

Применение тарельчатой колонны в агрегате подготовки углеводородного топлива по газосодержанию

10, октябрь 2014

Кобызев С. В.

УДК: 629.7, 629.7.08, 629.7.082, 629.7.085

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

ksergeyv@hotmail.com

Введение

Применение компонентов ракетного топлива на основе углеводородов, в частности нафтила, характерно для многих современных ракетных комплексов. В силу отработанности, высокого удельного импульса и относительной экологической чистоты применение углеводородного топлива в паре с жидким кислородом запланировано и для перспективных ракетных комплексов [5].

В настоящее время, в связи с изменением технических условий на поставку углеводородного топлива, содержание в нем растворенной и свободной воды не регламентируется. Таким образом, задача обезвоживания углеводородного топлива становится в ряд задач, выполняемых наземным оборудованием технического комплекса [5, 6].

При рассмотрении путей решения задачи обезвоживания рассматривают технологические процессы, основанные на применении коалесцирующих фильтров, адсорбции, вымораживания, электростатического разделения, барботажа жидким и газообразным азотом. В настоящей работе приводятся результаты исследования возможности применения тарельчатой колонны для разделения смеси вода-углеводородное топливо с использованием газообразного азота.

1. Внедрение агрегата подготовки в общую пневмогидравлическую схему заправочной системы.

В работах [5, 6, 10] отмечены преимущества метода барботажа газообразным азотом над методами фильтрации и химического связывания воды в углеводородных горючих. Главное преимущество метода – возможность достижения требуемой концентрации воды в углеводородном горючем 0,0002...0,0004% масс. Однако теоретические и полученные экспериментально возможности метода допускают ряд альтернативных конструктивных реализаций, из которых можно на этапе проектирования выбрать наиболее рациональную. Требующим наименьших затрат вариантом применения барботажа газообразным азотом является использование барботеров, уже встроенных в существующие емкости хранилищ

или емкости подготовки. Как показывают расчеты [5, 6, 10], в таком варианте применения метода барботажа газообразным азотом можно обеспечить высокую степень использования азота, достичь при продувке газовой подушки любой заданной глубины обезвоживания углеводородного горючего, однако время подготовки при этом составляет до десятков часов.

Второй альтернативой является использование специальных барботажных емкостей, добавленных в схему заправочной системы углеводородного горючего исключительно для проведения операции обезвоживания. При таком варианте применения метода барботажа газообразным азотом затраты на операцию обезвоживания увеличиваются, так как необходимы изготовление и монтаж отдельной емкости, однако появляется возможность заполнить такую емкость оптимальной именно с точки зрения массообменного процесса – то есть вертикальной конфигурации, с нижним расположением развитого барботера. Применение такой емкости подготовки позволяет интенсифицировать процесс подготовки и обеспечить одновременно его высокий темп и высокий коэффициент использования азота. Высота необходимой емкости подготовки может быть рассчитана по методике, приведенной в [5, 10].

При проектировании такой специальной емкости подготовки следует иметь в виду, что в составе наземного оборудования космодромов, в частности строящегося космодрома «Восточный» сооружаются заправочные системы для нескольких различных типов углеводородных горючих. Следовательно, специальная емкость подготовки потребовалась бы для каждой системы. Такой подход мог бы оказаться затратным, несмотря на увеличение скорости подготовки и снижение затрат азота.

Одним из вариантов снижения затрат на создание специального оборудования для подготовки углеводородных горючих по газосодержанию может быть разработка универсального передвижного агрегата подготовки, допускающего использование со всеми применяемыми типами систем заправки углеводородными горючими. Такой агрегат в составе наземного оборудования космодрома мог бы существовать в единственном экземпляре (или в двух экземплярах для резервирования). Для сокращения времени использования такого агрегата и обеспечения его максимальной готовности к применению в его составе следовало бы, поскольку агрегат разрабатывается и изготавливается заново, иметь устройство, обеспечивающее максимальную интенсивность процесса массообмена углеводородного горючего с газообразным азотом.

Такого рода устройства широко используются в химической промышленности [1, 2, 7] и называются барботажными абсорберами. Рассмотрим применение для десорбции водяного пара из углеводородного горючего барботажную тарельчатую колонну. Конструкция такого рода колонн, рекомендуемые расходы газовой и жидкой фазы, особенности расчета приведены в [1, 2, 7, 11, 12, 13, 14, 15]. Как будет показано в дальнейшем расчетом, интенсификация процесса массообмена в колонне по отношению к барботажному аппарату дает возможность, с одной стороны, обеспечить подготовку продукта на потоке, то есть за

один проход продукта через аппарат, а с другой стороны, сама колонна может быть выполнена при этом достаточно компактной для размещения на автомобильном шасси. Приведем пример принципиальной схемы подготовки продукта (углеводородного горючего) на потоке при его перегрузке из расходной емкости в емкость потребителя.

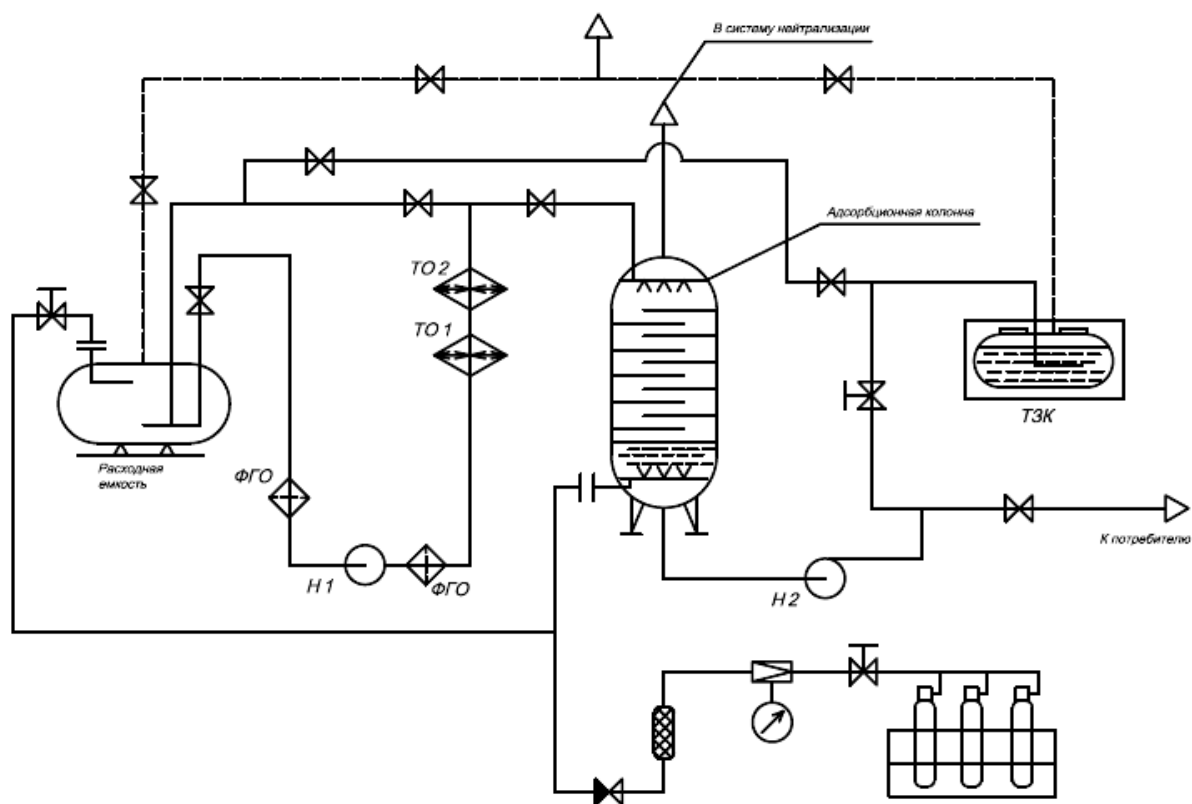


Рис. 1. Принципиальная пневмогидравлическая схема системы обезвоживания углеводородного горючего с помощью передвижного агрегата на базе тарельчатой десорбционной колонны.

На рис. 1 применены обозначения: ФГО – фильтр грубой очистки, Н1, Н2 – насосы, ТО1, ТО2 – теплообменники, ТЗК – емкость потребителя (транспортно-заправочный контейнер).

Поскольку производительность агрегата допускает его использование на потоке, агрегат может применяться для обезвоживания углеводородного горючего при загрузке продукта из транспортных емкостей в емкости хранилищ, периодически при хранении продукта, при выдаче продукта потребителю.

3. Построение операционной функции агрегата подготовки.

Применение передвижного агрегата подготовки будет целесообразно только в том случае, когда суммарные затраты на проведение подготовки к запуску с учетом затрат на изготовление самого агрегата, дополнительных затрат на заполнение его подготавливаемым продуктом, затраты газообразного азота, затраты труда персонала наземного комплекса станут при применении агрегата меньше, чем при использовании встроенных в

существующие емкости хранилищ барботеров. Для минимизации этих затрат рассмотрим влияние геометрических параметров барботажной колонны и режимов ее работы на скорость подготовки продукта и затраты газообразного азота.

Схема противоточной экстракции (баланс концентраций для колонны в целом) приведена на рис. 2.

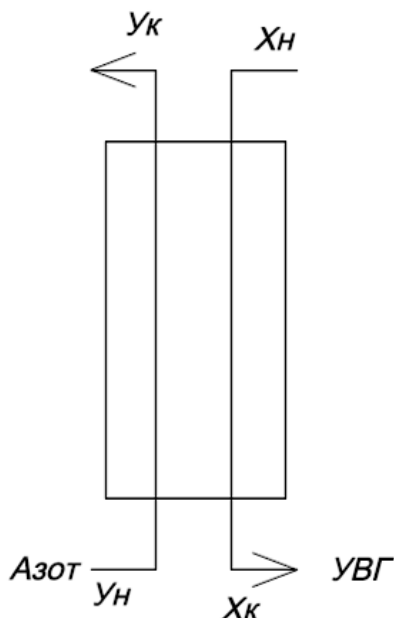


Рис. 2. Принципиальная схема противоточной экстракции.

y_n – начальная концентрация водяного пара в азоте, y_k – конечная концентрация водяного пара в азоте, x_n – начальная концентрация водяного пара в углеводородном горючем, x_k – конечная концентрация водяного пара в углеводородном горючем/

В каждом сечении колонны из закона сохранения количества вещества можно записать балансное уравнение.

$$Gdy = -Ldx,$$

где G – расход газообразного азота, кг/с, L – расход обезвоживаемого продукта, y – текущая концентрация водяного пара в азоте, x – текущая концентрация водяного пара в углеводородном горючем.

Из закона сохранения массы также следует

$$\frac{L}{G} = \frac{y_k - y_n}{x_n - x_k} \quad (1)$$

Для определения числа теоретических тарелок проектируемой десорбционной колонны построим диаграмму составов с рабочей линией и линией равновесия (рис. 3).

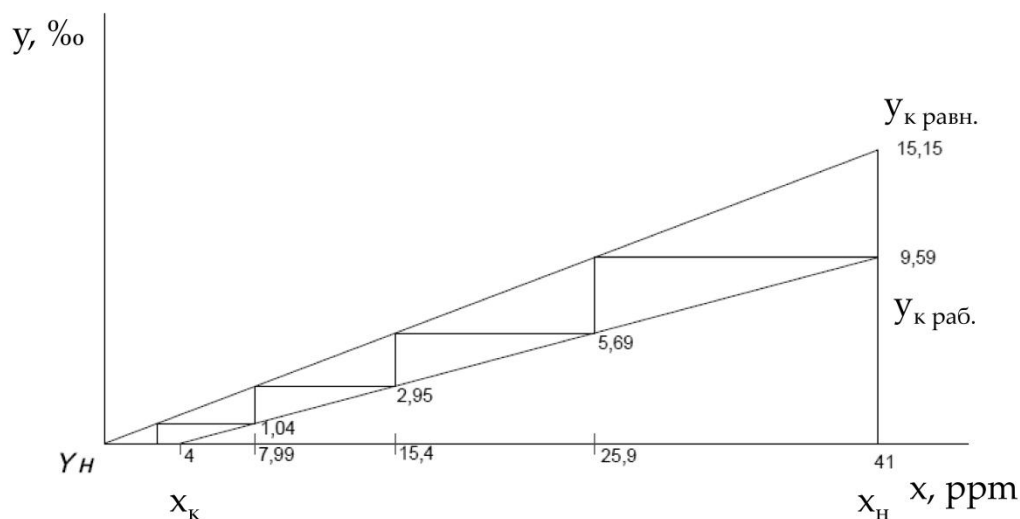


Рис. 3. Принципиальная схема противоточной экстракции.

На рис. 3 приведены характерные значения концентрации x водяного пара в жидкой фазе (обезвоживаемое углеводородное горючее) и в газовой фазе y (газообразный азот). Приведено графическое определение числа теоретических тарелок и концентрации водяного пара во взаимодействующих фазах на различных тарелках по высоте колонны для начальной концентрации водяного пара в жидкой фазе $x_n=41$ ppm, заданной концентрации водяного пара на выходе из аппарата подготовки $x_k=4$ ppm, равновесной концентрации паров воды в газообразном азоте на выходе из аппарата подготовки, равной 15,15 ‰. Считается, что при поступлении азота в аппарат подготовки водяных паров в нем не содержится (азот сухой).

За коэффициент использования азота примем величину

$$K_{N_2} = \frac{y_{\text{к раб.}}}{y_{\text{к равн.}}},$$

равную отношению равновесной $y_{\text{к равн.}}$ и рабочей $y_{\text{к раб.}}$ концентрации водяного пара в азоте на выходе из аппарата подготовки.

Для определения числа теоретических тарелок (то есть тарелок с коэффициентом полезного действия, равным единице), необходимо определить координаты вершин четырехугольника $[(0,0), (x_n, y_{\text{к равн.}}), (x_n, y_{\text{к раб.}}), (x_k, 0)]$. Из задания на проектирования агрегата имеем значения влагосодержания углеводородного горючего на входе x_n и выходе x_k из аппарата подготовки. Равновесную массовую концентрацию водяного пара в азоте на выходе из аппарата подготовки $y_{\text{к равн}}$ получаем из закона Генри:

$$y_{\text{к равн}} = \frac{1}{\left(P_0 - \frac{x_k}{k_H}\right) \mu_{N_2} + \frac{x_k}{k_H} \mu_{H_2O}},$$

где k_H – константа Генри для водяного пара, растворенного в углеводородном горючем, P_0 – рабочее давление колонны, μ_{N_2} – молярная масса азота, μ_{H_2O} – молярная масса водяного

пара. Величину рабочей концентрации водяного пара в азоте на выходе из аппарата подготовки найдем, задавшись значением коэффициента использования азота:

$$y_{\text{к раб.}} = K_{N_2} y_{\text{к равн.}}$$

Таким образом, четырехугольник $[(0,0), (x_{\text{н}}, y_{\text{к равн}}), (x_{\text{н}}, y_{\text{к раб}}), (x_{\text{к}}, 0)]$ оказывается полностью определен при одном свободном параметре – коэффициенте использования азота K_{N_2} .

Между равновесной и рабочей линиями колонны проводим ступенчатую кривую (рис. 3), вертикальные отрезки которой соответствуют изменениям влагосодержания азота при движении вверх по колонне (одна линия – одна теоретическая тарелка), а горизонтальные отрезки соответствуют изменению влагосодержания углеводородного горючего при его движении вниз по тарелкам колонны (одна линия – одна теоретическая тарелка). При известных координатах вершин четырехугольника $[(0,0), (x_{\text{н}}, y_{\text{к равн}}), (x_{\text{н}}, y_{\text{к раб}}), (x_{\text{к}}, 0)]$ из геометрических соображений число горизонтальных отрезков ступенчатой кривой, соответствующих числу теоретических тарелок, может быть определено как

$$N \geq \frac{\ln \left(\frac{K_{N_2} x_{\text{к}}}{(x_{\text{н}} - x_{\text{к}})(1 - K_{N_2})} \right)}{\ln \left(\frac{K_{N_2} x_{\text{н}}}{(x_{\text{н}} - x_{\text{к}})} \right)} \quad (2)$$

Проведем расчет числа теоретических тарелок для входной массовой концентрации воды в углеводородном горючем, равной 41 ppm. Результаты расчета представлены в табл. 1. и на рис. 4.

Таблица 1. Результаты расчета числа теоретических тарелок.

Коэффициент использования азота K_{N_2}	Концентрация воды в углеводородном горючем $x_{\text{к}}$ на выходе из колонны, ppm					
	6	5	4	3	2	1
0,99	19,3	22,0	25,8	31,4	41,0	62,3
0,95	11,1	12,4	14,1	16,5	20,4	28,1
0,9	8,3	9,1	10,2	11,7	14,0	18,6
0,8	5,8	6,3	7,0	7,9	9,2	11,6
0,7	4,6	5,0	5,4	6,1	7,0	8,6
0,6	3,9	4,1	4,5	4,9	5,6	6,8
0,5	3,3	3,5	3,8	4,1	4,6	5,5
0,4	2,9	3,0	3,2	3,5	3,9	4,6
0,3	2,5	2,6	2,8	3,0	3,3	3,9
0,2	2,2	2,3	2,4	2,6	2,8	3,2
0,1	1,9	1,9	2,0	2,1	2,3	2,6

Число теоретических тарелок

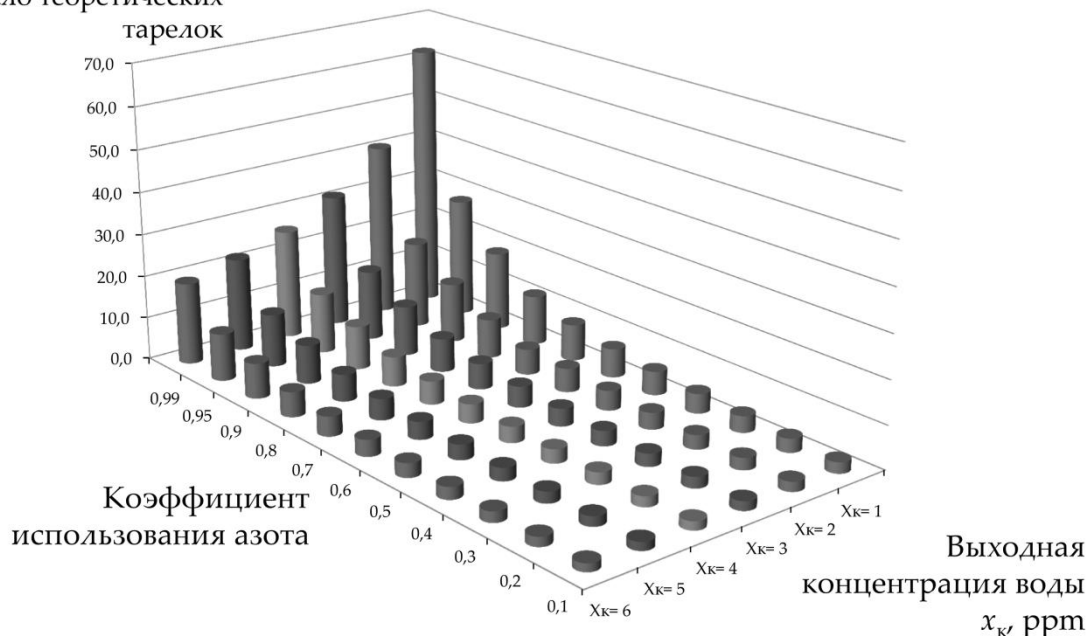


Рис. 4. Зависимость числа теоретических тарелок от требуемой выходной концентрации воды в углеводородном горючем и от коэффициента использования азота.

Представленные выше результаты относятся к бесконечно эффективным теоретическим тарелкам, слой жидкости на которых должен иметь бесконечную толщину. Для определения реальных размеров колонны нужно найти связь между коэффициентом полезного действия реальной тарелки и толщиной слоя жидкости на такой тарелке. Под коэффициентом полезного действия тарелки станем понимать отношение изменения концентрации воды в углеводородном горючем при заданных входных параметрах на действительной тарелке к изменению концентрации воды в углеводородном горючем на идеальной тарелке при тех же входных параметрах.

$$\eta = \frac{x_{\text{кд}} - x_{\text{н}}}{x_{\text{кид}} - x_{\text{н}}},$$

где $x_{\text{кд}}$ – концентрация воды в углеводородном горючем на выходе с реальной тарелки, $x_{\text{кид}}$ – концентрация воды в углеводородном горючем на выходе с идеальной тарелки. Конечная концентрация воды в углеводородном горючем на одной реальной тарелке найдется из (1) как

$$x_{\text{кд}} = x_{\text{н}} - \frac{(y_{\text{к}} - y_{\text{н}})G}{L}$$

Для определения высоты слоя жидкости на тарелке воспользуемся результатами работы []. Текущая масса водяного пара в пузырье азота m в зависимости от текущей концентрации водяного пара в этом пузырье y найдется как

$$m = \frac{V_{\text{п}} P \mu_{N_2} \mu_{H_2O}}{RT \left(\left(\frac{1}{y} - 1 \right) \mu_{H_2O} + \mu_{N_2} \right)}$$

Массовый расход водяного пара в пузырь азота найдется как

$$\dot{m} = A - Bm, \quad (3)$$

где

$$A = \pi d \rho_{\text{к}} S h \cdot D_{\text{м}} C_{\infty}$$

$$B = \frac{6\rho_k Sh D_M R T k_H}{d^2 \mu(\text{H}_2\text{O})}$$

Для толщины слоя жидкости на тарелке, решая (3), получим

$$H = \frac{V_{\Pi}}{B} \ln \frac{A - B m_H}{A - B m_K}$$

Для окончательного определения геометрических размеров колонны необходимо воспользоваться рекомендациями [1, 2, 7] по выбору зазора между зеркалом жидкости на тарелках и дном вышележащей тарелки (0,2...0,4 м) и рекомендациями [7] по допустимой нагрузке на квадратный метр поперечного сечения колонны по жидкости и по газу.

Количество действительных тарелок N_d будет определяться потребным числом теоретических тарелок, полученным по формуле (2) и выбранной толщиной слоя жидкости на тарелке, который определяет КПД тарелки η .

$$N_d = \frac{N}{\eta}$$

4. Пример расчета параметров десорбционной колонны

Приведем результаты расчета колонны со следующими параметрами (расчет толщины слоя жидкости производился для средней тарелки)

Начальная концентрация воды в углеводородном горючем (УВГ) 41,5 ppm

Конечная концентрация воды в УВГ 4ppm

Начальная концентрация воды в азоте 0 ppm

Рабочее давление в колонне 0,1 МПа

Температура подготовки 288 К

Коэффициент использования азота $K=0,7$

Диаметр пузыря $d=0,002\text{м}$

Скорость всплытия пузыря $V_{\Pi}=0,23\text{ м/с}$

Плотность УВГ $\rho_k=833,8\text{ кг/м}^3$

Число Шервуда $Sh=130$

Константа Генри $k_H=1,78 \cdot 10^{-8}\text{ Па}^{-1}$

Коэффициент молекулярной диффузии воды в УВГ $D_M=6,6 \cdot 10^{-10}\text{ м}^2/\text{с}$

Начальная концентрация водяного пара в углеводородном горючем при входе на среднюю тарелку (для расчета толщины слоя жидкости на тарелке) $C_{0\text{H}_2\text{Oк}}=16\text{ppm}$

Начальная концентрация водяного пара в азоте при входе на тарелку $C_{0\text{H}_2\text{O}\text{N}_2}=3\text{‰}$

Шаг отверстий на тарелке колонны $h=0,01\text{ м}$.

Обрабатываемая доза углеводородного горючего $M=8338\text{ кг}$.

При указанных входных данных получены следующие результаты расчета геометрических параметров колонны и параметров массообменного процесса.

Диаметр колонны $D_K=0,6\text{м}$

Число тарелок $N_d=6$

Шаг тарелок по высоте $H_T=0,4\text{м}$

Толщина слоя жидкости на тарелке $H=0,15\text{м}$

Расход жидкости $G=7,4 \cdot 10^{-4}$ кг/с

Время подготовки $t=12$ ч 15 мин

Второй вариант режима работы колонны с такими же геометрическими параметрами – максимально допустимый расход.

Диаметр отверстий в тарелках $d_{\text{отв}}=0,0004$ м

Шаг отверстий 0,005 м

Максимальный расход азота $Q_{N_2}=0,1$ кг/с

Максимальный расход углеводородного горючего $\dot{m}_{\text{УВГ}}=22$ кг/с

Время подготовки дозы $t=6,2$ мин

5. Сравнение эффективности методов обезвоживания углеводородного горючего.

Полезно выполнить сравнение важнейших параметров, характеризующих эффективность массообменного процесса для различных способов подготовки углеводородного горючего по влагосодержанию с использованием газообразного азота. Из работы [5] взяты для сравнения данные по характеристикам процесса обезвоживания методом сброс-пересыщение и методом барботаж в горизонтальной емкости хранилища и сопоставлены с результатами расчета обезвоживания продукта в тарельчатой колонне. Процессы сравниваются по удельным затратам азота (в килограммах азота на один процент массовой концентрации воды в углеводородном горючем на один кубометр подготавливаемого горючего) и удельным затратам времени (в минутах на один процент массовой концентрации воды в углеводородном горючем на один кубометр подготавливаемого горючего).

Результаты сравнения приведены на рис. 5.

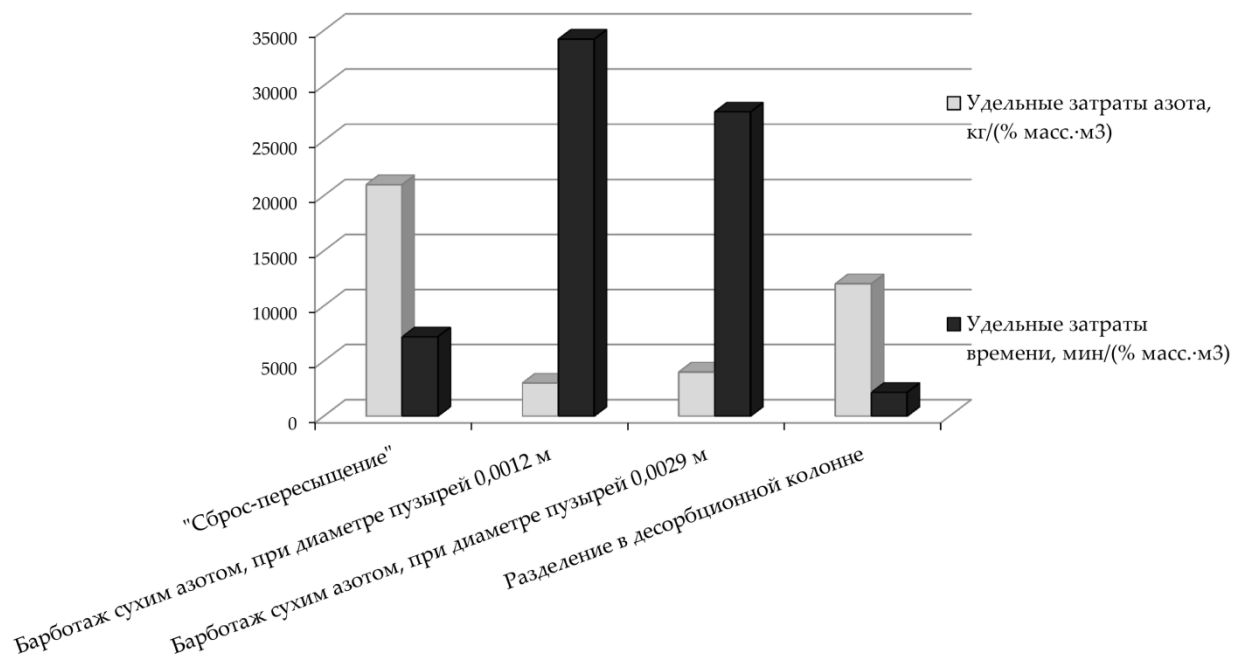


Рис. 5. Удельные характеристики методов обезвоживания углеводородного горючего по затратам азота и времени.

При рассмотрении этого графика следует, однако, обязательно иметь ввиду, что предлагаемая колонна и передвижной агрегат, на котором ее предполагается монтировать представляют собой вновь проектируемое и изготавливаемое оборудование, в то время как технологии сброса-пересыщения и барботажа в емкости хранилища газообразным азотом используют уже имеющееся оборудование заправочной системы.

Заключение

Предложенная десорбционная тарельчатая колонна для обезвоживания углеводородного горючего допускает, согласно приведенным расчетам, использование для подготовки продукта на потоке при загрузке углеводородного горючего в емкости хранения и при выдаче продукта потребителю, достаточно компактна (высота тарельчатой части по результатам расчета 2,4 м, в сборе с верхним и нижним коллекторами колонна по высоте не превысит 3 м) для размещения на шасси грузового автомобиля, обладает высоким коэффициентом использования азота и может быть рекомендована для использования при создании перспективных заправочных систем ракетных комплексов. Приведенные расчетные зависимости допускают, помимо расчета параметров процесса в колонне, оценить по ее геометрическим размерам и расходам жидкой и газовой фаз и в целом затраты на операцию подготовки продукта по влагосодержанию, и, таким образом, оценить целесообразность проведения операции обезвоживания именно с помощью передвижного агрегата с десорбционной колонной в сравнении с вариантом подготовки путем барботажа газообразным азотом в емкости хранилища.

Список литературы

1. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей: Л.: «Химия», 1975. – 320 с.
2. Владимиров А. И., Щелкунов В. А., Круглов С. А. Основные процессы и аппараты нефтегазопереработки. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 227 с.
3. Заправочно-нейтрализационная станция. Разработка и эксплуатация: Учеб. Пособие / О.Е.Денисов, Р.Н.Кузнецов, О.П.Матвеева, Н.А.Морозов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 240 с.: ил.
4. Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования: М.: МО РФ. Учебное пособие, 2003. – 248 с.
5. Сравнительный анализ технологий обезвоживания ракетного топлива с применением азота для наземных комплексов космодромов / А.А.Александров, А.В.Золин, С.В.Кобызов, В.В.Чугунков // Вестник МГТУ им Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение». 2013. №1 сс. 12-22/
6. Гончаров Р.А., Золин А.В., Кобызов С.В., Чугунков В.В. Моделирование тепломассообменных процессов подготовки углеводородного горючего перед заправкой в топливные баки ракеты на стартовом комплексе // Седьмой Международный Аэрокосми-

- ческий Конгресс, Москва, 2012. Тезисы докладов. – М.: Изд. Хоружевский А.И. – 486 с., ил. С. 242-243.
7. Кафаров В.В. Основы массопередачи Учебник для студентов ВУЗов. 3 изд., перераб. и доп. М.: "Высшая школа", 1979. - 439 с.
8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1.-М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1987. – 464 с.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – издание тринадцатое, исправленное. – М.: «Наука», гл. ред. физ-мат. лит., 1986. – 544 с.
10. Кобызев С.В. Методика расчета коэффициентов массоотдачи при осушке углеводородного ракетного топлива // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/245147.html> (дата обращения 24.09.2012).
11. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (5th ed.). Editors: Jacqueline I. Kroschwitz and Arza Seidel. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2004. ISBN 0-471-48810-0.
12. W. McCabe, J. Smith, and P. Harriott. Unit Operations of Chemical Engineering (7th ed.). McGraw Hill, 2004. ISBN 0-07-284823-5.
13. H.Z. Kister. Distillation Design (1st ed.). McGraw-Hill, 1992. ISBN 0-07-034909-6.
14. R. Felder, W. Rousseau. Elementary Principles of Chemical Processes (3rd ed.). Wiley, 2005. ISBN 978-0-471-68757-3.
15. G. Towler and R K Sinnott. Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design. Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 0-7506-8423-2