

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
Политехнический Институт
Факультет Механико-технологический
Кафедра «Гидравлика и гидропневмосистемы»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН
Рецензент, С.Б. Школин

_____ /
_____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ / Е.К. Спиридонов
_____ 2018 г.

РАСЧЕТ УСТРОЙСТВ ИСТЕЧЕНИЯ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО
ПОТОКОВ В СТРУЙНОМ ЭЖЕКТОРЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
РАБОТЕ
ЮУрГУ–15.03.02.2018.288 ПЗ ВКР

Руководитель работы, доцент

_____ / А.Р. Исмагилов
_____ 2018г.

Автор проекта
студент группы П-457

_____ / М.А. Авдеев
_____ 2018г.

Нормоконтролер, доцент

_____ / А.В. Подзерко
_____ 2018г.

Челябинск 2018 г.

АННОТАЦИЯ

М.А.Авдеев Расчет устройств истечения активного и пассивного потоков в струйном эжекторе. – Челябинск: ЮУрГУ, П; 2018, 50 с., 12 ил., библиогр. список — 13 наим., 1 лист чертежей ф. А1., 2 листа чертежей ф. А3., 2 листа чертежей ф.А4.

После обзора промышленного применения и различных конструкций водовоздушных эжекторов, выбран прототип водовоздушного эжектора. На основе выбранного прототипа разработан водовоздушный эжектор. Предложено техническое решение – ввести в водовоздушный эжектор традиционного исполнения побудитель пассивного потока. Рассмотрены различные виды побудителей пассивного потока. Разработан водовоздушный эжектор с побудителем пассивного потока на основе разработанного водовоздушного эжектора традиционного исполнения. Наглядно показана эффективность применения побудителя пассивного потока в водовоздушном эжекторе.

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	Авдеев				<i>Расчет устройств истечения активного и пассивного потоков в струйном эжекторе</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	Исмагилов						2	50
<i>Реценз.</i>						ЮУрГУ Кафедра ГиГПС		
<i>Н. Контр.</i>	Подзерко							
<i>Утверд.</i>	Спиридонов							

ВВЕДЕНИЕ

Струйный аппарат представляет собой устройство, в котором передача энергии обеспечивается путем смешивания рабочего (активного) потока с перекачиваемым потоком (пассивным) и последующего образования смешанного потока с промежуточным давлением. Смешиваемые потоки находятся в различных фазовых состояниях и отличаются по давлению.

За счет своей простоты конструкции и ряда других преимуществ струйные аппараты широко применяются в различных отраслях промышленности, начиная от пищевой и фармацевтической и заканчивая нефтеперерабатывающей и энергетической промышленностью.

Струйные аппараты свое распространение получили в виду ряда следующих преимуществ:

- 1) возможностью перекачки жидкостей, газов, газо-жидкостных смесей, гидросмесей, содержащих твердые частицы, агрессивных сред;
- 2) отсутствием подвижных частей, простотой конструкции, как следствие, высокая надежность и простота обслуживания;
- 3) малыми габаритными размерами и массой относительно других типов динамических гидромашин, возможностью размещения в труднодоступных местах;

Но в ряду преимуществ, также есть и существенные недостатки, к числу которых, прежде всего, относят [1]:

- 1) необходимость подачи рабочего потока под большим давлением;
- 2) низкий КПД
- 3) безвозвратный сброс большого количества жидкости, используемой в качестве рабочей (активной) среды.

Однако, не всегда третий недостаток СН проявляет себя в полной мере, т.к. на некоторых установках большое количество жидкости после струйного аппарата можно использовать вновь, например, для повторного создания высокоскоростного активного потока, предварительно отделив друг от друга двухфазный поток.

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

Все эти преимущества и недостатки позволили струйным аппаратам широко распространиться в следующих областях:

1) в химической отрасли струйные аппараты применяют для производства эпоксидных и акриловых смол, щелочей и кислот, для диспергирования газа для повышения эффективности карбонизации водных растворов и так далее;

2) в нефтеперерабатывающей отрасли струйные аппараты используют для перемешивания водяной эмульсии с деэмульгатором при обработке пластовой воды, а также добавление присадок в топливо и моторные масла и так далее;

3) на электростанциях – в системе регулирования паровых турбин, в системах воздушного охлаждения электрических генераторов;

4) для перекачки воды из скважин и колодцев, а также для откачки воды из трюмов судов;

5) в пищевой промышленности – для подготовки водно-кофейной суспензии при производстве растворимого кофе, гомогенизация молочных продуктов.

6) в энергетике – в качестве воздухоотсасывающих устройств конденсационных установок, реагентная подготовка в процессах водоподготовки ТЭЦ;

7) в фармацевтической промышленности струйные аппараты применяют для растворения и разбавления компонентов при получении жидких лекарственных форм, также ввод и распределение эмульгаторов и стабилизаторов в производстве мазей и кремов;

Все перечисленное выше, лишь небольшой список применения струйных аппаратов в различных областях промышленности.

Процессы, происходящие в струйных аппаратах, зависят, прежде всего, от агрегатного состояния взаимодействующих сред. С этой точки зрения можно все струйные аппараты разделить на три группы [1]:

1) аппараты, в которых агрегатное состояние рабочей и инжектируемой сред одинаково;

2) аппараты, в которых рабочий и инжектируемый потоки находятся в разных агрегатных состояниях, не изменяющихся в процессе смешения этих потоков;

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

3) аппараты с изменяющимся агрегатным состоянием сред. В этих аппаратах рабочий и инжектируемые потоки до смешения находятся в разных фазах, а после смешения – в одной фазе, т.е. в процессе смешения меняется агрегатное состояние одного из потоков.

К первой группе относятся газо (паро) струйные компрессоры, эжекторы и инжекторы, а также струйные насосы[1].

Ко второй группе относятся струйных аппаратов для пневмотранспорта, водовоздушные эжекторы (ВВЭ) и струйные аппараты для гидротранспорта [1].

К третьей группе относятся пароводяные инжекторы и струйные подогреватели [1].

Условия работы струйные аппараты зависят также от упругих свойств взаимодействующих сред. Под упругими свойствами или сжимаемостью понимается значительное изменение удельного объема среды при изменении ее давления. На практике применяются струйные аппараты, в которых [1]:

- а) обе среды (рабочая и инжектируемая) упруги;
- б) одна из сред упруга;
- в) обе среды неупруги;

									Лист
									6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

150302.2018.288.ПЗ

1 РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ВОДОВОЗДУШНОГО ЭЖЕКТОРА ТРАДИЦИОННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

Принцип работы водовоздушного эжектора показан на рисунке 1, рабочий (активный) поток с большой скоростью устремляется из соплового устройства 1 в приемную камеру 2 и увлекает за собой пассивный поток, который имеет более низкое давление. Затем активный и пассивный поток поступает в смесительную камеру 3, где происходит их интенсивное смешивание. До смесительной камеры 3 поток выглядит, как струя жидкости, окруженная газом и частично или полностью разбитая на капли. По мере продвижения вдоль камеры смешения (рабочей камеры) 3 струя жидкости частично или полностью дробится на капли, которые, обмениваются количеством движения с отсасываемым (эжектируемым) газом и распределяются по поперечному сечению рабочей камеры. После рабочей камеры поток представляет собой жидкое фазовое состояние, в котором равномерно распределены пузырьки газа.

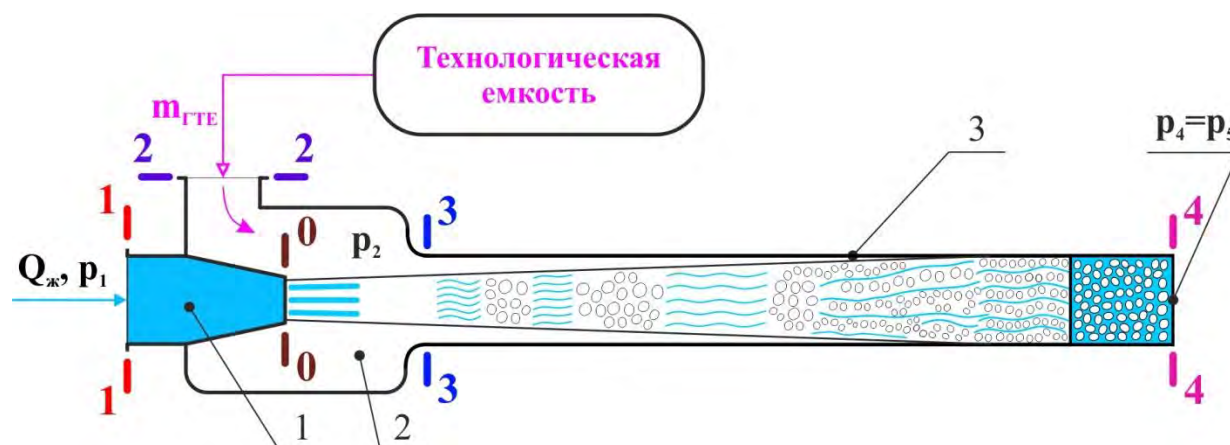


Рисунок 1 – ЖГЭ традиционного исполнения: 1 – устройство сопловое; 2 – камера приемная; 3 – камера (рабочая) смесительная

Следует также отметить, что эпюра скорости при входе газового потока в рабочую камеру ЖГЭ традиционного исполнения является неравномерной, при этом на границе жидкой струи скорость является максимальной, а вблизи стенки рабочей камеры – минимальной (см. рис. 2).

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной выпускной квалификационной работе ставится задача проектирования традиционного (без побудительного устройства) водовоздушного эжектора и эжектора с побудительным устройством. За счет установки побудительного устройства пассивный поток с большей скоростью поступает в рабочую камеру, что в свою очередь дает дополнительную передачу энергии пассивному потоку, а также повышения коэффициента скольжения фаз ψ . Как следствие, снижение потерь на перемешивание двух сред. Предполагается, что с установкой побудительного устройства для нагнетания пассивного потока и увеличения коэффициента скольжения ψ выше предельных величин, коэффициент полезного действия водовоздушного эжектора увеличится.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	150302.2018.288.ПЗ				

3 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВОДОВОЗДУШНЫХ ЭЖЕКТОРОВ

В таблице 1 представлены рабочие физические параметры промышленных водовоздушных эжекторов. Физические параметры промышленных водовоздушных эжекторов лежат в пределах: давление рабочей воды $p_p = 0,3-0,736$ МПа , давление всасывания $p_n = 0,23-20$ кПа , массовый расход воды $m_p = 2-1700$ т/ч , расчетный массовый расход воздуха $m_b = 2-375$ кг/ч .

Таблица 1 – Рабочие физические параметры промышленных водовоздушных эжекторов

Тип эжектора	Расчетный расход воздуха m_b , кг/ч	Расход рабочей воды m_p , т/ч	Давление рабочей воды p_p , МПа	Давление всасывания p_n , кПа	Температура отсасываемой смеси, °С	Расчетная температура рабочей воды, °С
ЭВ-1-230	25	230	0,38	5,3	20	–
ЭВ-7-1000	100	1000	0,38	5,3	20	10
ЭВ-13-450	30	450	0,48	5,3	29	12
ЭВ-13-900	80	900	0,48	5,3	20	–
ЭВ-7-500	50	500	0,48	5,3	20	12
ЭВ-7-200	20	200	0,48	5,3	20	–
ЭВ-4-1400 ПОТ ЛМЗ	48	1400	0,343	0,23	–	10
ЭВ-4-830 ПО- АТ ХТЗ	121	830	0,736	–	–	–
ЭВ-7-1000 ВТИ	90	1000	0,47	–	–	–
ЭВК-1300 ВТИ	285	1300	0,474	–	–	–
ЭВ-7-1700 ВТИ	375	1700	0,34	–	–	12
ЭВ-320	230	320	0,35	6,3	–	–
ЭВ-220	220	220	0,3	6,3	–	–
ЭВ-150	150	150	0,3	6,3	–	–
ЭВ-100	100	100	0,3	6,3	–	–

Продолжение таблицы 1

ЭВ-35	35	85	–	20	–	–
ЭВ-50	50	50	0,3	6,3	–	–
ЭВ-1	1	2	–	20	–	–
ЭВ-3	3	6	–	20	–	–
ЭВ-6	6	15	–	20	–	–
ЭВ-12	12	30	–	20	–	–
ЭВ-20	20	48	–	20	–	–

В таблице 2 представлены геометрические параметры промышленных водовоздушных эжекторов.

Таблица 2 – Геометрические параметры промышленных водовоздушных эжекторов

Тип эжектора	Количество камер, шт	Количество сопел, шт	Диаметр рабочего сопла d_0 , мм	Диаметр камеры смешения d_3 , мм	Длина камеры смешения L_{34} , мм	Расстояние от сопла до камеры смешения L_{03} , мм	$\frac{L_{34}}{d_3}$
ЭВ-1-230	1	1	55	120	2500	120	20,8
ЭВ-7-1000	7	7	45	80	2500	400	31,25
ЭВ-13-450	13	13	–	–	–	–	
ЭВ-13-900	13	13	–	–	–	–	
ЭВ-7-500	7	7	–	–	–	–	
ЭВ-7-200	7	7	–	–	–	–	
ЭВ-4-1400 ПОТ ЛМЗ	4	4	75	115	1250	312	10,9
ЭВ-4-830 ПОАТ ХТЗ	4	4	45	82	1165	165	14,2
ЭВ-7-1000 ВТИ	7	7	45	100	3500	–	35
ЭВК-1300 ВТИ	1	18	32	Кольцевая 333	–	–	
ЭВ-7-1700 ВТИ	7	7	56	125	3500	–	28

Геометрические параметры эжекторов ЭВ-320, ЭВ-220, ЭВ-150, ЭВ-100, ЭВ-50, ЭВ-1, ЭВ-3, ЭВ-6, ЭВ-12, ЭВ-20, ЭВ-35 найдены не были.

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>12</i>

4 ВЫБОР ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОТОТИПА ВОДОВОЗДУШНОГО ЭЖЕКТОРА

Анализируя обзор промышленного применения водовоздушных эжекторов не трудно заметить, что они нашли достаточно широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности в энергетике – в энергетических установках различного назначения. Например, для блочных турбоустановок большой мощности Ленинградский металлический завод (ЛМЗ) в качестве основного воздухоотсасывающего устройства применял водовоздушный эжектор (ВВЭ) типа ЭВ-4-1400. Одним из важнейших преимуществ при использовании водоструйных эжекторов для конденсаторов современных блочных турбоустановок является возможность пуска блока в работу без подвода пара от постороннего источника. На турбоустановку К-300-240 ЛМЗ устанавливались два водоструйных эжектора ЭВ-4-1400 и два подъемных насоса 32-Д-19. Тем не менее, в последние годы водовоздушные эжекторы ЭВ-4-1400 на блоках 300 МВт заменены разработанными Всероссийским Теплотехническим Институтом (ВТИ) более экономичными, совершенными семиканальными эжекторами ЭВ-7-1000 [2]. Технические характеристики наиболее распространенных водовоздушных эжекторов применяемых в энергетике в настоящее время лежат в пределах: давление питания $p_1 = 0,35-0,8$ МПа, давление всасывания $p_2 = 0,23-20$ кПа, массовый расход рабочей жидкости $m_{ж} = 2-1700$ т/ч, массовый расход эжектируемого газа $m_r = 1-375$ кг/ч.

За прототип водовоздушного эжектора был выбран ЭВ-1-230, как наиболее удачный в плане совершенства конструкции, работоспособности и надежности. Номинальные рабочие параметры данного эжектора: давление питания $p_1 = 0,38$ МПа, давление всасывания $p_2 = 5,3$ кПа, массовый расход рабочей жидкости $m_{ж} = 230$ т/ч, массовый расход эжектируемого газа $m_r = 25$ кг/ч, температура отсасываемого газа $T_r = 293$ К, количество рабочих камер и сопел $N = 1$ шт., диаметр рабочего сопла $d_0 = 55$ мм, диаметр каждой камеры смешения $d_3 = 120$ мм, диаметр камеры смешения $L_{34} = 2500$ мм, расстояние от сопла до камеры смешения $L_{03} = 120$ мм [5].

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>13</i>

Используем простую конструкцию для разработки водовоздушного эжектора, исходные данные примем в соответствии с техническим заданием.

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>14</i>

5 РАЗРАБОТКА ВОДОВОЗДУШНОГО ЭЖЕКТОРА ТРАДИЦИОННОГО ВАРИАНТА ИСПОЛНЕНИЯ

Исходя, из ранее принятых рабочих параметров разрабатываемого водовоздушного эжектора осуществим его расчет.

Найдем соотношение давлений на сопловом устройстве по формуле [7]:

$$\varepsilon_{12} = \frac{p_1}{p_2}, \quad (1)$$

где $p_1 = 400$ кПа – давление питания (давление перед соплом).

Подставляя вышеперечисленные значения в формулу (1) получаем:

$$\varepsilon_{12} = \frac{0,4 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^3} = 80.$$

Далее найдем степень сжатия по формуле [7]:

$$\varepsilon_{52} = \frac{p_5}{p_2}, \quad (2)$$

где $p_4 = p_5 = p_{\text{атм}} = 101$ кПа – противодействие.

Подставляя вышеперечисленные значения в формулу (2) получаем:

$$\varepsilon_{52} = \frac{101 \cdot 10^3}{5 \cdot 10^3} = 20,2.$$

После найдем параметр струи по формуле [7]:

$$\Gamma = 2 \cdot \varphi^2 \cdot (\varepsilon_{12} - 1), \quad (3)$$

где $\varphi = 0,97$ – коэффициент скорости соплового устройства [7].

Подставляя вышеперечисленные значения в формулу (3) получаем:

$$\Gamma = 2 \cdot 0,97^2 \cdot (80 - 1) = 148,66.$$

Далее найдем скорость истечения жидкости на срезе выходного сечения солового устройства [7]:

									Лист
									15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$$v_{ж0} = \sqrt{\frac{p_2 \cdot \Gamma}{\rho_{ж}}}, \quad (4)$$

Подставляя значения в формулу (4) получаем:

$$v_{ж0} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^3 \cdot 148,66}{1000}} = 27,27 \text{ м/с.}$$

Изменение скорости жидкости на срезе соплового устройства в зависимости от давления p_2 , незначительно. В процентном соотношении эта разница составляет 0,22%

Найдем площадь выходного сечения отверстия сопла по формуле [7]:

$$S_0 = \frac{Q_{ж}}{v_{ж0}}, \quad (5)$$

Подставляя значения в формулу (5) получаем:

$$S_0 = \frac{0,3056}{27,27} = 0,01 \text{ м}^2.$$

Так как сопло является коническим и сужающимся, то площадь струи равна площади отверстия сопла:

$$S_0 = S_c = 0,01 \text{ м}^2. \quad (6)$$

Далее найдем скорость жидкости на входе в рабочую камеру [7]:

$$v_{ж3} = \frac{Q_{ж}}{S_c}, \quad (7)$$

Подставляя значения в формулу (7) получаем:

$$v_{ж3} = \frac{0,3056}{0,01} = 30,56 \text{ м/с.}$$

Далее найдем скорость воздушного потока на входе в рабочую камеру [7]:

$$v_{г3} = \psi \cdot v_{ж3}, \quad (8)$$

где $\psi = 0,9$ – коэффициент скольжения [7].

										Лист
										16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Подставляя значения в формулу (8) получаем:

$$v_{r3} = 0,9 \cdot 30,56 = 27,5 \text{ м/с.}$$

Примем коэффициент гидравлического трения $\lambda = 0,015$ [7].

С помощью экстремальных характеристик представленных на Рисунке 3, которые указывают предельные режимы работы [7]. Определяем объемный коэффициент эжекции $\alpha = 3$ и относительную площадь сопла $\Omega_{03} = 0,21$.

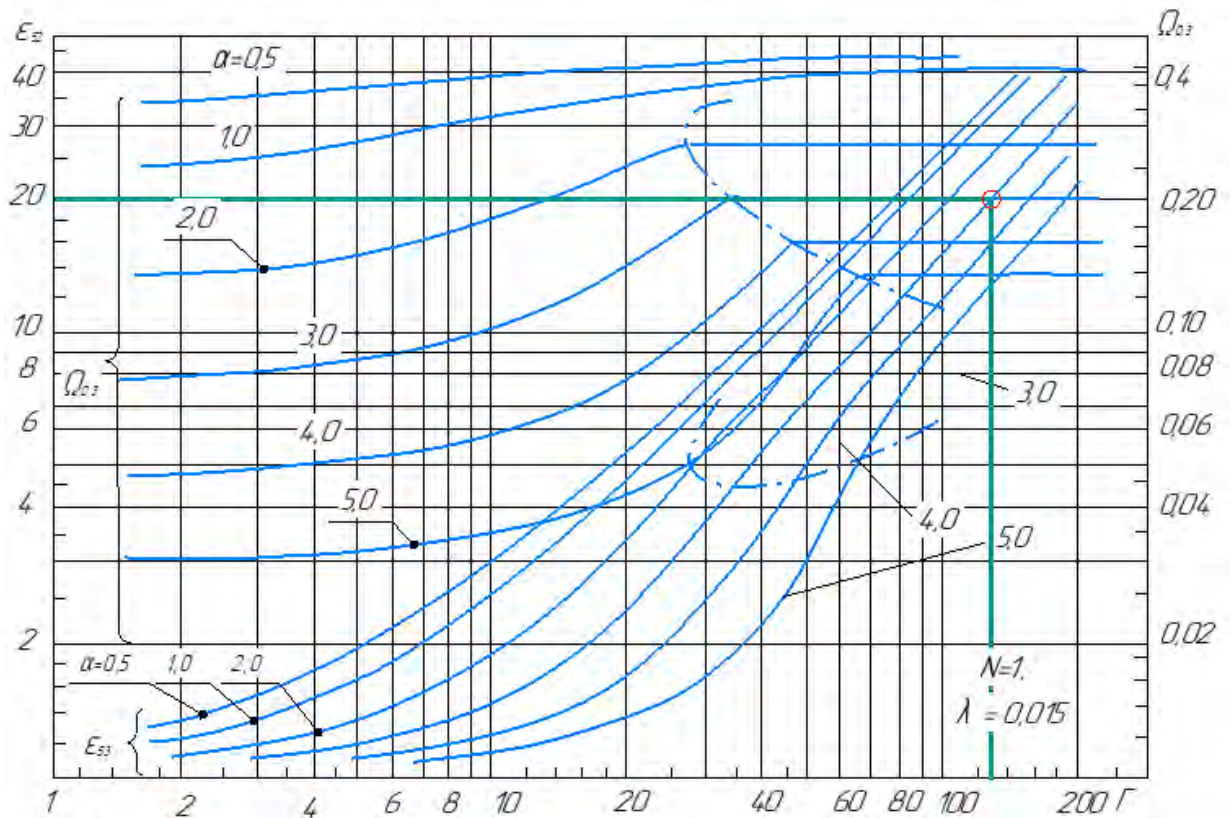


Рисунок 3 – Экстремальные характеристики одноструйного водовоздушного эжектора без диффузора [7].

Далее найдем площадь поперечного сечения рабочей камеры по формуле [7]:

$$S_3 = \frac{S_3}{\Omega_{03}}, \quad (9)$$

Подставляя значения в формулу (9) получаем:

$$S_3 = \frac{0,01}{0,21} = 0,05 \text{ м}^2.$$

Далее найдем диаметр отверстия сопла по формуле [7]:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_0}{\pi}}, \quad (10)$$

Подставляя значения в формулу (10) получаем:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,01}{3,14}} = 0,1 \text{ м} = 100 \text{ мм}.$$

Так как сопло является коническим, то диаметр сопла равен диаметру струи:

$$d_0 = d_c = 0,1 \text{ м}. \quad (11)$$

Далее найдем диаметр рабочей камеры по формуле [7]:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_3}{\pi}}, \quad (12)$$

Подставляя значения в формулу (12) получаем:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,05}{3,14}} = 0,25 \text{ м} = 250 \text{ мм}.$$

Далее найдем объемный расход эжектируемого газа по формуле [7]:

$$Q_{\Gamma} = \alpha_{\max} \cdot Q_{\text{ж}}, \quad (13)$$

Подставляя значения в формулу (13) получаем:

$$Q_{\Gamma} = 3 \cdot 0,3056 = 0,9168 \text{ м}^3/\text{с} = 3300,48 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Плотность эжектируемого воздуха в камере смешения определяется по формуле [7]:

$$\rho_{\Gamma 2} = \frac{p_2}{R \cdot T}, \quad (14)$$

где $p_2 = 5 \text{ кПа}$ – давление всасывания (в приемной камере);

$R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ – универсальная газовая постоянная для воздуха;

$T = 293 \text{ К}$ – температура эжектируемого (отсасываемого) газа.

Подставляя вышеперечисленные значения в формулу (14) получаем:

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\rho_{22} = \frac{5 \cdot 10^3}{287 \cdot 293} = 0,06 \text{ кг/м}^3 .$$

После найдем массовый расход эжектируемого газа по формуле [7]:

$$m_r = \rho_{r2} \cdot Q_r \cdot 3600 , \quad (15)$$

Подставляя значения в формулу (15) получаем:

$$m_2 = 0,06 \cdot 0,9186 \cdot 3600 = 198 \text{ кг/ч.}$$

Далее найдем длину рабочей камеры по первой формуле формулам [7]:

$$L_{34} = 28 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \frac{P_2}{P_5} \right) \cdot d_3 , \quad (16)$$

Подставляя значения в формулу (16) получаем:

$$L_{34} = 28 \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \frac{5 \cdot 10^3}{101 \cdot 10^3} \right) \cdot 0,25 = 6,8 \text{ м.}$$

Далее найдем длину рабочей камеры по второй формуле формулам [7]:

$$L_{34} = d_3 \cdot \frac{c \cdot \alpha}{\Omega_{03}} , \quad (17)$$

где $c = 11 \dots 12$ – коэффициент пропорциональности [7].

Подставляя значения в формулу (17) получаем:

$$L_{34} = 0,25 \cdot \frac{11 \cdot 3}{0,21} = 39,3 \text{ м.}$$

Так как соотношение длины рабочей камеры L_{34} к диаметру рабочей камеры d_3 находится в диапазоне от $10 \dots 35$ [7], то наиболее предпочтительным приемом результат в формуле (17), т.е. $L_{34} = 6,8 \text{ м.}$

Расчет соплового устройства:

Определим необходимые размеры соплового устройства. Так как диаметр отверстия соплового устройства известен найдем длину сопла по формуле [7]:

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\frac{l_0}{d_0} = 3,0 \dots 4,0, \quad (18)$$

Подставляя значения в формулу (18) получаем:

$$l_0 = 0,1 \cdot 3,5 = 0,35 \text{ м.}$$

Также найдем расстояние среза сопла от рабочей камеры по формуле [7]:

$$l_c \leq 2d_0, \quad (19)$$

Подставляя значения в формулу (19) получаем:

$$l_c = 2 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ м.}$$

Угол сужения сопла примем $\theta^0 = 16^0$.

Далее найдем полное давление потока жидкости перед сопловым устройством в подводящем патрубке [7]:

$$\bar{p}_1 = p_1 + \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot V_1^2}{2}. \quad (20)$$

Подставляя значения в формулу (20) получаем:

$$\bar{p}_1 = 0,4 \cdot 10^6 + \frac{1000 \cdot 27,27^2}{2} = 7,72 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Найдем плотность газа в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$\rho_{\text{г5}} = \frac{P_5}{R \cdot T}. \quad (21)$$

Подставляя значения в формулу (21) получаем:

$$\rho_{\text{г5}} = \frac{101 \cdot 10^3}{287 \cdot 293} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Далее найдем объемный расход газа в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$Q_{\text{г5}} = \frac{m_{\text{г}}}{\rho_{\text{г5}}}. \quad (22)$$

Подставляя значения в формулу (22) получаем:

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_{г5} = \frac{198}{1,2} = 0,046 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее найдем плотность смеси в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$\rho_{\text{смеси}} = \frac{\rho_{г5} \cdot Q_{г5} + \rho_{ж} \cdot Q_{ж}}{Q_{г5} + Q_{ж}}. \quad (23)$$

Подставляя значения в формулу (23) получаем:

$$\rho_{\text{смеси}} = \frac{1,2 \cdot 0,046 + 1000 \cdot 0,3056}{0,046 + 0,3056} = 869,33 \text{ кг/м}^3.$$

Далее найдем объемный расход смеси по формуле [7]:

$$Q_{\text{смеси}} = Q_{г5} + Q_{ж}. \quad (24)$$

Подставим значения в формулу (24):

$$Q_{\text{смеси}} = 0,046 + 0,3056 = 0,3516 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее определим скорость смеси в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$v_{\text{смеси}} = \frac{Q_{\text{смеси}}}{S_3}. \quad (25)$$

Подставляя значения в формулу (25) получаем:

$$v_{\text{смеси}} = \frac{0,3516}{0,05} = 6,112 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее найдем полное давление смеси в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$\bar{p}_5 = p_5 + \frac{\rho_{\text{смеси}} \cdot v_{\text{смеси}}^2}{2}. \quad (26)$$

Подставим значения в формулу (26):

$$\bar{p}_5 = 101 \cdot 10^3 + \frac{869,33 \cdot 6,112^2}{2} = 117,24 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Далее найдем коэффициент полезного действия водовоздушного эжектора традиционного исполнения по формуле [7]:

$$\eta_{\text{класс}} = \frac{m_{г} \cdot R \cdot T_{ж} \cdot \ln\left(\frac{p_5}{p_2}\right) + k_{\text{ост}} \cdot (\bar{p}_5 - p_2)}{Q_{ж} \cdot (p_1 - p_2)}, \quad (27)$$

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где $k_{\text{ост}} = 1$ – коэффициент полезного использования остаточной энергии активного потока;

Подставляя значения в формулу (27) получаем:

$$\eta = \frac{0,055 \cdot 287 \cdot 283 \cdot \ln\left(\frac{101}{5}\right) + 1 \cdot 0,3056 \cdot (117,24 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3)}{0,3056 \cdot (7,72 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^3)} \cdot 100\% = 20,32\%$$

В таблице 3 приведены параметры водовоздушного эжектора без побудителя пассивного потока.

Таблица 3 – Параметры водовоздушного эжектора без побудителя пассивного потока

p_2 , кПа	ρ_r , кг/м ³	m_r , кг/с	КПД	Q_r , м ³ /с	ψ
3,25	0,039	0,036	19,05	0,919	0,9
3,351	0,040	0,037	19,13		
3,466	0,041	0,038	19,22		
3,588	0,043	0,039	19,32		
3,719	0,044	0,041	19,42		
3,861	0,046	0,042	19,53		
4,014	0,048	0,044	19,64		
4,179	0,050	0,046	19,76		
4,359	0,052	0,048	19,89		
4,554	0,054	0,050	20,02		
5,00	0,059	0,055	20,32		
10,00	0,119	0,109	22,89		
20,00	0,238	0,219	25,44		
30,00	0,357	0,328	26,01		
40,00	0,476	0,437	25,25		
45,00	0,535	0,492	24,47		
55,00	0,654	0,601	22,22		
60,00	0,714	0,656	20,79		

равномерно, в отличие от эпюры скорости воздушного потока в водовоздушном эжекторе традиционного исполнения (см. рис. 2), что увеличивает эффективность перемешивания сред.

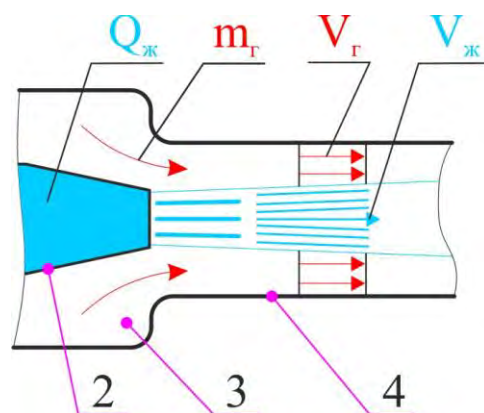


Рисунок 5 – Эпюра скорости воздушного потока при входе в рабочую камеру водовоздушный эжектор с побудителем пассивного потока

2) Дополнительная высокоскоростная струя. Принципиальная схема водовоздушного эжектора с дополнительной высокоскоростной струей изображена на рисунке 6.

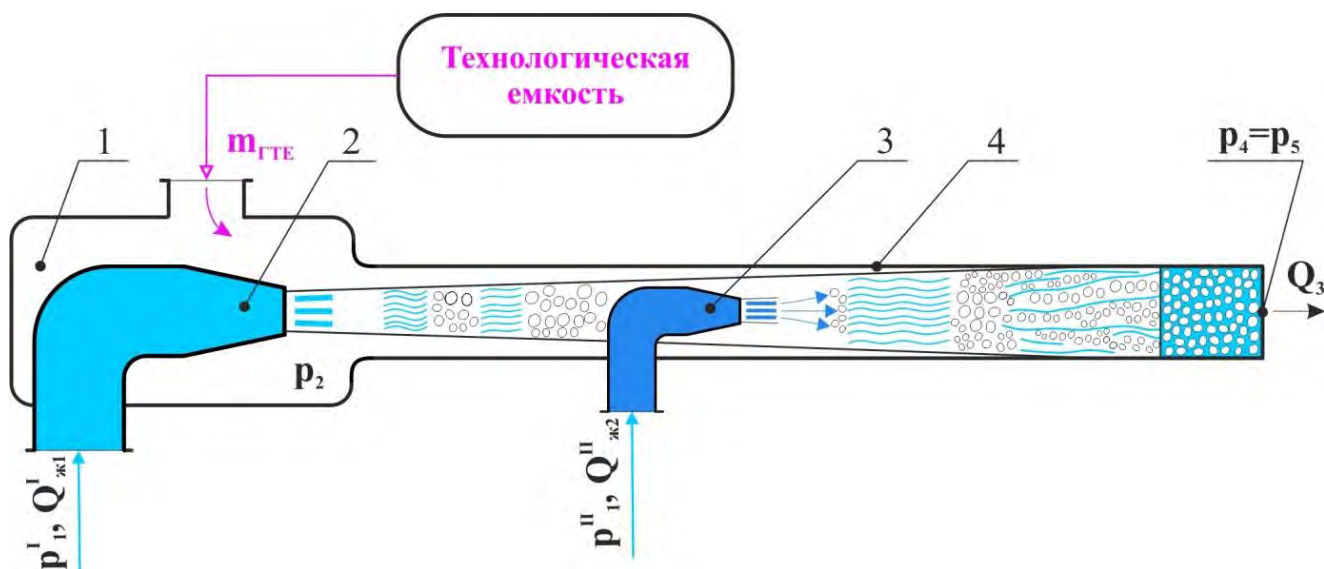


Рисунок 6 – Принципиальная схема водовоздушного эжектора с дополнительной высокоскоростной струей: 1 – камера приемная, 2 – сопловое устройство дополнительное, 3 – сопловое устройство основное, 4 – камера рабочая (смесительная)

В данном случае высокоскоростная струя, истекающая из дополнительного сопла 2 с объемный расходом $Q_{ж1}^1$ и давлением p_1^1 , устремляется в камеру сме-

шения 4 и одновременно увлекает пассивную среду – газ с массовым расходом $m_{гте}$ из технологической емкости. Частично перемешанный двухфазный поток, пройдя некоторое расстояние в рабочей камере водовоздушного эжектора, доходит до основного соплового устройства 3, из которого истекает основная высокоскоростная струя жидкости. В этом случае основная струя увлекает образовавшуюся жидкостно-газовую смесь. После камеры смешения 4 газожидкостная смесь поступает в сливной трубопровод

3) Вращающееся лопастное колесо, подобное лопастному колесу осевого вентилятора. В данном случае возможны два варианта исполнения:

3.1. Вращающееся лопастное колесо и сопловое устройство от электропривода (электродвигателя). Принципиальная схема данного водовоздушного эжектора изображена на рисунке 7.

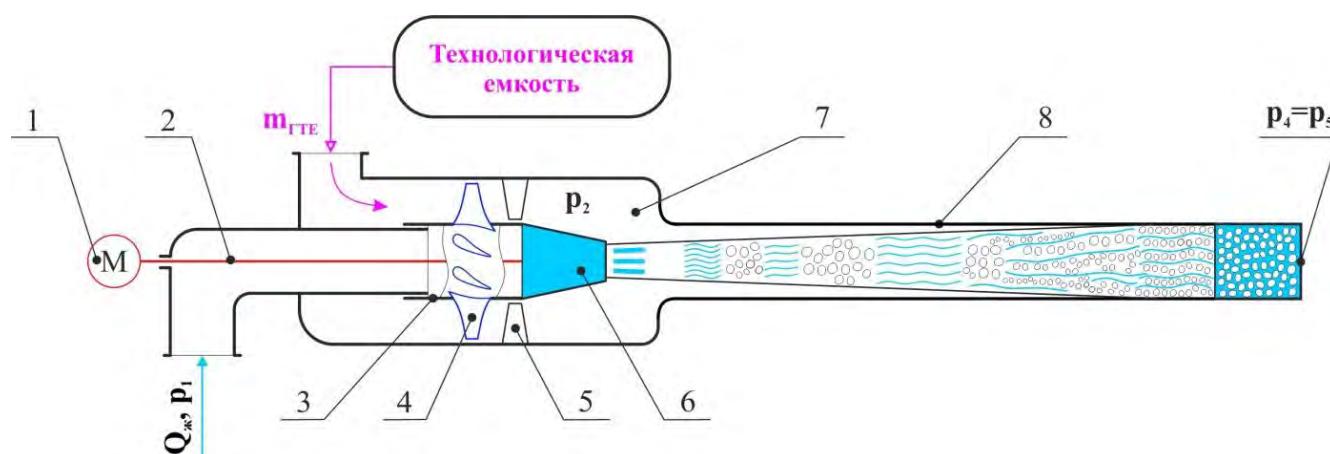


Рисунок 7 – Принципиальная схема водовоздушного эжектора с вращающимся лопастным колесом и сопловым устройством от электропривода (электродвигателя): 1 – электропривод (электродвигатель), 2 – вал электродвигателя, 3 – ребра центрирующие, 4 – колесо лопастное, 5 – аппарат направляющий, 6 – устройство сопловое, 7 – камера приемная, 8 – камера рабочая (смесительная)

В данном варианте вращение лопастного колеса и соплового устройства осуществляется посредством электропривода (электродвигателя). Лопастное колесо напрямую связано с валом электродвигателя. Направляющий аппарат предназна-

чен для устранения закрутки пассивного потока (воздушного потока), поступающего в приемную камеру водовоздушного эжектора.

3.2. Вращающееся лопастное колесо и сопловое устройство от набегающего активного потока рабочей жидкости. Принципиальная схема данного водовоздушного эжектора представлена на рисунке 8.

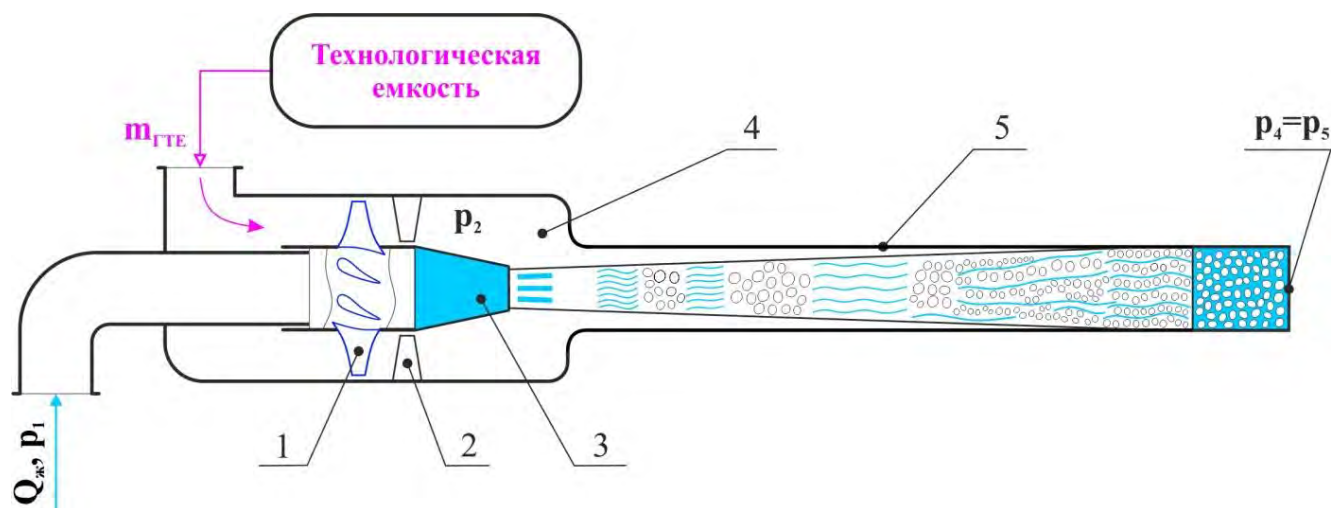


Рисунок 8 – Принципиальная схема водовоздушного эжектора с вращающимся лопастным колесом и сопловым устройством от набегающего активного потока рабочей жидкости: 1 – колесо лопастное, 2 – аппарат направляющий, 3 – устройство сопловое, 4 – камера приемная, 5 – камера рабочая (смесительная)

В данном случае вращение лопастного колесо и соплового устройства осуществляется посредством активного потока рабочей жидкости. Данный вариант водовоздушного эжектора с вращающимся лопастным колесом и сопловым устройством от набегающего активного потока рабочей жидкости является наиболее предпочтительным, ввиду того, что отсутствует дополнительный агрегат – электропривод (электродвигатель). В данном исполнении водовоздушный эжектор, поступающий в неподвижную часть соплового устройства активный поток рабочей жидкости самостоятельно вращает лопастное колесо вместе с подвижной частью соплового устройства.

7 РАЗРАБОТКА ВОДОВОЗДУШНОГО ЭЖЕКТОРА С ПОБУДИТЕЛЕМ ПАССИВНОГО ПОТОКА

Из всего многообразия побудителей пассивного потока водовоздушного эжектора, представленного в предыдущей главе, для расчета был выбран водовоздушный эжектор с побудителем пассивного потока в виде вращающегося лопастного колеса подобного осевому и соплового устройства от электродвигателя (электропривода). Сделаем некоторые замечания перед расчетом водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока: исходные данные возьмем такие же, как у водовоздушного эжектора традиционного исполнения. Коэффициент скольжения фаз ψ для расчета будет варьироваться от 0,9 до 1,175.

На рисунке 9 показан фрагмент водовоздушного эжектора к уравнению Бернулли.

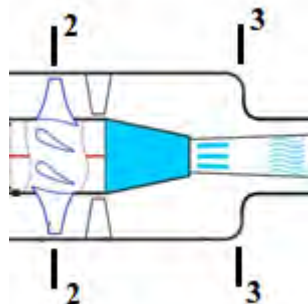


Рисунок 9 – Фрагмент водовоздушного эжектора к уравнению Бернулли.

Далее приведем формулы необходимые для расчета водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока. Запишем уравнение Бернулли, в дальнейшем из него будет выражаться скорость газа v_2 в сечении 2-2, где установлено осевое рабочее колесо, давление газа p_2 в сечении 2-2, массовый расход газа m_g , давление газа на входе в рабочую камеру p_3 и скорость газа v_3 на входе в рабочую камеру, скорость жидкости $v_{ж3}$, массовый расход жидкости $m_{ж}$ и давление жидкости p_1 остаются неизменными:

$$\frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + C_w \cdot T_2 + Ve_m = \frac{p_3}{\rho_3} + \frac{v_3^2}{2} + C_w \cdot T_3 + Ve_m \quad (28)$$

где $Ve_m = 0$, так как сечение идет плавное сужение от сечения 2-2 к сечению 3-3.

Произведем следующие преобразования в формуле (28):

$$p_2 = \rho_2 \cdot R \cdot T_2 \quad (29)$$

Далее выразим $R \cdot T_2$ в формуле (29):

$$R \cdot T_2 = \frac{p_2}{\rho_2} \quad (30)$$

Далее запишем формулу для определения газовой постоянной R :

$$R_2 = C_p - C_w \quad (31)$$

Запишем формулу для определения постоянной адиабаты k :

$$k = \frac{C_p}{C_w} \quad (32)$$

Далее преобразуем формулы (31) и (32) и решим относительно теплоемкости C_w :

$$C_w = \frac{R}{k-1} \quad (33)$$

Подставляя формулу (33) в левую часть уравнения (28) и производя такие же преобразования с правой частью уравнения (28), получим:

$$\frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + \frac{R}{k-1} \cdot T_2 = \frac{p_3}{\rho_3} + \frac{v_3^2}{2} + \frac{R}{k-1} \cdot T_3 \quad (34)$$

Далее преобразуем уравнение (34):

$$\frac{p_2}{\rho_2} \cdot \frac{k}{k-1} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_3}{\rho_3} \cdot \frac{k}{k-1} + \frac{v_3^2}{2} \quad (35)$$

Таким образом уравнение (35) будет являться первым уравнением системы для нахождения неизвестных водовоздушного эжектора.

Далее запишем уравнение закона адиабатического процесса, которое будет являться вторым уравнением системы:

$$\frac{P_2}{\rho_2^k} = \frac{P_3}{\rho_3^k} \quad (36)$$

Далее запишем формулы нахождения массового расхода газа в сечении 2-2 и при входе в рабочую камеру, которые будут являться третьим и четвертым уравнением системы:

$$m_2 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (37)$$

$$m_2 = \rho_3 \cdot v_3 \cdot A_3 \quad (38)$$

Так же понадобится формула степени повышения давления, которая получена из исходных уравнений отражающих закон сохранения энергии, закон сохранения масс, закон количества движения при описании течения сред в рабочей камере [10]:

$$\varepsilon_{42} = 0,5 \cdot [\varepsilon_{42x} + \sqrt{(\varepsilon_{42x}^2 - 4 \cdot k \cdot \Gamma \cdot \Omega_{03} \cdot (1 - \Omega_{03}) \cdot \Psi)}], \quad (39)$$

где k и ε_{42x} находятся по формулам [10]:

$$k = 1 + 0,5 \cdot \zeta_{34}, \quad (40)$$

$$\varepsilon_{42x} = 1 + \Omega_{03} \cdot \Gamma \cdot (1 - k \cdot \Omega_{03}), \quad (41)$$

где ζ_{34} находится по формуле [10]:

$$\zeta_{34} = \frac{\lambda \cdot L_{34}}{d_3} \quad (42)$$

Далее все выше перечисленные формулы записываются в программу MathCAD (см. приложение), где рассчитаны все необходимые параметры для проектирования водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока. При расчетах бралась постоянная мощность активного потока при коэффициенте скольжения фаз $\psi = 0,9 \dots 1,175$.

В таблице 4 приведены параметры водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока.

Таблица 4 – Параметры газового потока в водовоздушном эжекторе с побудителем пассивного потока

Ψ	p_2 , кПа	m_r , кг/с	v_{2r} , м/с	p_3 , кПа
1,175	3,25	0,069	3,37	3,22
1,15	3,351	0,070	3,3	3,327
1,125	3,466	0,071	3,23	3,442
1,1	3,588	0,071	3,16	3,564
1,075	3,719	0,072	3,09	3,695
1,05	3,861	0,073	3,01	3,838
1,025	4,014	0,074	2,94	3,991
1	4,179	0,076	2,87	4,156
0,975	4,359	0,077	2,8	4,336
0,95	4,554	0,078	2,73	4,531
0,9	5,00	0,082	2,59	4,983

Найдя все необходимые параметры через программу MathCAD, можем сопоставить значения параметров водовоздушного эжектора традиционного исполнения с водовоздушным эжектором с побудителем пассивного потока и построить график зависимости $p_2=f(m_r)$.

В таблице 5 приведены параметры водовоздушного эжектора без побудителя и с побудителем пассивного потока.

Таблица 5 – Параметры водовоздушного эжектора без побудителя и с побудителем пассивного потока

Без побудительного устройства			С побудительным устройством	
p_2 , кПа	m_r , кг/с	Ψ	m_r , кг/с	Ψ
3,25	0,036	0,9	0,069	1,175
3,351	0,037		0,070	1,15
3,466	0,038		0,071	1,125
3,588	0,039		0,071	1,1

Продолжение таблицы 5

Без побудительного устройства			С побудительным устройством	
p_2 , кПа	m_r , кг/с	ψ	m_r , кг/с	ψ
3,719	0,041	0,9	0,072	1,075
3,861	0,042		0,073	1,05
4,014	0,044		0,074	1,025
4,179	0,046		0,076	1
4,359	0,048		0,077	0,975
4,554	0,050		0,078	0,95
5,00	0,055		0,082	0,9

На рисунке 10 представлен график зависимости $p_2=f(m_r)$.

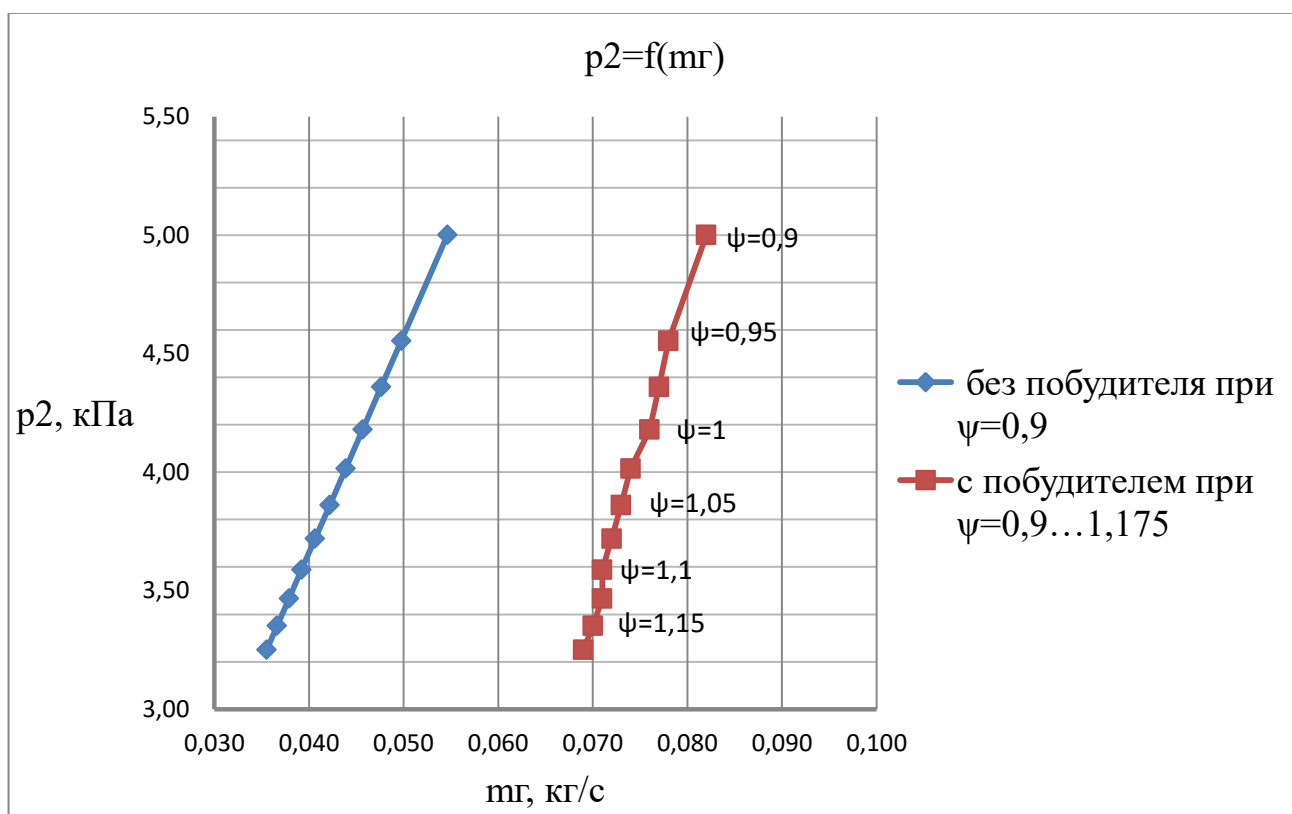


Рисунок 10– График зависимости давления всасывания p_2 от массового расхода газа m_r –

$$p_2=f(m_r)$$

На графике $p_2=f(m_r)$ видно, что водовоздушный эжектор с побудительным устройством перекачивает больше газа, чем водовоздушный эжектор традиционного исполнения. Например: при давлении $p_2=5$ кПа и коэффициенте скольжения

$\psi = 0,9$, массовый расход водовоздушного эжектора традиционного исполнения $m_r = 0,055 \text{ кг/с}$, а у водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока $m_r = 0,082 \text{ кг/с}$, следовательно, массовый расход повысился на $0,027 \text{ кг/с}$. Также увеличение массового расхода наблюдается и при других значениях. Таким образом при установке побудительного устройства увеличивается массовый расход перекачиваемого газа, а значит увеличивается и производительность водовоздушного эжектора.

Также зная все необходимые параметры, можем найти КПД водовоздушного эжектора с побудительным устройством пассивного потока и сопоставить со значениями КПД водовоздушного эжектора без побудительного потока. Затем построить график зависимости $\eta = f(m_r)$.

Приведем формулы для расчета КПД водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока.

Далее найдем полное давление потока жидкости перед сопловым устройством в подводящем патрубке [7]:

$$\bar{p}_1 = p_1 + \frac{\rho_{ж} \cdot V_1^2}{2}. \quad (43)$$

Подставляя значения в формулу (43) получаем:

$$\bar{p}_1 = 0,4 \cdot 10^6 + \frac{1000 \cdot 27,27^2}{2} = 7,72 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Найдем плотность газа в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$\rho_{r5} = \frac{p_5}{R \cdot T}. \quad (44)$$

Подставляя значения в формулу (44) получаем:

$$\rho_{r5} = \frac{101 \cdot 10^3}{287 \cdot 293} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Далее найдем объемный расход газа в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$Q_{r5} = \frac{m_r}{\rho_{r5}}. \quad (45)$$

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Подставляя значения в формулу (45) получаем:

$$Q_{г5} = \frac{280,8}{1,2} = 0,065 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее найдем плотность смеси в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$\rho_{\text{смеси}} = \frac{\rho_{г5} \cdot Q_{г5} + \rho_{ж} \cdot Q_{ж}}{Q_{г5} + Q_{ж}}. \quad (46)$$

Подставляя значения в формулу (46) получаем:

$$\rho_{\text{смеси}} = \frac{1,2 \cdot 0,065 + 1000 \cdot 0,3056}{0,065 + 0,3056} = 824,82 \text{ кг/м}^3.$$

Далее найдем объемный расход смеси по формуле [7]:

$$Q_{\text{смеси}} = Q_{г5} + Q_{ж}. \quad (47)$$

Подставим значения в формулу (47):

$$Q_{\text{смеси}} = 0,065 + 0,3056 = 0,3706 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее определим скорость смеси в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$v_{\text{смеси}} = \frac{Q_{\text{смеси}}}{S_3}. \quad (48)$$

Подставляя значения в формулу (48) получаем:

$$v_{\text{смеси}} = \frac{0,3706}{0,05} = 7,412 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Далее найдем полное давление смеси в конце рабочей камеры по формуле [7]:

$$\bar{p}_s = p_s + \frac{\rho_{\text{смеси}} \cdot v_{\text{смеси}}^2}{2}. \quad (49)$$

Подставим значения в формулу (49):

$$\bar{p}_s = 101 \cdot 10^3 + \frac{824,82 \cdot 7,412^2}{2} = 123,657 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Далее найдем скорость воздушного потока при входе в рабочую камеру [7]:

$$V_{г3} = \Psi_{\text{ппп}} \cdot V_{ж3}. \quad (50)$$

Подставим значения в формулу (50):

									Лист
									33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$$V_{г3} = 0,95 \cdot 30,56 = 29,03 \text{ м/с.}$$

Полезная мощность в общем случае определяется по формуле [7]:

$$N_{пол} = p_{дг} \cdot Q_{г3} = \frac{\rho_{г} \cdot V_{г3}^2}{2} \cdot Q_{г3}, \quad (51)$$

где $p_{дг}$ – динамическое давление воздушного потока, Па;

$Q_{г3}=Q_{г}$ – объемный расход газа при входе в рабочую камеру, м³/с.

В свою очередь объемный расход газа определяется по формуле [7]:

$$Q_{г3} = \frac{m_{г}}{\rho_{г}}. \quad (52)$$

Подставляя формулу (52) в формулу (51) получаем полезную мощность в нашем случае:

$$N_{пол} = \frac{m_{г} \cdot V_{г3ппп}^2}{3600 \cdot 2}. \quad (53)$$

Подставляя значения в формулу (53) получаем:

$$N_{пол} = \frac{280,8}{3600} \cdot 29,03^2 = 32,87 \text{ Вт.}$$

КПД приводных электродвигателей лежит в пределах 0,60-0,95. КПД рабочих осевых колес в пределах 0,85-0,95 [7].

Принимаю КПД приводного электродвигателя $\eta_{эд} = 0,62$, а КПД рабочего осевого колеса $\eta_{колеса} = 0,9$.

Далее найдем потребляемую мощность, затрачиваемую на разгон пассивного потока по формуле [7]:

$$N_{потр} = \frac{N_{пол}}{\eta_{эд} \cdot \eta_{колеса}}. \quad (54)$$

Подставляя значения в формулу (54) получаем:

										Лист
										34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

$$N_{\text{потр}} = \frac{32,87}{0,62 \cdot 0,9} = 58,91 \text{ Вт.}$$

Далее найдем коэффициент полезного действия водовоздушного эжектора традиционного исполнения по формуле [7]:

$$\eta_{\text{ппп}} = \frac{\frac{m_r}{3600} \cdot R \cdot T_{\text{ж}} \cdot \ln\left(\frac{p_5}{p_2}\right) + k_{\text{ост}} \cdot (\bar{p}_5 - p_2)}{Q_{\text{жппп}} \cdot (\bar{p}_1 - p_2) + N_{\text{потр}}}, \quad (55)$$

где $k_{\text{ост}} = 1$ – коэффициент полезного использования остаточной энергии активного потока;

Подставляя значения в формулу (55) получаем:

$$\eta_{\text{ппп}} = \frac{0,078 \cdot 287 \cdot 283 \cdot \ln\left(\frac{101}{5}\right) + 1 \cdot 0,3056 \cdot (123,657 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^3)}{0,3056 \cdot (7,72 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^3) + 58,91} \cdot 100\% = 25,55\%$$

Ранее была найдена потребляемая мощность $N_{\text{потр}} = 58,91$ Вт, однако, максимальная потребляемая мощность для верхней границы численного диапазона по коэффициенту скольжения фаз $\psi = 1,175$ равна $N_{\text{потрmax}} = 79,45$ Вт (см. таблицу 8). Подберем приводной электродвигатель для вращения осевого рабочего колеса исходя из максимальной потребляемой мощности. В качестве приводного электродвигателя выбираю АИР80А8 IM1081.

В таблице 6 приведены технические характеристики электродвигателя АИР80А8 IM1081

Таблица 6 – Технические характеристики электродвигателя АИР80А0 IM1081 [9]

						150302.2018.288.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			35

В таблице 8 приведены параметры водовоздушного эжектора без побудительного устройства и с побудительным устройством пассивного потока.

Таблица 8 – параметры ВВЭ без побудительного и с побудительным устройством пассивного потока

Без побудительного устройства				С побудительным устройством					
P_2 , кПа	m_r , кг/с	ψ	η , %	m_r , кг/с	$N_{пол}$	$N_{потр}$	ψ	η , %	
3,25	0,036	0,9	19,05	0,069	44,33	79,45	1,175	25,45	
3,351	0,037		19,13	0,070	43,23	77,47	1,15	25,49	
3,466	0,038		19,22	0,071	41,96	75,20	1,125	25,52	
3,588	0,039		19,32	0,071	40,12	71,89	1,1	25,42	
3,719	0,041		19,42	0,072	38,85	69,63	1,075	25,44	
3,861	0,042		19,53	0,073	37,58	67,35	1,05	25,46	
4,014	0,044		19,64	0,074	38,66	69,28	1,025	25,46	
4,179	0,046		19,76	0,076	35,49	63,60	1	25,59	
4,359	0,048		19,89	0,077	34,18	61,26	0,975	25,57	
4,554	0,050		20,02	0,078	32,87	58,91	0,95	25,55	
5,00	0,055		20,32	0,082	31,02	55,58	0,9	25,71	
10,00	0,109		22,89						
20,00	0,219		25,44						
30,00	0,328		26,01						
40,00	0,437		25,25						
45,00	0,492		24,47						
55,00	0,601		22,22						
60,00	0,656	20,79							

На рисунке 12 представлен график зависимости $\eta=f(m_r)$.

Таблица 9 – параметры ВВЭ без побудительного и с побудительным устройством пассивного потока при $p_1 = 450 \text{кПа}$

m_r , кг/с	ψ	η
0,242	0,9	27,95
0,239	0,95	27,83
0,238	0,975	28,15
0,235	1	28,29
0,233	1,05	28,03
0,23	1,1	28,35
0,229	1,15	28,22

8 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОФИЛИРОВАНИЮ ОСЕВОГО РАБОЧЕГО КОЛЕСА

8.1 Расчет частот вращения осевого рабочего колеса

Запишем формулу нахождения осевой скорости рабочего колеса. Осевая скорость будет равняться скорости в сечении 2-2, которая найдена через программу MathCAD (см. приложение) [13]:

$$v_2 = v_{oc} = \varphi \cdot U_{cp}, \quad (56)$$

где $\varphi = 0,45 \dots 0,7$ – коэффициент расхода;

U_{cp} – средняя скорость лопасти.

Далее из формулы (56) выразим среднюю скорость лопасти:

$$U_{cp} = \frac{v_2}{\varphi}, \quad (57)$$

Подставляя значения в формулу (57) получаем:

$$U_{cp} = \frac{2,73}{0,5} = 5,46 \text{ м/с.}$$

Также средняя скорость лопасти находится по формуле [13]:

$$U_{cp} = \frac{\pi \cdot d_{cp} \cdot n}{60}, \quad (58)$$

где d_{cp} – средний диаметр осевого рабочего колеса;

n – частота вращения вала.

Средний диаметр осевого рабочего колеса находится по формуле [13]:

$$d_{cp} = \frac{d_{вт} + d_{\kappa}}{2}, \quad (59)$$

где d_{κ} – диаметр концов лопастей. Так как диаметр приемной камеры составляет $d_2 = 820 \text{ мм}$, примем ; диаметр концов лопастей $d_{\kappa} = 810 \text{ мм}$;

$d_{вт}$ – диаметр втулки;

Диаметр втулки находится по формуле [13]:

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

$$d_{em} = v \cdot d_{\kappa}, \quad (60)$$

где $v = 0,5 \dots 0,9$ – втулочный коэффициент;

Подставляя значения в формулу (62) получаем:

$$d_{em} = 0,5 \cdot 0,81 = 0,405 \text{ м.}$$

Подставляя значения в формулу (59) получаем:

$$d_{cp} = \frac{0,405 + 0,81}{2} = 0,608 \text{ м.}$$

Далее из формулы (58) выразим частоту вращения вала осевого рабочего колеса:

$$n = \frac{U_{cp} \cdot 60}{\pi \cdot d_{cp}}, \quad (61)$$

Подставляя значения в формулу (61) получаем:

$$n = \frac{6 \cdot 60}{3,14 \cdot 0,608} = 171,61 \text{ об/мин.}$$

В таблице 10 осевого рабочего колеса.

Таблица 10 – осевого рабочего колеса

ψ	v_{2r} , м/с	U_{cp} , м/с	n, об/мин
1,175	3,37	6,74	211,83
1,15	3,3	6,6	207,43
1,125	3,23	6,46	203,03
1,1	3,16	6,32	198,63
1,075	3,09	6,18	194,23
1,05	3,01	6,02	189,20
1,025	2,94	5,88	184,80
1	2,87	5,74	180,40
0,975	2,8	5,6	176,00
0,95	2,73	5,46	171,60
0,9	2,59	5,18	162,80

При использовании побудительного устройства, регулировка осуществляется путем вращения соплового устройства, на котором расположено осевое рабочее колесо, с частотой n . КПД практически не изменяется (см. рисунок 11), однако производительность меняется.

8.2 Количество лопаток

В современных вентиляторах, имеющих профили несущих поверхностей совершенных обтекаемых форм и высокую чистоту обработанных поверхностей, влияние количество лопаток на КПД менее заметно. Уменьшение количества лопаток связано с применением длинных и тяжелых ступиц, использование которых нежелательно для вентиляторов консольной конструкции [10].

Для одноступенчатых вентиляторов и воздуходувок можно выбрать с достаточной точностью число лопаток по следующей формуле [10]:

$$z = \frac{6 \cdot v}{1 - v}, \quad (62)$$

где v – втулочное отношение.

Втулочное отношение определяется по следующей формуле [10]:

$$v = \frac{D_h}{D_0}, \quad (63)$$

где D_h – диаметр ступицы рабочего колеса, мм;

D_0 – внешний диаметр рабочего колеса, мм.

Для различных значений втулочного отношения v имеет следующие значения z , представленные в таблице 12.

Таблица 12 – Рекомендации по выбору числа лопаток в зависимости от втулочного отношения [10]

Втулочное отношение v	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Количество лопаток z	3	4	6	9	14	24

Подставляя в уравнение (85) значение $v = \frac{D_h}{D_o}$, имеем [15]:

$$z = 6 \cdot \frac{D_h}{D_o - D_h} = 3 \cdot \frac{D_h}{b}. \quad (64)$$

Из полученного выражения следует, что число лопаток прямо пропорционально диаметру ступицы и обратно пропорционально высоте лопатки.

В моем случае диаметр ступицы равен $D_h = 405$ мм, а внешний диаметр рабочего колеса $D_o = 810$ мм. Данные размеры были найдены в процессе конструирования эжектора.

Определим втулочное отношение по формуле (63):

$$v = \frac{405}{810} = 0,5$$

Исходя из табл. 12 при $v=0,5$ количество лопаток рабочего колеса принимаю $z = 6$.

8.3 Толщина лопатки

Эккер провел испытания двух рабочих колес, из которых у одного были профилированные лопатки с полированной поверхностью, а у другого лопатки имели ту же кривизну средней линии, но были изготовлены из листовой стали и приварены к ступице. Характеристики этих колес совпали. Аналогичные результаты были получены многими исследователями [10].

Эккер опытным путем также установил, что колесо с литыми чугунными лопатками того же профиля, что и в предыдущем случае, имеет КПД на 5 % меньше. Это понижение, в основном, произошло вследствие шероховатости поверхности лопаток. Поэтому литые чугунные лопатки нужно обрабатывать и давать им припуски. Лопатки завышенной толщины в высокоскоростных и высоконапорных колесах работают с шумом [10].

При сравнении колес насосов с колесами воздуходувок нужно иметь в виду следующее [10]:

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		43

1) для получения одинаковой быстроходности в насосах требуется значительно большая поверхность лопаток, чем в вентиляторах, из-за различной плотности воды и воздуха (отношение плотностей составляет более 800);

2) при низких удельных быстроходностях лопатки водяных колес получаются шире, так как выходные углы у них, как правило, меньше углов лопаток колес воздуходувок;

3) воздуходувки и вентиляторы при переходе от центробежных колес к осевым (между быстроходностями 410-820) характеризуются резким изменением форм, в то время как в насосах наблюдается непрерывность изменения форм при переходе колес от центробежных к диагональным и от диагональных к осевым.

					<i>150302.2018.288.ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований был спроектирован водовоздушный эжектор традиционного исполнения. На основе спроектированного водовоздушного эжектора традиционного исполнения предложена конструкция водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока. В качестве побудителя пассивного потока применялось вращающееся сопловое устройство с лопатками, подобными лопаткам осевого вентилятора. Массовый расход перекачиваемого газа в водовоздушном эжекторе традиционного исполнения при давлении $p_2 = 5$ кПа составляет 198 кг/ч, а при применении побудительного устройства, массовый расход увеличивается до 295 кг/ч. Так, КПД разработанного водовоздушного эжектора с побудителем пассивного потока превышает КПД водовоздушного эжектора традиционного исполнения, разработанного ранее. При коэффициенте скольжения $\psi = 0,9$ и давлении $p_2 = 5$ кПа, КПД возрастает с 20,32% до 25,71%. Таким образом показана эффективность применения побудителя пассивного.

					150302.2018.288.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 106-110.

12 Наземцев, А.С. Гидравлические и пневматические системы. Часть 1. Пневматические приводы и средства автоматизации: Учебное пособие / А.С. Наземцев. – М.: ФОРУМ, 2004. – 240 с.

13 Черкасский, В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры – 2-е изд., перераб. и доп. / В.М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.: ил.

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	150302.2018.288.ПЗ				