

Моделирование обезвоживания углеводородного горючего с применением азота при выполнении технологических операций подготовки ракетного топлива на стартовом комплексе

11, ноябрь 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

Эффективность и надежность применения ракет-носителей в значительной мере определяются процессами наземной подготовки компонентов ракетного топлива. Широкое применение в отечественных ракетных комплексах космического назначения, эксплуатируемых и намеченных к эксплуатации с космодромов «Байконур», «Плесецк» и «Восточный», находит углеводородное горючее (УВГ) (комплексы «Союз», «Зенит», «Ангара», разгонный блок «ДМ»)[1, 2].

Предназначенное для заправки в бортовые баки ракет космического назначения углеводородное горючее подвергается на техническом комплексе подготовке по содержанию твердых примесей, по влагосодержанию и содержанию растворенных газов и доводится до требуемой температуры. Операции подготовки производятся во внетехнологическое время последовательно. При приеме продукта из транспортных емкостей производится предварительная очистка от механических примесей, затем в емкостях подготовки производится обезвоживание продукта, рассыщение продукта по содержанию растворенных газов и доведение температуры продукта до заданной. Окончательная очистка от механических примесей производится в процессе выдачи продукта потребителю.

Блок фильтрации продукта при приеме продукта из транспортных емкостей имеет тонкость фильтрации 20 мкм. Прием продукта осуществляется при текущих параметрах температуры воздуха и при влагосодержании продукта в пределах 0,0015...0,015% по массе, что не приводит к образованию кристаллов льда на фильтрах. Фильтры при выполнении операции приема продукта задерживают твердые частицы, содержащиеся в транспортных резервуарах и могут использоваться для снижения концентрации воды в резервуарах хранилища.

Существующие технологии фильтрации (коагулирующие и сепарирующие фильтры) позволяют обеспечить уровень влагосодержания при загрузке продукта в резервуары хранения на уровне 0,00126...0,0015 % по массе. Кроме того, даже осушенное до более низких значений углеводородное горючее приобретает такой же равновесный уровень влагосодержания, когда длительное время хранится в емкостях хранения с герметично закрытыми люками, но открытыми дыхательными клапанами, свободно сообщающимися с атмосферой [3].

При таком уровне влагосодержания продукта выдача его потребителю из резервуара хранения через фильтры с тонкостью фильтрации 5...40 мкм уже при охлаждении до -5°C приводит к быстрому забиванию фильтров кристаллами льда и прекращению операции заправки. Требования по заправке ракет космического назначения могут включать в себя охлаждение продукта до уровня температур -30...-40°C без образования кристаллов льда. Такой температурный уровень при сохранении перекачиваемости продукта может достигаться при влагосодержании углеводородного горючего на уровне 0,0001...0,0004% по массе. Существенно, что указанные параметры влагосодержания относятся к воде, находящейся в УВГ во всех возможных состояниях – как свободная, эмульсионная (свободная в диспергированном состоянии) и растворенная в сумме.

Требуемый уровень влагосодержания не достигается применением фильтров на основе молекулярных сит и силикагеля. Для глубокой осушки УВГ могут быть применены методы, основанные на барботаже объема горючего в емкости подготовки сухим азотом, как в непрерывном режиме, так и в режиме циклического «пересыщения-сброса» [3].

Подготовка продукта по влагосодержанию в существующих и перспективных комплексах наземного оборудования ведется, как правило, в стационарных емкостях подготовки, емкостях хранения либо в емкостях специальных передвижных агрегатов подготовки продукта.

Для проведения операции подготовки по влагосодержанию методом барботаж газобразным азотом существующие емкости подготовки или емкости хранения могут быть дооборудованы барботерами, передвижные агрегаты подготовки могут быть оборудованы вновь спроектированными емкостями подготовки с барботерами с рациональными параметрами. Задача построения эффективного массообменного аппарата как на основе существующих емкостей хранения и емкостей подготовки, так и при проектировании специальных передвижных агрегатов подготовки подразумевает построение адекватных моделей гидродинамических и массообменных процессов в аппаратах подготовки на всех этапах операции подготовки – при загрузке продукта в емкость подготовки (емкость хранения), во время проведения основного этапа технологического процесса подготовки углеводородного горючего по влагосодержанию путем барботаж сухим газобразным азотом, при хранении продукта в емкости, при выдаче продукта потребителю.

1. Формирование замкнутой математической модели.

Среди частных математических моделей, составляющих комплексную замкнутую математическую модель массообменного процесса, позволяющую провести синтез оптимальных аппаратов подготовки УВГ по влагосодержанию, можно выделить следующие модели [4].

1. Гидродинамические модели.

1.1 Модель образования газовой фазы на отверстиях барботажного аппарата.

1.2 Модель движения двухфазной смеси в рабочем объеме аппарата подготовки. Примеры построения таких вычислительных моделей приведены в [9, 11, 12, 14], результаты экспериментов по определению параметров движения двухфазных смесей в барботажных аппаратах приведены в [13, 14].

1.3 Модель взаимодействия двухфазной смеси с газовой фазой на зеркале жидкости в рабочем объеме аппарата подготовки.

1.4 Модель движения газовой фазы в газовой подушке аппарата подготовки.

2. Модели процессов массопереноса:

2.1 Модель массопереноса в изолированный газовый пузырь, движущийся в пределах рабочего объема аппарата подготовки.

2.2 Модель массопереноса между жидкой и дисперсной газовой фазами в полном рабочем объеме аппарата подготовки.

2.3 Модель массопереноса на поверхности фазового контакта на зеркале жидкости аппарата подготовки.

2.4 Модель массопереноса при выходе дисперсной газовой фазы (пузырей азота) из жидкой фазы в газовую подушку емкости.

В данной работе приводятся результаты построения моделей массопереноса в изолированный газовый пузырь, движущийся в потоке жидкости с известными параметрами движения, модель массопереноса примеси между жидкой фазой и дисперсной газовой фазой в целом в рабочем объеме аппарата подготовки, модель массопереноса на поверхности раздела фаз для спокойной поверхности и с учетом выхода дисперсной газовой фазы в газовую подушку.

2. Модели массопереноса

Раскроем подробно построенные математические модели процессов массопереноса (2.1...2.4), допускающие построение замкнутой методики аналитического расчета параметров массообменного аппарата при известной гидродинамике процесса.

В данной работе введено сопряжение модели массопереноса с результатами гидродинамического расчета или эксперимента по сравнению с моделью, приведенной в [3], путем введения индивидуального времени всплытия для пузыря, учитывающего различное время взаимодействия дисперсной газообразной фазы и жидкой фазы по объему массообменного аппарата. Учетом индивидуального характера массопередачи пузырей по объему

аппарата предлагаемая модель отличается от модели, построенной в [10]. Гидродинамическая обстановка в аппарате при проведении расчета процесса массопереноса считается известной и может быть определена расчетным [9, 11, 12, 14] или экспериментальным путем [13, 14].

Для составления модели массопереноса в изолированный газовый пузырь считается справедливым закон Генри для водяного пара – прямая пропорциональная зависимость между парциальным давлением водяного пара во всплывающем пузыре и концентрацией воды в жидкой фазе УВГ вблизи стенки пузыря [5, 6]

$$C_{\text{ст}} = k_H P_{H_2O}, \quad (1)$$

где k_H – константа Генри, Па^{-1} , P_{H_2O} – парциальное давление паров воды в газовой фазе (пузыре), Па , $C_{\text{ст}}$ – массовая концентрация растворенной в углеводородном горючем воды вблизи стенки пузыря.

Определяющим для скорости протекания массообменного процесса жидкая фаза УВГ – дисперсная газовая фаза будет сопротивлению диффузионного пограничного слоя со стороны жидкой фазы.

Безразмерный коэффициент массоотдачи по парам воды (число Шервуда Sh), согласно рекомендациям [6, 7] может быть принят в виде

$$Sh = 2 + (0,55 \dots 0,7) Re^{1/2} Sc^{1/3}, \quad (2)$$

где Re , Sc – числа Рейнольдса и Шмидта для пузыря. Доступны также работы, указывающие на пути численного расчета безразмерного коэффициента массоотдачи [15].

При определенном безразмерном коэффициенте массоотдачи Sh паров воды к поверхности пузыря удельный поток паров воды от точек жидкой фазы на бесконечности к слою жидкой фазы непосредственно у поверхности раздела фаз может быть определен как

$$J_{H_2O} = \rho_k \beta (C_{\infty} - C_{\text{ст}}) = \frac{\rho_k \cdot Sh \cdot D_M}{d_n} (C_{\infty} - C_{\text{ст}}) \quad (3)$$

где β – размерный коэффициент массоотдачи, Sh – безразмерный коэффициент массоотдачи, D_M – коэффициент молекулярной диффузии воды в керосине, C_{∞} – концентрация воды на удалении от пузыря, $C_{\text{ст}}$ – концентрация воды в УВГ у поверхности раздела фаз, определяемая по закону Генри (1), ρ_k – плотность УВГ, d_n – диаметр пузыря.

Тогда для массового расхода водяного пара в единичный пузырь получаем из (3):

$$\dot{m}_{H_2O} = \pi d_n \cdot \rho_k \cdot Sh \cdot D_M (C_{\infty} - C_{\text{ст}}). \quad (4)$$

Изменением концентрации растворенной воды в основном объеме УВГ вне диффузионных пограничных слоев пренебрегаем.

Значение парциального давления паров воды в всплывающем пузыре определяем по накопленной пузырем за время всплытия массе водяного пара

$$P_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{v_n \mu_{H_2O}} RT, \quad (5)$$

где m_{H_2O} – накопленная пузырем масса воды, v_n – объем пузыря, μ_{H_2O} – молекулярная масса водяного пара, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура.

Подставляя (5) и (1) в (4) получаем для массового потока водяного пара $\dot{m}_{H_2O}$ в пузырь уравнение [8]

$$\dot{m}_{H_2O} = \pi d_{\pi} \cdot \rho_k \cdot Sh \cdot D_M \left(C_{\infty} - \frac{m_{H_2O}}{v_{\pi} \mu_{H_2O}} RT k_H \right) \quad (6)$$

с граничным условием (при образовании пузыря на отверстии барботера пары воды в азоте не содержатся).

$$m_{H_2O}|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

Решением уравнения (6) при граничном условии (7) будет

$$m_{H_2O} = \frac{\pi C_{\infty} d_{\pi}^3 \mu_{H_2O}}{6RT k_H} \exp \left(-6\rho_k Sh \cdot D_M \frac{RT k_H}{d_{\pi}^2 \mu_{H_2O}} t \right) + \frac{\pi C_{\infty} d_{\pi}^3 \mu_{H_2O}}{6RT k_H}, \quad (8)$$

где t – время всплытия пузыря.

Общий поток отделяемых от УВГ паров складывается в каждый момент времени из элементарных потоков водяных паров в каждый всплывающий пузырь, причем в пределах рабочего объема аппарата подготовки в различных зонах кажущаяся скорость всплытия пузырей, и, соответственно, их время пребывания в пределах рабочего объема барботажного аппарата отличается.

При известном распределении потоков водяных паров в каждый пузырь и известном общем числе пузырей имеем суммарный массовый поток паров воды из жидкой в дисперсную газовую фазу.

$$\dot{m}_{\Sigma} = - \sum_{i=1}^{N_{\pi}} \overline{\dot{m}_{H_2O_i}} \quad (9)$$

(поток из газовой фазы внутрь пузыря считается положительным, при этом суммарный поток из жидкой фазы в дисперсную газовую отрицателен). $\overline{\dot{m}_{H_2O_i}}$ – средний за время всплытия данного пузыря поток паров в данный пузырь.

При полном перемешивании растворенной и эмульсионной воды в жидкой фазе для концентрации водяного пара на удалении от пузырей получаем

$$C_{\infty} = \frac{m_{\Sigma}}{v_k \rho_k}, \quad (10)$$

где m_{Σ} – суммарная масса воды, растворенная или содержащаяся в виде эмульсии в емкости подготовки, v_k – объем УВГ в емкости подготовки.

причем уравнение (6) может быть переписано в виде

$$m_{H_2O} = \frac{\pi d_{\pi}^3 \mu_{H_2O}}{6RT k_H} \frac{m_{\Sigma}}{v_k \rho_k} \exp \left(-6\rho_k Sh \cdot D_M \frac{RT k_H}{d_{\pi}^2 \mu_{H_2O}} t \right) + \frac{\pi d_{\pi}^3 \mu_{H_2O}}{6RT k_H} \frac{m_{\Sigma}}{v_k \rho_k}, \quad (11)$$

или

$$m_{H_2O} = \frac{m_{\Sigma}}{v_k \rho_k} \left(\frac{\pi d_{\pi}^3 \mu_{H_2O}}{6RT k_H} \exp \left(-6\rho_k Sh \cdot D_M \frac{RT k_H}{d_{\pi}^2 \mu_{H_2O}} t \right) + \frac{\pi d_{\pi}^3 \mu_{H_2O}}{6RT k_H} \right), \quad (12)$$

При известном текущем потоке водяного пара и известном исходном, на начало операции подготовки, количестве растворенной и эмульсионной воды в жидкой фазе рабочей области аппарата подготовки

$$m_{0\Sigma} = v_k \rho_k C_{\infty 0}, \quad (13)$$

получаем для текущего количества воды в жидкой фазе УВГ

$$\dot{m}_\Sigma = E m_\Sigma \quad (14)$$

где
$$E = \frac{1}{v_k \rho_k} \sum_{i=1}^{N_\Pi} n_i \left(\frac{\pi d d^2 \mu_{H_2O}}{6 R T k_H} \exp \left(-6 \rho_k Sh \cdot D_M \frac{R T k_H}{d^2 \mu_{H_2O}} \Delta t_i \right) + \frac{\pi d d^2 \mu_{H_2O}}{6 R T k_H} \right), \quad (15)$$

где Δt_i – время всплытия i -го пузыря.

Решением уравнения (14) с граничным условием (13) будет для общей массы отделенной от УВГ воды за время подготовки

$$m_\Sigma = v_k \rho_k C_{\infty 0} \cdot \exp(-E t_\Pi), \quad (16)$$

где t_Π – время подготовки.

3. Моделирование процесса обратного насыщения

Выше приведенные уравнения (7, 8, 14-16), описывая динамику массовой концентрации воды, во всех формах содержащейся в жидкой фазе УВГ, учитывают только взаимодействие жидкой и дисперсной газовой фазы. Производимые в соответствии с этой моделью расчеты дают хорошее приближение экспериментальных данных на начальном этапе отделения воды [3], но не описывают наблюдающееся на практике явление прекращения изменения влагосодержания УВГ через некоторое время после начала подготовки. В имеющихся источниках также описаны случаи, когда после процесса барботажа в течение нескольких часов влагосодержаниеготавливаемого продукта оставалось неизменным. Описаны также экспериментальные данные по зафиксированному уменьшению влагосодержания продукта при продолжительном хранении в емкости без барботажа, но под небольшим избыточным давлением сухого азота в газовой подушке [3].

Эти данные позволяют считать существенным для полного описания массообменного процесса в емкости подготовки учет массообмена по поверхности раздела фаз при наличии движения жидкости вдоль этой поверхности, вызываемого процессом барботажа или вызываемого естественной конвекцией, а также при выдаче продукта из емкости подготовки в емкость хранилища или потребителю. Представляется необходимым также учесть изменения в строении диффузионного пограничного слоя на поверхности, вызываемого всплытием и раскрытием на поверхности пузырей при барботаже.

В результате выхода дисперсной газовой фазы (пузырей) на поверхность жидкости в емкости подготовки возникает обогащение приповерхностного слоя газовой фазы парами воды пузырями, насыщенными после всплытия и массообмена в объеме жидкой фазы. Следует учесть, что при проведении операций барботажа и при естественной конвекции в емкости подготовки формируются как восходящие, так и нисходящие потоки жидкости, которые переносят насыщенный в результате межфазного взаимодействия обогащенный парами воды слой жидкости обратно в толщу жидкой фазы. Интенсивность межфазного взаимодействия растет с увеличением концентрации водяного пара в приповерхностном

слое, с увеличением скорости приповерхностного слоя и дополнительно увеличивается в результате самого процесса раскрытия пузырей на поверхности.

Для моделирования процесса массообмена на поверхности раздела фаз в емкости воспользуемся моделью горизонтальной цилиндрической емкости подготовки с прямоугольной областью раздела фаз (рис. 1).

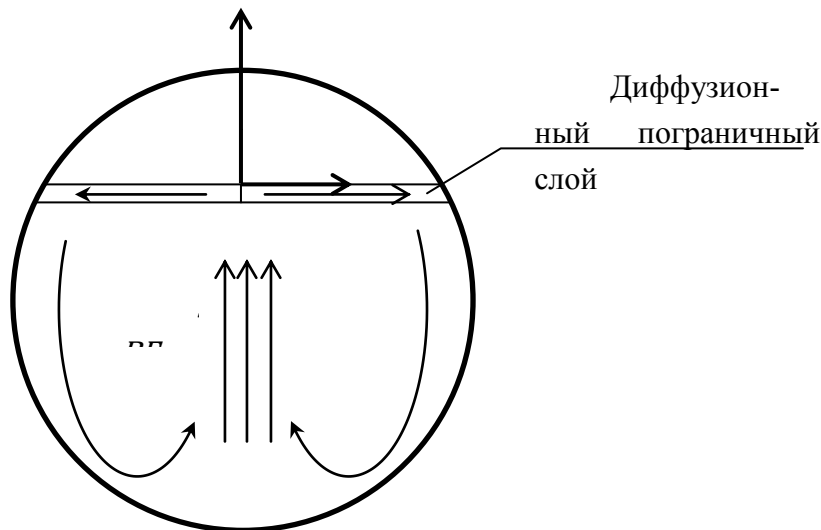


Рис 1. Механизм процесса обратного насыщения.

Интенсивность взаимодействия газовой и жидкой фазы в данном случае, так же как и в случае со всплытием пузыря, лимитируется диффузией в приповерхностном слое жидкости и описывается уравнением для концентрации водяного пара в жидкой фазе

$$V_x \frac{\partial C}{\partial x} = D_M \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (17)$$

с граничными условиями

$$C|_{y=0} = C_0, \forall x, \quad (18)$$

причем C_0 (концентрация воды в приповерхностном слое жидкости) определяется из уравнения Генри как $C_0 = k_H P_{H_2O}$, где P_{H_2O} – парциальное давление паров воды в паровом пространстве емкости подготовки вблизи поверхности раздела фаз.

В основном объеме жидкости:

$$C|_{y=\infty} = C_\infty, \forall x, \quad (19)$$

$$C|_{x=0} = C_\infty, \forall y \quad (20)$$

Эти граничные условия подразумевают, что восходящий поток жидкой фазы, образующийся за счет увлечения центральной части жидкости в аппарате подготовки пузырями в движение, в момент выхода на поверхность имеет среднюю по жидкой фазе концентрацию водяного пара.

Из решения уравнения (17) получим полный поток обратного насыщения для всей поверхности раздела фаз [5]

$$J = -2\sqrt{2}L\rho_k(C_0 - C_\infty) \sqrt{\frac{D_M V_x d}{\pi}}, \quad (21)$$

где d – ширина зеркала жидкости и L – длина зеркала жидкости в емкости подготовки, V_x – скорость движения приповерхностного слоя жидкости в направлении от центра к периферии емкости подготовки.

Такого рода движение возможно как при наличии барботажа, так и при естественной конвекции в емкости из-за суточного хода температуры. Полученная зависимость (21) подразумевает, что при движении приповерхностного слоя жидкости этот слой дополнительным воздействиям не подвергается. В связи с этим на этом слое растет сопротивление диффузионному потоку в результате роста диффузионного пограничного слоя. Такую модель можно считать адекватной при обратном насыщении при длительном хранении с открытым газосбросом. В случае барботажа всплывающие пузыри разрывают образовавшийся диффузионный пограничный слой в месте всплытия, образуя пятно, на котором процесс обратного насыщения начинается снова.

Проведем оценку влияния раскрывающихся на поверхности раздела фаз пузырей на интенсивность процесса обратного насыщения УВГ при проведении процесса подготовки методом барботажа газообразным азотом. Для начала оценим средний путь, проходимый пятном, образующимся при раскрытии всплывшего пузыря. Примем форму емкости подготовки горизонтальной цилиндрической (рис. 1). В случае, если пузырь всплывает точно по оси емкости, его путь составит точно $d/2$, где d – ширина поверхности раздела фаз в емкости, и влияния на процесс обратного насыщения такой пузырь не окажет – формирование диффузионного пограничного слоя в нем начнется с центра поверхности раздела фаз, как и для невозмущенного зеркала жидкости. В случае, когда пузырь всплывает вблизи стенки емкости, созданное им пятно также проходит нулевой путь и на процесс обратного насыщения не влияет.

Средний путь, проходимый пятнами выхода пузырей на поверхность от точки всплытия до стенки емкости определяется распределением газонасыщения, которое складывается в результате развития гидродинамической обстановки в емкости в приповерхностном слое.

В случае с равномерным распределением отверстий барботера (для цилиндрической емкости близкое к такому распределение будет возникать при наличии хотя бы двух труб барботёра) характерный вид кривой газонасыщения [9] - парабола с максимумом вблизи середины поверхности раздела фаз (1 на рис. 2). В случае одного линейного барботера, расположенного по оси емкости подготовки, и небольшой относительной глубине (порядка ширины емкости подготовки) слоя жидкости из данных, приведенных в [9] можно ожидать колоколообразной формы кривой распределения газонасыщения. (2 на рис. 2)

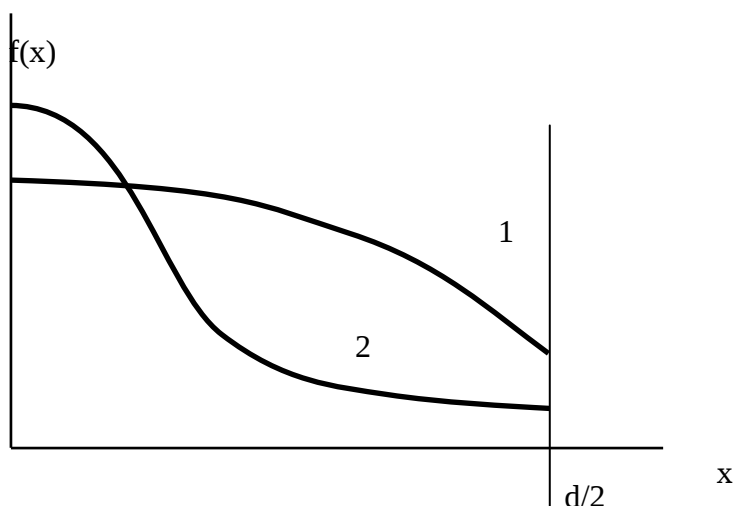


Рис. 2. Виды кривых распределения газосодержания.

Средняя длина пробега пятна l_{cp} , образуемого пузырем на поверхности раздела фаз составит

$$l_{cp} = \frac{\int_0^{d/2} (d/2 - x) f(x) dx}{\int_0^{d/2} f(x) dx} \quad (22)$$

где $d/2$ – полуширина поверхности раздела фаз, $f(x)$ – зависимость объемного газонасыщения в приповерхностном слое УВГ от координаты x .

Для различных форм кривых газонасыщения, приведенных в [9] интегрирование по формуле (22) дает значения l_{cp} от 0,3 до 0,45 от $d/2$.

Число пузырей, пересекающих поверхность раздела фаз в единицу времени, составит

$$n_{\pi} = \frac{Q}{V_{\pi}} \quad (23)$$

где V_{π} – объем одиночного пузыря у поверхности, Q – объемный расход газа подготовки.

Каждое из пятен, порождаемое пузырями, находится на поверхности t_1 секунд, проходя при этом l_{cp} метров. Скорость движения пятна совпадает со скоростью движения

приповерхностного слоя жидкости. Таким образом, на поверхности раздела фаз одновременно находятся пятна, порожденные всплывшими пузырями общей площадью

$$S_{\text{п}\Sigma} = 2n_{\text{п}}S_{\text{п1}}t_1, \quad (24)$$

где $S_{\text{п1}}$ – площадь пятна одиночного пузыря, принимаемая за $S_{\text{п1}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4}$, t_1 – время пребывания пятна пузыря на поверхности, $t_1 = \frac{l_{\text{cp}}}{V_x}$ (25)

С учетом (25) уравнение (24) принимает вид

$$S_{\text{п}\Sigma} = \frac{2n_{\text{п}}S_{\text{п1}}l_{\text{cp}}}{V_x}, \quad (26)$$

Таким образом, процесс обратного насыщения по формуле (21) должен рассчитываться с параметрами V_x , d для площади

$$S_0 = Ld - S_{\text{п}\Sigma} \quad (27)$$

и с параметрами V_x , l_{cp} для площади $S_{\text{п}\Sigma}$. В данном случае при расчете принимается, что повторного попадания нового пузыря в движущееся пятно, сформированное предшествующим пузырем, не происходит. Такое предположение справедливо в том случае, когда барботаж ведется с умеренным расходом газа и малым диаметром пузырей. Можно сказать, что в данной модели расчет обратного насыщения ведется в условной емкости, поверхность раздела фаз которой вместо одного прямоугольника $S_{00} = Ld$ имеет две прямоугольных области: $S_0 = L_0d$ и $S_{\text{п}\Sigma} = 2L_1l_{\text{cp}}$, причем

$$L_0 = \frac{Ld - S_{\text{п}\Sigma}}{d}, \quad L_1 = \frac{n_{\text{п}}S_{\text{п1}}}{V_x} \quad (28)$$

В результате расчет потока обратного насыщения ведем в соответствии с формулой (21) для двух областей – не занятых и занятых пятнами всплывших пузырей и имеющих вышеприведенные (28) параметры.

$$J_0 = -2\sqrt{2}L_0\rho_{\text{к}}(C_0 - C_{\infty})\sqrt{\frac{D_{\text{М}}V_x d}{\pi}} \quad (29)$$

$$J_1 = -4L_1\rho_{\text{к}}(C_0 - C_{\infty})\sqrt{\frac{D_{\text{М}}V_x l_{\text{cp}}}{\pi}} \quad (30)$$

В предельном случае, когда вся поверхность раздела фаз полностью покрывается пятнами всплывших пузырей, имеем $J_0 = 0$, а

$$J_1 = -2Ld\rho_{\text{к}}(C_0 - C_{\infty})\sqrt{\frac{D_{\text{М}}V_x}{\pi l_{\text{cp}}}}, \quad (31)$$

Важно оценить вклад, вносимый пятнами всплывших пузырей на процесс обратной конденсации в этом предельном режиме. Обозначим относительную длину пробега пятна по поверхности раздела фаз $\zeta = \frac{2l_{\text{cp}}}{d}$ Тогда из (21, 31) получаем увеличение потока обратного насыщения равным

$$\frac{J_{1max}}{J} = \frac{1}{\sqrt{\xi}} \quad (32)$$

Соотношение (32) дает для различных профилей газосодержания увеличение потока обратного насыщения по сравнению с потоком, рассчитанным для невозмущенной поверхности в пределах от 50 до 83%.

Заключение

Рассмотренная в настоящей статье комплексная математическая модель массообменных процессов в аппаратах подготовки углеводородных горючих по влагосодержанию подробно разработана в части процесса взаимодействия дисперсной газовой фазы с основным объемом жидкой фазы, включая элементы сопряжения с гидродинамическими моделями или результатами экспериментов по исследованию гидродинамической обстановки в массообменных аппаратах и в части взаимодействия газовой и жидкой фазы по плоской межфазной границе, включая оценку влияния процесса обратного насыщения, в том числе с учетом раскрытия пузырей на поверхности. Показано, что именно процесс обратного насыщения оказывается лимитирующим процессом для операции обезвоживания углеводородного горючего и не дает возможности достигнуть в практических применениях уровня газосодержания УВГ менее 0,0002% масс. без применения дополнительных мер. Приведенная в настоящей работе методика оценки скорости процесса обратного насыщения позволяет объяснить снижение эффективности технологического процесса обезвоживания углеводородного горючего при малых значениях влагосодержания и указать пути преодоления такого снижения. Для дальнейшей интенсификации процесса массопередачи и для достижения низких значений газосодержания следует осуществлять при выполнении барботажа дополнительную продувку газовой подушки емкости газообразным азотом, хранение подготовленного продукта производить с закрытым газосбросом под избыточным давлением азота и проводить предварительную подготовку сухим азотом всех используемых емкостей и трубопроводов.

Список литературы

1. 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.
2. Хлыбов В.Ф. Основы устройства и эксплуатации заправочного оборудования: -М.: МО РФ. Учебное пособие, 2003. 248 с.
3. А.А.Александров, А.В.Золин, С.В.Кобызев, В.В.Чугунков. Сравнительный анализ технологий обезвоживания ракетного топлива с применением азота для наземных комплексов космодромов // Вестник МГТУ им Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение». 2013. №1 с. 12-22.

4. 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 Аэрокосмический Конгресс, Москва, 2012. Тезисы докладов. – М.: Изд. Хоружевский А.И. – 486 с., ил. с. 242-243.
5. Кафаров В.В. Основы массопередачи Учебник для студентов ВУЗов. 3 изд., перераб. и доп. М.: "Высшая школа", 1979. 439 с.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1.-М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1987. 464 с.
7. 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.
8. Кобызов 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).
9. M.T. Dhotre, K. Ekambara, J.B. Joshi. CFD simulation of sparger design and height to diameter ratio on gas hold-up profiles in bubble column reactors // Experimental Thermal and Fluid Science 28 (2004) p. 407-421.
10. Sorenson, Kristan L., Comparative Studies on Oxygen Mass Transfer for the Design and Development of a Single-Use Fermentor (2010) // All Graduate Theses and Dissertations. Paper 738. <http://digitalcommons.usu.edu/etd/738>.
11. Masood R.M.A., Rauh C., Delgado A. CFD simulation of bubble column flows: An Explicit Algebraic Reynolds Stress Model approach // International Journal of Multiphase Flow (Impact Factor: 1.72). 11/2014; DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2014.06.008.
12. Zhang D., Deen N.G., Kuipers J.A.M. Numerical Simulation of Dynamic Flow Behaviour in a Bubble Column: Comparison of the Bubble-Induced Turbulence Models in the k- ϵ Model // Fourth International Conference on CFD in the Oil and Gas, Metallurgical & Process Industries SINTEF / NTNU Trondheim, Norway. 6-8 June 2005.
13. Stöhr M., Schanze J., Khalili A. Visualization of gas-liquid mass transfer and wake structure of rising bubbles using pH-sensitive PLIF // Exp Fluids (2009) 47:135–143; DOI 10.1007/s00348-009-0633-6.
14. Deen N. An Experimental and Computational Study of Fluid Dynamics in Gas-Liquid Chemical Reactors: Ph.D. thesis, Aalborg University Esbjerg, 2001.
15. Darmana D., Dijkhuizen D., Deen N.G., Sint Annaland, M., Kuipers J.A.M. Detailed 3D Modelling of Mass Transfer Processes in Two Phase Flows with Dynamic Interfaces. // 6th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2007, July 9-13, 2007, Leipzig, Germany.