

КОНСТРУКЦИИ ЖИДКОСТНОГАЗОВЫХ СТРУЙНЫХ НАСОСОВ. СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Е.К. Спиридонов

Анализом конструкции жидкостногазовых струйных насосов (эжекторов) различного назначения по материалам научно-технической и патентной литературы выявлены три поколения эжекторов этого типа. Сформулированы основные задачи дальнейшего совершенствования жидкостногазовых эжекторов и предложены способы их технического решения. Приводятся оригинальные конструкции регулируемых струйных насосов с побудителями распада активной струи и формирования зоны смешения.

Процесс смешивания и энергообмена сред в проточной части жидкостногазового струйного насоса (эжектора) включает распад высокоскоростных струй жидкости на капли и вовлечение газа в спутное движение, образование бурного газожидкостного потока со скольжением фаз, формирование прыжка перемешивания с интенсивным сжатием газа и сменой бурного течения на спокойное, образование за прыжком квазигоднородного двухфазного потока. Осуществление в полном объеме всех перечисленных стадий рабочего процесса естественным путем требует довольно большой длины проточной части аппарата. В противном случае сжатие газа в эжекторе сопровождается значительными потерями [1–3, 6].

1. Жидкостногазовые струйные насосы первого и второго поколений

Жидкостногазовые струйные насосы претерпели несколько стадий развития. На первой стадии их конструкция практически не отличалась от традиционной конструкции струйных насосов с однородными средами (рис. 1а) и включала одноструйное центральное сопло для формирования высокоскоростной струи, приемную камеру с патрубком подвода эжектируемого воздуха, цилиндрическую смесительную камеру с входным конфуззором, в которой происходит энергообмен между средами и повышение статического давления, и диффузор для преобразования части динамического давления жидкостногазовой смеси в статическое [4, 5]. При этом сопло и смесительная камера устанавливались соосно в приемную камеру, а длина смесительной камеры составляла 3...10 диаметров (рис. 1а).

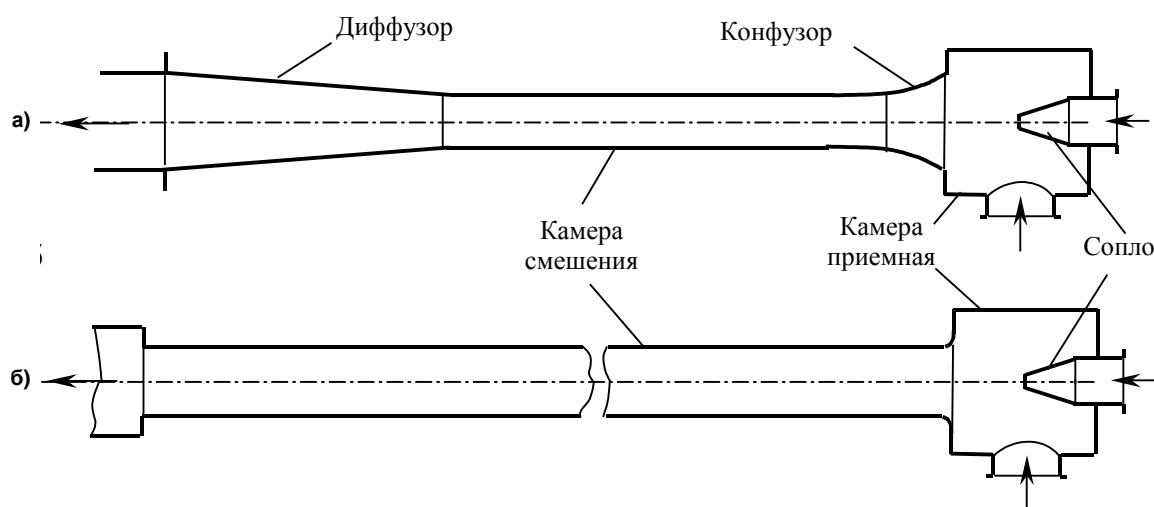


Рис. 1. Жидкостногазовые струйные насосы

Такие струйные насосы широко применяются во многих отраслях народного хозяйства в качестве вакуумных аппаратов, гидрокompрессоров, смесителей жидкости и газов [4, 5]. Однако эффективность струйных насосов первого поколения сравнительно невелика, так как в осевых

габаритах, характерных для аппаратов с однофазными средами, реализовать в полном объеме рабочий процесс двухфазного струйного насоса не представляется возможным [4, 12].

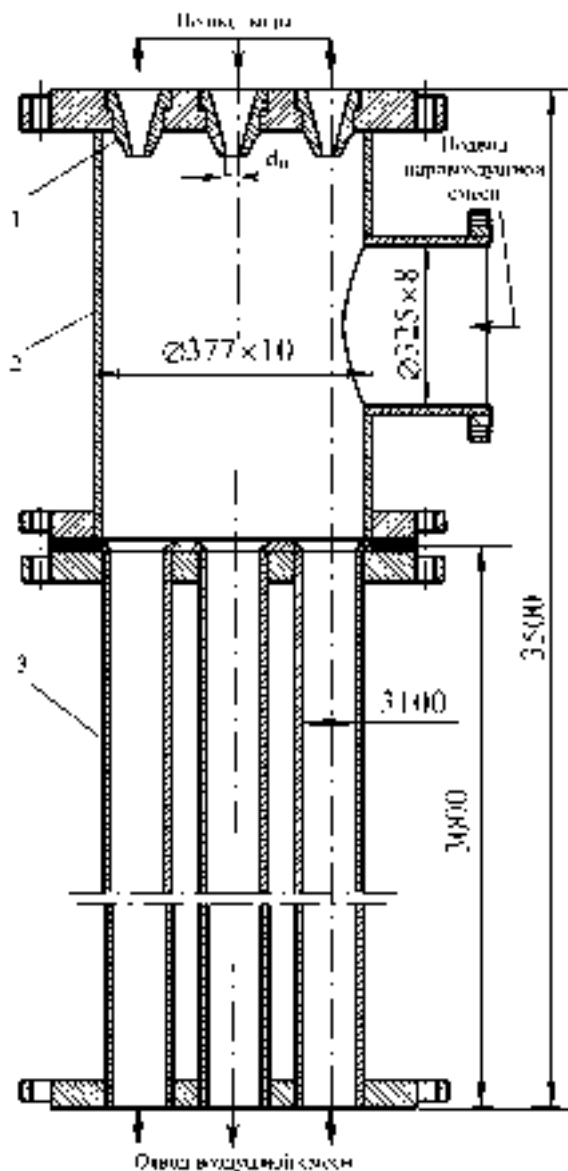


Рис. 2. Общий вид водовоздушного струйного насоса ЭВ-7-1000 ВТИ: 1 – сопло; 2 – камера приемная; 3 – камера смешения

$\Omega = 0,203...0,21$; а относительная длина камеры смешения $L/d_3 = 30$. Струйные насосы ЭВ-7-1000 применяются в качестве основных воздухоотсасывающих устройств конденсаторов мощных паровых турбин, однако в отличие от эжекторов первого поколения они потребляют воды на $(300...350) \text{ м}^3/\text{ч}$ меньше и меньше вибрируют [4, 11, 12].

В водоструйных насосах ВТИ ЭВ-7-1000 применена многоканальная конструкция. Однако, многоканальная конструкция, не изменяя относительной длины каждой проточной части, приводит к уменьшению ее диаметра и увеличению гидравлического сопротивления. В итоге потери механической энергии активного потока в струйном насосе возрастают и его эффективность снижается. Вместе с тем, многоканальная конструкция усложняет струйный насос и ухудшает показатели надежности.

Исследования [3, 6, 9, 13] показывают, что интенсифицировать процесс естественного распада струи и, тем самым, уменьшить потребную длину смесительной камеры двухфазного эжектора можно увеличением числа струй жидкости, формируемых сопловым устройством.

Последующий анализ рабочего процесса в жидкостногазовом струйном насосе обнаружил, что для минимизации потерь энергии в зоне смешивания сред необходимо перед ней обеспечить полное дробление струй жидкости на капли [2, 6–9]. В связи с этим, длина смесительной камеры должна быть значительно больше, чем у аппарата с однофазными средами, и составлять 20...40 калибров [3, 6–8].

Осуществление этого мероприятия привело к появлению струйного насоса с удлиненной камерой смешения. Причем исследованиями [8, 10] установлено, что для определенного сочетания режимных параметров можно упростить общепринятую конструкцию струйных аппаратов, состоящую из активного сопла, входного конфузора, камеры смешения и диффузора, оставив только соосно расположенные сопло и камеру смешения увеличенной длины (рис. 1б).

На основе проведенных исследований ВТИ были разработаны промышленные водовоздушные струйные насосы второго поколения ЭВ-7-1000, в которых для уменьшения общей длины аппарата применена многоканальная конструкция, состоящая из семи параллельно включенных бездиффузорных проточных частей (каналов) с общими приемной камерой 2, напорным и сливным трубопроводами (рис. 2). Каждый канал имеет следующие размеры: диаметр сопла 1 $d_0 = (45...46) \text{ мм}$; диаметр цилиндрической камеры 3 смешения $d_3 = 100 \text{ мм}$; ее длина $L = 3000 \text{ мм}$. Общая длина аппарата 3500 мм [4, 11, 12]. Основным геометрическим параметром Ω , равный отношению площадей проходных сечений сопла и смесительной камеры для эжектора ЭВ-7-1000 составляет

Расчет и конструирование

Конструкция жидкостногазовых эжекторов с многоструйным соплом, детально исследованных в работах [6, 13], принципиально не отличается от традиционной конструкции струйного насоса и включает последовательно установленные активное сопло, приемную и смесительную камеры, диффузор. Однако имеются предложения по конструкциям струйного аппарата, отличных от традиционной [14]. На рис. 3 приведена конструктивная схема жидкостногазового эжектора с многоструйным сопловым устройством 1 и кольцевой камерой смешения 2, снабженной на выходном участке с целью повышения надежности и уменьшения вибрации радиальными ребрами 3. Последние выполнены в виде продольных перегородок длиной 0,2–0,6 от длины камеры смешения, которая, в свою очередь, определяется из соотношения: $L = (1...2) \cdot d_3 \cdot \sqrt{A_3/A_0}$, где d_3 – внутренний диаметр наружного цилиндра камеры смешения; A_3 – площадь нормального сечения камеры смешения; A_0 – суммарная площадь выходных сечений сопловых отверстий (каналов).

Особенностью рассматриваемой конструкции является также исполнение приемной камеры из двух частей – внутренней цилиндрической, выполненной в виде цилиндрического тела 4 и расположенной по всей длине струйного насоса, и наружной кольцевой 5, расположенной на начальном участке камеры смешения. Такая составная приемная камера обеспечивает подвод эжектируемого газа как по наружному, так и по внутреннему периметру смесительной камеры.

Из формулы определения длины смесительной камеры следует, что применение многоструйного сопла в сочетании с кольцевой камерой смешения позволило заметно уменьшить ее длину. Однако кольцевая камера смешения при прочих равных условиях имеет по сравнению с обычной цилиндрической камерой большую площадь внутренней поверхности, что неизбежно приведет к увеличению потерь энергии активного потока на трение. Вместе с тем составная приемная камера существенно увеличивает металлоемкость эжектора и уменьшает его надежность, поскольку число элементов струйного насоса возрастает. Так, например, в случае разгерметизации внутренней стенки камеры смешения или диффузора неизбежно проникновение потока смеси во внутреннюю цилиндрическую часть 4 приемной камеры и далее в систему, что недопустимо.

Анализ существующих конструкций жидкостногазовых струйных насосов первого и второго поколений [4, 5, 8, 10–14] показал, что в большинстве струйных аппаратов основные узлы: сопло, приемная и смесительная камеры установлены последовательно. В струйных насосах такой конструкции добиться строгого соблюдения соосности соплового устройства и удлиненной камеры весьма затруднительно. Вместе с тем известно, что соосность сопла и камеры смешения оказывает значительное влияние на работу эжектора. Отклонение от соосности вызывает соударение высокоскоростных струй со стенками проточной части. Следствием этого является, с одной стороны, повышение уровня вибрации аппарата, а с другой – снижение его эффективности из-за потери струями части своей кинетической энергии. Так, например, установленный ВТИ на Костромской ГРЭС семиканальный эжектор ЭВ-7-1000 имеет объемный коэффициент эжекции на (35...40)% выше, чем аналогичный аппарат, установленный на Кармановской ГРЭС [10,11]. Ав-

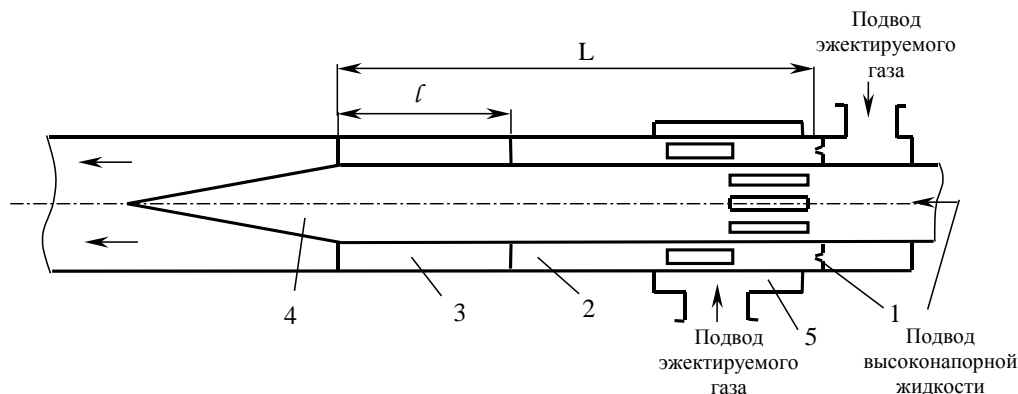


Рис. 3. Жидкостногазовый струйный аппарат: 1 – сопло; 2 – камера смешения; 3 – ребро; 4 – полое центральное тело; 5 – наружная кольцевая полость

торы объясняют это различие более высоким качеством изготовления струйных насосов на Костромской ГРЭС и, следовательно, более строгим соблюдением соосности сопел и камер смешения.

Для обеспечения соосности целесообразно число поверхностей, оказывающих влияние на соосность сопловых отверстий и камеры смешения, сократить до двух: наружной цилиндрической поверхности соплового блока и внутренней цилиндрической поверхности камеры смешения. В жидкостногазовом струйном насосе это условие может быть достигнуто следующим образом. Во-первых, сопловое устройство устанавливается непосредственно в камере смешения с центрированием его наружной цилиндрической поверхности по внутренней цилиндрической поверхности смесительной камеры. Во-вторых, приемная камера располагается вокруг камеры смешения на ее начальном участке в виде кольцеобразной полости. В-третьих, сообщение приемной и смесительной камер осуществляется посредством продольных прорезей или радиальных отверстий, расположенных равномерно по окружности на начальном участке камеры смешения.

Жидкостногазовый струйный насос такой конструкции был разработан на кафедре гидравлики и гидропневмосистем ЮУрГУ [15]. Его конструктивная схема показана на рис. 4. Струйный насос содержит сопловое устройство с одним или несколькими отверстиями 2, сопряженное с

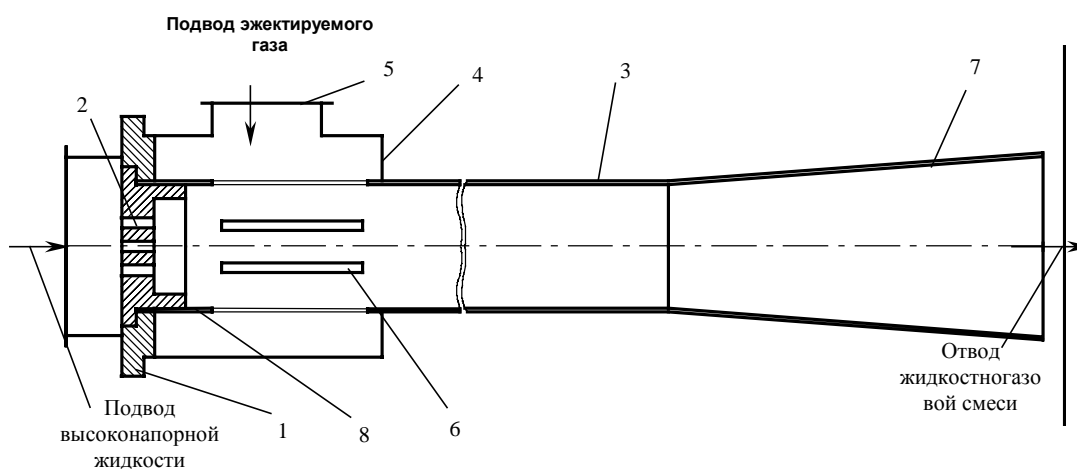


Рис. 4. Струйный насос конструкции ЮУрГУ: 1 – сопловое устройство; 2 – отверстие; 3 – камера смешения; 4 – камера приемная; 5 – патрубок подвода эжектируемой среды; 6 – радиальные прорези (отверстия); 7 – диффузор; 8 – центрирующая поверхность

цилиндрической камерой 3 смешения; приемную камеру 4 с патрубком 5 подвода пассивной среды, сообщенную с камерой 3 смешения с помощью отверстий 6 и расположенную коаксиально с камерой смешения на ее входном участке; диффузор 7.

Сопловое устройство 1 снабжено цилиндрической центрирующей поверхностью 8, с помощью которой сопло 1 сопряжено с камерой 3 смешения. Радиальные отверстия (прорези) 6, сообщающие полости приемной 4 и смесительной 3 камер, расположены равномерно по окружности камеры 3. Длина камеры смешения выбирается исходя из режима работы эжектора и числа сопловых отверстий с помощью рекомендаций, полученных опытно-расчетным путем и опубликованных в работах [3,9]. Благодаря этому все стадии процесса перемешивания и энергообмена сред завершаются к выходному сечению камеры смешения и, следовательно, сводятся к минимуму потери энергии в зоне смешения и на трение о стенку камеры.

Таким образом, обеспечение соосности активного сопла и камеры смешения, оптимизация ее длины, выполнение приемной камеры в виде кольцеобразной полости позволяют достигнуть некоторого сокращения габаритов аппарата, повысить его надежность и эффективность.

Жидкостногазовый струйный насос конструкции ЮУрГУ детально исследован в лабораторных и промышленных условиях [2, 9, 16]. В настоящее время струйные насосы ЮУрГУ успешно функционируют на нескольких ГРЭС в системе вакуумирования паровых турбин К-300-240 ЛМЗ.

2. Задачи создания новых образцов струйных насосов

В существующих жидкостногазовых струйных насосах первого и второго поколений, включая эжекторы с многоструйным соплом, рабочий процесс протекает естественным путем, никаких дополнительных средств, интенсифицирующих распад струй жидкости на капли и формиро-

Расчет и конструирование

вание зоны смешения, не предусмотрено. А это требует довольно большой длины камеры смешения. Большая длина, в свою очередь, приводит к росту потерь на трение в камере смешения и некоторому снижению КПД эжектора, увеличению его габаритов.

Известные конструкции струйных насосов не содержат также средств, инициирующих образование прыжка перемешивания и стабилизирующих его положение в камере смешения, что особенно важно при переменных режимах работы, когда положение прыжка (скачка) неустойчиво. При изменении противодавления (перепада давления на эжекторе) прыжок перемешивания может переместиться из смесительной камеры в диффузор или приемную камеру, причем с увеличением противодавления он перемещается в сторону приемной камеры, что приводит к ее затоплению и аварийной ситуации, а с уменьшением противодавления скачок перемешивания может оказаться в диффузоре, что также приводит к аварийной ситуации, так как в этих условиях характеристики эжектора непредсказуемы.

Жидкостногазовые струйные насосы первого и второго поколений являются, как правило, нерегулируемыми, поскольку их конструкция не позволяет управлять рабочим процессом и, следовательно, настраивать его на эффективные режимы при изменившихся условиях работы в гидросистеме.

Исходя из сказанного, можно сформулировать следующие технические задачи создания новых образцов жидкостногазового струйного насоса.

1. Интенсификация процесса дробления струй жидкости активного потока и, как следствие этого, получение квазиоднородного двухфазного потока на меньшей длине камеры смешения. Это позволит уменьшить габариты струйного насоса, снизить потери на трение в камере смешения, повысить эффективность аппарата.

2. Инициирование прыжка перемешивания сред и стабилизация его положения в камере смешения; в результате достигается устойчивость в работе, повышается надежность и КПД эжектора.

3. Управление процессами дробления струй активного потока, инициирование прыжка перемешивания и стабилизации его положения в камере смешения, что обеспечивает эффективные режимы при переменных условиях работы.

3. Жидкостногазовые струйные насосы нового поколения

К настоящему времени появилось немало интересных предложений по улучшению элементов струйных насосов. Причем многие авторы создание эффективного жидкостногазового струйного насоса видят, прежде всего, в совершенствовании соплового устройства аппарата. Например, с целью интенсификации процесса распада активных струй на капли, ряд авторов рекомендует закрутить поток жидкости в сопловых каналах, снабдив их винтовыми пластинами [12].

Однако размещение пластин на выходном участке соплового канала, где скорости потока достаточно велики, ухудшает показатели надежности сопла и всего эжектора, ибо, с одной стороны, возникает опасность кавитационного разрушения пластины, а с другой – возрастает вероятность засорения сопла.

Более приемлемым с точки зрения эксплуатационной надежности является решение, описанное в авторском свидетельстве СССР № 1041766 [17]. Авторы предлагают коническое сопло снабдить цилиндрическим участком 1, на внутренней поверхности которого выполнены винтовые канавки 2, расположенные под углом к оси струйного насоса (рис. 5). Причем угол наклона винтовых канавок равен $(12...27)^\circ$. Активная среда, истекая из такого сопла в виде двухфазного жидкостного потока с монолитной центральной частью и распыленным пограничным слоем, вследствие закрутки периферийной части потока винтовыми канавками более интенсивно увлекает пассивный газ в камеру смешения и распадается в ней на капли.

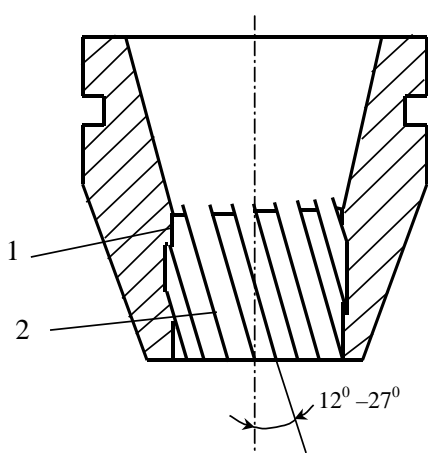


Рис. 5. Сопло с винтовыми канавками:
1 – цилиндрический участок;
2 – винтовые канавки

Недостатком последнего, как и предыдущего конструктивных мероприятий является повышенное гидравлическое сопротивление соплового канала. Лишенным этого недостатка является многоструйное сопловое устройство (рис. 6), в котором сопловые каналы (стволы) размещены парами, оси стволлов каждой пары наклонены одна к другой и расположены к оси эжектора под углом, равным $\alpha = (2 \dots 10)^\circ$ [18]. Благодаря этому обеспечивается попарное соударение струй жидкости. В результате соударения каждая пара струй, вытекающих из пары стволлов, преобразуется в неустойчивую плену в форме тонкой плоской ленты, легко дробящейся на капли. Таким образом, организация попарного соударения струй жидкости в значительной степени ускоряет процесс распада струй на капли, интенсифицирует процесс перемешивания жидкости с газом и увеличивает скорость газа в камере смешения до значений, близких к скорости жидкости. Тем самым достигается повышение КПД струйного насоса на расчетном режиме.

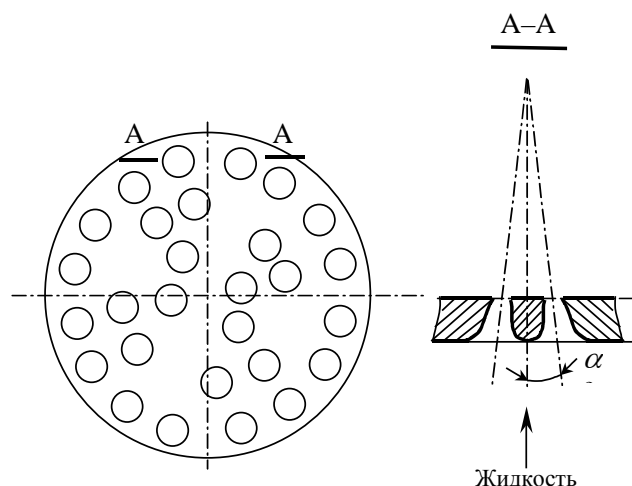


Рис. 6. Сопло с попарным соударением струй

самым достигается повышение КПД струйного насоса на расчетном режиме.

Авторы соплового устройства с попарным соударением струй предложили также несколько оригинальных конструктивных решений, основанных на использовании активного сопла со свободно вращающимся элементом, содержащим профилированные каналы [19, 20].

Выполнение струйного насоса для интенсификации рабочего процесса и повышения КПД с подвижными элементами нашло свое применение в авторских свидетельствах СССР № 1386752 и № 1418498 [21, 22], в которых авторы предлагают камеру 3 смешения установить с возможностью вращения и закрепить на ее внутренней поверхности направляющий аппарат 5

(рис. 7). Поступая во вращающуюся камеру 3, активная и пассивная среды более интенсивно смешиваются и приобретают в результате взаимодействия с аппаратом 5 дополнительную кинетическую энергию. Этим, по мнению авторов, и достигается повышение КПД.

Однако, применение свободно вращающихся элементов (соплового диска или камеры смешения) лишает струйный насос его главного достоинства – отсутствие подвижных механических частей в проточной части и, как следствие этого, высокой надежности. Этот существенный недостаток сужает область применения таких струйных насосов установками с чистой рабочей жидкостью и пониженными требованиями к показателям надежности.

Все рассмотренные выше конструктивные мероприятия по совершенствованию жидкостногазовых струйных насосов направлены исключительно на решение первой задачи создания струйного аппарата нового поколения, т.е. интенсификацию процесса дробления струй жидкости и получение однородной двухфазной смеси на меньшей длине камеры смешения. Каких-либо средств, инициирующих образование зоны смешения и стабилизирующих ее положение в камере смешения, а также управляющих рабочим процессом в рассмотренных конструкциях струйного насоса нет.

Одно из возможных комплексных технических решений для жидкостногазового эжектора с многоструйным соплом включает следующие конструкторские мероприятия.

1. В струйном насосе, содержащем соосное многоструйное сопло с центральным сопловым отверстием, приемную и смесительную камеры, диффузор, в камере смешения соосно центральному сопловому отверстию размещается центральное тело в виде стержня. Причем, один свободный конец стержня со стороны сопла выполняется с профилированной торцевой поверхностью, а другой конец устанавливается с помощью радиальных перегородок с острыми кромками, образующих в камере смешения на ее выходном участке каналы, параллельные оси камеры смешения.

2. В камере смешения на ее стенках между активным соплом и радиальными перегородками устанавливаются отклоняющие элементы в виде профилированных кольцевых втулок. Причем, один из отклоняющих элементов устанавливается между активным соплом и свободным концом центрального тела, а остальные на участке между свободным концом центрального тела и радиальными перегородками.

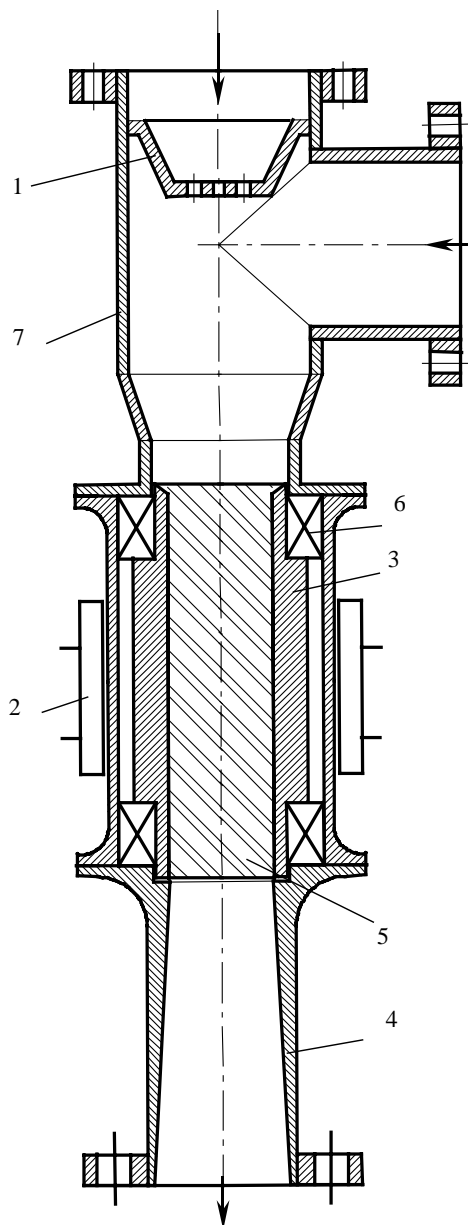


Рис. 7. Струйный насос с вращающейся камерой смешения: 1 – сопло; 2 – привод; 3 – камера смешения; 4 – диффузор; 5 – направляющий аппарат; 6 – подшипник; 7 – камера приемная

дает интенсификацию процесса распада периферийных струй, а все последующие отклоняющие элементы (втулка 13 и перегородки 10, 15) формируют зону смешения. При изменении давлений перед и за эжектором, вызывающим перемещение прыжка в камере 3, втулки 12, 13 и перегородки 10, 15, создавая сопротивление этому перемещению, препятствуют проникновению прыжка в приемную камеру 5 или диффузор 4. В результате повышается надежность и устойчивость в работе струйного насоса.

Выполнение центрального отверстия 2 соплового устройства 1 с наименьшей площадью проходного сечения позволяет затраты энергии активного потока на дробление струй свести к минимуму, а расположение периферийных сопловых отверстий 14 в зонах, ограниченных внутренними контурами поперечных сечений каналов 11 и 16, исключает потери кинетической энергии от столкновения струй со стенками 10 и 15 каналов.

Таким образом, обеспечивается более интенсивный распад струй на капли, формирование более однородного двухфазного потока и постепенное повышение давления. Все это приводит

Сущность описанного выше технического решения, поясняется рис. 8, где представлен жидкостногазовый струйный насос конструкции ЮУрГУ, дополненный необходимыми деталями [23].

Центральное тело 8 в виде стержня с профилированной площадкой 9, размещенное в камере 3 смешения по ходу центральной струи активного потока, отклоняет ее от прямолинейного движения и дробит на ряд струек. Последние, в свою очередь, соударяются с периферийными струями и инициируют их рассеивание. В результате процесс распада струй активного потока интенсифицируется.

Радиальные перегородки 10 вместе с цилиндрической стенкой 15, выполняя функцию опоры стержня 8, инициируют формирование скачков перемешивания и, кроме того, снижают амплитуды пульсации давления за счет уменьшенной площади проходного сечения каналов 11 и 16. Это способствует повышению надежности струйного насоса.

Профилированное кольцо 12, размещенное в камере смешения между активным соплом 1 и свободным концом центрального тела 8, отклоняет часть периферийных струй от осевого движения к центру. Это вызывает их более ранний распад и столкновение с другими струями активного потока. Таким образом, в центральной части камеры смешения процесс распада интенсифицируется телом 8, а в пристенной зоне – кольцевой втулкой 12. В итоге сокращается длина камеры смешения и снижаются потери на трение.

Другой отклоняющий элемент – кольцевая профилированная втулка 13 расположена на участке между площадкой 9 и перегородками 10 и 15, т.е. в зоне уже сформировавшегося газожидкостного потока со скольжением фаз. Втулка 13, несколько сужая поток, инициирует более раннее появление скачков перемешивания в камере 3 смешения. Вследствие этого зона смешения становится более протяженной, а повышение давления в ней постепенным, что, в свою очередь, приводит к снижению потерь энергии на перемешивание сред и повышению КПД аппарата.

На расчетном режиме работы струйного насоса первый отклоняющий элемент (втулка 12) обеспечи-

к уменьшению габаритов и повышению КПД. Кроме того, уменьшение площади поперечного сечения каналов в зоне смешения снижает амплитуду пульсаций, уровень вибрации, повышает надежность и устойчивость в работе струйного насоса. Однако, размещение центрального тела, перегородок и отклоняющих профилированных колец в проточной части смесительной камеры несколько увеличивает ее гидравлическое сопротивление, степень влияния которого на характеристики эжектора возрастает с уменьшением диаметра камеры смешения. В связи с этим, применение описанного технического решения целесообразно для крупногабаритных струйных насосов с большой потребной производительностью по эжектируемому газу.

Для малых струйных насосов интенсификация рабочего процесса и управление им могут быть достигнуты на основе эффекта соударения струй, но не активных струй друг с другом, как это предложено в [18], а струй потока управления с активными струями. Техническая реализация этого предложения на базе струйного насоса конструкции ЮУрГУ показана на рис. 9 [24].

В жидкостногазовом струйном насосе полость патрубков 6 подвода активной среды сообщена с камерой 2 смешения на ее входном участке 7 посредством перепускных каналов 8 с соплами управления 9. Последние установлены в корпусе камеры смешения, либо в одном сечении, ортогональном оси камеры (см. рис. 9), либо в нескольких нормальных сечениях входного участка 7. Перепускные каналы 8 в предпочтительном варианте выполнения состоят из кольцевых камер 10, 11 и труб 12, снабженных регулирующими дросселями 13.

Перепускные каналы 8 дополнительно сообщены с камерой 2 смешения на ее выходном участке 14 посредством отводов 15, снабженных соплами управления 16, регулирующими дросселями 17. Отводы 15 в предпочтительном варианте выполнения состоят из труб 18 и кольцевой камеры 19, охватывающей сопла управления 16.

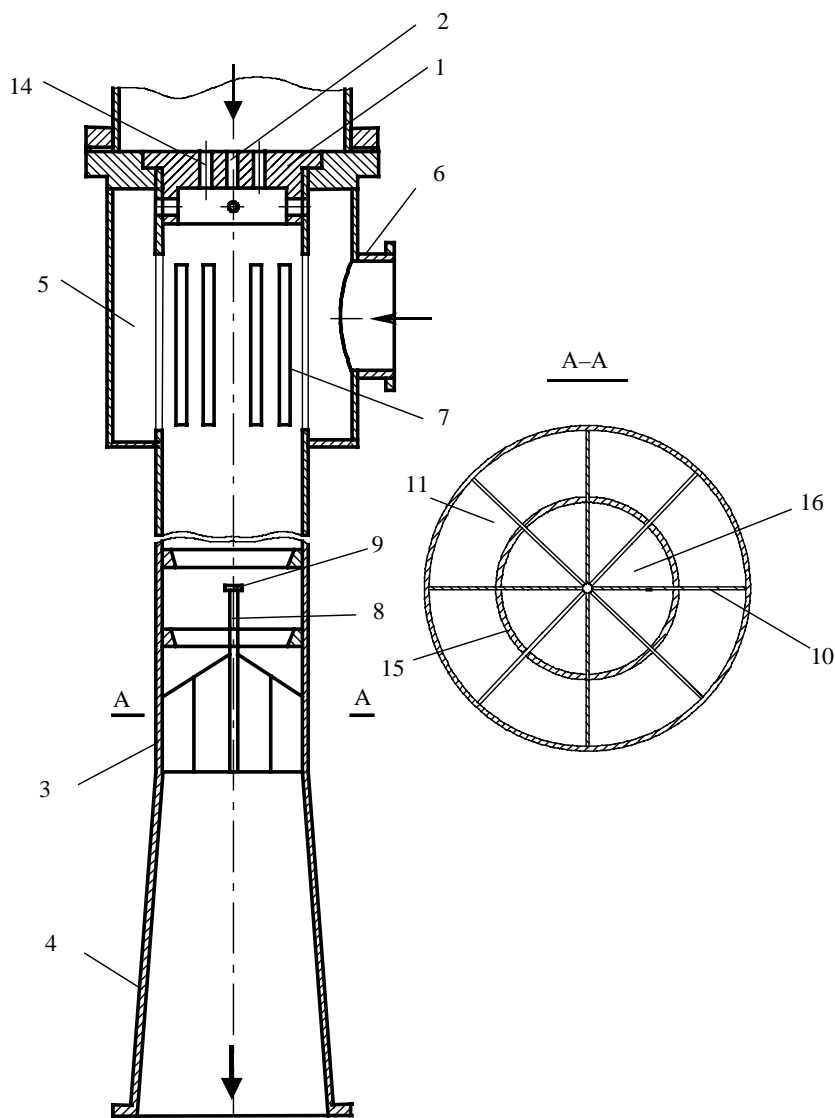


Рис. 8. Струйный насос с отклоняющими элементами в смесительной камере: 1 – сопловое устройство; 2 – центральное отверстие; 3 – камера смешения; 4 – диффузор; 5 – камера приемная; 6 – патрубок подвода эжектируемого газа; 7 – радиальные прорезы; 8 – центральное тело; 9 – профилированная площадка; 10 – радиальные перегородки; 11 – канал; 12 и 13 – отклоняющие элементы; 14 – периферийные отверстия; 15 – цилиндрическая стенка; 16 – канал

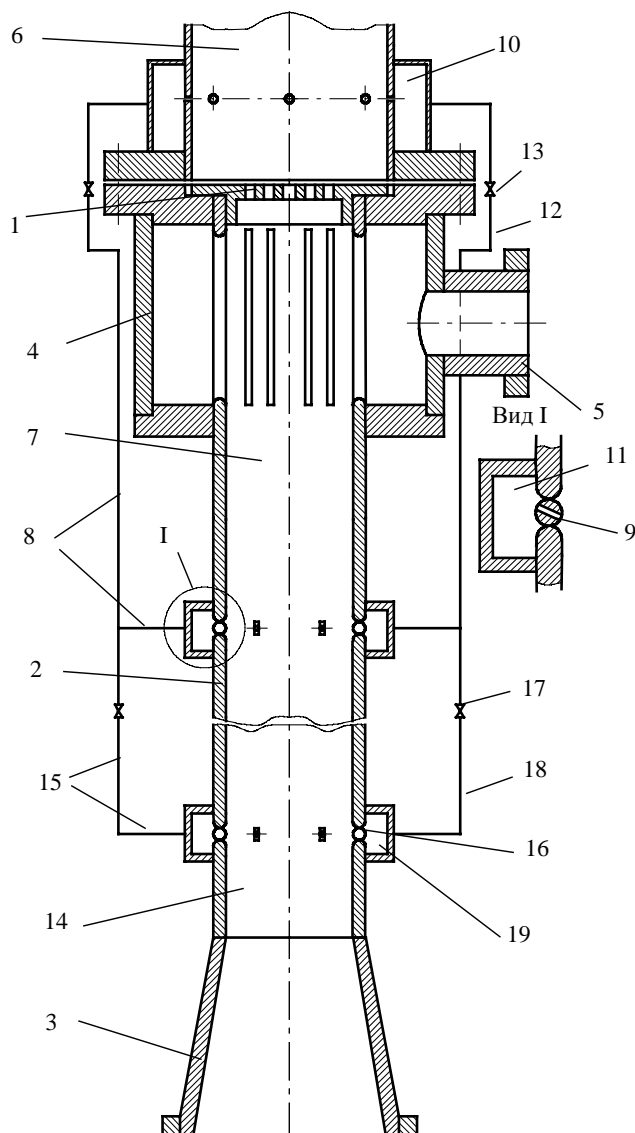


Рис. 9. Эжектор со струями управления в камере смешения: 1 – сопловое устройство; 2 – камера смешения; 3 – диффузор; 4 – камера приемная; 5 – патрубок подвода газа; 6 – патрубок подвода активной жидкости; 7 – входной участок камеры смешения; 8 – перепускной канал; 9 и 16 – сопла управления; 10, 11 и 19 – кольцевые камеры; 12 и 18 – трубы; 13 и 17 – регулируемые дроссели; 14 – выходной участок камеры смешения; 15 – отвод

При увеличении противодавления выше номинальной величины прыжок перемешивания перемещается вверх к приемной камере 4. Однако струи потока управления, создавая гидродинамическую завесу, препятствуют вытеснению прыжка из камеры смешения 2 в приемную камеру 4 и способствуют устранению аварийной ситуации.

Включением отводов 15 формируется дополнительный поток управления, протекающий из перепускных каналов 8 через трубы 18, кольцевую камеру 19, сопла управления 16 в камеру 2 смешения на ее входном участке 14. Струи дополнительного потока управления, направленные под углом к вектору скорости основного жидкостногазового потока, несколько сужают его и иницируют, тем самым, появление на выходном участке 14 перед сужением потока прыжка перемешивания. В последнем происходит изменение структуры газожидкостного потока и повышение статического давления. При снижении противодавления за эжектором прыжок перемещается вниз по потоку и оказывается под влиянием струй дополнительного потока управления, гидродинамическое воздействие которых на прыжок возрастает по мере его продвижения к диффу-

При работе эжектора жидкость, например, вода подается под большим напором через патрубок 6 к активному многоструйному соплу 1, на выходе которого она приобретает большую скорость. Истекающие из активного сопла 1 струи жидкости попадают в камеру 2 смешения, где разрушаясь на капли, перемешиваются с увлекаемой ими пассивной средой (низконапорным газом, например, паровоздушной смесью) и отдают ей часть своей кинетической энергии. Эжектируемый газ подводится в камеру 2 смешивания через приемную камеру 4 патрубком 5 подвода пассивной среды.

Одновременно в перепускном канале 8, сообщающем полость патрубка 6 подвода активной (высоконапорной) жидкости со входным участком 7 камеры смешения, формируется поток управления. Высоконапорная жидкость, отбираемая в небольшом количестве из патрубка 6 и протекающая через кольцевую камеру 10 и трубы 12, попадает в кольцевую камеру 11, из которой истекает в виде струек через сопла управления 9 в камеру смешения. В кольцевых камерах 10 и 11 осуществляется выравнивание давления. В камере 2 смешения струи потока управления, направленные под углом к ее оси, соударяются со струями активного потока и разбивают их на ряд отдельных струек и капель, за счет чего интенсифицируется процесс дробления активного потока. В итоге формирование равномерного жидкостногазового потока осуществляется на меньшей длине, что позволяет сократить длину камеры смешения и всего эжектора.

зору 3. Благодаря этому, прыжок удерживается в камере 2 смешения на ее выходном участке 14. В результате устраняется вторая аварийная ситуация, обусловленная непредсказуемостью характеристик эжектора при расположении зоны смешения в диффузоре 3.

Регулирующими дросселями 13 и 17 достигаются оптимальные режимы работы эжектора при минимальном расходе потока управления.

Процесс перемешивания и энергообмена активного и пассивного потоков завершается к входному сечению камеры 2 смешения, из которой поток смеси поступает в диффузор 3. В последнем происходит трансформация части кинетической энергии потока смеси в потенциальную.

При изменении массового расхода отсасываемого воздуха или давлений перед и за эжектором регулированием углов наклона сопел управления 9 и 16 к оси камеры смешения настраивают рабочий процесс в эжекторе для новых условий работы с целью достижения наибольшего КПД. Причем, поворотом сопел управления 9 на тот или иной угол управляют процессом дробления струй активной жидкости, а поворотом сопел управления 16 – управляют процессом формирования прыжка перемешивания и стабилизации его положения в выходном участке 14 камеры 2 смешения.

Таким образом, жидкостногазовый струйный насос со взаимодействием струй потока управления с активными струями обеспечивает снижение осевых габаритов, повышение надежности и эффективности аппарата.

4. Выводы

1. К настоящему времени можно выделить три поколения жидкостногазовых струйных насосов. Конструкция струйных насосов первого поколения практически не отличается от традиционной конструкции эжекторов с однородными средами и в большинстве случаев не обеспечивает эффективную работу аппарата.

Проточная часть жидкостногазовых струйных насосов второго поколения в той или степени отвечает потребности естественного протекания рабочего процесса и включает удлиненную камеру смешения и/или многоструйное активное сопло. Эффективность лучших образцов струйного насоса второго поколения приближается к предельно достижимой.

Отличительной чертой двухфазных струйных насосов третьего поколения является включение в их конструкцию элементов и устройств, интенсифицирующих рабочий процесс и позволяющих управлять им.

2. Дальнейшее совершенствование конструкции жидкостногазового струйного насоса связано с решением трех основных задач, в том числе интенсификация процесса дробления струй активной жидкости и, как следствие, получение квазиоднородного двухфазного потока при меньшей длине камеры смешения; инициирование прыжка перемешивания сред и стабилизация его положения в смесительной камере; управление рабочим процессом в проточной части эжектора.

3. Эффективным способом интенсификации процесса распада жидких струй, истекающих из многоствольного соплового устройства, является их попарное соударение. Для этого оси стволов каждой пары должны быть наклонены одна к другой на небольшой угол. Однако, наиболее интенсивный распад активных струй в камере смешения аппарата следует ожидать при прерывистом истечении насыщенной газом жидкости.

4. Комплексным решением проблемы совершенствования жидкостногазовых струйных насосов является организация потока управления, воздействующего на активные струи и жидкостногазовую смесь в камере смешения, и/или модернизация самой камеры смешения на основе деталей и устройств, отклоняющих струи жидкости от осевого движения и несколько сужающих проходные сечения каналов в области формирования прыжка перемешивания.

Литература

1. Спиридонов Е.К. Энергетический анализ жидкостногазовых течений// Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2003. – Вып. 3. – № 1(17). – С. 141–150.

2. Спиридонов Е.К. Теоретические положения оптимального синтеза жидкостногазовых струйных аппаратов и систем на их основе// Наука и технологии: Труды XXIII Российской школы. – М.: РАН, 2003. – С. 414–431.

Расчет и конструирование

3. Спиридонов Е.К. К определению длины смесительной камеры двухфазного струйного насоса// Гидромеханика, гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: Сб. докл. Междунар. научно-техн. конф. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. – С. 23–24.

4. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – 3-е изд. перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

5. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 256 с.

6. Witte J.H. Mixing Shocks in Two – Phase Flow// The Journal of Fluid Mechanics. Vol. 36. – Part 4. – 1969. – P. 639–655.

7. Каннингем, Допкин. Длины участка разрушения струи и смешивающей горловины жидкоструйного насоса для перекачки газа// Теоретические основы инженерных расчетов. – М.: Мир. – 1974. – № 3. – С. 128–141.

8. Ефимочкин Г.И., Коренков Б.Е. Исследование и выбор водоструйных эжекторов с удлиненной камерой смешения // Электрические станции. – 1976. – № 4. – С. 46–49.

9. Спиридонов Е.К. О рациональной длине смесительной камеры вакуумного водовоздушного эжектора // Теплоэнергетика. – 1982. – № 7. – С. 69–70.

10. Ефимочкин Г.И. Конструкции и расчет водоструйных эжекторов с удлиненной камерой смешения // Теплоэнергетика. – 1982. – № 12. – С. 48–51.

11. Ефимочкин Г.И., Коренков Б.Е., Кроль А.Я. Реконструкция водоструйных эжекторов на турбинах К-300-240 ЛМЗ// Электрические станции. – 1974. – № 2. – С. 43–49.

12. Ефимочкин Г.И., Коренков Б.Е. Сравнительные испытания основных водоструйных эжекторов турбин К-300-240 ЛМЗ// Электрические станции. – 1975. – № 2. – С. 21–23.

13. 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.

14. А.с. 684162 СССР, МКИ F04F5/0. Водоструйный эжектор / Г.И. Ефимочкин (СССР). – №2597729/25–06; Заявлено 28.03.78; Оpubл. 05.09.79, Бюл. №33.

15. А.с.1483106 СССР, МКИ F04F5/02. Эжектор / Е.К. Спиридонов, В.К. Темнов, А.П. Спиридонов, В.В. Шмаков, М.А. Чепкасов (СССР). – №4170435/25–29; Заявлено 30.12.86; Оpubл. 30.05.89, Бюл. № 20.

16. Спиридонов Е.К. Испытание водовоздушного струйного насоса ЮУрГУ в системах вакуумирования паровых турбин// Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2005. – Вып. 6. – № 1(41). – С. 120–125.

17. А.с.1041766 СССР, МКИ F04F5/02. Струйный аппарат / Я.С. Теплицкий П.Е. Коришонов, Г.М. Бахронова, Д.М. Горловский, О.С. Чехов (СССР). – № 2883717/25-06; Заявлено 19.02.80; Оpubл. 15.09.83, Бюл. № 34.

18. А.с.985462 СССР, МКИ F04F5/04 Жидкостногазовый эжектор/ Ю.Н. Васильев, Е.П. Гладков, Г.А. Горшкова (СССР). – № 3324816/25-06; Заявлено 24.07.81; Оpubл. 30.12.82, Бюл. № 48.

19. А.с.681228 СССР, МКИ F04F5/04 Жидкостногазовый эжектор/ Ю.Н. Васильев, Е.П. Гладков, Г.А. Горшкова (СССР). – № 2394169/25-06; Заявлено 02.08.76; Оpubл. 25.08.79, Бюл. № 31.

20. А.с.1038618 СССР, МКИ F04F5/04 Жидкостногазовый эжектор/ Ю.Н. Васильев, Е.П. Гладков, Г.А. Горшкова (СССР). – № 3381175/25-06; Заявлено 08.01.82; Оpubл. 30.08.83, Бюл. № 32.

21. А.с.1386752 СССР, МКИ F04F5/04 Эжектор/ И.И. Рошак, А.В. Городивский, П.В. Косяков, Л.В. Городивский (СССР). – № 4133772/25-06; Заявлено 14.10.86; Оpubл. 07.04.88, Бюл. № 13.

22. А.с.1418498 СССР, МКИ F04F5/04 Эжектор/ А.В. Городивский, А.В. Бакин, И.И. Рошак, П.В. Косяков, Л.В. Городивский (СССР). – № 4154374/25-06; Заявлено 01.12.86; Оpubл. 23.08.88, Бюл. № 31.

23. Патент 2070670 РФ. МПК F04F5/02. Жидкостногазовый эжектор/ Е.К. Спиридонов, А.В. Воронков (РФ). – № 94026814/06. Заявлено 18.07.94. Оpubл. 20.12.96. Бюл. № 35.

24. Патент 2072454 РФ. МПК F04F/02. Жидкостногазовый эжектор/ Е.К. Спиридонов, (РФ). – № 94037902/06. Заявлено 22.09.94. Оpubл. 27.01.97. Бюл. № 13.