М359505

НА ДС.1
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего образования СССР
Московское ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
Высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

КОРЕННОВ Борис Евгеньевич

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОВОЗДУШНЫХ ЭЖЕКТОРОВ С УДЛИНЕННЫМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ КАМЕРАМИ СМЕШЕНИЯ

Специальность 05.04.03. Гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1980 г.

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском и проектном институте "ВНИПИэнергопром".

Научный руководитель
кандидат технических наук Г.И. Ефимочкин

Оффициальные оппоненты
доктор технических наук,
профессор М.Е.ДЕЙЧ

Кандидат технических наук, с.н.с. В.К.ШАНИН

Ведущее предприятие - указано в решении специализированного совета

Защита состоится "26" мая 1980г. в 14 00 час.
На заседании Специализированного совета К.053.15.07 в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана (Москва 2-я Бауманская 5).

С диссертацией .Э.
Баумана.

Автореферат р

Отзыв на авто
в двух экземпля
107005, 2-я Бауме

Ученый сек
Специализирован
к.т.н., доцент

М359503

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Простота конструкции газожидкостного эжектора, отсутствие движущихся деталей, проблем уплотнения и смазки, возможность длительной работы без обслуживания и ремонта, способность выполнять различные функции (вакуумного и перекачивающего насоса, компрессора, подогревателя, конденсатора, реактора-смесителя и др.) предопределяют чрезвычайно широкий диапазон их использования в различных областях техники.

Но при этих достоинствах газожидкостный эжектор имеет большой недостаток – низкую экономичность, что часто заставляет отказаться от его использования. Повышение экономичности газожидкостных эжекторов– сложная, но чрезвычайно актуальная проблема, решению которой посвящена настоящая работа.

Цель работы. Проведение исследований, направленных на повышение экономичности газожидкостных эжекторов. Углубление физических представлений о происходящих в эжекторе процессах. Разработка конструкции и рекомендаций по расчету более эффективных, по сравнению с существующими, эжекторов.

Научная новизна. Исследованы оптимальные и граничные условия работы газожидкостных эжекторов с удлиненными цилиндрическими камерами смешения – ЭУ и взаимосвязь различных режимных и геометрических факторов. Предложена модель происходящих в ЭУ процессов, на базе которой объясняются причины повышения их экономичности. Предложена инженерная методика расчета, справедливая в указанном диапазоне режимных параметров. Накоплен богатый экспериментальный материал, являющийся базой для дальнейших исследований и анализа.

Практическая ценность. Разработаны и защищены авторским свидетельством конструкции ЭУ,экономичность которых примерно в два раза больше по сравнению с ранее выпускавшимися эжекторами, конструктивно более простые и компактные.

Реализация работы. Начиная с 1971 г. ЭУ устанавливаются на турбинах мощностью 300 и затем 800 МВт Ленинградского металлического завода. Установлены они также на некоторых турбинах мощностью 300 МВт Харьковского турбинного завода и ряде теплофикационных турбин мощностью 100 и 250 МВт Уральского турбомоторного завода. На многих электростанциях ЭУ, использу-

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1359505
Кореннов Б.Е.Исследование

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

ются также для очистки трубопроводов систем гидрозолоудаления от карбонатных отложений. Экономический эффект от промышленного внедрения ЭУ составляет около полутора миллионов рублей в год.

В настоящее время ЭУ серийно выпускает производственное объединение Ленинградский металлический завод им. XXII съезда КПСС.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научном семинаре в институте механики жидкости и газа АН СССР при МГУ им. М.В.Ломоносова, на научно-техническом семинаре отдела сепараторов и гидродинамики оборудования АЭС ВНИИАМ, на заседании секции "Гидромеханика двухфазных потоков" УI конференции Института гидромеханики АН УССР, на научно-технических конференциях Ивановского энергетического института им. В.И.Ленина.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 117 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы ( 95 наименований) содержит 68 иллюстраций.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дается краткий исторический обзор и анализ научно-исследовательских работ, посвященных изучению газожидкостных эжекторов. Ставится задача работы и обосновывается направление исследований.

С начала XX века до 70-х годов газожидкостные эжекторы не претерпели существенных конструктивных изменений, сохраняя традиционную форму проточной части, состоящую из конфузора, диффузора и соединяющей их цилиндрической камеры смешения - КС, длина которой - $\ell_3$ обычно не превышает 10 диаметров КС - $d_3$ . (В дальнейшем эти эжекторы, в отличие от эжекторов с удлиненной КС ( $\ell_3 > 17 d_3$) - ЭУ будем сокращенно именовать - ЭК).

Несмотря на отдельные случаи увеличения экономичности ЭК, характеризующейся объемным - $U_0$ или массовым - $U_в$

коэффициентами эжекции, а также изотермическим КПД – $\eta_{из}$, ее общий уровень за этот период почти не изменился. Исключение составляют многоступенчатые эжекторы, но повышение их экономичности связано со значительным усложнением конструкции и увеличением габаритов установки.

При исследовании эжекторов обнаружен ряд интересных явлений. В частности Рорбеком обнаружена возможность получения при давлениях в приемной камере – $P_н$ меньших 0,03 МПа критического режима работы. Рядом исследователей, проводивших опыты на прозрачных моделях, обнаружены пристенные обратные токи, интенсивность которых растет с ростом степени сжатия – $P_c/P_н$ (где $P_c$ – давление за эжектором) и отношения – $f_3/f_1$, поперечных сечений КС – $f_3$ и сопла – $f_1$. Но природа их появления и влияние на экономичность трактуются по разному. Обнаружен и целый ряд других явлений, упомянутых в диссертации.

В конце 60-х годов появляются сообщения Витте, а в начале 70-х годов Ю.Н.Васильева и Каннингема об эжекторах с удлиненной до 17 $d_3$ и более КС. Всеми авторами отмечается увеличение их экономичности, но рекомендуемые геометрические соотношения, геометрия сопла и трактовка происходящих в ЭУ процессов существенно различаются. Так Витте рекомендует КС длиной 21 $d_3$ и девятнадцатиструйное сопло, Ю.Н.Васильев $\ell_3$ = 17÷18 $d_3$ и двенадцтиструйное сопло, Каннингем $\ell_3$ = 20÷45 $d_3$ и сопло с острой входной кромкой.

В отношении механизма работы ЭУ Витте и Каннингем, ссылаясь на работу Раммингена, считают, что до зоны повышения давления – ЗПД нет полного заполнения сечения КС газожидкостным потоком, поэтому нельзя говорить о критическом режиме течения до ЗПД. Для объяснения механизма повышения давления в ЗПД Витте прибегает к модели "скачка смешения", состоящего из зоны проникновения газа в жидкость и зоны сжатия. Механизм образования в зоне проникновения пенной структуры по Витте состоит в том, что при ударе капли о поверхность часть жидкости выбрасывается в виде пленки (каверны), которая захлопываясь, захватывает газ, в результате чего образуется пузырек.

По Каннингему, сжатие газа происходит за счет процесса перемешивания, происходящего в зоне перемешивания. Максимальный КПД достигается когда зона перемешивания находится в выход-

ном сечении КС. Раннее (в КС) и позднее (в диффузоре) перемешивание приводит к снижению КПД. Механизм перемешивания газа и жидкости в зоне перемешивания и причина повышения давления в ней автором не раскрываются.

Наиболее правильной является доведенная до математического описания модель Ю.Н.Васильева, считающего, что КС до ЗПД полностью заполняется газожидкостной смесью, условно принимаемой равновесной. Скорость ее на выходе из КС может быть равной или большей скорости звука. Предложенные им уравнения с помощью ЭВМ позволяют оценить степень совершенства реального ЭУ относительно идеального (эталонного). Расчет вновь создаваемого ЭУ сложен и выполним лишь путем последовательных приближений.

Названные работы направлены на изучение ЭУ с целью достижения максимального противодавления - $P_c$ . Но в технике часто требуется при постоянном (например, атмосферном) $P_c$ добиться максимального $U_o$ . Изучению таких режимов и посвящена, в основном, данная работа.

Постановка задачи и выбор направления исследований

Настоящая работа начала выполняться в 1968 г., когда общая и давно существующая в технике проблема низкой эффективности эжекторов стала весьма актуальной для энергетики, где, в связи с переходом к сверхкритическим параметрам и блочным схемам, начали широко использоваться водовоздушные эжекторы. Низкая экономичность, вибрация эжекторов, громоздкость эжекторных установок турбин настоятельно заставляли искать пути устранения указанных недостатков. Это и явилось задачей настоящей работы.

Если постановка задачи не гребовала усилий, т.к. диктовалась самой жизнью, то решение ее, учитывая многолетние и почти безрезультатные попытки это сделать, представлялось достаточно сложным. А направление исследований, которое могло бы привести к положительным результатам в первый момент было совершенно не ясным.

Для выбора рационального направления исследований проведен вышеупомянутый анализ существующих работ, позволивший сделать вывод о бесперспективности оптимизации эжектора в рамках

традиционно сложившейся геометрии с короткой КС, путем более удачного профилирования сопла, конфузора, диффузора, изменения расстояния от среза сопла до входа в КС - $\ell_2$ и т.д.

Обращало на себя внимание несоответствие рекомендуемых в методиках оптимальных поперечных соотношений сечений КС и сопла $f_3/f_1$, реальным соотношениям в ЗПД, располагающейся обычно в промежуточном сечении диффузора - $f_\chi$, большем чем $f_3$. Иногда ЗПД перемещалась и в сливную трубу, как бы исключая проточную часть из работы, без снижения при этом рабочих показателей. В то же время максимальный КПД достигался когда ЗПД располагалась на выходе КС, т.е. при действительном соблюдении соотношений $f_3/f_1$. Возникал вопрос - как отразится на экономичности соответствующее увеличение длины КС при соблюдении оптимальных поперечных соотношений. Заинтересовала нас и единственная опубликованная в то время работа Витте о водовоздушном эжекторе с девятнадцатиструйным соплом и необычайно длинной ( $\ell_3 = 21 d_3$) КС. Хотя достижение наивысшей экономичности Витте объясняет внедрением замкнутой схемы подвода рабочей воды, определенную роль в этом, по-видимому, играет и улучшение условий формирования и сжатия смеси, благодаря увеличению длины КС и струйности сопла. Г.И.Ефимочкиным получение в 1,5 раза большей экономичности, при установке на одном из эжекторов многоструйного сопла, объяснялось формированием структуры смеси, приводящей к улучшению работы ЭК. Но это предположение не было развито, а на других эжекторах увеличение струйности не дало желаемых результатов. Формированием гомогенного газожидкостного потока объяснялось Рорбеком получение критического режима.

Исходя из этих на первый взгляд не связанных между собой сведений, и из собственных представлений, согласно которым увеличение длины КС, или струйности сопла, должно было способствовать получению перед ЗПД квазиоднородного газожидкостного потока и более равномерному распределению его энергии по сечению, было решено исследовать цилиндрические проточные части с различными продольными и поперечными соотношениями.

Первые же опыты подтвердили правильность выбранного направления исследований. Подробное рассмотрение методики их проведения и полученных результатов излагается ниже.

Во второй главе рассматриваются стендовая и промышленные установки, на которых проводились эксперименты, и методика проведения и обработки опытов.

Экспериментальный стенд состоял из приемной камеры с насадкой для установки сопл и разделенной на секции сливной трубы диаметром – $d_c$ = 80 мм. К ним с помощью фланцев крепились вертикально установленные сменные проточные части с диаметром до 80 и длиной до 2200 мм. Расстояние от среза сопла до КС регулировалось в пределах 0÷185 мм с помощью вставок различной длины. На стенде испытывались суживающиеся сопла с выходными диаметрами – $d_1 \leq 30$ мм, имевшие различные профили, снабженные винтовыми вставками и без таковых, одно– и многоструйные. На стенде испытывались эжекторы 29–ти различных модификаций. Две проточные части, с целью проведения визуальных наблюдений за происходящими в эжекторе процессами, выполнены прозрачными.

Сливная труба, свободно опущенная в бак-газоотделитель под уровень воды на 700–900 мм, позволяла менять длину проточной части в более широком диапазоне, чем на размер съемной секции сливной трубы. Насосы 4К-6 и 3К-6, включавшиеся параллельно и последовательно позволяли получить расход рабочей воды – $V_р$ до 21 л/с и давление – $P_р$ до 1,4 МПа. Минимальное противодавление – $P_c$ , равное 0,08 МПа, обусловливалось высотой установки эжектора над уровнем в баке-газоотделителе. Нагрев воды осуществлялся паром с параметрами: $P$ = 0,3÷0,5 МПа, $t \approx 150^{\circ}$С. Температура в пределах 10÷95$^{\circ}$С поддерживалась постоянной за счет слива соответствующего количества нагретой воды и одновременного добавления холодной воды из водопровода. Расход и давление рабочей и эжектируемой сред, а также противодавление регулировались вентилями, установленными на линиях подвода рабочей и эжектируемой сред, а также на сливной линии.

Испытывавшиеся промышленные эжекторы имели относительные длины КС от 2,6 до 40 $d_3$, суживающиеся сопла различного профиля с выходным диаметром – $d_1$ до 100 мм, одноструйные, многоструйные, с винтовыми вставками. Эжекторы устанавливались вертикально и горизонтально. Регулирование параметров осуществлялось принципиально теми же способами, что и на стенде. Возможные диапазоны регулирования определялись схемными и эксплуатационными условиями конкретной установки.

Всего испытано около 100 эжекторов 51 модификации. Из них 29 испытано на стенде и 22 на промышленных установках. Подготовка измерительных устройств, регистрация параметров при испытаниях, обработка и анализ опытных данных, оценка погрешностей производилась в соответствии с действующими требованиями и рекомендациями. Эти вопросы подробно изложены в диссертации, поэтому здесь упомянем лишь об измерении давлений меньше 0,02 МПа и полного давления в потоке - $P_0$.

Давление меньше 0,02 МПа измерялось ртутным баровакуумметром с ценой деления шкалы 0,05 мм рт.ст., или 7 Па, не требующем внесения поправок на барометрическое давление. Такая точность необходима, в частности, при определении давления в приемной камере - $P_н$, т.к. с его помощью определяется экономичность эжектора.

Сложным и до сих пор окончательно не решенным вопросом является измерение полного давления в газожидкостном потоке. Это связано с чувствительностью его динамической составляющей к абсолютной скорости, структуре потока, скачкам уплотнений на входе в зонд, числам Маха, Рейнольдса и др. Все это приводит к диссипативным потерям и, в результате, несоответственно замеренной величины полной энергии загорможенного потока. Но несмотря на условность термина "полное давление" безусловная полезность таких измерений в том, что они позволяют хотя бы качественно определить характер изменения $P_0$ по сечению газожидкостного потока. Обработка результатов экоперимента, ввиду многочисленности проведенных опытов (более двух тысяч), производилась с помощью ЭВМ.

В третьей главе анализируются проведенные эксперименты, большая часть которых выполнена при $P_c \approx 0{,}1$ МПа. Для эжекторов с одноструйным соплом получена следующая зависимость $U_0$ от расстояния между срезом сопла и выходным сечением КС - $L_з$, при условии, что ЗПД располагается на выходе из КС. Увеличение $L_з$ от 2,5 до 13÷14 $d_з$ не приводит к существенному увеличению $U_0$. Увеличение $L_з$ с 14 до 18 $d_з$ приводит к повышению $U_0$ примерно в два раза при больших степенях сжатия. При их снижении степень повышения $U_0$ уменьшается и при $P_c/P_н \approx 1$ увеличения $U_0$ практически не происходит. Дальнейшее увеличение $L_з$ приводит к замедлению роста $U_0$, а при $L_з > 25÷35$ $d_з$ полному его прекращению.

Если по какой-либо причине, например, из-за увеличе-

ния $P_c$ , ЗПД перемещается в КС на расстояние от среза сопла - $L_x$ меньшее $18\,d_3$, происходит уменьшение $U_0$ аналогичное соответствующему уменьшению $L_3$.

Исследования рабочего диапазона ЭУ показали наличие ярко выраженных максимумов в зависимостях $U_0 = f(f_3/f_1)$, смещающихся с ростом $P_p$ и $P_H$ в сторону больших значений $(f_3/f_1)^{опт}$. Увеличение $P_c$ приводит к снижению $(f_3/f_1)^{опт}$.

Определены и границы рабочего диапазона ЭУ. За нижнюю границу рабочего диапазона принято минимальное давление рабочей воды, при котором на безрасходном режиме ( $G_H = 0$) достигалось давление насыщения $P_H = P_n''$ . За верхнюю - давление рабочей воды превышение которого не приводит к дальнейшему увеличению $U_0$.

Большой интерес представляло исследование влияния фактора масштабности на показатели экономичности. При анализе экспериментальных данных в пределах изменения абсолютного диаметра сопла от 3 до 70 мм не обнаружено его влияния на экономичность эжектора. Эксперименты, проведенные с одноструйными соплами, имеющими различные профили, не дают оснований говорить о существенном различии для них значений $L_3$ , соответствующих интенсивному увеличению $U_0$ .

Увеличение струйности, закрутка потока, установка рассекателей и др., повышая потери в сопле и сложность его изготовления, не приводят к существенному увеличению объемного коэффициента эжекции по сравнению с достижимыми значениями его в ЭУ с одноструйным соплом, но позволяют уменьшить продольные размеры ЭУ.

Исследование влияния различных элементов проточной части на экономичность ЭУ показало, что профили и углы раскрытия конфузора и диффузора, рациональной компоновке которых многие исследователи уделяли большое внимание, несколько увеличивают, но не оказывают решающего влияния на КПД. Поэтому в ряде случаев, без большого ущерба для экономичности, конструкция ЭУ может быть упрощена, а продольные габариты снижены, путем установки цилиндрической КС, соответствующей длины, без конфузора и диффузора. Исследования предложенного Ю.Н.Васильевым сверхзвукового диффузора, снижающего потери в ЗПД на критических режимах работы, показали, что в связи с трудностью запуска и ненадежностью работы его массовая установка на промышленных эжекторах не может быть рекомендована.

Расстояние от среза сопла до входного сечения КС - $\ell_2$

не рекомендуется выбирать меньше $1 d_3$, т.к. при очень малых $\ell_2$ увеличивается сопротивление на входе эжектируемой среды в КС, а также не больше $6(7) d_3$, поскольку при больших $\ell_2$ расширяющаяся струя рабочей воды не вписывается в сечение КС.

Опыты с $P_c - v a z$ показали наличие в ЭУ режимов, которые условно можно разделить на критические, соответствующие отсутствию влияния противодавления – $P_c$ на давление в приемной камере; докритические, при которых влияние $P_c$ на $P_н$ налицо; смешанные, – промежуточные между критическими и докритическими, при которых влияние $P_c$ на $P_н$ имеет место, но в меньшей степени чем на докритическом режиме.

Критические режимы реализуются обычно при малых $P_н$ и $P_c$ С увеличением $P_c$ выше некоторого значения $P_c^{пр}$ критический режим переходит в докритический. Чтобы рассмотреть влияние $P_н$ проследим за изменением режимов в диапазоне $P_c < P_c^{пр}$. При $P_н$ $<0,02 \div 0,03$ МПа обычно реализуются критические режимы. При $P_н$ $> 0,02 \div 0,03$ МПа влияние $P_c$ на $P_н$ становится заметным настолько, что режим перестает отвечать условиям критического режима, т.е. переходит в группу смешанных. Дальнейшее повышение $P_н$ приводит к увеличению влияния $P_c$ на $P_н$ и, наконец, переходу на докритический режим. Поскольку влияние $P_c$ на $P_н$ с ростом $P_н$ увеличивается достаточно плавно границы между критическими и смешанными, смешанными и докритическими режимами весьма условны. Кроме снижения $P_н$ и $P_c$ получению критических режимов в ЭУ способствуют увеличение $P_р$, $L_3$ и струйности сопла, а также уменьшение $f_3/f_1$.

Изложенные выше результаты исследований явились основой создания высокоэкономичных ЭУ.

Изучению механизма происходящих в эжекторах процессов посвящена четвертая глава, положения и выводы которой, помимо рассмотренного в третьей главе экспериментального материала, базируются на исследованиях ЭУ с прозрачными проточными частями, измерениях полного давления в потоке и положениях гидрогазодинамики.

Опыты на ЭУ с прозрачной проточной частью позволили установить следующее. Углы раскрытия выходящей из сопла струи воды в зависимости от условий составляют $3 \div 9^0$. Непосредственно на выходе из сопла начинается разрушение струи. Помимо волнового ме-

ханизма воздействия этому способствует турбулентное перемешивание газовой и жидкостной струй, выделение растворенного в воде воздуха. Не исключено влияние естественной закрутки потока перед соплом. В результате на границе двух потоков возникают вихри, способствующие взаимопроникновению газовой и жидкостной фаз, т.е. появлению увеличивающегося по мере удаления от сопла газожидкостного потока, разделяющего уменьшающиеся по сечению периферийный газовый и центральный жидкостный потоки. При расчетном режиме на расстоянии 4÷8 $d_з$ от среза сопла сечение КС полностью заполняется газожидкостным потоком. Ядро жидкостного потока разрушается на большем расстоянии от сопла – около 15 $d_з$ . Далее движется заполнившая КС двухкомпонентная газожидкостная смесь, степень однородности которой растет по мере продвижения к выходу из КС. Сжатие газа, особенно ярко выраженное при малых $p_н$ и больших $p_с/p_н$ , происходит обычно в выходном сечении КС. При нерасчетных условиях местоположение ЗПД может быть и иным.

Происходящие в ЭУ процессы рассматриваются исходя из условия формирования в КС перед ЗПД неравновесного газожидкостного потока. В зависимости от соотношения весовых и объемных составляющих, структуры, скольжения фаз, дисперсности, распределения скоростей, плотностей в потоке и т.д. отличительные от равновесных свойства неравновесных потоков (релаксация, дисперсия, скорость распространения возмущений и др.) проявляются в различной степени.

В ЭУ, работающих с $p_н < 0{,}02 \div 0{,}03$ МПа, эти отличительные свойства проявляются настолько слабо, что ими можно пренебречь и условно считать поток равновесным.

Исходя из этого рассмотрим природу процессов и потерь в ЭУ при различных режимах работы. Примем поток для ЭУ, работающих на критическом режиме, перед ЗПД равновесным, с критическим или сверхкритическим течением, переходящим в докритическое в скачке (системе скачков) уплотнения, который в зависимости от условий располагается в сливной трубе, диффузоре (при наличии его) или на выходе из КС. При расположении скачка уплотнения в сливной трубе будут иметь место большие потери на перерасширение потока. Уменьшение потерь на перерасширение (например, при уменьшении $p_р$ ) при наличии диффузора приводило бы к перемещению ЗПД вверх по диффузору к выходу из КС. Потери на перерасширение будут равны нулю при расположении скачка на выходе из КС. Останутся лишь

потери в скачке, пропорциональные значению $M$ в потоке перед скачком. Этот режим, называемый предельным критическим, буде. оптимальным (расчетным). Аналогична природа потерь и при отсутствии диффузора. Поскольку на расчетном режиме скорость сжатого в ЗПД потока будет очень низкой, потери на внезапное расширение, будут незначительны. Этим объясняется возможность ликвидации диффузора.

Значительная неравномерность поля скоростей в КС, увеличение значения скорости звука-$a$ в потоке с ростом $P_н$, приводят к необходимости учитывать при $P_н > 0{,}02 \div 0{,}03$ МПа наличие зонч докритического течения в пограничном слое. Проникновением возмущений по докритической зоне пограничного слоя можно объяснить появление влияния $P_c$ на $P_н$. Кроме того, для неравновесных потоков, в силу зависимости $a$ от частоты, высокочастотные составляющие спектра возмущений могут распространяться вверх по потоку и в зоне, где расчетные значения $a = \sqrt{dP/d\rho}$ меньше скорости потока - $W$ ($M \geq 1$), увеличивая влияние $P_c$ на $P_н$. Но в связи с диссипацией на все проникающие вверх по потоку возмущения достигают приемной камеры, а воздействие на $P_н$ достигающих ее заметно ослабляется. Увеличение зоны докритического течения и неравновесности потока приводят к усилению влияния $P_c$ на $P_н$. Влияние противодавления на давление в приемной камере приводит к снижению степени сжатия и, следовательно, к снижению КПД.

Другой характерной для смешанных режимов потерей является потеря на отрыв потока от стенки, благодаря воздействию градиента давления в ЗПД на докритическую зону пограничного слоя. В зоне отрыва значительно возрастает сопротивление давления и увеличиваются потери за счет дезорганизации части основного потока, граничащего с отрывной зоной. На развитие отрыва, помимо градиента давления, большое влияние оказывает структура пограничного слоя, распределение $P_0$, шероховатость стенки, диффузорность, центровка сопла и др.

Наибольшие КПД до 40÷45% достигаются при $P_c/P_н = 3 \div 2$ (для атмосферного противодавления при $P_н = 0{,}03 \div 0{,}06$ МПа), т.е. на смешанном режиме. Причем, чем меньше неравновесность потока и, следовательно, влияние $P_c$ на $P_н$, тем КПД выше и наоборот.

Докритическим режимам отвечает перемещение ЗПД вверх по КС на расстояние $L_3 \leq 14\, d_3$, где пристенные зоны докритического течения и неравновесность в ядре потока позволяют возмущениям без

труда проникать в приемную камеру. Кроме того, в связи с большой неравномерностью кинетической энергии потока по сечению увеличивается вероятность отрыва. Интенсивность отрывных течений обычно настолько велика, что на участке между ЗПД и сечением, соответствующим заполнению КС локализации зоны отрыва не происходит. В результате на участке между границей заполнения сечения КС газожидкостным потоком и ЗПД помимо основного появляется относительно небольшой пристенный поток, движущийся в направлении обратном основному. При движении он постепенно теряет энергию и вновь вовлекается в основной поток. Таким образом на докритическом режиме при больших $P_c/P_н$ имеет место своеобразная рециркуляция части смеси.

Затраты энергии на торможение встречного потока, увеличение и повторное сжатие водовоздушной смеси является основной составляющей потерь энергии на докритическом режиме. Экспериментально установлено, что эффективность эжектора снижается при этом в 1,5÷2,0 раза по сравнению с расчетным (предельным критическим) режимом. Интенсивность обратных токов уменьшается с уменьшением степени сжатия, т.е. градиента давления, и при $P_c/P_н$ приближающейся к единице причина возникновения обратных токов и связанных с ними потерь исчезает. В результате экономичность ЭК и ЭУ становится практически одинаковой.

Вопросы расчета и промышленного внедрения ЭУ рассматриваются в пятой главе. Проведенный анализ существующих методик и расчетных уравнений показал, что ни одна из них не может быть рекомендована для расчета ЭУ. Поэтому предлагается инженерный метод расчета ЭУ, справедливый в диапазоне параметров:

$P_р$ = 0,25÷1,4 МПа, $P_c$ = 0,08÷0,12 МПа.

Расчетные уравнения, полученные путем обработки экспериментальных данных, позволяют определить оптимальные геометрические размеры ЭУ при заданных режимных параметрах, или необходимое давление и расход рабочей воды готового эжектора при работе в оптимальных условиях.

Порядок расчета ЭУ.

По заданному массовому расходу эжектируемого воздуха кг/с (кг/ч) определяем его объемный расход

$$V_н = 2,87 \cdot G_н \frac{(t_р + 273,15) \cdot 10^{-4}}{P_н - P_н''}, \qquad (1)$$

где $P_н''$ – давление насыщенного водяного пара при температуре $t_р$ °С рабочей воды.

Оптимальные геометрические размеры $(f_3/f_1)^{опт}$ и $\ell_3^{опт}$ в зависимости от величины давления в приемной камере определяются из выражений

для $P_н < 0{,}03$ МПа $$(f_3/f_1)^{опт} = 0{,}9 \cdot P_р/P_с + 1 \qquad (2)$$

для $P_н = 0{,}03 \div 0{,}098$ МПа $$(f_3/f_1)^{опт} = 0{,}9 P_р/P_с + 3{,}3\, P_н/P_с \qquad (3)$$

$$\ell_3^{опт} = 2{,}8 (1 - 0{,}5\, P_н/P_с) \cdot d_3 \qquad (4)$$

Значение $\ell_3^{опт}$ определяется после определения $d_3$.

Значения $P_р^{мин}$ и $P_р^{max}$ определяются из выражений:

$$P_р^{мин} = P_с/2\,(f_3/f_1)^{опт}; \qquad P_р^{max} = 1{,}5 \cdot P_с \cdot (f_3/f_1)^{опт} \qquad (5,\ 6)$$

Исходя из теоретически достижимого значения - $U_0^{пр}$

$$U_0^{пр} = \frac{V_н^{пр}}{V_р} = \frac{(f_3 - f_1)}{f_1} \qquad (7)$$

реальное значение $U_0$ определяется с помощью опытного коэффициента $\varphi$

$$U_0 = \varphi \cdot U_0^{пр} \qquad (8)$$

среднее значение которого $\varphi = 0{,}8$ определено путем обобщения результатов многочисленных испытаний ЭУ.

На основании (1,2,6 и 7)

для $P_н < 0{,}03$ МПа $$U_0 = 0{,}72 \cdot P_р/P_с \qquad (9)$$

для $P_н = 0{,}03 \div 0{,}098$ МПа $$U_0 = 0{,}72 \cdot P_р/P_с + 2{,}64 \cdot P_н/P_с - 0{,}8 \qquad (10)$$

Скорость истечения рабочей воды из сопла

$$W_р = 44{,}625 \cdot \varphi \sqrt{P_р - P_н} \qquad (11)$$

где $\varphi$ - коэффициент расхода, равный для одноструйного сопла - 0,92÷0,98, в среднем 0,95.

Диаметр сопла определится из выражения

$$d_1 = \sqrt{\frac{V_р}{0{,}785 \cdot W_р}} \qquad (12)$$

для многоканального ( $n$ - канального) эжектора

$$d_1^n = \sqrt{\frac{V_р}{0{,}785 \cdot W_р \cdot n}} \qquad (13)$$

Диаметр камеры смешения

$$d_3 = d_1 \cdot \sqrt{(f_3/f_1)^{опт}} \qquad (14)$$

Расстояние от среза сопла до КС для эжекторов, эжектирующих паровоздушную смесь, рекомендуется выбирать в пределах (3÷7) $d_3$,

для эжекторов (I5) эжектирующих неконденсирующийся газ (I+6)$d_3$ (I6)

$$\ell_2 = (3 \div 7) d_3 ; \qquad \ell_2 = (1 \div 6) d_3 \qquad (I5, I6)$$

диаметр сливной трубы рекомендуется выбирать из условия

$$d_c = 1{,}2\, d_3 \qquad (I7)$$

Изотермический КПД эжектора

$$\eta_{из} = \frac{U_в \cdot \rho_р \cdot R \cdot T_р \cdot \ln P_c / P_н}{P_р - P_c} , \qquad (I8)$$

где $\rho_р$ – плотность рабочей воды;

$R$ – газовая постоянная;

$T_р$ – абсолютная температура рабочей воды.

Для облегчения расчета дается номограмма.

В результате проведенных исследований разработаны и защищены авторским свидетельством конструкции ЭУ, обладающие примерно вдвое большей экономичностью, более компактных и работающих практически без вибрации. Разработана технология изготовления ЭУ, обеспечивающая качественную центровку сопла и КС, являющуюся основным условием, обеспечивающим решение проблемы вибрации.

Начиная с I97I г. на базе ЭУ реконструированы эжекторные установки почти на всех существующих турбинах К-300-240 ЛМЗ, причем с 8.02.I973 г. реконструкция производилась по приказу Минэнерго СССР № 55 прилож. 5 поз. I7; всех турбинах К-800-240 ЛМЗ. Установлены ЭУ и на турбинах К-300-240 ХТГЗ Новочеркасской и Змиевской ГРЭС, на турбинах Т-I00/I20-I30 и Т-250/300-240 ТМЗ ТЭЦ-23 Мосэнерго. Успешно используются ЭУ и для очистки трубопроводов системы гидрозолоудаления на Прибалтийской, Новоприбалтийской ГРЭС, Калининской, Алма-Атинской, Кировской и других ТЭС, выполняя одновременно функции вакуумного насоса, реактора-смесителя и компрессора.

Экономический эффект от промышленного внедрения ЭУ составляет около полутора миллионов рублей в год.

В настоящее время производственное объединение Ленинградский металлический завод им. XXII съезда КПСС освоил серийное производство ЭУ для турбин мощностью от 300 до I200 МВт.

В соответствии с руководящими указаниями, утвержденными Минэнерго СССР 7 августа I975 г. и вышедшим вслед за этим директивным указанием № 47-0 по институту ВНИИЭНЕРГОПРОМ, на всех проектируемых институтом ТЭЦ, где в трубопроводах систем гидрозолоудаления возможно появление карбонатных отложений, предусмат-

ривается установка ЭУ для их удаления.

## В Ы В О Д Ы

I. На основании проведенных исследований разработан и защищен авторским свидетельством новый тип эжектора - ЭУ. Экономичность которого примерно вдвое выше, чем ЭК. Изотермический КПД ЭУ достигает 40÷45%.

2. Увеличение расстояния от среза сопла до выхода из КС в эжекторе с одноструйным соплом от I4 до I8(20)$d_3$ приводит к росту экономичности примерно в два раза. Увеличение длины КС в диапазонах, меньшем и большем указанного, не вызывает существенного изменения экономичности.

3. Определены оптимальные (расчетные) и граничные условия работы ЭУ в широком диапазоне изменения режимных и геометрических параметров.

4.Исследовано влияние на экономичность ЭУ различных режимных и геометрических факторов и их взаимосвязь.

5. Увеличение длины КС и струйности сопла позволяет создать перед ЗПД, располагающейся при близких к расчетным условиях на выходе из КС, неравновесный газожидкостный поток с относительно равномерным распределением кинетической энергии по сечению и низкими значениями скорости звука. Течение в таком потоке, при докритических режимах течения рабочей и эжектируемой сред, может оказаться критическим или сверхкритическим.

6. Возможные режимы работы ЭУ можно условно разделить на докритические, смешанные и критические. Для докритических характерно наличие влияния изменения противодавления на давление в приемной камере, для смешанных это влияние снижается, для критических отсутствует. Для ЭК, в связи с отсутствием достаточной для формирования перед ЗПД квазиравновесного потока длины КС, характерны докритические режимы работы.

7. Основными потерями в ЭУ являются потери в ЗПД. На критических режимах - в скачке (системе скачков) уплотнения и на перерасширение потока. На предельном критическом, являющимся оптимальным критическим режимом, потери на перерасширение отсутствуют. На смешанных - за счет проникновения через пристенные области потока возмущений в приемную камеру и отрывов пограничного слоя. На докритических - за счет обратных токов, интенсивность которых с уменьшением степени сжатия снижается. В результ-

тате при $P_c/P_н$ , близких к единице показатели ЭК и ЭУ становятся практически одинаковыми.

8. Для расчета ЭУ предложены эмпирические расчетные зависимости, справедливые в диапазоне режимных параметров: $P_р$ = 0,25÷1,4 МПа, $P_c$ = 0,08÷0,12 МПа. Для облегчения расчета эжекторов дана номограмма.

9. На основе проведенных исследований созданы и внедрены в энергетике на мощных отечественных турбинах и для очистки трубопроводов системы гидрозолоудаления ТЭС от карбонатных отложений экономичные, надежные в работе и компактные ЭУ. Экономический эффект от их внедрения составляет около полутора миллионов рублей в год.

Они приняты в серийное производство производственным объединением Ленинградский металлический завод имени XXII съезда КПСС.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:


1. Ефимочкин Г.И., Кореннов Б.Е. Режимы работы водовоздушного эжектора и влияние температуры воды на его показатели.-Теплоэнергетика, 1973, № 2, с. 70-73.
2. Ефимочкин Г.И., Кореннов Б.Е., Кроль А.Я. Реконструкция водоструйных эжекторов на турбинах К-300-240 ЛМЗ. - Электрические станции, 1974, № 2, с. 45-49.
3. А.с. № 484378 (СССР). Водоструйный газожидкостный эжектор / Г.И.Ефимочкин, Б.Е.Кореннов. - Опубл. в Б.И., 1975, № 34.
4. Ефимочкин Г.И., Кореннов Б.Е. Методика расчета водовоздушного эжектора с удлиненной цилиндрической камерой смешения. - Теплоэнергетика, 1976, № 1, с. 84-86.
5. Кореннов Б.Е. Рабочий процесс в газожидкостном эжекторе. - Теплоэнергетика, 1977, № 1, с. 59-65.
6. Ефимочкин Г.И., Кореннов Б.Е. Реконструкция эжекторной установки на турбинах мощностью 800 МВт. - Электрические станции, 1978, № 9, с. 31-35.

Л.-65476. Подписано к печати 26.03.1980г.
Уч.-изд. л. 1,0. Заказ № 556. Тираж 100 экз.
Ротапринт ВНИПИэнергопром. 105266 Москва,
Семеновская наб. 2/1, ВНИПИэнергопром.
Бесплатно.