambda_{ж}, \lambda_T$	– молекулярная и турбулентная теплопроводности жидкости
μ	– коэффициент динамической вязкости
$\mu_{сг}, \mu_{сж}$	– коэффициенты расхода газового и жидкостного сопл
ν	– коэффициент кинетической вязкости; коэффициент потерь полного давления
ξ_D	– коэффициент сопротивления диффузора
Γ	– объемная доля
Π	– динамический коэффициент связи
$\Pi_{кин}$	– кинетический коэффициент связи
ISS	– удельное производство энтропии
ISS_p, ISS_T, ISS_v	– удельное производство энтропии, вызванное выравниванием давления, температур, скоростей движения компонентов, соответственно
ISS_τ	– удельное производство энтропии из-за диссипации части кинетической энергии потока при его взаимодействии со стенкой камеры смешения
ISS_w	– разность между удельными производствами энтропии ISS_v и ISS_τ
ρ	– плотность
σ	– коэффициент поверхностного натяжения; параметр
τ	– объем; касательное напряжение; шаг сетки
φ	– коэффициент скорости; параметр
φ_n	– коэффициент отличия показателя процесса расширения газа в сопле от показателя адиабаты
ψ	– коэффициент восстановления полного давления; коэффициент потерь импульса

Простые нижние индексы

$0, \dots, 5; i; I; II$	– номер сечения струйного аппарата в соответствии с рис. 1.1; 3.23; 6.3; 8.1
$1 - 2$	– между сечениями 1 - 1 и 2 - 2

<i>A</i>	– активный поток (газ)
<i>БР</i>	– капля, отраженная от стенки (брызги)
<i>Г</i>	– газ
<i>ГА</i>	– газ активного потока
<i>ГП</i>	– газ пассивного потока
<i>Д</i>	– диффузор
<i>Ж</i>	– жидкость
<i>ИД</i>	– идеальное истечение
<i>КС</i>	– камера смешения
<i>К</i>	– капля
<i>КОН</i>	– конденсат
<i>Н</i>	– начальный участок
<i>ОТР</i>	– сечение отрыва
<i>П</i>	– пар; пассивный поток (газ)
<i>ПЛ</i>	– пленка
<i>ПС</i>	– поверхность струи
<i>С</i>	– смесь
<i>СЖ</i>	– сопло жидкости
<i>СК</i>	– скачок
<i>СР</i>	– среднее значение
<i>СТ</i>	– стенка
<i>СТР</i>	– струя; струйка на стенке
<i>Т</i>	– турбулентный; топливо
<i>ЧГ</i>	– чистый газ
<i>zap</i>	– запирающее эжектора
<i>gor</i>	– горло эжектора
<i>n</i>	– проекция на нормаль
<i>S</i>	– параметр насыщения
<i>Z</i>	– проекция на ось <i>Z</i> струйного аппарата
δ	– торец сопла

Сложные нижние индексы

<i>Г1, Г2, Ж1, Ж2,</i> <i>ЧГ1, ГА1, ГП1</i> и т. д.	– буквы в индексе указывают на компонент (газ, жидкость, «чистый газ», газ активного потока, газ пассивного потока и т. д.), цифра – на сечение струйного аппарата
<i>ГСК, ЖСК</i>	– соответственно параметр газа и жидкости в сечении за скачком
<i>ГЖ</i>	– параметры на границе раздела газ – жидкость
<i>ЖСР</i>	– среднее значение параметра жидкостного потока
<i>СРК</i>	– среднее значение параметра капли

1 – 2 CP – среднее значение параметра между сечениями 1 – 1 и 2 – 2 струйного аппарата

Верхние индексы

– – осредненное по времени значение; относительная величина
 ' – пульсационная составляющая; параметр потока, соответствующий критическому режиму течения смеси
 '' – параметр потока, соответствующий докритическому режиму течения смеси
 * – параметр изоэнтропически заторможенного потока
 + – безразмерная переменная в уравнении теплопроводности
 (i) – парциальное давление
 нас – параметр насыщенного пара

Безразмерные числа (критерии)

$$M = \mu_{ж}^2 / (\rho_{ж} d \sigma)$$

$$\rho = \rho_r / \rho_{ж}$$

$$\Pi = \frac{\rho_r}{\rho_{ж}} \left[\left(\frac{V_r}{V_{ж}} \right)^2 - \frac{V_r}{V_{ж}} \right]$$

$Pr = \nu/a$ – число Прандтля

$Re = Vd/\nu$ – число Рейнольдса

$We = V_{ж}^2 \rho_{ж} d / \sigma$ – число Вебера

$M = V/a$ – число Маха

Условные сокращения

ВГЦ-агрегат – вакуумный гидроциркуляционный агрегат
 ГЖСА – газожидкостный струйный аппарат
 ГПЖСА – газопарожидкостный струйный аппарат
 ДУ – двигательная установка
 ЖГСА – жидкостно-газовый струйный аппарат
 ЖГПСА – жидкостно-газопаровой струйный аппарат
 КС – камера смешения
 КПД – коэффициент полезного действия
 ПЖСА – парожидкостный струйный аппарат
 ПГЖСА – парогазожидкостный струйный аппарат
 СА – струйный аппарат

ЧАСТЬ I ДВУХФАЗНЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

ГЛАВА 1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Классификация и принципиальные схемы двухфазных струйных аппаратов

Двухфазными струйными аппаратами (СА) называются устройства, в проточных каналах которых происходит смешение двух струй, находящихся в разных агрегатных состояниях, с дальнейшим образованием смешанного двухфазного или однофазного потока. В зависимости от физических свойств и параметров смешиваемых потоков на выходе СА образуется однофазная (парогазовая или жидкостная) или двухфазная (парогазожидкостная или газожидкостная) среда. В случае использования СА для подачи взвеси твердых частиц на выходе из него образуется двухфазная смесь газа и твердой фазы.

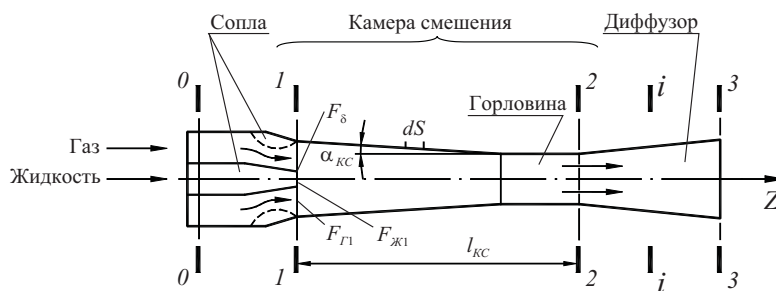


Рис. 1.1. Схема двухфазного СА

Двухфазный СА (рис. 1.1) состоит из газового и жидкостного сопел, камеры смешения (КС) и диффузора. Взаимное расположение сопел, их число и форма могут быть различными, так же как длина и форма КС. В качестве основных безразмерных геометрических па-

ГЛАВА 2 УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ТЕЧЕНИЕ ПОТОКОВ В ДВУХФАЗНОМ СТРУЙНОМ АППАРАТЕ

2.1. Основные допущения, принятые при выводе уравнений

Двухфазный СА состоит из газового и жидкостного сопл, КС и диффузора (см. рис. 1.1). Взаимное расположение сопл, их число и форма могут быть различными. В широком диапазоне могут изменяться форма и длина КС. Парогазовая смесь, используемая в качестве газообразного компонента¹, поступает в КС через дозвуковое или сверхзвуковое (см. штриховые линии на рис. 1.1) сопло, а жидкость – через сужающийся насадок. На выходе из КС образуется турбулентный двухфазный газожидкостный поток, характеризующийся неравномерностью распределения и интенсивными пульсациями его параметров. Через диффузор, преобразующий кинетическую энергию потока в энергию давления, газожидкостная смесь вытекает из СА.

При выводе уравнений эжекции принимаем следующие основные допущения:

- 1) турбулентное течение, реализуемое в рассматриваемом СА, является квазистационарным;
- 2) стенки сопл, КС и диффузора нетеплопроводны;
- 3) процесс смешения не сопровождается химическими превращениями;
- 4) теплоемкость и плотность жидкости не зависят от температуры и давления;
- 5) парогазовая смесь на входе в КС и на выходе из нее подчиняется уравнению состояния идеального газа, а ее удельная теплоемкость не зависит от температуры и давления;
- 6) пар, содержащийся в парогазовой смеси, является идеальным газом и при конденсации образует жидкость с теми же

¹ Далее газообразный компонент будем называть газом.

ГЛАВА 3 ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ (ЖГСА)

3.1. Теоретический анализ возможных режимов работы ЖГСА

3.1.1. Три режима работы ЖГСА как результат термодинамического анализа

Назовем идеальным СА такой, у которого в выходном сечении КС образуется стационарная однородная механически и термодинамически равновесная по всему сечению двухфазная смесь и отсутствуют потери полного давления от взаимодействия потока со стенкой. В этом случае в уравнениях эжекции, приведенных в 2.2, имеем $\theta = 1$, $m_V = 1$, $K_{T_{ж2}} = K_{T_{г2}} = 1$, $\Pi_{ж2} = \Pi_{кин ж2} = \Pi_{г2} = \Pi_{кин г2} = 1$, $\tau_{1-2CP} = 0$. Отметим, что характеристики реального СА могут приближаться к характеристикам идеального аппарата, но никогда не достигают их.

Используя (2.30) – (2.33) и пренебрегая влиянием сил поверхностного натяжения ($\sigma = 0$), запишем уравнения эжекции для идеального двухфазного СА:

$$V_{C2} = \frac{-d \pm \sqrt{d^2 - 4lq}}{2l}; \quad (3.1)$$

$$P_{C2} = \frac{(1-\tilde{\delta})\rho_{ж} V_{ж1}}{(1+\alpha)[\beta - z(\beta-1)]} (N - V_{C2} D); \quad (3.2)$$

$$T_{C2} = -\frac{\beta V_{C2}^2}{[\beta - z(\beta-1)]R} +$$

ГЛАВА 4 ЖИДКОСТНО-ГАЗОПАРОВЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ (ЖГПСА)

4.1. Теоретический анализ возможных режимов работы ЖГПСА

Используя теоремы термодинамики необратимых процессов, проанализируем возможные режимы работы ЖГПСА и условия их реализации в зависимости от содержания пара в газообразном компоненте, поступающем в КС. Рассмотрим сначала идеальный ЖГПСА, для которого справедливы уравнения эжекции вида (3.1) – (3.3). В таком ЖГПСА происходит полная конденсация пара в КС ($q_{п2} = 0$), а в ее выходном сечении устанавливается термодинамическое равновесие относительно осредненных температур газа и жидкости ($\theta = 1$). В этом случае степень конденсации пара в КС $C = q_{п1}$ (см. (2.60)).

На рис. 4.1, 4.2 приведены зависимости ряда величин от коэффициента эжекции для водопаровоздушного СА с цилиндрической и конической КС при трех значениях массовой доли водяного пара в парогазе $q_{п1}$ на входе аппарата. Удельное производство энтропии $ΠS$ и ее составные части определяли по формулам, приведенным в 2.5, а разность кинетических энергий потоков на входе и выходе КС – по формуле (3.16). Отметим, что при построении зависимостей для конических КС в уравнениях эжекции принимали коэффициент $z = 0,5$. В силу конденсации пара и выравнивания температуры смеси зависимости $ΠS = f(K)$ практически полностью находятся в области положительных значений $ΠS$ и на рисунках не приведены.

Не останавливаясь на описании термодинамического анализа, подробно изложенного в 3.1, приведем сразу его результаты.

1. В ЖГПСА, как и в ЖГСА, реализуются все основные режимы работы: докритические, критические и частичного распада, причем при небольших значениях $q_{п1}$ справедливы равенства стати-

ГЛАВА 5 ПАРОЖИДКОСТНЫЕ И ПАРОГАЗОЖИДКОСТНЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ (ИНЖЕКТОРЫ)

5.1. Общие сведения

В 1.1 дано определение ПЖСА и ПГЖСА, которые часто называют инжекторами. В таких аппаратах путем преобразования тепловой энергии пара в кинетическую энергию жидкой струи можно на выходе из СА создать полное давление потока, превышающее полные давления пара (парогаза) и жидкости на входе в аппарат.

В 1.3 приведен обзор работ, посвященных экспериментально-теоретическому исследованию инжекторов.

Инжекторы (например, ПГЖСА) отличаются от эжекторов (например, ЖГПСА, описанных в гл. 4) количеством тепловой энергии парогазового потока, которая преобразуется в аппарате в кинетическую энергию жидкостной струи, приходящейся на единицу расхода. Отсюда следуют некоторые конструктивные особенности инжектора. В отличие от эжектора он обязательно имеет сверхзвуковое или звуковое газовое (паровое) сопло и, как правило, коническую КС. В газовом сопле потенциальная энергия пара преобразуется в кинетическую энергию парового потока, который со сверхзвуковой или звуковой скоростью поступает в КС и взаимодействует в ней со струей жидкости, истекающей из соответствующего сопла. При этом скорость пара и его температура на срезе сопла выше соответствующих параметров жидкостной струи. Большая относительная скорость смешивающихся разнофазных потоков и высокий коэффициент эжекции способствуют интенсивному дроблению жидкостной струи (см. 4.4) и разгону частиц жидкой фазы. Одновременно с этим в КС происходят интенсивные тепло- и массообменные процессы. Все это приводит к перестройке структуры потока с одновременной конденсацией паровой фазы при приближении к выходному сечению КС.

ГЛАВА 6 ЖИДКОСТНО-ГАЗОВЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ С АКТИВНЫМ ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ

6.1. Общие сведения

ЖГСА с активным двухфазным потоком по своему конструктивному исполнению аналогичны обычным ЖГСА, рассмотренным в гл. 3. Однако в них в качестве активного потока вместо жидкости используется двухфазная жидкостно-газовая смесь или жидкость, которая при течении по соплу частично переходит в газовую фазу (например, истечение из сопла вскипающей жидкости, газонасыщенной нефти и др.). Течение в сопле такого аппарата активной двухфазной жидкостно-газовой смеси, даже с массовой долей газа на несколько порядков меньше, чем жидкости, приводит, как будет показано далее, к некоторым отличиям характеристик этих аппаратов от характеристик обычных ЖГСА.

С помощью ЖГСА с активным двухфазным потоком могут быть решены такие нефтепромысловые проблемы, как утилизация нефтяного газа и ликвидация технологических факелов, откачка нефтегазовой продукции по одному нефтепроводу и др. На рис. 6.1 приведена схема использования этих аппаратов в нефтегазодобыче. Двухфазный СА на установках подготовки нефти или конденсата к транспортировке позволяет осуществлять перекачку газа с последующей ступени сепарации на предыдущую. Давление низконапор-

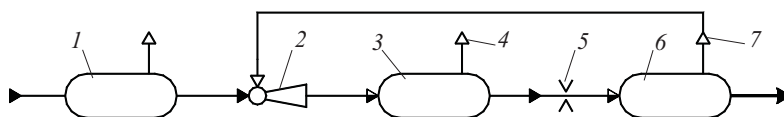


Рис. 6.1. Схема компримирования нефтяного газа на установке подготовки нефти к транспортировке:

1, 3, 6 – сепараторы; 2 – двухфазный СА; 4 – газ высокого давления; 5 – дроссель; 7 – газ низкого давления

ГЛАВА 7 ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХФАЗНЫХ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

7.1. Двухфазные струйные аппараты в нефтяной, газовой и нефтехимической отраслях промышленности

7.1.1. Двухфазные струйные аппараты для создания вакуума в ректификационных колоннах и других технологических емкостях

Двухфазные СА нашли широкое применение в нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах для откачивания парогазовых потоков из технологических колонн различного назначения с целью создания в них вакуума. Это обусловлено в первую очередь тем, что с помощью таких СА намного проще решаются актуальные для указанных выше производств проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды. Одновременно сокращаются эксплуатационные расходы на создание вакуума и повышается надежность работы установки в сравнении с другими применяемыми вакуумсоздающими устройствами. В работах [6, 15 – 39, 295 – 297] дано описание ряда схем вакуумсоздающих установок с двухфазным СА и циркулирующей по замкнутому контуру рабочей жидкостью, названных в промышленности вакуумными гидроциркуляционными агрегатами (ВГЦ-агрегатами). Рассмотрим наиболее общие из них.

В ВГЦ-агрегате, схема которого изображена на рис. 7.1, откачиваемая из колонны 1 парогазовая смесь направляется после системы конденсации паров (применяется по необходимости, поэтому на рисунке не показана) на вход двухфазного СА 2. В аппарате происходит сжатие парогаса за счет энергии струи рабочей жидкости, подаваемой в него насосом 3. Одновременно с этим идет процесс конденсации паров на струе рабочей жидкости (паров углеводородов и водяного пара в случае перегонки мазута). Образовавшаяся в СА жидкостно-газовая смесь поступает в сепаратор 5,

ЧАСТЬ II ГАЗОВЫЕ СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ (ЭЖЕКТОРЫ)

ГЛАВА 8 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

8.1. Области применения и схемы газовых эжекторов

Газовыми струйными аппаратами называются устройства, в проточных каналах которых происходит смешение двух газовых струй, сопровождающееся увеличением полного давления низконапорного (пассивного) потока за счет энергии другого высоконапорного (активного) потока. В процессе передачи при смешении энергии от одного потока к другому образуются скачки уплотнения в случае сверхзвуковой скорости течения хотя бы одной из смешиваемых струй. В результате полное давление смеси газов становится больше полного давления пассивного газа, но меньше полного давления активного газа. В соответствии с классификацией, приведенной в 1.1, такие аппараты относятся к классу эжекторов, поэтому их называют *газовыми эжекторами* (эта терминология используется и далее).

Газовые эжекторы благодаря их конструктивной простоте, надежности, способности работать в широком диапазоне параметров и расходов смешиваемых струй применяются в нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, металлургии, теплоэнергетике, нефтехимии, самолетостроении, вакуумной технике и многих других областях. Так, в конденсационных установках паровых турбин газовые эжекторы используются для понижения давления за турбиной. В газодобывающей промышленности они поднимают давление газа, выходящего из низконапорной скважины, до магистрального давления за счет энергии газа высоконапорной скважины. Газовые эжекторы применяются для увеличения реактивной тяги путем подмешивания атмосферного воздуха к струе газа, выходящего из сопла реактивного двигателя, используются в пароэжекторных холодильных установках, в системах вентиляции, в аэродинамических трубах и других установках различного

ГЛАВА 9 УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ТЕЧЕНИЕ ПОТОКОВ В ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ, И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ

9.1. Уравнения эжекции газового эжектора

Эжектор состоит из сопел активного и пассивного газов, КС и диффузора (см. рис. 8.1). Из сопел могут истекать потоки с дозвуковой, звуковой и сверхзвуковой скоростью в зависимости от формы сопел, термодинамических параметров потоков и режимов работы эжектора. Геометрическая форма и длина камер смешения могут быть разными. На выходе из КС образуется турбулентный поток смеси газов, который может иметь как дозвуковую, так звуковую и сверхзвуковую скорость течения. Этот поток характеризуется неравномерностью по сечению осредненных по времени параметров и интенсивными пульсациями. Через диффузор, преобразующий кинетическую энергию потока в энергию давления, газовая смесь вытекает из эжектора.

Запишем уравнения эжекции для газового эжектора, устанавливающие зависимость параметров смеси газов в выходном сечении КС от параметров газов до смешения, аналогично приведенным в 2.2. В качестве безразмерных геометрических параметров эжектора примем: параметр α – отношение площади выходного сечения сопла пассивного газа $F_{П1}$ к площади выходного сечения сопла активного газа $F_{А1}$; степень конусности КС β – отношение площади F_2 поперечного сечения 2–2 эжектора к площади F_1 поперечного сечения 1–1; безразмерную длину КС $\bar{l}_{КС}$ – отношение длины $l_{КС}$ камеры смешения к ее выходному диаметру d_2 ; параметр $\tilde{\delta}$ – отношение площади F_8 торцев сопел к площади F_1 . Здесь и далее параметры активного газа будем отмечать в индексе буквой A , параметры пассивного газа – буквой P , параметры смеси газов – буквой C , а цифрой – сечение эжектора (см. рис. 8.1), к которому относится параметр.

ГЛАВА 10

ЗВУКОВЫЕ И СВЕРХЗВУКОВЫЕ ГАЗОВЫЕ ЭЖЕКТОРЫ С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

10.1. Рабочие характеристики газовых эжекторов

Один и тот же эжектор может работать на различных режимах (см. 9.5). Режим работы эжектора и картина течения смешиваемых потоков в его проточной части зависят как от параметров активного и пассивного газов на входе, так и от давления смеси на выходе аппарата.

Рабочие характеристики эжектора заданной геометрии представляют собой различные зависимости между параметрами активного и пассивного газов на входе в него и давлением смеси на выходе, позволяющие одновременно определять как режим работы, так и картину течения потока в проточной части аппарата, соответствующую этому режиму.

10.1.1. Дроссельная характеристика эжектора и соответствующие ее участкам картины течения потоков в камере смешения

Дроссельной характеристикой называют зависимость одного из параметров эжектора заданной геометрии от давления смеси на выходе из него, построенную при постоянстве остальных параметров. Характеристику называют дроссельной потому, что экспериментально ее получают посредством изменения (дросселирования) давления на выходе из эжектора. Чаще всего используют дроссельные характеристики двух типов.

Дроссельная характеристика первого типа устанавливает зависимость между коэффициентом эжекции и давлением смеси газов на выходе эжектора при заданном полном давлении $P_{П0}^*$ пассивного

ГЛАВА 11 СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОВЫЙ ЭЖЕКТОР С КОНИЧЕСКОЙ КАМЕРОЙ СМЕШЕНИЯ

11.1. Два критических режима работы газового эжектора с конической камерой смешения как результат термодинамического анализа

В 9.5 на основании термодинамического анализа было показано, что в газовом эжекторе с конической КС при одном и том же коэффициенте эжекции может быть реализован как первый, так и второй критический режим. Например, для $K = 0,21$ первый критический режим может реализоваться при $P_{П0}^* = 0,035$ МПа (см. рис. 9.5, *a*), а второй – при $P_{П0}^* = 0,05$ МПа (см. рис. 9.4, *a*). При этом реализовавшийся при определенных условиях первый критический режим должен скачкообразно перейти во второй критический или докритический режим. Было указано на влияние порядка подачи активного и пассивного газов при запуске эжектора на реализацию первого критического режима работы. Для подтверждения результатов термодинамического анализа было проведено экспериментальное исследование эжектора, результаты расчета которого представлены на рис. 9.4, *a* и 9.5, *a*. На рис. 11.1, *a* приведена экспериментальная дроссельная характеристика такого эжектора для $K = 0,215$, а на рис. 11.1, *б* – распределение статического давления, замеренного на стенке в указанных точках проточной части эжектора с приведенной на рисунке геометрией. Номера кривых распределения давления на рис. 11.1, *б* соответствуют номерам точек на дроссельной характеристике (см. рис. 11.1, *a*). При запуске эжектора сначала подавали активный газ при противодавлении не выше 0,11 МПа, а затем постепенно увеличивали расход пассивного газа до получения коэффициента эжекции $K = 0,215$, после чего изменяли противодавление P_{C3}^* . В силу малой скорости течения смеси газов в выходном сечении диффузора замеряемое в этом сечении статическое давление и противодавление в барокамере, установленной

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соколов Е.Я., Зингер Н.М.* Струйные аппараты. – М.: Энергия, 1970. – 287 с.
2. *Вакуумная техника / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александров и др.; под ред. Е.С. Фролова.* – М.: Машиностроение, 1985. – 359 с.
3. *Келлер С.Ю.* Инжекторы. – М.: Машгиз, 1954. – 96 с.
4. *Аронс Г.А.* Струйные аппараты. – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 139 с.
5. *Ефимочкин Г.И.* Сравнительные испытания пароструйных и водоструйных эжекторов на турбине Т-250/300-240 ТМЗ // Электрические станции. – 1982. – № 8. – С. 20 – 23.
6. *Топливо-энергетический комплекс России.* Федеральный справочник. – М.: Родина-Про, 1999. – С. 407.
7. *Донец К.Г.* Гидроприводные струйные компрессорные установки. – М.: Недра, 1990. – 174 с.
8. *Донец К.Г., Рошак И.И., Еремича Л.Н.* Применение насосного эжектора для перекачки нефтяного газа // Нефтепромысловое дело. – 1978. – № 5. – С. 58 – 60.
9. *Донец К.Г., Писарик М.Н., Рошак И.И.* Оценка возможности использования насосно-эжекторных станций для сбора и транспорта нефтяного газа // Нефтепромысловое дело. – 1978. – № 12. – С. 28 – 30.
10. *Цегельский В.Г.* Способ сжатия и подачи под давлением углеводородсодержащих газообразных сред: Пат. 2158623 РФ; Бюл. изобрет. № 31, ноябрь 2000. – С. 278.
11. *Tsegelsky V.G.* Method of Compressing Gaseous Hydrocarbon-Containing Medium. – Pat. 6,767,191 US; July 27, 2004.
12. *Цегельский В.Г., Харитонов Н.В.* Способ сжатия и разделения газообразной углеводородсодержащей среды и насосно-эжекторная установка для осуществления способа: Пат. 2182266 РФ; Бюл. изобрет. № 13, май 2002. – С. 307 – 308.
13. *Цегельский В.Г., Акимов М.В.* Способ сжатия газообразной среды и насосно-эжекторная установка для его осуществления: Пат. 2101577 РФ; Бюл. изобрет. № 1, январь 1998. – С. 352 – 353.
14. *Акимов М.В., Цегельский В.Г.* Способ работы насосно-эжекторной установки: Пат. 2054583 РФ; Бюл. изобрет. № 5, февраль 1996. – С. 192.

15. *Цегельский В.Г., Акимов М.В.* Применение высокоэффективных струйных аппаратов для создания вакуума и утилизации факельных газов в технологиях добычи и переработки нефти и газа // Передовые технологии на пороге XXI века: Тез. докл. Междунар. конф. – М., 1998. – С. 65 – 67.
16. *Цегельский В.Г., Абросимов А.А., Кочергин И.А.* Установка для вакуумной перегонки нефтяного сырья: Пат. 2048156 РФ; Бюл. изобрет. № 32, ноябрь 1995. – С. 131.
17. *Абросимов А.А., Кочергин И.А., Цегельский В.Г.* и др. Способ вакуумной перегонки жидкого продукта и установка для его осуществления: Пат. 2050168 РФ; Бюл. изобрет. № 35, декабрь 1995. – С. 156.
18. *Tsegelsky V.G., Mevada V., Malashkevich A.V.* New Technology for Creating Vacuum // Active Conservation Techniques. – New Delhi, India. – July – Sept. 2002. – P. 6 – 10.
19. *Попов В.Г., Кобак О.А., Филимонов И.В.* Модернизация вакуумного блока установки ЭЛОУ-АВТ-3 // Химия и технология топлив и масел. – 2000. – № 3. – С. 39 – 40.
20. *Абросимов А.А.* Экологически чистая вакуум-создающая система для ректификационных колонн // Нефтепереработка и нефтехимия. – 1997. – № 11. – С. 39 – 44.
21. *Tsegelsky V.G.* Method and Device for Producing Vacuum in a Petroleum Distillation Column. – Pat. 8,337,672 US; December. 25, 2012.
22. *Цегельский В.Г.* Насосно-эжекторная установка: Пат. 2084707 РФ; Бюл. изобрет. № 20, июль 1997. – С. 314.
23. *Цегельский В.Г.* Установка для перегонки жидкого продукта: Пат. 2091117 РФ; Бюл. изобрет. № 27, сентябрь 1997. – С. 213.
24. *Цегельский В.Г.* Способ создания вакуума в вакуумной колонне перегонки нефтяного сырья и установка для осуществления способа: Пат. 2392028 РФ; Бюл. изобрет. № 17, июнь 2010. – С. 545 – 546.
25. *Цегельский В.Г.* Установка для вакуумной перегонки сырья, преимущественно нефтяного сырья: Пат. 2325207 РФ; Бюл. изобрет. № 15, май 2008. – С. 496 – 497.
26. *Цегельский В.Г.* Способ перегонки нефти и установка перегонки нефти для его осуществления: Пат. 2161059 РФ; Бюл. изобрет. № 36, декабрь 2000. – С. 280 – 281.
27. *Цегельский В.Г.* Способ создания вакуума при перегонке жидкого продукта: Пат. 2102433 РФ; Бюл. изобрет. № 2, январь 1998. – С. 274.
28. *Цегельский В.Г.* Способ перегонки жидкого продукта: Пат. 2102102 РФ; Бюл. изобрет. № 2, январь 1998. – С. 183.
29. *Цегельский В.Г.* Установка для создания вакуума при перегонке жидкого продукта: Пат. 2112577 РФ; Бюл. изобрет. № 16, июнь 1998. – С. 271.

30. *Цегельский В.Г.* Способ создания вакуума в вакуумной колонне перегонки нефтяного сырья и установка для осуществления способа: Пат. 2354430 РФ; Бюл. изобрет. № 13, май 2009. – С. 494 – 495.
31. *Цегельский В.Г., Акимов М.В.* Жидкостно-газовый струйный аппарат: Пат. 2132976 РФ; Бюл. изобрет. № 19, июль 1999. – С. 481.
32. *Цегельский В.Г., Акимов М.В.* Способ работы вакуум-создающей насосно-эжекторной установки и устройства для его реализации: Пат. 2135841 РФ; Бюл. изобрет. № 24, август 1999. – С. 479 – 480.
33. *Цегельский В.Г.* Установка для создания вакуума в вакуумной колонне перегонки нефтяного сырья: Пат. 109671 РФ; Бюл. изобрет. № 30, октябрь 2011. – С. 937 – 938.
34. *Абросимов А.А.* Экологические аспекты производства и применения нефтепродуктов. – М.: Барс, 1999. – 731 с.
35. *Tsegelsky V.G., Abrosimov A.A., Kochergin I.A.* Process for the Vacuum Distillation of Crude Petroleum and a Facility for Carrying out the Process. – Pat. 0783910B1 EU; July 12, 2000.
36. *Tsegelsky V.G.* Facility for Distilling a Liquid Product. – Pat. 6,086,721 US; July 11, 2000.
37. *Abrosimov A.A., Kochemasov A.M., Tsegelsky V.G.* Method for Vacuum Distillation of a Liquid Product and an Equipment for Performing Thereof. – Pat. 5,980,698 US; Nov. 9, 1999.
38. *Tsegelsky V.G.* Method and Device for Producing Vacuum in a Petroleum Distillation Column. – Pat. 2 239 027 EU; Bulletin № 8, February 2010.
39. *Tsegelsky V.G.* Method for Producing Vacuum in a Vacuum Oil-Stock Distillation Column and a Plant for Carrying out the Method. – Patent 8,784,648 US; July 22, 2014.
40. *Tsegelsky V.G.* Method for Removing Hydrocarbons from a Vapour-Gas Mixture and a Device for Carrying out Said Method. – Pat. 8,034,159 US; October 11, 2011.
41. *Коршак А.А., Блинов И.Г., Новоселов В.Ф.* Системы улавливания легких фракций нефти и нефтепродуктов из резервуаров: учеб. пособие. – Уфа: Изд-во Уфим. нефт. ин-та, 1991. – 71 с.
42. *Прохоренко Ф.Ф., Андреева Г.А.* Герметизированная система хранения испаряющихся нефтепродуктов в резервуарах и защита окружающей среды. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 48 с.
43. *Цегельский В.Г.* Способ очистки от углеводородов парогазовой среды, образующейся при хранении нефти или бензина или при наполнении емкости нефтью или бензином, и установка для его осуществления (варианты): Пат. 2304016 РФ; Бюл. изобрет. № 22, август 2007. – С. 362 – 363.

44. Дроздов А.Н., Демьянова Л.А. О способах эксплуатации насосно-эжекторных систем // Нефтепромышленное дело. – 1999. – № 4. – С. 42 – 45.
45. Brown G.A., Stem J. An Analytical Study of the Use of the Condensing Ejector in a 300 KW Loop-and-One-Half Space Power System // Report № 41, Joseph Kaye and company. – Cambridge, 1961. – 87 p.
46. Степанчук В.Ф., Салтанов Г.А., Циклаури Г.В. Выбор оптимальных параметров работы жидкометаллической МГД-установки // Теплофизика высоких температур. – 1969. – Т. 7, № 3. – С. 502 – 507.
47. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А. Термодинамика энергетической МГД-установки с парожидкостным инжектором // Теплофизика высоких температур. – 1965. – Т. 3, № 5. – С. 757 – 764.
48. Методика расчета простейшего инжектора / М.Е. Дейч, В.Ф. Степанчук, Г.В. Циклаури и др. // Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии. – М.: Энергия, 1968. – С. 456 – 467.
49. Экспериментальное исследование модели инжектора как разгонного устройства для МГД-установок / М.Е. Дейч, Е.П. Марков, А.П. Севастьянов и др. // Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии. – М.: Энергия, 1968. – С. 433 – 444.
50. Brown G.A., Lee K.S. A Liquid Metal MHD Power Generation Cycle Using a Condensing Ejector // Proceedings of the International Symposium on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. – Vienna: International Atomic Energy Agency. – 1964. – V. 2. – P. 929 – 939.
51. Шишков А.А., Силин Б.М. Высотные испытания реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1985. – 207 с.
52. Акимов М.В., Цегельский В.Г. Экспериментальные исследования жидкостно-газовых струйных аппаратов с двухфазным активным потоком // Ракетно-космические двигательные установки: Тез. докл. Рос. конф. – М., 1998. – С. 47.
53. Грейнер Л. Гидродинамика и энергетика подводных аппаратов. – Л.: Судостроение, 1978. – 384 с.
54. Алексеев Г.Н. Основы теории энергетических установок подводных подвижных аппаратов. – М.: Наука, 1974. – 294 с.
55. Цегельский В.Г., Чернухин В.А. Исследование некоторых схем тепловых энергоустановок разомкнутого цикла для обитаемых подводных аппаратов // Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 394. – М., 1983. – С. 33 – 39.
56. Цегельский В.Г., Чернухин В.А., Жердев В.М. Исследование двухфазного струйного аппарата как устройства для удаления газов в теплоэнергетических установках // Технические средства изучения и освоения океана: Тез. докл. Всесоюз. конф. «Океанотехника – 81». – Севастополь, 1981. – С. 87 – 88.

57. *Кудрявцев В.М., Буркальцев В.А., Чернухин В.А.* Характеристики теплоэнергетической установки с двухфазным струйным аппаратом на выхлопе отработанных газов // Технические средства изучения и освоения океана: Тез. докл. Всесоюз. конф. «Океанотехника – 81». – Севастополь, 1981. – С. 89.
58. *Шаманов Н.П., Дядик А.Н., Лабинский А.Ю.* Двухфазные струйные аппараты. – Л.: Судостроение, 1989. – 240 с.
59. *Башкатов В.А., Орлов П.П., Федосов М.И.* Гидрореактивные пульсивные установки. – Л.: Судостроение, 1977. – 296 с.
60. *Ивченко В.М.* Основы теории гидрореактивного движения // Современные вопросы гидродинамики. – Киев: Наукова думка, 1967. – С. 115 – 124.
61. *Иванов Д.А., Цегельский В.Г.* Способы удаления газов в теплоэнергетических установках подводных роботов // Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. Всесоюз. конф. – М., 1980. – С. 28 – 29.
62. *Цегельский В.Г., Ефимов А.В., Чернухин В.А.* Применение эжектора в энергетических установках // Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении: Тез. докл. Всесоюз. конф. – М., 1980. – С. 66.
63. *Исследование* возможности использования двигательных установок с химическим источником энергии для подводных аппаратов типа «ОСА» / В.М. Кудрявцев, А.С. Вихров, В.Г. Цегельский и др. // Технические средства изучения и освоения океана: Тез. докл. 2-й Всесоюз. конф. – Л., 1978. – С. 78.
64. *Эллиот Д.Ж.* Исследование газоструйных насосов для ракетных двигателей // Исследование ракетных двигателей на жидком топливе. – М.: Мир, 1964. – С. 324 – 354.
65. *Pfleiderer C.* Zur Berechnung der Wasserstrahl-züftpumpen // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1914. – Bd. 58, N. 24. – S. 965 – 973.
66. *Klone K.G.* Untersuchungen an Wasserstrahl – Luftpumpen // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1935. – Bd. 79, N. 3. – S. 77 – 78.
67. *Радциг А.А.* Теория и расчет конденсационных установок. – М.: Энергоиздат, 1934. – 218 с.
68. *Казанский А.М.* Конденсационные устройства. – М.: ГОНТИ, 1939. – 306 с.
69. *Анатолиев Ф.А.* Теплообменные аппараты судовых паросиловых установок. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 495 с.
70. *Захариков Г.М.* Основы теории водоструйных аппаратов для сжатия воздуха / Ин-т горного дела. – М., 1965. – 156 с.

71. *Берман Л.Д., Ефимочкин Г.И.* Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов // Теплоэнергетика. – 1964. – № 7. – С. 44 – 48.
72. *Зингер Н.М.* Исследование водовоздушного эжектора // Теплоэнергетика. – 1958. – № 8. – С. 26 – 31.
73. *Баженов М.И.* Исследование работы двухфазных струйных аппаратов // Электрические станции. – 1967. – № 4. – С. 39 – 41.
74. *Ефимочкин Г.И., Кореннов Б.Е.* Методика расчета водовоздушного эжектора с удлиненной цилиндрической камерой смешения // Теплоэнергетика. – 1976. – № 1. – С. 84 – 86.
75. *Ефимочкин Г.И.* Конструкция и расчет водоструйных эжекторов с удлиненной камерой смешения // Теплоэнергетика. – 1982. – № 12. – С. 48 – 51.
76. *Ефимочкин Г.И., Кореннов Б.Е.* Исследование и выбор водоструйных эжекторов с удлиненной цилиндрической камерой смешения // Электрические станции. – 1976. – № 4. – С. 46 – 49.
77. *Шпитов А.Б., Спиридонов Е.К.* О предельных режимах работы жидкостно-газового эжектора // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Тематический сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1991. – С. 129 – 134.
78. *Демьянова Л.А.* Аналитический расчет характеристик струйного аппарата при откачке газожидкостных смесей // Нефтепромышленное дело. – 1999. – № 5. – С. 39 – 44.
79. *Каула Р.Д., Робинсон И.В., Яновский М.О.* Конденсационные установки. – Л.: ГТИ, 1930. – 284 с.
80. *Копьев С.Ф.* Вспомогательное оборудование машинных цехов электростанций. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 296 с.
81. *Канингэм Р.Ж.* Сжатие газа с помощью жидкоструйного насоса // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д: Теоретические основы инженерных расчетов. – 1974. – № 3. – С. 112 – 118.
82. *Канингэм Р.Ж., Допкин Р.И.* Длины участка разрушения струи и смешивающей горловины жидкоструйного насоса для перекачки газа // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д: Теоретические основы инженерных расчетов. – 1974. – № 3. – С. 128 – 141.
83. *Шидловский В.П.* К расчету газожидкостного эжектора // Изв. АН СССР. ОТН. – 1954. – № 10. – С. 119 – 123.
84. *Васильев Ю.Н.* Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1971. – Вып. 5. – С. 175 – 261.
85. *Васильев Ю.Н., Гладков Е.П.* Экспериментальное исследование вакуумного водовоздушного эжектора с многоствольным соплом //

- Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1971. – Вып. 5. – С. 262 – 306.
86. *Васильев Ю.Н.* Некоторые одномерные задачи течения двухфазной газопарожидкостной смеси // Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1972. – Вып. 6. – С. 179 – 201.
 87. *Цегельский В.Г.* К теории двухфазного струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1977. – № 6. – С. 79 – 85.
 88. *Цегельский В.Г.* Применение теорем термодинамики необратимых процессов в определении режима работы двухфазного струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1976. – № 5. – С. 98 – 103.
 89. *Цегельский В.Г.* Определение режимов работы жидкостно-газового струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1977. – № 5. – С. 60 – 65.
 90. *Цегельский В.Г.* О зависимости для динамического коэффициента связи в выходном сечении жидкостно-газового струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 1. – С. 47 – 51.
 91. *Цегельский В.Г.* К расчету характеристик жидкостно-газового струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1984. – № 3. – С. 63 – 68.
 92. *Цегельский В.Г.* К расчету оптимальной длины камеры смешения жидкостно-газового струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – № 7. – С. 61 – 67.
 93. *Цегельский В.Г.* Выбор оптимальной длины камеры смешения жидкостно-газового струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – № 9. – С. 69 – 73.
 94. *Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И.* О расчете жидкостно-газовых струйных аппаратов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1977. – № 8. – С. 81 – 86.
 95. *Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И.* Определение динамического коэффициента связи в выходном сечении камеры смешения жидкостно-газового струйного аппарата // Изв. вузов. Машиностроение. – 1977. – № 9. – С. 69 – 74.
 96. *Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И.* Влияние геометрических параметров жидкостно-газового струйного аппарата на динамический коэффициент связи // Изв. вузов. Машиностроение. – 1977. – № 10. – С. 82 – 86.
 97. *Цегельский В.Г., Чернухин В.А., Глубоковский С.И.* Расчет жидкостно-газового струйного аппарата с конической камерой смешения // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 3. – С. 58 – 63.
 98. *Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И.* Анализ работы жидкостно-газового струйного аппарата с конической камерой сме-

- шения // Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 313. – М., 1979. – Вып. 2. – С. 49 – 58.
99. *Жердев В.М., Цегельский В.Г., Чернухин В.А.* К расчету режимов «частичный распад» жидкостно-газового струйного аппарата // Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 377. – М., 1982. – С. 100 – 111.
100. *Дорофеев А.А.* Расчет динамического коэффициента связи жидкости в выходном сечении камеры смешения // Изв. вузов. Машиностроение. – 1978. – № 11. – С. 82 – 85.
101. *Берман Л.Д., Ефимочкин Г.И.* Экспериментальное исследование водоструйного эжектора // Теплоэнергетика. – 1963. – № 9. – С. 9 – 15.
102. *Берман Л.Д., Ефимочкин Г.И.* Особенности рабочего процесса и режимы работы водоструйного эжектора // Теплоэнергетика. – 1964. – № 2. – С. 31 – 35.
103. *Берман Л.Д., Ефимочкин Г.И.* Характеристика и расчет низконапорных водоструйных эжекторов // Теплоэнергетика. – 1966. – № 10. – С. 89 – 90.
104. *Ефимочкин Г.И.* Влияние конструкции сопла на работу водоструйного эжектора // Электрические станции. – 1964. – № 5. – С. 7 – 11.
105. *Спирidonов Е.К., Темнов В.К.* Исследование экстремальных характеристик водовоздушного эжектора // Динамика пневмогидравлических систем: Тематический сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 62 – 75.
106. *Донец К.Г.* Влияние газонасыщенности рабочей жидкости на производительность жидкостно-струйного компрессора. – Ивано-Франковск, 1989. – 18 с. – Деп. в УкрНИИНТИ 18.09.89, РГАСНТИ 55.39.39.
107. *Ефимочкин Г.И.* Результаты испытаний низконапорного водоструйного эжектора // Электрические станции. – 1967. – № 3. – С. 39 – 43.
108. *Демьянова Л.А.* Исследование работы струйного аппарата для различных конфигураций его проточной части при эжектировании струей жидкости газожидкостной смеси // Нефтепромышленное дело. – 1999. – № 1. – С. 16 – 22.
109. *Баженов М.И.* Экспериментальное исследование водовоздушного струйного аппарата на прозрачной модели // Изв. вузов. Энергетика. – 1966. – № 3. – С. 82 – 86.
110. *Арбат В.С., Брылин В.И., Коваленко Н.Е.* Исследование всасывающей способности водоструйных эжекторов // Электрические станции. – 1980. – № 5. – С. 28 – 30.
111. *Кирсанов И.Н.* Конденсационные установки. – М.: Энергия, 1965. – 375 с.

112. *Денисов Ю.К., Тачанов Н.И.* Исследование водовоздушного центробежного эжектора // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1967. – № 6. – С. 703 – 709.
113. *Ефимочкин Г.И.* Сравнительные испытания пароструйных и водоструйных эжекторов на турбине Т-250/300-240 ТМЗ // Электрические станции. – 1982. – № 8. – С. 20 – 23.
114. *Бондаренко А.Д.* Аэродинамические характеристики водовоздушного эжектора ЭВЦ 265 // Безопасность труда в промышленности. – 1976. – № 10. – С. 38 – 39.
115. *Симонов Ю.М., Воронина Е.П., Маркин А.А.* Исследование и расчет приборов с водовоздушными эжекторами для подпитки воздухом воздушно-гидравлических колпаков на насосных станциях железнодорожного водоснабжения // Тр. Ленинград. ин-та инженеров ж.-д. транспорта. – 1973. – Вып. 358. – С. 3 – 16.
116. *Кореннов Б.Е.* Рабочий процесс в газожидкостном эжекторе // Теплоэнергетика. – 1977. – № 1. – С. 59 – 65.
117. *Берман Л.Д., Ефимочкин Г.И.* Влияние длины камеры смешения на режимы работы и экономичность водоструйного воздушного эжектора // Теплоэнергетика. – 1978. – № 12. – С. 66 – 71.
118. *Witte J.H.* Mixing Shocks in Two-Phase Flow // Fluid Mechanics. – 1969. – V. 36, part 4. – P. 639 – 656.
119. *Экспериментальное* исследование режимов работы жидкостно-газового струйного аппарата / В.А. Чернухин, В.Г. Цегельский, С.И. Глубоковский и др.; МВТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 1976. – 16 с. – Деп. в ВИНТИ 2.04.76, № 1014-76.
120. *Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Дорофеев А.А.* Экспериментальное исследование жидкостно-газовых струйных аппаратов // Изв. вузов. Машиностроение. – 1980. – № 3. – С. 48 – 52.
121. *Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Дорофеев А.А.* О режимах работы жидкостно-газового струйного аппарата // Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 290. – М., 1979. – С. 35 – 46.
122. *Дейч М.Е., Робожев А.В., Кох А.А.* Влияние некоторых геометрических и газодинамических параметров ступени эжектора с изобарическим начальным участком смешения на эффективность ее работы // Тр. МЭИ. – 1955. – Вып. 23. – С. 103 – 120.
123. *Шапиро Я.Г.* Экспериментальное исследование жидкостного эжектора // Присоединение дополнительной массы в струйных аппаратах: Тр. МАИ; Вып. 97. – М.: Оборонгиз, 1958. – С. 191 – 236.
124. *Басаргин Б.Н., Каталов В.И., Власов В.В.* Расчет тепло- и массообмена в скруббере вентури с центральным форсуночным орошением // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1981. – Т. 24, № 8. – С. 1040 – 1043.

125. *Звездин Ю.Г., Симаков Н.И., Пластинин А.П.* Гидродинамика и теплообмен при распыливании жидкости в потоке высокотемпературного газа // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Т. 19, № 3. – С. 354 – 359.
126. *Гельперин Н.И., Басаргин Б.Н., Оссовский Б.Г.* К теории жидкостно-газовой инъекции. Математическая модель процесса // Теоретические основы химической технологии. – 1969. – Т. 3, № 3. – С. 429 – 440.
127. *Течение и массоперенос в гравитационном газожидкостном эжекторе / А.А. Абкарян, Р.З. Алимов, А.К. Алимова и др.* // Тепло- и массообмен в химической технологии. – Казань, 1981. – С. 14 – 16.
128. *Басаргин Б.Н., Звездин Ю.Г., Соболев В.Г.* Математическое описание процесса совместного переноса тепла и массы в дисперсных системах // Массообменные и теплообменные процессы химической технологии. – Ярославль, 1975. – С. 3 – 6.
129. *Гуцин Ю.И., Галицкий И.В., Басаргин Б.Н.* Коэффициент полезного действия струйного аппарата // Массообменные и теплообменные процессы химической технологии. – Ярославль, 1975. – С. 20 – 25.
130. *Теплообмен в струйном аппарате при сверхзвуковых скоростях истечения газа / В.С. Сальников, Б.Н. Басаргин, Т.Е. Зевакина и др.;* Ярославский политехн. ин-т. – Ярославль, 1981. – 11 с. – Деп. ЦИНТИХИМ 17.04.81, № 758.
131. *Пикков Л.М., Рейтер Э.К., Сийрде Э.К.* Моделирование тепло- и массообмена в двухфазной системе газ – распыленная жидкость // Теоретические основы химической технологии. – 1976. – Т. 10, № 5. – С. 691 – 695.
132. *Смирнов В.И., Бахтюков В.Н., Горст А.Г.* О влиянии степени дисперсности в струйных аппаратах на удельную производительность гетерогенной реакции // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1967. – Т. 10, № 7. – С. 830 – 832.
133. *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергия, 1968. – 422 с.
134. *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. – М.: Энергоиздат, 1981. – 471 с.
135. *Стырикович М.А., Полонский В.С., Циклаури Г.В.* Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций. – М.: Наука, 1982. – 368 с.
136. *Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев Л.И.* Адиабатные двухфазные течения. – М.: Атомиздат, 1973. – 447 с.
137. *К вопросу об оценке потерь в неидеальном конденсационном инжекторе / С.И. Вайнштейн, А.Ф. Гандельсман, Л.П. Севастьянов и*

- др. // Теплофизика высоких температур. – 1974. – Т. 12, № 1. – С. 184 – 190.
138. *Выбор* оптимальных размеров горла диффузора конденсирующего инжектора / А.Ф. Гандельсман, С.И. Вайнштейн, А.Е. Морозов и др. // Теплофизика высоких температур. – 1976. – Т. 14, № 2. – С. 365 – 371.
139. *Гролмз М., Петрик М.* Экспериментальное исследование работы конденсационного инжектора и анализ КПД при сверхзвуковых скоростях пара на входе: информ. бюл. / ВИНТИ. – 1969. – Вып. 7 (84). – 15 с.
140. *Аладьев И.Т., Кабаков В.И.* Анализ эффективности конденсационного инжектора // Вопросы тепло- и массопереноса в энергетических установках: Тр. ЭНИН; Вып. 19. – М., 1974. – С. 45 – 61.
141. *Леви Е.К., Браун Г.А.* Взаимодействия жидкость – пар в конденсирующем инжекторе с постоянной площадью поперечного сечения // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер Д: Теоретические основы инженерных расчетов. – 1972. – № 1. – С. 188 – 200.
142. *Иродов В.Ф., Теплов С.В.* О течении в камере смешения инжектора-конденсатора // Теплофизика высоких температур. – 1973. – Т. 11, № 5. – С. 1101 – 1106.
143. *Иродов В.Ф.* К вопросу об описании поля течения в камере смешения инжектора // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 5. – С. 788 – 793.
144. *Иродов В.Ф., Аладьев И.Т.* К расчету течения в инжекторе-конденсаторе // Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред: Тр. ЭНИН; Вып. 25. – М., 1974. – С. 156 – 160.
145. *Аладьев И.Т., Кабаков В.И., Теплов С.В.* Исследование инжекторов на двухфазных потоках воды и калия // Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред: Тр. ЭНИН; Вып. 25. – М., 1974. – С. 171 – 180.
146. *Кабаков В.И.* Исследование работы двухступенчатого инжектора-конденсатора // Теплофизика высоких температур. – 1974. – Т. 12, № 3. – С. 626 – 631.
147. *Анализ* эффективности работы однокомпонентного конденсационного инжектора с малым размером горла диффузора / А.Ф. Гандельсман, С.И. Вайнштейн, А.П. Севастьянов и др. // Теплоэнергетика. – 1976. – № 5. – С. 62 – 70.
148. *Кузнецов В.И.* Некоторые результаты экспериментального исследования диссипации энергии в камере смешения инжектора – разгонного устройства МГД-установки // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 4. – С. 836 – 841.

149. Жуков Д.А., Кузнецов В.И., Левин А.А. Некоторые результаты экспериментального исследования влияния геометрии камеры смешения инжектора на потери в ней // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 1. – С. 166 – 170.
150. Хураев Л.В., Воронцов В.Д., Аладьев И.Т. Приближенная теория запуска инжектора // Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред: Тр. ЭНИН; Вып. 25. – М., 1974. – С. 161 – 170.
151. Развитие метода «сброса массы» для запуска конденсационного инжектора и исследование внешних характеристик аппарата / С.И. Вайнштейн, А.Ф. Гандельсман, В.А. Рябцев и др. // Теплофизика высоких температур. – 1973. – Т. 11, № 6. – С. 1264 – 1271.
152. К вопросу об оптимизации условий работы двухфазного диффузора с конденсирующимся потоком / С.И. Вайнштейн А.Ф. Гандельсман, А.П. Севастьянов и др. // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 2. – С. 416 – 422.
153. Исследование методов пуска конденсационного инжектора / С.И. Вайнштейн, А.Ф. Гандельсман, А.П. Севастьянов и др. // МГД-метод получения электроэнергии; под ред. В.А. Кириллина, А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1972. – С. 220 – 237.
154. Анализ потерь при завершении конденсации паровой фазы в горловине диффузора инжектора / Ф.И. Крантов и др. // Вопросы газотермодинамики энергоустановок. – 1975. – Вып. 2. – С. 72 – 76.
155. Кудрявцев Б.К., Хураев Л.В. Экспериментальные исследования парожидкостного инжектора в замкнутом контуре // Исследование по тепломассообмену: Тр. ЭНИН; Вып. 53. – М., 1976. – С. 70 – 85.
156. Салтанов Г.А., Циклаури Г.В., Шанин В.К. Ударные волны в потоке влажного пара с высокой концентрацией жидкой фазы // Теплофизика высоких температур. – 1970. – Т. 9, № 3. – С. 571 – 579.
157. Циклаури Г.В., Кудрявцев Б.К., Ворохоб Б.А. Экспериментальное исследование скачка уплотнения в диффузоре парожидкостного инжектора // Теплофизика высоких температур. – 1976. – Т.14, № 4. – С. 881 – 886.
158. Некоторые результаты исследования пульсаций давления в конденсационном инжекторе / Э.Э. Шпильрайн и др. // Теплоэнергетика. – 1976. – № 12. – С. 7 – 10.
159. Успенский В.А., Кузнецов Ю.М. Струйные вакуумные насосы. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.
160. Влияние некоторых режимных и геометрических параметров на запуск конденсационного инжектора / С.И. Вайнштейн, И.В. Ан, А.Ф. Гандельсман и др. // Вопросы газотермодинамики энергоустановок: Тр. ХАИ; Вып. 3. – Харьков, 1976. – С. 36 – 45.

161. *Исследование* поведения скачка уплотнения в процессе пуска конденсационного инжектора / Э.Э. Шпильрайн, И.В. Ан, С.И. Вайнштейн и др. // Вопросы газотермодинамики энергоустановок: Тр. ХАИ; Вып. 4. – Харьков, 1977. – С. 88 – 98.
162. *Иродов В.Ф., Аладьев И.Т.* К расчету параметров двухфазной смеси в камере смешения инжектора-конденсатора // Теплотехнические проблемы прямого преобразования энергии. – Киев: Наукова думка, 1975. – Вып. 6. – С. 96 – 98.
163. *Лунин Н.И., Королев Г.А.* Исследование рабочего процесса в приемной камере эжекторного конденсатора // Изв. вузов. Энергетика. – 1982. – № 2. – С. 114 – 117.
164. *О механизме* скачка давления в камере смешения струйного аппарата / В.В. Фисенко, Ю.П. Скакунов и др. // Теплоэнергетика. – 1982. – № 10. – С. 48 – 50.
165. *Кабаков В.И., Аладьев И.Т.* Смешение и конденсация в скоростных двухфазных потоках в энергетических устройствах / ЭНИН. – М., 1974. – 43 с.
166. *Гладков Е.П., Усанов В.В.* Расчетно-теоретическое исследование N_2^* криогенного инжектора с цилиндрической камерой смешения // Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах ЭУ и криогенной технике. – М., 1985. – С. 78 – 84.
167. *Исследование* жидкостно-парогазовых струйных аппаратов / В.А. Чернухин, В.Г. Цегельский, С.И. Глубоковский и др. // Изв. вузов. Машиностроение. – 1977. – № 11. – С. 88 – 91.
168. *Результаты* исследования инжектора, работающего на паровоздушной смеси / А.П. Севастьянов, И.В. Ан, А.А. Соловьев и др. // Теплофизика ядерных энергетических установок: Тр. УПИ; Вып. 2. – Свердловск, 1983. – С. 1 – 10.
169. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
170. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
171. *Слезкин Н.А.* Динамика вязкой несжимаемой жидкости. – М.: Гостехиздат, 1955. – 463 с.
172. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.* Техническая термодинамика. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
173. *Вукалович М.П., Новиков И.И.* Термодинамика. – М.: Машиностроение, 1972. – 670 с.
174. *Вукалович М.П.* Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 400 с.
175. *Абрамович Г.К.* Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824 с.

176. Зуев В.С., Макарон В.С. Теория прямоточных и ракетно-прямоточных двигателей. – М.: Машиностроение, 1971. – 368 с.
177. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учеб. для вузов / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; под общ. ред. В.М. Кудрявцева. – 3-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 1983. – 704 с.
178. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
179. Вскипающие адиабатные потоки / В.А. Зысин, Г.А. Баранов, В.А. Барилевич и др. – М.: Атомиздат, 1976. – 152 с.
180. Исатаев С.И., Кусальников К.И. Результаты экспериментальных исследований течения газожидкостного потока в диффузорах и конфузорах // Теплофизика и физическая гидродинамика. – Новосибирск, 1978. – С. 18 – 22.
181. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 560 с.
182. Гроот С. де, Мазур П. Неравновесная термодинамика: пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 456 с.
183. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 396 с.
184. Боровков И.С. О принципе минимального производства энтропии // Инженерно-физический журнал. – 1978. – Т. 35, № 3. – С. 531 – 539.
185. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения: пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
186. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. – М.: Атомиздат, 1978. – 160 с.
187. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
188. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 2. – 360 с.
189. Боровков И.С. Работа простейшего газового эжектора с точки зрения термодинамики необратимых процессов // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т. 26, № 4. – С. 630 – 639.
190. Дорофеев А.А. Динамическая модель скачка расширения струи в жидкостно-газовом струйном аппарате // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 8. – С. 149 – 151.
191. Rorbeck W. Untersuchung Eines Stuhl-Kondensators. Kgl Kondensatoren // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1923. – N. 1. – S. 1042 – 1045.
192. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

193. *Исследование гидравлического разрушения угля* / Г.П. Никонов, Б.А. Фидман, В.Ф. Хныкин и др. – М.: Наука, 1968. – 183 с.
194. *Лышевский А.С.* Распыливание топлива в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1971. – 310 с.
195. *Нигматулин Б.И.* К гидродинамике двухфазного потока в дисперсно-кольцевом режиме течения // Прикладная механика и техническая физика. – 1971. – № 6. – С. 141 – 153.
196. *Лышевский А.С.* Закономерности дробления жидкостей механическими форсунками давления. – Новочеркасск: НПИ, 1961. – 185 с.
197. *Лышевский А.С.* Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. – М.: Машгиз, 1963. – 179 с.
198. *Hilding W.E.* Differential Equations for the Local Interfacial and Wall Shear Stresses for One-Dimensional Annular Two-Phase Flow // Presented at the Third International Heat Transfer Conference. – Chicago, 1966. – P. 167 – 178.
199. *Турбулентное смешение газовых струй* / Г.И. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.И. Секундов и др. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
200. *Теория турбулентных струй* / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиринович, С.Ю. Крашенинников и др. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
201. *Сточек Н.П., Шапиро А.С.* Гидравлика жидкостных ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1978. – 126 с.
202. *Хныкин В.Ф.* Разрушение горных пород гидромониторными струями на открытых разработках. – М.: Наука, 1969. – 150 с.
203. *Дериглазова Ф.Г., Маслов Б.Н., Шрайбер А.А.* Расчет двухфазного течения в осесимметричном сопле Лавала с учетом отражения частиц от стенки // Изв. Акад. наук СССР. Механика жидкости и газа. – 1990. – № 2. – С. 79 – 85.
204. *Хелемский С.Л., Подвысоцкий А.М., Шрайбер А.А.* Обобщение опытных данных по переносу массы при взаимодействии капель с плоской стенкой // Тепломассоперенос в одно- и двухфазных средах. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 74 – 77.
205. *Шрайбер А.А., Подвысоцкий А.М., Хелемский С.Л.* Влияние вязкости на интенсивность массопереноса при взаимодействии капель со смоченной твердой поверхностью // Промышленная теплотехника. – 1990. – Т. 12, № 2. – С. 19 – 22.
206. *Жбанкова С.Л., Колтаков А.В.* Соударение капель воды с плоской водной поверхностью // Изв. Акад. наук СССР. Механика жидкости и газа. – 1990. – № 3. – С. 165 – 168.
207. *Глушков В.И.* Взаимодействие частиц жидкости с твердой поверхностью // Повышение эффективности транспорта газа. – М., 1975. – С. 90 – 98.

208. *Шрайбер А.А.* Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики. – 1988. – № 3. – С. 30 – 80.
209. *Милютин В.Н., Подвысоцкий А.М., Хелемский С.Л.* О взаимодействии капель с поверхностью жидкой пленки // Теплофизика и теплотехника. – 1978. – Вып. 35. – С. 84 – 89.
210. *Милютин В.Н., Хелемский С.Л.* Экспериментальное исследование закономерностей взаимодействия быстро движущихся капель со стенкой // Промышленная теплотехника. – 1979. – Т. 1, № 1. – С. 49 – 56.
211. *Забрудский В.Т., Холпанов Л.П., Николаев Н.А.* и др. Влияние физических свойств жидкой фазы на величину брызгоуноса при восходящем прямооточном движении фаз // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1976. – Т. 19, № 6. – С. 963 – 968.
212. *Daines W.L., Boordmann T.A., Lund R.K.* et al. Effect of Aluminium Oxide Impingement on Specific Impulse of Solid Proppellant Rocket Motors // AIAA Pap. – 1975. – No. 75 – 1277. 11 p.
213. *Бабуха Г.Л., Шрайбер А.А., Милютин В.Н., Подвысоцкий А.М.* Экспериментальное исследование устойчивости капель при соударениях // Теплофизика и теплотехника. – Киев.: Наукова думка, 1972. – Вып. 21. – С. 41 – 44.
214. *Hartley D.E., Murgatroyd W.* Criteria for the Break-Up of Thin Liquid Layers Flowing Isothermally Over Solid Surfaces // Internat. J. Heat and Mass Trans. – 1964. – V. 7, no. 9. – P. 635 – 644.
215. *Баттерворс Д., Хьюитт Г.* Теплопередача в двухфазном потоке: пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 326 с.
216. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 366 с.
217. *Чисхолм Д.* Двухфазные течения в трубопроводах и теплообменниках. – М.: Недра, 1986. – 204 с.
218. *Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД-50-2/3-80.* – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 318 с.
219. *Зайдель А.И.* Ошибка измерений физических величин. – Л.: Наука, 1974. – 106 с.
220. *Иванов Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.* Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 230 с.
221. *Турбулентные струйные течения в каналах / В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов и др.* – Казань: Казанский филиал АН СССР, 1988. – 172 с.

222. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача при конденсации и кипении. – М.: Машгиз, 1952. – 231 с.
223. *Абрамович Г.Н.* Теория турбулентных струй. – М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.
224. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.
225. *Исаченко В.П., Солодов А.П.* Теплообмен при конденсации пара на сплошных и диспергированных струях жидкости // Теплоэнергетика. – 1972. – № 9. – С. 24 – 27.
226. *Берман Л.Д.* Определение коэффициентов массо- и теплоотдачи при расчете конденсации пара из парогазовой смеси // Теплоэнергетика. – 1972. – № 11. – С. 52 – 55.
227. *Шкловер Г.Г., Родивилин М.Д.* Тепло- и массообмен при конденсации пара на струях воды // Теплоэнергетика. – 1975. – № 11. – С. 65 – 68.
228. *Исследование теплообмена при конденсации пара на турбулентных струях жидкости / В.П. Исаченко, А.П. Солодов, Ю.З. Самойлович и др.* // Теплоэнергетика. – 1971. – № 2. – С. 7 – 10.
229. *Солодов А.П.* Конденсация пара на ламинарной плоской струе жидкости // Теплоэнергетика. – 1971. – № 4. – С. 50 – 53.
230. *Исаченко В.П., Сотсков С.А., Якушева Е.В.* Теплообмен при конденсации водяного пара на ламинарной цилиндрической струе воды // Теплоэнергетика. – 1976. – № 8. – С. 72 – 74.
231. *Исаченко В.П., Сотсков С.А., Якушева Е.В.* Исследование теплообмена при конденсации водяного пара на турбулентных струях воды // Тр. МЭИ. – 1975. – Вып. 235. – С. 145 – 152.
232. *Солодов А.П., Ежов Е.В.* Модель струйной конденсации // Теплоэнергетика. – 1984. – № 3. – С. 32 – 35.
233. *Kashiwagi T., Oketani K.* Direct Contact Condensation on Coolant Fluid Jets // Basic Mechanical Two-Phase Flow and Heat Transfer. – New York, 1980. – P. 87 – 94. – (Winter Annual Meeting American Society of Mechanical Eng. Ghicago).
234. *Кейс В.М.* Конвективный тепло- и массообмен. – М.: Энергия, 1972. – 445 с.
235. *Вулис Л.А., Кашкаров В.П.* Теория струй вязкой жидкости. – М.: Наука, 1965. – 432 с.
236. *Бай Ши-и.* Теория струй. – М.: Физматгиз, 1960. – 326 с.
237. *Баттерворс Д., Хьюитт Г.* Теплопередача в двухфазном потоке. – М.: Энергия, 1980. – 325 с.
238. *Теория тепломассообмена: учеб. для вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; под ред. А.И. Леонтьева.* – М.: Высш. шк., 1979. – 496 с.

239. *Кафаров В.В.* Основы массопередачи. – М.: Высш. шк., 1979. – 438 с.
240. *Бесфамильный П.В., Леонтьев А.И., Цыгулев Ю.В.* Исследование пульсационных характеристик расслоенного газожидкостного потока // Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23, № 6. – С. 1120 – 1124.
241. *Тихонов А.И., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 735 с.
242. *Годунов С.К., Рябенский В.С.* Разностные схемы. – М.: Наука, 1973. – 400 с.
243. *Дьяченко В.Ф.* Основные понятия вычислительной математики. – М.: Наука, 1972. – 119 с.
244. *Мак-Кракен Д., Дорн У.* Численные методы и программирование на Фортране. – М.: Мир, 1977. – 584 с.
245. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырный П.И.* Вычислительные методы. – М.: Наука, 1977. – Т. 1. – 399 с.
246. *Берковский Б.М., Ночотов Е.Ф.* Разностные методы исследования задач теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1976. – 143 с.
247. *Гиневский А.С.* Теория турбулентных струй и следов. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
248. *Ferri A., Libby P.A., Zakey V.* Theoretical and Experimental Investigation of Supersonic Combustion // High Temperatures in Aeronautics. – Pergamon Press, 1963. – P. 55 – 118.
249. *Гиневский А.С., Почкина К.А.* Влияние начальной турбулентности на характеристики осесимметричной затопленной струи // Инженерно-физический журнал. – 1967. – Т. 12, № 1. – С. 15 – 19.
250. *Пажи Д.Г., Галустов В.С.* Распылители жидкостей. – М.: Химия, 1979. – 214 с.
251. *Ивандаев С.И.* Закономерности влагообменных процессов при течении двухфазных смесей в дисперсно-кольцевом режиме // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1986. – Вып. 1, № 4. – С. 93 – 103.
252. *Смирнов В.М.* Интенсификация диспергирования жидкой струи в трубчатом аппарате за счет спутного или встречного движения окружающей среды // Изв. вузов. Энергетика. – 1973. – № 7. – С. 95 – 99.
253. *Рудяк М.Е.* Катастрофическое разрушение струй жидкости в дозвуковом сносящем потоке газа // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1986. – № 1. – С. 42 – 46.
254. *Шец Д.В., Куш Э.А., Джонни П.Б.* Волновые процессы при распаде жидкой струи, инжектируемой по нормали в сверхзвуковой сносящий поток // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – Т. 18, № 7. – С. 191 – 198.

255. *Волынский М.С.* Распыливание жидкости в сверхзвуковом потоке // Изв. АН СССР. Механ. и машиностр. – 1963. – № 2. – С. 20 – 27.
256. *Югай Ф.С., Волгин Б.П.* Качественная картина движения жидкости в ускоряющемся газовом потоке // Инженерно-физический журнал. – 1965. – Т. 9, № 6. – С. 703 – 706.
257. *Охотский В.Б.* О критерии дробления капель и струй жидкости // Инженерно-физический журнал. – 1985. – № 3. – С. 428 – 432.
258. *Weis M., Worsham C.* Atomization in High Velocity Air-Streams // American Rocket Society Journal. – 1959. – V. 29, no. 4. – P. 252 – 259.
259. *Карабин А.И., Раменская Е.С., Энно И.К.* Сжигание жидкого топлива в промышленных установках. – М.: Металлургия, 1966. – 371 с.
260. *Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л.* О гидравлической устойчивости некоторых газожидкостных систем // Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – С. 315 – 324.
261. *Кулагин Л.В., Морошкин М.Я.* Форсунки для распыливания тяжелых топлив. – М.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
262. *Чернухин В.А.* Экспериментальное определение толщины жидкостной пленки и величины «капельного уноса», возникающего под воздействием скоростного газового потока // Изв. вузов. Машиностроение. – 1965. – № 4. – С. 107 – 112.
263. *Whalley P.B., Hewitt G.F., Hutchinson P.* Experimental Waves and Entrainment Measurements in Vertical Annular Two-Phase Flow // УКАЕА. – 1973. – AERE – R7521. – 21 p.
264. *Можаров Н.А.* Исследование критической скорости срыва пленки влаги со стенки паропровода // Теплоэнергетика. – 1959. – № 2. – С. 50 – 53.
265. *Яблоник Р.М., Хаимов В.А.* Определение начальной скорости срыва пленки в двухфазном потоке методом индикации капельной влаги // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. 20, № 4. – С. 660 – 665.
266. *Шевский А.И.* Критическая скорость уноса жидкости с поверхности кольцевой пленки // Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. – Харьков, 1973. – Вып. 3. – С. 94 – 101.
267. *Чен Ше-фу, Ибеле.* Потери напора и толщина жидкой пленки при кольцевом двухфазном чисто пленочном течении и течении с образованием эмульсии // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. С: Теплопередача. – 1964. – № 1. – С. 116 – 125.
268. *Ishii M., Grolmes M.A.* Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two-Phase Concurrent Film Flow // AIChE Journal. – 1975. – V. 21, no. 2. – P. 308 – 318.
269. *Быков В.Н., Лаврентьев М.Е.* Формирование спектра размеров капель в газожидкостном потоке // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 5. – С. 782 – 787.

-
270. *Нигматулин Б.И., Рачков В.И., Шугаев Ю.С.* Исследование начала уноса влаги с поверхности жидкой пленки при восходящем течении пароводяной смеси // Теплоэнергетика. – 1980. – № 6. – С. 51 – 55.
271. *Майер Е.* Теория распыления жидкости в высокоскоростных газовых потоках // Ракетная техника и космонавтика. – 1961. – № 12. – С. 143 – 146.
272. *Шерман А., Шец Д.В.* Распад жидких пленок и струй в сверхзвуковом потоке газа // Ракетная техника и космонавтика. – 1971. – Т. 9, № 4. – С. 154 – 163.
273. *Адельберг М.* Средний размер капель, образующихся при распаде струи жидкости, впрыскиваемой в высокоскоростной газовый поток // Ракетная техника и космонавтика. – 1968. – Т. 6. – С. 187 – 193.
274. *Адельберг М.* Скорость распада и проникновение струи жидкости в потоке газа // Ракетная техника и космонавтика. – 1967. – № 8. – С. 40 – 48.
275. *Дежарле Г., Исии М., Лайнехэн Д.* Гидродинамическая устойчивость струи жидкости в коаксиальном газовом потоке при адиабатических условиях // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. С: Теплопередача. – 1986. – № 1. – С. 86 – 96.
276. *Катаока И., Исии М., Мисима К.* Образование и распределение капель по размерам в кольцевом двухфазном течении // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1983. – № 2. – С. 166 – 175.
277. *Иванов В.А.* О дроблении жидкой струи // Прикладная механика и техническая физика. – 1966. – № 4. – С. 30 – 37.
278. *Можаров Н.А.* О предельно допустимом расходе пара через сепаратор // Теплоэнергетика. – 1961. – № 4. – С. 60 – 63.
279. *Кутателадзе С.С., Сорокин Ю.Л.* О гидравлической устойчивости некоторых газожидкостных систем // Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – С. 315 – 324.
280. *Прандтль Л.* Результаты работ последнего времени по изучению турбулентности // Проблемы турбулентности / ОНТИ. – М., 1936. – С. 14 – 16.
281. *Брэдишоу П.* Введение в турбулентность и ее измерение: пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 278 с.
282. *Куприянов А.Г., Цегельский В.Г.* О возможности интенсификации процессов теплообмена в камере смешения струйного аппарата // Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 510. – М., 1988. – С. 42 – 51.
283. *Идельчик И.Е.* Аэрогидродинамика технологических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1983. – 350 с.

284. *Салтанов Г.А.* Сверхзвуковые двухфазные течения.– Минск: Вышэйш. шк., 1972. – 479 с.
285. *Стернин Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. – М.: Машиностроение, 1974. – 211 с.
286. *Солдатов Н.Н.* Определение расхода кипящей воды при ее истечении через отверстие // Теплоэнергетика. – 1958. – № 1. – С. 88.
287. *Bailey J.F.* Metastable Flow of Saturated Water // Trans. ASME. – 1951. – V. 73. – P. 1109.
288. *Леви С.* Расчет двухфазного критического расхода // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. С: Теплопередача. – 1965. – Т. 67, № 1. – С. 64.
289. *Павлов П.А., Исаев О.А.* Изучение парообразования в насадке при истечении перегретой жидкости из камеры высокого давления // Теплофизика высоких температур. – 1985. – Т. 23, № 4. – С. 714–720.
290. *Павлов П.А., Исаев О.А.* Барокапиллярная неустойчивость поверхности свободной струи перегретой жидкости // Теплофизика высоких температур. – 1984. – Т. 22, № 4. – С. 745–752.
291. *Акимов М.В., Цегельский В.Г.* Экспериментальное исследование жидкостно-газовых струйных аппаратов с активным двухфазным потоком // Изв. вузов. Машиностроение. – 2002. – № 5. – С. 21–34.
292. *Охрана воздушного бассейна на предприятиях нефтепереработки и нефтехимии в связи с переходом на новые экономические методы управления / Г.М. Кавиев, В.С. Моряков, В.К. Загвоздкин и др. / ЦНИИТЭнефтехим. – М., 1989. – 53 с.*
293. *Цегельский В.Г., Ермаков П.Н., Спиридонов В.С.* Защита атмосферы от выбросов углеводородов из резервуаров для хранения и транспортирования нефти и нефтепродуктов // Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 3. – С. 16–18.
294. *Акимов М.В., Спиридонов В.С., Цегельский В.Г.* Утилизация факельных газов нефтеперерабатывающих заводов с помощью струйных компрессоров // Безопасность жизнедеятельности. – 2001. – № 4. – С. 19–21.
295. *Tsegelsky V.G., Mevada V., Malashkevich A.V., Tolmachev A.A.* Creation of Vacuum by Vacuum Hydrocirculation // Chemical Industry Digest. Bombay, India. – March – April, 2002. – P. 65–68.
296. *Нурмухаметов Г.З., Коман Г., Реутов А.Н., Валеа Г.* Опыт применения новой технологии создания вакуума на установке АВТ-3,5 предприятия S.C. Petrotel – Lukoil S.A., Румыния // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2002. – № 2. – С. 14–16.
297. *Энергетика и нефтехимический комплекс Татарстана // Сб. справочной информации. Вып. VIII. – Казань: Изд-во «Центр экспертиз и анализа», 2012. – С. 54–61.*

298. *Zeuner G.* Das Lokomotivenblasrohr. – Zurich: Meyer & Zeller, 1863.
299. *Rankin M.* Proceedings of the Royal Soc. – 1870.
300. *Баулин К.К.* Исследование работы эжектора // Отопление и вентиляция. – 1933. – № 2.
301. *Баулин К.К.* О расчете эжекторов // Отопление и вентиляция. – 1938. – № 6.
302. *Христианович С.А.* О расчете эжектора // Промышленная аэродинамика / БНИ ЦАГИ. – М., 1944. – С. 125 – 130.
303. *Миллионщиков М.Д., Рябинков Г.М.* Газовые эжекторы больших скоростей // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 5 – 32.
304. *Таганов Г.И., Межиров И.И.* К теории критического режима газового эжектора // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 33 – 40.
305. *Никольский А.А., Шустов В.И.* Критические режимы газовых эжекторов больших перепадов давлений // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 41 – 47.
306. *Васильев Ю.Н.* К теории газового эжектора // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 48 – 79.
307. *Васильев Ю.Н.* Газовые эжекторы со сверхзвуковыми соплами // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 134 – 212.
308. *Васильев Ю.Н.* Теория сверхзвукового газового эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1967. – Вып. 2. – С. 171 – 235.
309. *Межиров И.И.* Расчет предельных режимов газового эжектора // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 284 – 292.
310. *Искра А.Л.* Эжектор с разными эжектирующим и эжектируемым газами // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 303 – 321.
311. *Таганов Г.И., Межиров И.И., Харитонов В.Т.* Экспериментальное исследование газового эжектора при больших перепадах давления // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 80 – 104.
312. *Харитонов В.Т.* Характеристики эжектора с цилиндрической камерой смешения и сверхзвуковым соплом эжектирующего газа // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 111 – 146.

313. *Аркадов Ю.К.* Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 2001. – 334 с.
314. *Маланичев В.А.* Экспериментальное исследование сверхзвукового газового эжектора // Ученые записки ЦАГИ. – 1989. – Т. XX, № 4. – С. 119 – 122.
315. *Байков В.С., Васильев Ю.Н.* Исследование газового эжектора с многоствольным сверхзвуковым соплом высоконапорного газа // Лопаточные машины и струйные аппараты. – М.: Машиностроение, 1968. – Вып. 3. – С. 147 – 180.
316. *Байков В.С., Васильев Ю.Н., Орлова Т.И.* Влияние лопаточного венца на эффективность сверхзвукового газового эжектора с короткой камерой смешения // Тр. ЦИАМ; № 825. – М., 1978. – 36 с.
317. *Байков В.С., Васильев Ю.Н.* Теория сверхзвукового газового эжектора с изобарической камерой смешения // Тр. ЦИАМ; № 976. – М., 1982. – 55 с.
318. *Дейч М.Е., Поликовский М.В.* К расчету переменного режима эжектора // Теплоэнергетика. – 1954. – № 3. – С. 41 – 42.
319. *Дейч М.Е., Кох А.А., Робожев А.В.* Исследование структуры потока в ступени эжектора с изобарическим начальным участком смешения // Теплоэнергетика. – 1954. – № 12. – С. 24 – 32.
320. *Дейч М.Е., Робожев А.В., Кох А.А.* Влияние некоторых геометрических и газодинамических параметров ступени эжектора с изобарическим начальным участком смешения на эффективность ее работы // Тр. МЭИ; Вып. XXIII. – М., 1955. – С. 103 – 120.
321. *Дейч М.Е.* Техническая газодинамика. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 670 с.
322. *Flugel G.* Berechnung von Strahlapparaten // VDI Forschungsheft. – 1939. – № 395. – Berlin, Germany. – P. 1 – 21.
323. *Keenan J.H., Neumann E.P.* A Simple Air Ejector // Journal of Applied Mechanics; Trans. ASME. – 1942. – V. 64. – P. A75 – A84.
324. *Keenan J.H., Neumann E.P., Lustwerk F.* An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment // Journal of Applied Mechanics; Trans, ASME. – 1950. – V. XVII, no. 3. – P. 299 – 309.
325. *Fabri J., Le Grives E., Siestrunk R.* Etude aerodynamique les trompes supersoniques // Jahrbuch WGL. – 1953. – P. 101 – 110.
326. *Fabri J., Paulon J.* Theorie et experimentation des ejecteurs supersoniques air-air // O.N.E.R.A. Note Tech. – 1956. – No. 36. – P. 1 – 30.
327. *Fabri J., Siestrunk R.* Supersonic Air Ejectors // Advance in Applied Mechanics. N.Y. Academic Press. – 1958. – V. 5. – P. 1 – 34.

328. *Sun D.W., Eames I.W.* Recent Developments in the Design Theories and Applications of Ejectors – a Review // *Journal of the Institute of Energy*. – 1995. – V. 68. – no. 6, June. – P. 65 – 79.
329. *Porter J.L., Squyers R.A.* A Summary Overview of Ejector Augmentor Theory and Performance // ATC Report No. R-91100/9CR-47A. Vought Corp. Advanced Technology Cr. Dallas, Texas, 1981.
330. *Васильев Ю.Н., Лаишков Ю.А.* Экспериментальное исследование газовых эжекторов с коническими камерами смешения // Сб. работ по исследованию сверхзвуковых газовых эжекторов / БНИ ЦАГИ. – М., 1961. – С. 224 – 235.
331. *Хикмен К.И., Хилл П.Г., Джилберт Г.Б.* Теоретическое и экспериментальное исследование струйного эжектора для сжимаемой жидкости со смесительной трубой переменного сечения // *Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д: Теоретические основы инженерных расчетов*. – 1973. – № 2. – С. 164 – 175.
332. *Хеджес К.Р., Хилл П.Г.* Газоструйные эжекторы. Часть II. Экспериментальное исследование картины течения и анализ // *Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д: Теоретические основы инженерных расчетов*. – 1976. – № 3. – С. 202 – 209.
333. *Matsuo K., Sasaguchi K., Tasaki K.* Investigation of Supersonic Air Ejectors. Part II // *Bulletin of the JSME*. – 1982. – V. 25, no. 210, December. – P. 1898 – 1905.
334. *Kim S., Kwon S.* Experimental Determination of Geometric Parameters for an Annular Injection Type Supersonic Ejector // *Journal of Fluids Engineering*. – 2006. – V. 128, no. 6, November. – P. 1164 – 1171.
335. *Зингер Н.М.* Экспериментальное исследование пароструйных компрессоров с различной длиной камеры смешения // *Изв. ВТИ*. – 1950. – № 10. – С. 21 – 26.
336. *Зингер Н.М., Андреева К.С.* Исследование пароструйного эжектора конденсационной установки // *Электрические станции*. – 1954. – № 1. – С. 11 – 16.
337. *Берман Л.Д.* Построение эксплуатационных характеристик пароструйных эжекторов по данным испытаний на сухом воздухе // *Электрические станции*. – 1954. – № 6. – С. 12 – 16.
338. *Соколов Е.Я.* Экспериментальное исследование пароструйных компрессоров // *Изв. ВТИ*. – 1948. – № 11. – С. 14 – 16.
339. *Цегельский В.Г.* К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // *Изв. вузов. Машиностроение*. – 2012. – № 2. – С. 46 – 71.
340. *Цегельский В.Г., Акимов М.В., Сафаргалиев Т.Д.* Экспериментально-теоретическое исследование режимов работы сверхзвуковых га-

- зовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Изв. вузов. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 48 – 58.
341. *Цегельский В.Г., Акимов М.В., Сафаргалиев Т.Д.* Экспериментальное исследование влияния длины конической камеры смешения и горловины диффузора на характеристики сверхзвукового газового эжектора // Изв. вузов. Машиностроение. – 2013. – № 4. – С. 30 – 44.
342. *Цегельский В.Г.* К расчету первого критического режима сверхзвукового газового эжектора с конической камерой смешения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 61 – 72.
343. *Цегельский В.Г.* О применении термодинамики необратимых процессов в расчетах режимов работы сверхзвукового эжектора // Изв. вузов. Машиностроение. – 2015. – № 6. – С. 26 – 45.
344. *Васильев Ю.Н.* Теория газового эжектора с цилиндрической камерой смешения и сужающимися соплами // Тр. ЦАГИ; № 468. – М., 1971. – С. 1 – 25.
345. *Стернин Л.Е.* Основы газовой динамики. – М.: Вузовская книга, 2008. – 332 с.
346. *Дорофеев А.А.* Основы теории тепловых ракетных двигателей. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 571 с.
347. *Байков В.С., Васильев Ю.Н., Виноградова Т.Г.* Экспериментальное исследование эжектора с цилиндрической камерой смешения // Техн. отчет / ЦИАМ. – № 172. – М., 1962. – 30 с.
348. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 312 с.
349. *Цейтлин А.Б.* Пароструйные вакуумные насосы. – М.: Энергия, 1965. – 399 с.

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

Научное издание

Цегельский Валерий Григорьевич

СТРУЙНЫЕ АППАРАТЫ

Редакторы *Е.Н. Ставицкая, Е.К. Кошелева*
Корректоры *О.В. Калашикова, Н.В. Савельева*
Художник *Я.М. Ильина*
Компьютерная графика *А.Е. Крыловский*
Компьютерная верстка *А.Е. Крыловский*

Подписано в печать 21.02.2017. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 36. Тираж 500 экз.
Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru www.baumanpress.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com.



*Научно-производственное
предприятие
ООО «Техновакуум»*

ООО «Техновакуум» работает на отечественном и зарубежном рынке с 1992 года. Занимается разработкой и внедрением новых экологически чистых и ресурсосберегающих технологий на предприятиях нефтяной, газовой и химической промышленности. Многие разработки не имеют аналогов в мире.

ООО «Техновакуум» поставляет:

- вакуумные гидроциркуляционные агрегаты типа ВГЦ-140-04 для создания вакуума в ректификационных колоннах;
- струйные компрессоры различного назначения, в том числе для утилизации факельных газов с выделением из них более тяжелых углеводородов или очисткой от кислых примесей;
- струйно-абсорбционные системы для очистки газов дыхания наливных железнодорожных эстакад, морских терминалов и резервуарных парков нефти и нефтепродуктов;
- струйные аппараты (эжекторы, инжекторы) различного назначения, работающие на однофазных и двухфазных рабочих телах.

Все разработки защищены более 100 патентами России, США, Китая, Канады, Германии, Франции, Англии и других стран Европы. Заказчику предоставляется лицензия на их использование. В основе разработок лежит более чем сорокалетний опыт работы сотрудников предприятия по исследованию, проектированию и внедрению струйной техники.

Специалисты ООО «Техновакуум» осуществляют обследование и моделирование технологических процессов действующих производств, определяют необходимую глубину реконструкции под требования заказчика, проводят оптимиза-

цию технологических режимов. Кроме того осуществляют проектно-конструкторские работы, поставляют нестандартное оборудование, проводят шеф-монтажные и пусконаладочные работы, гарантийное и послегарантийное обслуживание.

Разработанные ООО «Техновакуум» установки работают в 11-ти странах мира. Только вакуумных гидроциркуляционных агрегатов различных схем (см. раздел 7.1) до выхода монографии введено в эксплуатацию более 50 единиц на нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах в процессах ректификации сырья под вакуумом.

Заказчиками ООО «Техновакуум» являются ПАО «НК-Роснефть», ПАО «Транснефть», ПАО «Башнефть», ПАО «Газпромнефть», ПАО «ЛУКОЙЛ», АО «ТАНЕКО», ОАО «ТАИФ-НК», ТОО НК «КазМунайГаз» (Казахстан), «Essar-Oil Ltd.» (Индия), «ORLEN Lietuva» (Польша), «HYUNDAI» (Корея), а также ряд других российских и зарубежных компаний.

ООО «Техновакуум» постоянно совершенствует свою техническую базу, проводит экспериментальные, теоретические исследования и патентную защиту своих новых разработок. Все это позволяет ООО «Техновакуум» оставаться лидером в области внедрения современных технологий на базе двухфазных струйных аппаратов.

Наш адрес:

Россия, 105082, г. Москва, ул. Большая Почтовая, 26в, стр. 2
тел./факс: (495) 956-76-21, (499) 261-99-98, (499) 267-82-03

Web – site: www.technovacuum.ru

e-mail: info@technovacuum.ru