

УДК 621.59(075.8)

Д.В. Рубцов, Г.В. Зибер, Е.Н. Зырянов

ООО «Технические газы — Традиции качества», ул. Машинная, 42а, г. Екатеринбург, РФ, 620089

e-mail: pto@techgas.ru

НЕСТАНДАРТНЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ЭФФЕКТИВНОГО АТМОСФЕРНОГО ИСПАРИТЕЛЯ КРИОПРОДУКТОВ

Потребители криогенного и теплообменного оборудования предъявляют высокие требования к изделиям, в том числе и к атмосферным испарителям криогенных жидкостей. В настоящее время с интересом относятся к конструкциям аппаратов, имеющих относительно невысокую стоимость, обеспечивающих более длительный период непрерывной работы и обладающих хорошими массогабаритными характеристиками. При выборе аппарата часто в качестве преимущества рассматривается его способность работать на транспортных средствах. Достижению аппаратом высоких значений перечисленных параметров препятствуют осадки в виде снега и льда, образующиеся вследствие конденсации и кристаллизации воды из атмосферного воздуха. Для устранения их негативного влияния в некоторых случаях прибегают к наращиванию теплообменной поверхности аппарата, что приводит к увеличению его габаритов и массы. Описываются нестандартные подходы к разработке эффективного атмосферного испарителя для жидких криопродуктов. Приводятся характеристики разработанного испарителя с расходом 240 нм³/ч кислорода при давлении 400 бар. Сравнение его с существующими аппаратами указывает на его преимущества.

Ключевые слова: Испаритель. Высокое давление. Кислород. Аргон. Азот. Метан. Природный газ. Воздух. Конвекция. Газодинамика. Отложения. Термосопротивления.

D.V. Rubtsov, G.V. Sieber, E.N. Ziryanov

NONSTANDARD APPROACHES DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE CRYOGENIC PRODUCTS ATMOSPHERIC EVAPORATOR

The consumers cryogenic and heat exchange equipment make high demands to products including the atmospheric evaporators of cryogenic liquids. At present with interest relate to design of the device having a relatively low cost, providing a longer period of continuous operation and with a reasonable amount weight and size characteristics. When choosing a device as an advantage is considered its ability to work on vehicles often. The achievement device high values of listed parameters prevent the precipitation in the form of snow and ice that are formed due to condensation and crystallization of water from the atmospheric air. In order to eliminate their negative influence in some cases resort for increased heat exchange surface of the device that leads to increasing its size and weight. Describes nonstandard approaches to developing an effective atmospheric evaporator for liquid cryogenic products. Summarizes the characteristics of the developed evaporator at a rate of 240 Nm³/h of oxygen at a pressure of 400 bar. Comparison with existing devices indicates its advantages.

Keywords: Evaporator. High pressure. Oxygen. Argon. Nitrogen. Methane. Natural gas. Air. Convection. Gasdynamics. Sediments. Thermal resistance.

1. ВВЕДЕНИЕ

С развитием криогенной техники большое внимание уделяется совершенствованию теплообменного оборудования, выявлению возможностей управления реализуемыми в них термогазодинамическими процессами, а также интенсификации внешнего теплообмена при работе со средами, образующими отложе-

ния с собственными термическими сопротивлениями.

Зачастую термические сопротивления отложений оказывают решающее влияние на работу теплообменных аппаратов [1,2], уменьшая интенсивность теплоотдачи со стороны источников и приёмников тепла. Таким образом, за счёт снижения влияния указанных отложений можно существенно улучшить рабочие характеристики разрабатываемых теплообмен-

ных аппаратов.

В настоящей работе под отложениями понимаются образования снегового и ледяного слоя на внешней теплообменной поверхности, возникающие вследствие конденсации с последующей кристаллизацией атмосферной влаги (в большей степени — воды).

Результаты работы кожухотрубных теплообменников с учётом отложений и методы минимизации их влияния освещаются в [3], где рассматриваются аппараты для дивинила (полимерные отложения) и солевых растворов (солевые отложения).

Из сказанного вытекает, что объективно существует проблема термических сопротивлений. Поэтому актуальным являются способы минимизации их влияния на эффективность атмосферных испарителей.

2. ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ АППАРАТОВ

Анализ недостатков существующих аппаратов, с одной стороны, и требования потребителей криогенного и другого теплообменного оборудования, с другой, позволили сформулировать следующую цель работы: «Разработать и исследовать компактный, с низкой металлоёмкостью и повышенной продолжительностью непрерывной работы аппарат внешнего теплообмена для испарения и подогрева кислорода».

Для реализации поставленной цели требовалось решить ряд задач. Укажем только основные из них:

1. Снизить скорость образования снега и льда на внешних теплообменных поверхностях.
2. Интенсифицировать теплоотдачу со стороны атмосферного воздуха и испарившегося кислорода.
3. Повысить компактность аппарата и обеспечить возможность его монтажа на транспорте.
4. Рационально распределить температурные нагрузки по всей длине каналов аппарата.
5. Снизить электропотребление при наполнении баллонов кислородом и другими техническими газами.

Решение указанных задач позволит существенно улучшить характеристики разрабатываемого атмосферного испарителя.

3. РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО АТМОСФЕРНОГО ИСПАРИТЕЛЯ

Современные условия работы с потребителем обуславливают сокращение времени разработки и изготовления оборудования, создаваемого с учётом индивидуальных требований. В связи с этим применение сложных методик термогазодинамического расчёта на основе систем дифференциальных уравнений можно признать не вполне оправданным. Достаточную для практики точность расчётов и качественную оценку результатов даёт использование полуэмпирических зависимостей, характеризующих соответствующие параметры процессов.

Анализ эффективности теплоотдачи со стороны кипящей криогенной жидкости ($\alpha_k=5000-7000$ Вт/(м²К)), при конвекции атмосферного воздуха

($\alpha_b=45-55$ Вт/(м²К)) и при конвективном теплообмене сжатого кислорода ($\alpha_c=700-1500$ Вт/(м²К)) показал, что их численные значения отличаются иногда на несколько порядков. Этот факт объясняет необходимость применения рёбер для развития теплообменной поверхности со стороны атмосферного воздуха.

Для решения этой задачи нами разработан алюминиевый профиль со сбалансированными поверхностями, удовлетворяющий, согласно [2], условию:

$$\alpha_c F_c = \alpha_b F_b,$$

где F — теплообменная поверхность. Кроме того, решена технологическая задача создания оребрения с плотным контактом оребряющего алюминиевого профиля с нержавеющей трубами высокого давления, при котором исключаются точечные контакты.

Для иллюстрации изменения температур стенки вследствие развития внешней поверхности приведен рис. 1.

Расчёт температур стенки $T_{ст1}$ и $T_{ст2}$ показывает, что из-за значительного отличия теплоотдачи воздуха от теплоотдачи при кипении температуры внешней и внутренней поверхностей мало отличаются от условно постоянной температуры кипения T_k однокомпонентной среды — кислорода. При развитии внешней поверхности, очевидно, что средняя толщина стенки возрастает, следовательно, температуры её поверхности приближаются к температуре окружающего воздуха T_b . В связи с этим удельный тепловой поток $q = \alpha_k (T_{ст} - T_k)$ увеличивается. Такое влияние разности между температурой кипения и температурой стенки на тепловой поток приведено в литературе [4, 5]; оно проявляется вплоть до достижения критического теплового потока q_{max} (см. рис. 2).

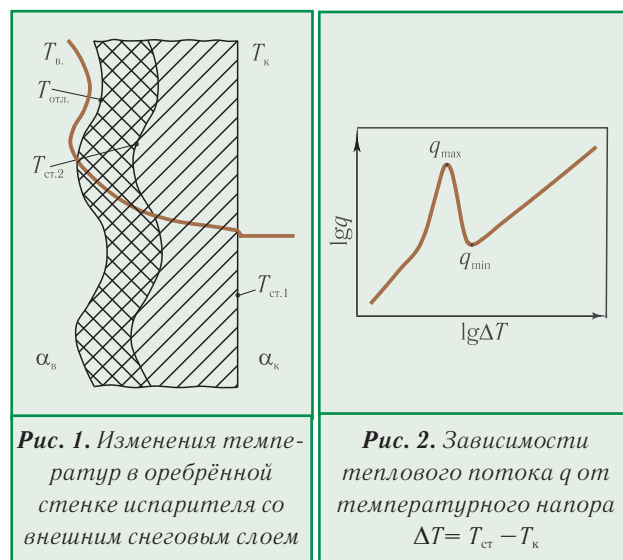


Рис. 1. Изменения температур в оребренной стенке испарителя со внешним снеговым слоем

Рис. 2. Зависимости теплового потока q от температурного напора $\Delta T = T_{ст} - T_k$

Равенство произведений теплоотдачи и поверхности с обеих сторон теплообменника зачастую обеспечить технологически не представляется возможным, когда рост внешней поверхности способствует увеличению теплоотдачи при кипении.

Из-за применения сварки в некоторых конструкциях профилей, участвующих в процессах кипения и нагрева газа, существенно снижаются температурные напоры между стенкой и нагреваемой средой, что ведёт к избыточным поверхностям и невозможности снижения недорекуперации между температурой окружающей среды и нагреваемым продуктом. Аналогичный эффект наблюдается и в многоходовых кожухотрубных аппаратах при смешанном режиме движения сред, когда температура теплоприёмника выше температуры источника тепла (или близка к ней).

В разработанной нами конструкции испарителя это явление учтено и обеспечена теплоизоляция его отдельных участков испарения и нагрева продукта.

Как уже отмечалось, основным ограничением при обеспечении высокой эффективности теплообменников являются отложения на рабочих поверхностях аппаратов. Для снижения скорости их образования принят во внимание эффект вымораживания воздушной влаги на поверхностях. За счёт снижения расхода воздуха и углубления его охлаждения не на 8-10 °С (в серийном аппарате), а на 20-25 °С, в процессе в большей степени участвует осушенный воздух. Однако рост перепада температур не ведёт к снижению выпадения влаги на поверхностях. Этот процесс больше зависит от температуры стенки, чем от средней температуры потока, особенно при малых значениях чисел Рейнольдса, когда ламинарный слой характеризуется большой толщиной и небольшой интенсивностью массообмена. При таких условиях вода легко конденсируется (при высоких коэффициентах теплоотдачи в процессе конденсации) и кристаллизуется в хаотичном порядке, образуя высокопористую структуру, что обуславливает низкую теплопроводность из-за заполнения пор воздухом.

Нами для борьбы с отложениями выбран более действенный метод, заключающийся в уплотнении снега и уносе незатвердевших капель воды посредством увеличения скорости потока. При высоких значениях чисел Re (18000–23000) ожидается увеличение интенсивности массообмена в пристенной области и утончение ламинарного слоя. При этом кристаллизация будет направленной, в результате чего сформируется более плотная структура — лёд с теплопроводностью в 19 раз больше, чем у снега. Образующиеся капли, не успевая кристаллизироваться, будут собираться в более крупные и уноситься высокоскоростным потоком воздуха. Эффект брызгоуноса широко описан в литературе.

За счёт использования описанных методов появляются возможности снижения теплообменных поверхностей, что ведёт к увеличению компактности, уменьшению металлоёмкости и стоимости аппарата, а также повышению продолжительности его безостановочной работы. После проведения исследований аппарата планируется переход на многоходовую схему по межтрубному пространству, что ещё более улучшит его работу. Это позволит обеспечить рост теплотёма в связи с оптимизацией температурного напора с обеих сторон теплообмена.

Усовершенствованный таким образом аппарат

может изготавливаться в транспортном исполнении. При использовании аппарата исследовался нестационарный процесс наполнения баллонов при росте давления в них от атмосферного до 400 бар. При высоких значениях давлений, когда газообразная среда близка по характеристикам к жидкости [6], особых проблем не возникало. Однако в начале процесса наполнения из-за стремления скорости потоков к скорости звука снижается производительность и увеличивается продолжительность заправки. Для устранения этого трубные каналы на соответствующих участках аппарата имеют увеличенное сечение. Причём система каналов спроектирована при использовании допустимых гидросопротивлений потоков.

Для анализа описанных выше процессов и выбора наилучших условий их реализации выполнены многовариантные расчёты при переменных условиях окружающей среды, изменяющихся давлениях в кислородных магистралях, скоростях и расходах воздушного и продуктового потоков. Проектирование аппарата проводилось посредством 3D-моделирования. Основные показатели созданного аппарата «Гелиос-240/40» указаны в таблице.

Характеристики атмосферных испарителей крио-продуктов

Параметр	«Гелиос 240/40»	Стандартный аппарат
Давление наполнения, бар	400	400
Производительность по кислороду, $\text{м}^3/\text{ч}$	240	240
Недорекуперация, К	10	15
Габариты, мм:		
высота	1938	2500 (с вентил.)
ширина	510	1100
глубина	490	900

Теплообменная поверхность аппарата «Гелиос» составила почти половину от поверхности стандартного аппарата. Трёхмерная модель аппарата изображена на рис. 3.

Представление о его внешнем виде дает рис. 4.

В настоящее время имеются результаты предварительных испытаний, в ходе которых аппарат продемонстрировал устойчивую работу без образования снеговых отложений на внешней поверхности «тёплого» контура.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и численное моделирование позволили создать аппарат с меньшими габаритами и металлоёмкостью. Аппарат в связи с этим может выпускаться в транспортном исполнении. Следствием результатов также является сни-

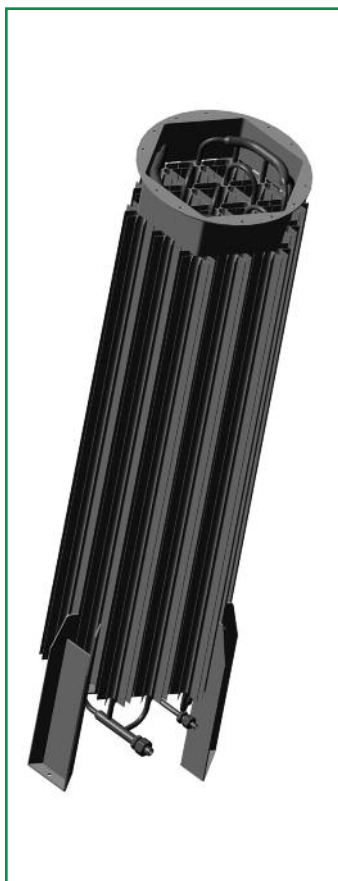


Рис. 3. 3D-модель испарителя типа «Гелиос-240/40»

жение трудоёмкости изготовления.

Результаты испытаний «на отказ» будут опубликованы в следующих статьях. Однако уже сейчас на основании предварительных данных можно утверждать, что продолжительную устойчивую работу атмосферных испарителей можно обеспечить не посредством увеличения запаса теплообменной поверхности, а за счёт использования теоретических положений гидродинамики и тепло-массообмена, описывающих коэффициенты теплоотдачи, закономерности распределения температурных полей в аппарате, условия срыва жидкости с поверхности посредством высокоскоростных потоков, условий осушки среды методом вымораживания.

Дальнейшего снижения габаритов аппаратов планируем достичь за счёт увеличения количества ходов по межтрубному пространству.



Рис. 4. Газификатор с атмосферным испарителем криопродуктов типа «Гелиос-240/40» в транспортном исполнении

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейс В.М, Лондон А.Л. Компактные теплообменники. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1962. — 160 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. — М. — Л.: Энергия, 1965. — 424 с.
3. Шершевский А.Г., Рубцов Д.В. Конденсация под контролем LOTUS// Химическая техника. — 2010. — № 10. — С. 15-17.
4. Справочник по физико-техническим основам криогеники/ М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др. Под ред. М.П. Малкова — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 432 с.
5. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Технология и оборудование. В 2-ух томах. Под ред. В.И. Епифановой и Л.С. Аксельрода. Т. 1. Термодинамические основы разделения воздуха, схемы и аппараты воздуходелительных установок. — М.: Машиностроение, 1973. — 468 с.
6. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов. — М.: Наука, 1972. — 720 с.

**Книги “Кислород...”
делают бизнес успешным**

В трехтомнике “Кислород. История и современность” собраны лучшие статьи, опубликованные в журнале “Технические газы”. В них отражены достижения в области создания оборудования для производства технических газов и реализации эффективных технологий на их основе.

По вопросам приобретения обращаться :
 а/я 188, г. Одесса-26, Украина, 65026;
 тел./факс: +380 48 777 00 87;
 E-mail: uasigma@paco.net;
 Web: www.uasigma.odessa.ua