

УДК 629.787; 629.7.048

## **Система регенерации воды из твердых отходов экипажа на космическом корабле длительного полета**

*Меньщиков И.Е., студент  
кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы  
кондиционирования и жизнеобеспечения»,  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Смородин А.И., д.т.н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[crio@power.bmstu.ru](mailto:crio@power.bmstu.ru)*

На современном этапе развития ракетно-космической техники ставится задача, связанная с осуществлением пилотируемых полетов к дальним объектам, как в солнечной системе, так и за ее пределами, строительства обитаемых баз на Луне и Марсе.

Решение этих задач связано, прежде всего, со следующими техническими сложностями:

1. Необходимо создание ракет-носителей тяжелого класса с двигателями высокой тяги для вывода пилотируемых космических кораблей со скоростью выше второй космической сейчас;
2. Необходима разработка регенеративной системы жизнеобеспечения максимальной замкнутости для:
  - выработки необходимых для жизнедеятельности экипажа продуктов, таких как кислород, вода, пища из регенерируемых продуктов;
  - утилизации, переработки и хранения нерегенерируемых продуктов жизнедеятельности экипажа;

Многолетний опыт эксплуатации орбитальных станций «Мир» и «Международной Космической Станции» (МКС) показал, что основным компонентом для обеспечения жизнедеятельности экипажа является вода. Вода входит в состав рациона питания экипажа (разбавление сублимированной пищи), используется для питья и санитарно-гигиенических нужд, а также для получения кислорода в результате электролиза, являющегося основой для жизни экипажа.

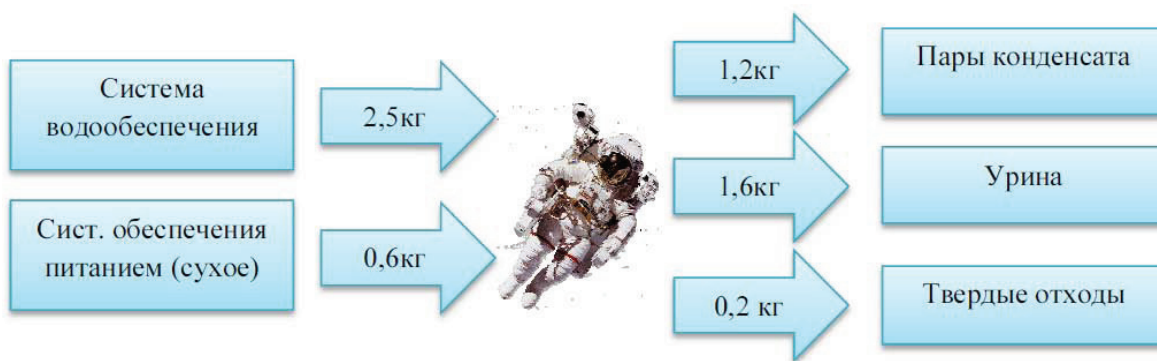


Рис. 1. Суточный водно-пищевой баланс одного члена экипажа

Из рис.1 видно, что один член экипажа выделяет в сутки воды больше, чем потребляет, связано это с тем, что в организме человека за счет определенных химических реакций выделяется метаболическая вода.

На современных пилотируемых космических кораблях и модулях российского сегмента МКС для регенерации воды установлены следующие системы:

- СРВ-К—система регенерации воды из конденсата, основанная на прогонке воздуха через холодильно-сушильный агрегат, относящийся к системе кондиционирования воздуха (СКВ) комплекса обеспечения теплового режима (СОТР) космического аппарата. Данная система позволяет собрать около 1,2 л воды за сутки с одного члена экипажа.
- СРВ-У—система регенерации воды из урины, принцип работы основан на многоступенчатом выпаривании воды из урины. Конечные продукты регенерации и их объемная доля от исходного компонента для одного члена экипажа приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Конечные продукты работы системы СРВ-У**

Компонент	% от исходного продукта	Объем, л
Чистая вода	96,8%	1,55
«Сироп», в том числе:	3,2%	0,05
1. Вода	70%	0,035
2. Сухая масса	30%	0,15

Таким образом, за сутки с одного члена экипажа собирается 2,75 л воды из 3,0 л возможных (от «чистой воды» урины и конденсата атмосферной влаги), так как сегодня не существует систем для регенерации воды из твердых отходов (около 0,15-0,2 л) и сиропа

(0,03-0,04 л). Далее оценим целесообразность разработки системы регенерации воды из твердых отходов.



Рис. 2. Суточный CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> баланс одного члена экипажа

Для получения кислорода применяется система электролиза воды, разлагающая воду на кислород и водород, ниже приведена химическая формула реакции:

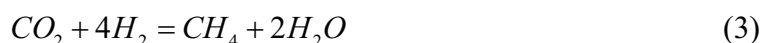


Из 0,036 кг (2 моль) воды получается 22,4 л кислорода и 44,8 л водорода. Таким образом, для обеспечения кислородом одного члена экипажа в течение суток необходимо количество воды, равное:

$$m_{H_2O(min)} = \frac{m_{O_2} \cdot 2 \cdot M_{H_2O}}{V_m \cdot \rho_{O_2}} = \frac{0,9 \text{ кг} \cdot 0,036 \text{ кг}}{0,0224 \text{ м}^3 \cdot 1,429 \text{ / м}^3} = 1,012 \quad (2)$$

В формуле 2  $m_{O_2}$  – потребная суточная масса кислорода, необходимая для дыхания,  $M_{H_2O}$  – молекулярная масса воды,  $V_m$  – объем одного моля газа,  $\rho_{O_2}$  – плотность кислорода.

Однако кроме систем регенерации воды и электролиза необходимо установка на корабль системы, осуществляющей разложение углекислого газа по реакции Сабатье, так существует возможность регенерировать выделившуюся углекислоту (рис.2), конечными продуктами которой являются метан (CH<sub>4</sub>) и вода (H<sub>2</sub>O):



После вышеприведенной реакции вода также поступает в электролизер для разложения на водород и кислород. По реакции 3 видно, что для ее осуществления водорода необходимо в 4 раза больше, нежели углекислого газа. Далее проведем более детальный расчет.

В процессе работы электролизера количество выделившегося водорода за сутки равно:

$$V_{H_2} = \frac{m_{H_2O(min)} \cdot 2 \cdot V_m}{2 \cdot M_{H_2O}} = \frac{1,012 \text{ кг} \cdot 2 \cdot 0,0224 \text{ м}^3}{0,036} = 1,26 \text{ м}^3 \quad (4)$$

Требуемый суточный объем углекислого газа при условии полного использования водорода:

$$V_{CO_2} = \frac{V_{H_2}}{4} = 0,315 \text{ м}^3 \quad (5)$$

Таким образом, в час используется количество углекислого газа, равное  $V_{CO_2} = 0,013125 \text{ м}^3$ , что составляет от общего количества выделяемой углекислоты:

$$A = \frac{V_{CO_2} / \text{час} \cdot \rho_{CO_2} \cdot 100\%}{M_{CO_2 \text{сут.}} / \text{сут.}} = \frac{0,013125 \text{ м}^3 \cdot 24 \text{ час} \cdot 1,97 \text{ кг} / \text{м}^3 \cdot 100\%}{\text{кг} / \text{сут.}} = 62,5\% \quad (6)$$

В формуле 6  $\rho_{CO_2}$  – плотность углекислого газа, необходимая для дыхания,  $M_{CO_2 \text{сут.}}$  – суточная масса выделяемой углекислоты.

Количество выделившейся воды по реакции 3 Сабатье:

$$m_{H_2O(AB)} = \frac{V_{CO_2} \cdot 2 \cdot M_{H_2O}}{V_M} = \frac{0,315 \text{ м}^3 \cdot 0,036 \text{ кг}}{0,0224 \text{ м}^3} = 0,506 \quad (7)$$

Получим общее количество регенерированной воды (8):

$$m_{H_2O(AB)} + m_{H_2O(BC)} + m_{H_2O(CD)} = 0,506 + 1,550 + 1,200 = 3,256$$

В формуле 8  $m_{H_2O(AB)}$ ,  $m_{H_2O(BC)}$ ,  $m_{H_2O(CD)}$  – массы регенерированной воды по реакции Сабатье, из урины и конденсата соответственно.

Тогда степень замкнутости по воде составит:

$$X1 = \frac{m_{H_2O(AB)} \cdot 100\%}{m_{H_2O(BC)} + m_{H_2O(CD)}} = \frac{3,256 \text{ кг} \cdot 100\%}{1,012 + 2,500} = 92,7\% \quad (9)$$

В формуле 9  $m_{H_2O(BC)}$  – масса воды, необходимая для непосредственного потребления членом экипажа.

При использовании воды из твердых отходов и «сиропа» степень замкнутости составит:

$$X2 = \frac{(m_{H_2O(AB)} + m_{H_2O(BC)} + m_{H_2O(CD)}) \cdot 100\%}{m_{H_2O(BC)} + m_{H_2O(CD)}} = \frac{3,456 \text{ кг} \cdot 100\%}{3,512} = 98,4\% \quad (10)$$

В формуле 10  $m_{H_2O(BC)} = 0,165$  – масса воды регенерированной из твердых отходов,  $m_{H_2O(CD)} = 0,035$  – масса воды, регенерированной из «сиропа».

После реакции метанирования (Сабатье) целесообразно провести реакцию пиролиза метана:



Однако возникают трудности с последующим сбором, утилизацией и хранением твердого углерода, в настоящее время данный метод не применяется. Есть смысл использовать выработанный метан в качестве топлива.

Зависимость 10 показывает целесообразность регенерации воды из твердых отходов и «сиропа», что практически сводит степень замкнутости регенерационного цикла по воде близкой к 100%.

В настоящее время можно выделить три экспериментально проверенных и широко распространенных способа сушки:

1. Сублимационная сушка (лиофилизация);
2. Нагрев в резонансной камере (микроволновой печи);
3. Термическая сушка;

Суть сушки методом лиофилизации заключается в предварительном замораживании осушаемого продукта и дальнейшим помещением его в вакуумную камеру, в которой происходит возгонка растворителя. Процесс сублимации обычно проводится в условиях вакуума от  $10^{-3}$  до  $10^{-4}$  мм рт. ст. Несмотря на явные преимущества метода лиофилизации по качеству воды в сравнении с другими способами, положить его в основу системы водообеспечения в космическом полете весьма затруднительно из-за необходимости тщательной подготовки материала к сушке, создания высокого вакуума для полноты высыхания, длительности сушки и достаточно высоких энергозатрат.

В последние годы для сушки различных материалов все чаще применяются сушильные устройства, работающие за счет генератора волн сверхвысокой частоты (СВЧ-печи). В отличие от термических печей, разогрев продуктов в микроволновой печи происходит не только с поверхности, но и по объёму продукта, содержащему полярные молекулы (например, воды), так как радиоволны данной частоты проникают и поглощаются продуктами на глубине примерно 2,5 см. Это сокращает время разогрева продукта. Несмотря на все достоинства этого метода, установка СВЧ-генераторов на космические аппараты в настоящее время запрещена вследствие отрицательного воздействия микроволн на здоровье членов экипажа.

Для процесса сушки можно выделить несколько основных видов теплового воздействия:

- Воздействие вынужденной конвекцией, то есть объект нагревается потоком горячего газа.

– Воздействие теплопроводностью, когда объект разогревается за счет собственной теплопроводной способности при его непосредственном контакте с более горячим телом.

– Радиационным нагревом.

Все вышеперечисленные способы имеют свои преимущества и недостатки, однако в условиях невесомости возникает одна общая проблема, и она заключается в том каким образом подводить теплоту к объекту. По всей видимости, для эффективного подвода тепла необходима стационарность положения объекта в пространстве, на Земле эта проблема решена за счет естественной гравитации. Таким образом, возникает задача создания искусственной гравитации в условиях невесомости.

Наиболее рациональным методом является способ вращения объекта, например в барабане, при этом происходит его равномерное распределение по внутренней поверхности барабана за счет центробежной силы. После чего можно применять один из вышеперечисленных способов нагрева. Кроме того в процессе вращения объекта будет происходить разделение отходов на во ду и твер дую массу, что упрощает извлечение основной массы воды.

При проведении инженерных расчетов для определения различных параметров системы сушки были приняты следующие исходные данные (табл. 2).

Таблица 2

**Исходные данные для расчета системы осушки твердых отходов**

Параметр	Обозначение	Значение
Масса осушаемого объекта, кг	$m_{об.}$	0,2
Температура окружающей среды в отсеке, °С	$t_{отс.}$	23
Внешний диаметр барабана, мм	$D_{нар.}$	200
Толщина стенки барабана, мм	$s_{бар.}$	2
Высота барабана, мм	$h_{бар.}$	50
Частота вращения барабана, об/мин	$n$	6000
Время осушки, час	$\tau$	0,5
Влажность продукта, %		75
Материал барабана		Алюминиевый сплав

В результате расчета потребной мощности для испарения воды из объекта, получили величину, равную:  $N_{Вм_{потреб.}} = 215$

Анализ результатов тепловых расчетов для каждого вида нагрева показал, что:

– Сушка за счет лучистого теплообмена является эффективной только при очень высоких температурах излучателя-нагревателя (более 500 °С) (рис. 3), что влечет за собой высокие энергетические затраты, кроме того столь высокие температуры отрицательно влияют на электро-пожаробезопасность космического корабля, необходимо изготовление отражающего экрана и применения эффективной теплоизоляции.

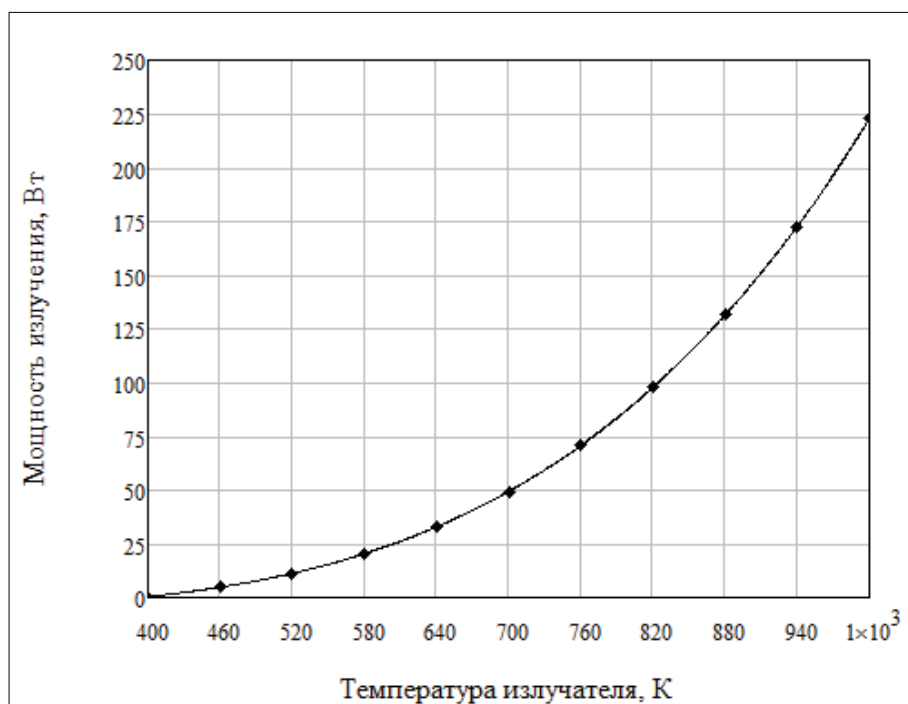


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от температуры стального нагревателя-излучателя

Для расчета была принята модель лучистого теплообмена между двумя соосными цилиндрами, располагающимися один в другом (барaban внутри излучателя). В качестве материала излучателя была принята сталь.

– Сушка за счет эффекта теплопроводности на практике может быть осуществлена методом нагрева током нихромовой проволоки, навитой вокруг вращающегося барабана. Тогда нить будет нагреваться и тем самым нагревать барабан за счет теплопроводности. Этот метод представляет собой один из наиболее быстрых и эффективных видов нагрева. Для нихромовой проволоки диаметром 0,2 мм был получен график, характеризующий скорость разогрева (рис. 4).

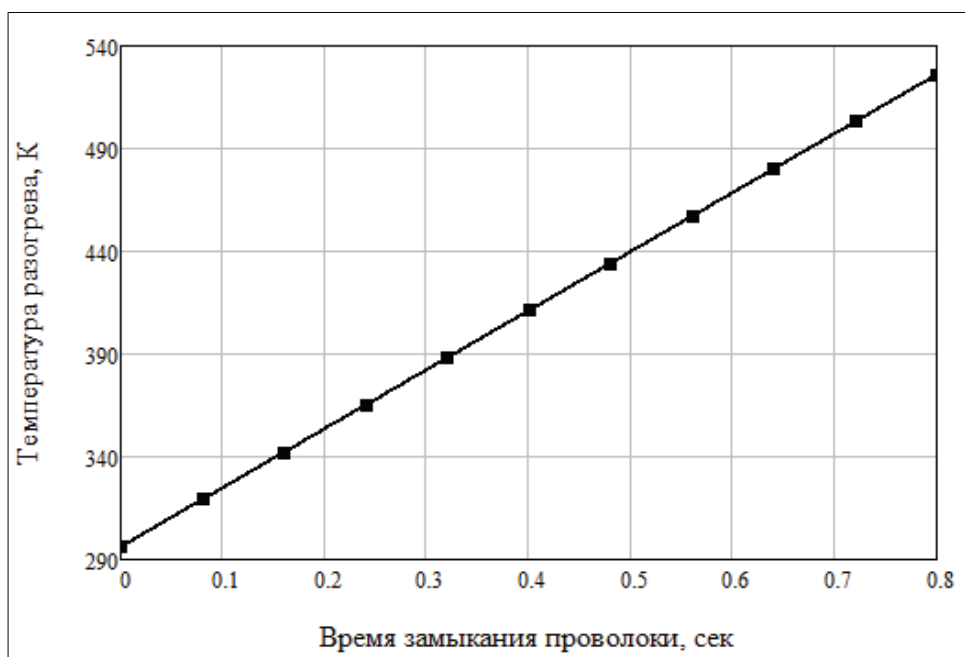


Рис. 4. Скорость разогрева нихромовой проволоки, навитой на барабан

Трудность в осуществлении процесса нагрева нихромовой нитью заключается в подводе электричества к ней во время вращения барабана с материалом, что влечет за собой необходимость разработки высокооборотного токоприемника. Кроме того во время вращения могут возникнуть биения, что может привести к разрыву контактов.

– Конвективная сушка горячим потоком воздуха заключается в следующем: нагретый до высокой температуры воздух обдувает объект и тем самым осушает его. Возможны два варианта исполнения:

1. Обдувается непосредственно материал, находящийся внутри барабана;
2. Обдувается барабан, и теплота через стенки передается материалу;

В результате проведенных расчетов при принятой расчетной модели обтекания вращающейся с большой скоростью трубы (в нашем случае трубой является барабан), были получены следующие значения параметров, характеризующих теплообмен в процессе осушки:

1. Температура воздуха, обдувающего барабан:

$$T = 410;$$

2. Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{обтек.} = 215 \frac{Вт}{м^2 \cdot К};$$

3. Потребная площадь барабана:

$$F_{бар.} = 0,041 м^2;$$



Следует отметить, что при заданных ранее исходных данных, боковая поверхность барабана имеет площадь, равную  $0,031 \text{ м}^2$ , поэтому целесообразно увеличить либо высоту, либо диаметр барабана.

Предлагается следующая принципиальная схема агрегата для осуществления конвективной сушки (рис.5):

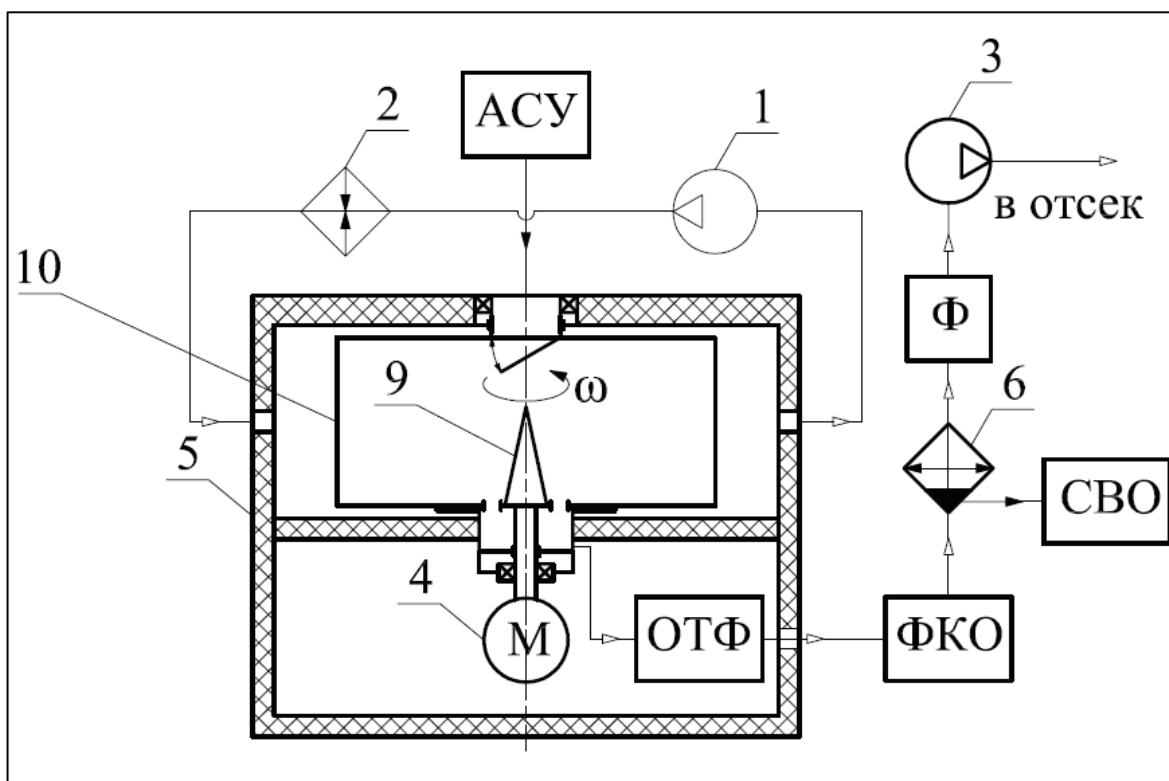


Рис. 5. Система сушки твердых отходов с конвективной сушильной камерой

Из ассенизационно-санитарного устройства (АСУ) массы попадают на разбрасывающий конус 9 барабана 10 машины сушки твердых отходов 5 посредством создания направленного потока воздуха вакуум-насосом 3. Затем крышка забора отходов в барабане закрывается, начинается процесс вращения барабана с помощью электродвигателя (М). Нагнетатель 1 контура нагревающего воздуха прогоняет воздух через электронагреватель 2, после чего нагретый газ поступает в камеру, в которой вращается барабан 10. Горячий воздух с температурой  $410\text{К}$  отдает теплоту стенке барабана за счет вынужденной конвекции, а стенка в свою очередь распределенным по внутренней поверхности барабана массам. Паровоздушная смесь отбирается насосом откачки паровоздушной смеси 3, при этом смесь проходит отделитель твердой фазы (ОТФ) для отделения твердых частиц, далее поступает в фото-каталитический окислитель (ФКО) для обеззараживания, дезинфекции и дезодорации смеси посредством окисления вредных веществ. Затем отбираемая среда попадает в конденсатор 6, в котором <http://sntbul.bmstu.ru/doc/587223.html>

происходят конденсация влаги и разделение смеси на газ и воду. Сконденсированная вода поступает в систему водообеспечения космического корабля (СВО), а оставшийся воздух после прохождения фильтра тонкой очистки (Ф), улавливающего окисленные вредные примеси выбрасывается в отсек.

По результатам расчета выяснилось, что необходимая часовая холодопроизводительность конденсатора составляет около 400 Вт. Таким образом, для осуществления процесса конденсации пара достаточно применения термоэлектрических модулей, работающих на основе эффекта Пельтье.

Сбор влаги в условиях невесомости возможно осуществить двумя способами:

1. Применить в качестве влагоборника капиллярно-пористый материал например поливинилформаль, который должен находиться непосредственно в конденсаторе и контактировать с паром;
2. Применить конденсатор оригинальной конструкции, влагобор в котором осуществляется за счет воздействия на поток сторонних сил, вызывающих разделение двухфазной среды (например центробежных).

Основным недостатком первого способа сбора влаги является ухудшение теплообмена между паровоздушным потоком и поверхностью теплообмена, то есть холодной стороной термоэлектрического элемента. Для второго варианта влагобора возможно применение спирального конденсатора (рис.6), в котором происходят одновременно конденсация и закручивание потока. После выхода из теплообменника поток попадает в циклон, в котором происходит отбрасывание жидкой фазы к периферии за счет центробежных сил, где непосредственно происходит сбор влаги. При этом горячая сторона элементов Пельтье термостатируется теплоносителем системы обеспечения теплового режима космического аппарата.

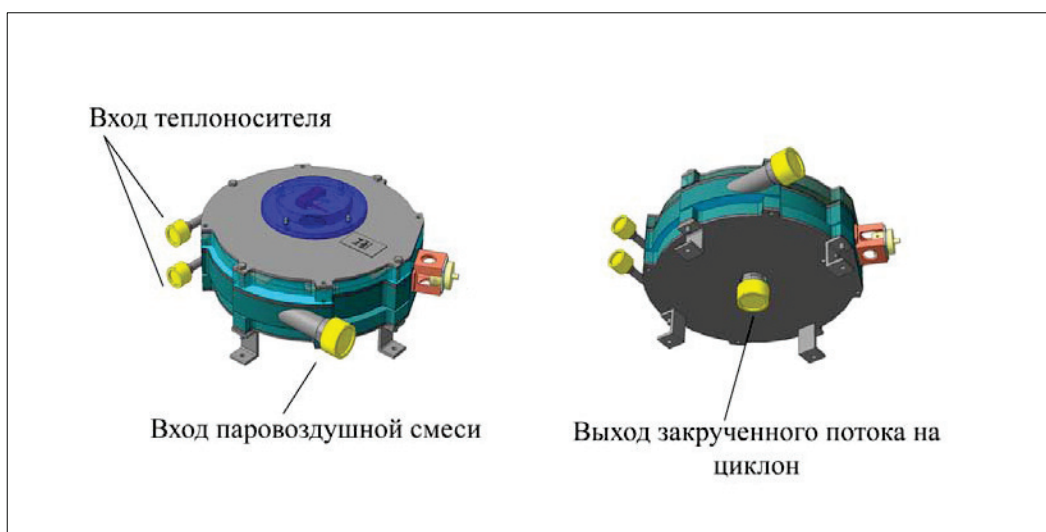


Рис. 6. Спиральный конденсатор

В табл. 3 приведены основные технические сложности, возникающие в процессе конструирования агрегата осушки, а также возможные способы их преодоления. Во всяком случае выбор того или иного метода решения конкретной технологической задачи требует разработки различных вариантов прототипов и их испытаний.

Таблица 3

**Технические сложности, решаемые на этапе проектирования**

Общие подлежащие решению технологические вопросы	Варианты решения
Способ помещения объекта в агрегат.	Автоматическое помещение объекта после АСУ либо ручное в специальном мешке.
Обеспечение герметичности.	Создание газовых уплотнений.
Очистка внутренней поверхности барабана от пригоревших после окончания осушки остатков.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Деформация барабана, например наддув, если он эластичный;</li> <li>- Установка специальной пленки (мешка) для сбора сухих остатков на внутреннюю поверхность барабана с последующим ручным выниманием;</li> <li>- Впрыск антипригарной жидкости перед использованием;</li> <li>- Механическая очистка.</li> </ul>
Отделение твердых частиц от паровоздушной среды в процессе ее откачки из барабана.	Создание специального устройства-отделителя наподобие циклона.
Сбор влаги в конденсаторе в условиях невесомости.	Применение капиллярно-пористых материалов или конденсаторов специальной конструкции.

Таким образом, на основе проведенного исследования, можно сказать, что для осуществления дальних космических полетов проблема осушки твердых отходов экипажа является весьма актуальной. В силу специфики космических изделий возникает масса трудностей в их проектировании и изготовлении вследствие необходимой высокой надежности и безопасности, поэтому конструкция агрегата осушки должна быть максимально простой и ремонтпригодной, а также не содержать в себе элементов опасных для здоровья экипажа. Дополнительным преимуществом применения этого устройства является снизившаяся масса продуктов, подвергнутых осушке, что позволит уменьшить объем отсека космического корабля для хранения отходов.

### Список литературы

1. Серебряков В.Н. Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1983, 160 с.
2. Шибанов Г.П. Обитаемость космоса и безопасность пребывания в нем человека. М.: Машиностроение, 2007. – 544 с.: ил.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — Изд. 5-е перераб. и доп.—.: Атомиздат, 1979, 416 с.