

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА В ТОПЛИВНЫХ БАКАХ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ ТЯЖЁЛОГО КЛАССА ВО ВРЕМЯ ХРАНЕНИЯ И АВИАЦИОННОГО ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ

©2009 В. М. Бронштейн, Е. К. Красночуб, А. А. Маркин

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Приведены результаты экспериментальных исследований влажностного режима в топливных баках ракет-носителей тяжёлого класса для обеспечения противокоррозионной защиты во время хранения и авиационного транспортирования.

Топливный бак ракеты-носителя, коррозия, противокоррозионная защита, авиатранспортирование, влагосодержание, наддув, осушка влажного воздуха

При разработке ракет-носителей (РН) тяжёлого класса могут быть предусмотрены транспортные операции по доставке топливных баков и отсеков больших габаритов на внешней подвеске самолёта-носителя с заводов-изготовителей на техническую позицию эксплуатирующей организации. Авиационное транспортирование крупногабаритных блоков в виде отдельных авиагрузов с помощью самолёта-носителя ВМ-Т «Атлант» (диаметр груза превышает диаметр фюзеляжа самолёта-носителя примерно в два с половиной раза) впервые было осуществлено в технологии сборки РН «Энергия» (рис. 1).



Рис. 1. Авиационное транспортирование топливного бака РН «Энергия»

Одной из важнейших задач при этом является защита от влажностной коррозии внутренних поверхностей бака и размещенных в нем трубопроводов и устройств. Технические, технологические и эксплуатационные требования к готовым изделиям предусматривают наземное хране-

ние баков вне монтажно-испытательного корпуса (МИК) и транспортировку их на фюзеляже самолёта-носителя. Во время авиатранспортирования возможна конденсация влаги внутри баков и трубопроводов, если температура в баке окажется ниже температуры точки росы. В баке ёмкостью 1500 м³ из влажного воздуха, находящегося в баке перед полетом при давлении 0,2 МПа и температуре +25 °С, при охлаждении может выделиться до 70 кг воды. При заправке топливных баков криогенными компонентами сконденсировавшаяся влага кристаллизуется, и это может привести к аварийной ситуации.

В соответствии с требованиями ГОСТ [1] по межоперационной защите изделий при хранении и транспортировании в баках должна быть создана защитная атмосфера инертным газом или осушенным воздухом.

При подготовке к авиатранспортированию предварительный наддув бака до номинального давления 0,08 МПа осуществляется в цехе завода-изготовителя при температуре окружающей среды от 8 до 35 °С.

Наддув бака производится сухим воздухом (СВ) с точкой росы минус 70 °С, при этом влажность воздушной среды в баке должна быть не выше минус 50 °С на момент окончания наддува.

Вывоз бака на аэродром, погрузка его на самолёт-носитель, предполётное обслуживание самолета и авиагруза производятся в условиях окружающей среды при температуре от минус 40 до 50 °С и давлении от 0,105 до 0,083 МПа. Сроки хранения

изделия на борту самолёта-носителя могут достигать нескольких суток, а изменение температуры атмосферного воздуха даже в течение суток может быть значительным. Контроль давления в баке проводится за два часа до взлета. В случае снижения давления в баке ниже номинального проводится дополнительный наддув бака СВ с точкой росы не более минус 70 °С от передвижной компрессорной станции. Если давление в баке становится выше номинального, производится стравливание газа из бака до номинального значения. Для авиатранспортирования предусмотрена ампульная заправка воздухом бака. Дополнительный наддув или стравливание воздуха из бака в полете не проводятся.

Во время авиатранспортирования прочностная устойчивость тонкостенного бака требует обеспечения избыточного давления воздуха в заданном диапазоне от 0,03 до 0,14 МПа. Расчет давления наддува бака во время подготовки к полету проводится с учетом изменения атмосферного давления по высоте полета. Оно не должно превысить максимального допустимого эксплуатационного давления с необходимым коэффициентом безопасности 1,5. За время полёта избыточное давление воздуха из-за его охлаждения и негерметичности конструкции понижается. Для исключения потери устойчивости оболочки бака при посадке самолета-носителя давление воздуха в баке не должно быть ниже минимального допустимого эксплуатационного давления. Предварительная глубокая осушка воздуха при подготовке к полёту должна обеспечивать значение относительной влажности воздуха в баке при точке росы менее минус 50 °С.

После доставки авиагруза на техническую позицию эксплуатирующей организации в МИК работа с баком проводится после достижения температуры воздуха в баке значения температуры окружающей среды.

Целью этой работы является выдача рекомендаций для разработки методики обеспечения необходимой влажности и давления во внутренних полостях топливных баков РН тяжёлого класса для межоперационной защиты их при хранении и авиационном транспортировании.

Было проведено экспериментальное исследование процессов наддува и продувки модельного бака сухим воздухом для обеспечения требуемого влажностного режима в штатных топливных баках.

Моделирование процесса изменения влагосодержания в топливных баках емкостью свыше 500 м³ проводилось на экспериментальной установке (ЭУ), в которой в качестве объекта испытаний был использован бак ёмкостью 40 м³ [2]. На рис. 2 представлена схема ЭУ.

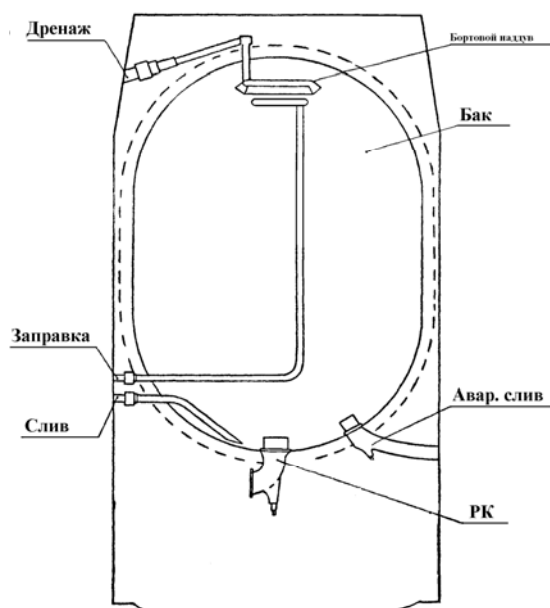


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Эффективный диаметр проходного сечения в магистрали «Дренаж» составлял 110 мм, в магистрали «Заправка» – 60 мм, в магистрали «Слив» – 60 мм, в магистрали «Авар. слив» – 80 мм, в магистрали «РК» – 100 мм; в магистрали «Бортовой наддув» устанавливались сменные дроссельные шайбы для замера расхода воздуха на наддув. На рис. 3 показаны схемы размещения 16 телеметрических датчиков температуры и трех датчиков влажности влагомеров «Волна-2». Датчики влажности *2 и *3 были установлены внутри бака на верхнем и нижнем днищах соответственно. Датчик влажности *1 находился снаружи установки для измерения относительной влажности окружающей среды. Замер температуры точки росы внутри бака проводился автоматическим фотоэлектронным индикатором влажности 8Ш31.

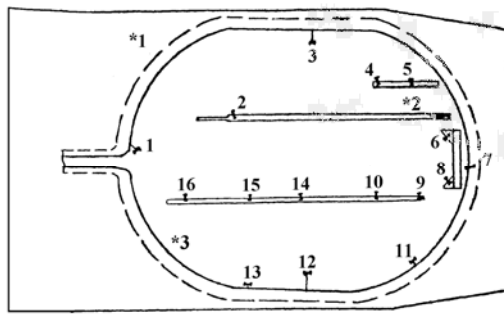


Рис. 3. Размещение датчиков температуры и влажности на ЭУ:

1-16 – порядковые номера датчиков температуры;
*1 - *3 - датчики влажности

Эксперименты проводились при горизонтальном и вертикальном положениях установки.

Определение изменения влагосодержания воздуха внутри бака, сообщенного с атмосферой заключалось в следующем. Экспериментально исследовалось открытие бака, когда температура газа в баке была ниже температуры окружающей среды в МИК. Такие случаи могут быть после транспортировки РН в холодное время года или после проведения продувок и наддувов топливных баков.

Перед проведением каждого эксперимента бак продувался до достижения относительной влажности воздуха в нем не более 2 %. В процессе экспериментов фиксировались изменения относительной влажности в баке и окружающей среды в МИК.

Во время проведения экспериментальных работ температура воздуха в МИК по высоте была не одинакова. Температура воздуха под установкой была 25,6°С, над установкой на высоте 4,5 м - 27,4°С.

Открытие бака и сообщение его внутренней полости с окружающей средой осуществлялось открытием клапанов в магистралях «Дренаж», «Заправка», «Слив» и «Авар. слив». Атмосферная влага проникала в бак и увеличивала его влагосодержание. При открытии клапанов, расположенных на разной высоте, происходила интенсивная вентиляция бака и значительное повышение влажности (рис. 4).

Если бак прогрет до температуры окружающей среды и проводится открытие клапанов, расположенных на одной высоте бака, то чем больше площади проходных сечений клапанов, тем интенсивнее увеличивается влажность воздуха внутри бака.

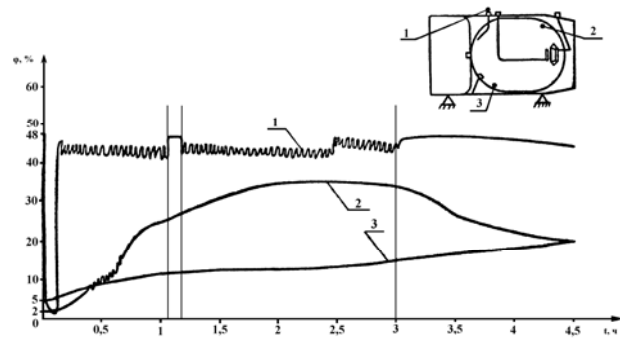


Рис. 4. Выдержка бака с открытыми магистралями «Дренаж», «Заправка», «Слив», «Авар. слив»:

φ – относительная влажность, %; 1 – график изменения относительной влажности в сечении окружающей среда-ёмкость по датчику *1; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 3 – график изменения относительной влажности по датчику *3

В случае сообщения внутренней полости бака с внешней средой через магистраль «РК» граница влажности между средами устанавливается в этой магистрали. При достаточной длине магистрали увеличение влагосодержания в баке изменяется достаточно медленно (рис. 5). В течение первого часа изменение относительной влажности воздуха в баке не наблюдалось.

Это позволяет при наземных испытаниях РН проводить кратковременное открытие баков в течение 0,5...1,0 часа для присоединения к топливному баку испытательных или технологических средств.

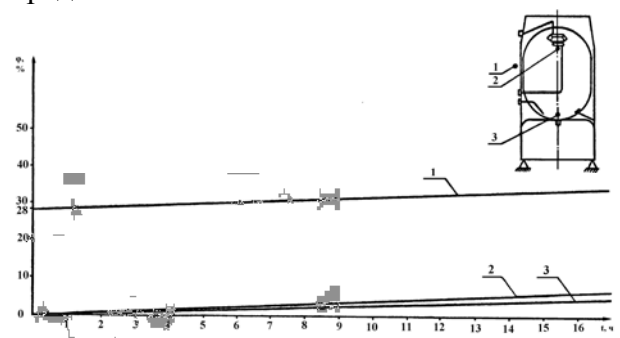


Рис. 5. Выдержка бака с открытой магистралью «РК»:

1 – график изменения относительной влажности окружающей среды по датчику *1; 2 - график изменения относительной влажности по датчику *2; 3 - график изменения относительной влажности по датчику *3

Определение факта конденсации влаги в баке при наддуве и продувках

Целью данного экспериментального исследования является определение возможности конденсации влаги при продувках бака.

Перед началом эксперимента в баке создавалась относительная влажность воздуха 50...70 % при температуре 20°C. Затем проводилась продувка бака СВ по магистрали «Бортовой наддув» до достижения в баке относительной влажности не более 2%. За счет дроссель-эффекта на расходной шайбе в бак поступал охлажденный воздух и по показаниям температурных датчиков температура воздуха в баке понижалась (рис. 6), особенно в районе коллектора наддува (ниже 0°C). Охлаждение воздуха в баке ниже точки росы привело к конденсации влаги из воздуха. По окончании продувок проводилось открытие бака и проверялось наличие конденсата. Был обнаружен обильный конденсат на внешней поверхности коллектора наддува.

В ряде экспериментов после продувок бака СВ до достижения относительной влажности воздуха не более 2 % проводилась выдержка бака для прогрева воздуха в нем до температуры окружающей среды. При этом изменения относительной влажности воздуха внутри бака не было обнаружено.

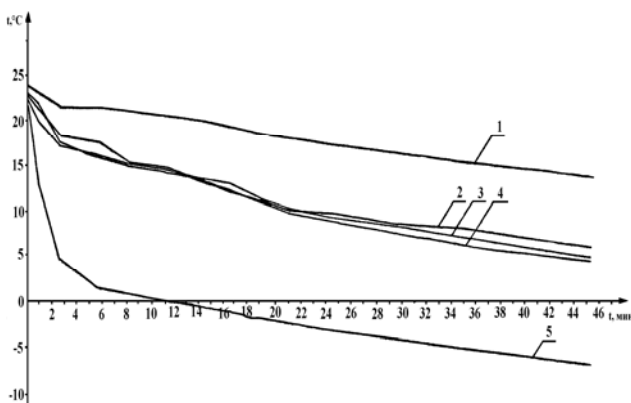


Рис. 6. Продувка бака с расходом 0,24 кг/с:
1 – график изменения температуры по датчику 3; 2 – график изменения температуры по датчику 1; 3 – график изменения температуры по датчику 13; 4 – график изменения температуры по датчику 14; 5 – график изменения температуры по датчику 6

Проверка эффективности прямой продувки бака

Перед началом экспериментов в баке создавалась влажность воздуха 40...90 %. Продувки осуществлялись СВ по магистрали «Бортовой наддув», при этом дренаж из бака проводился через открытые клапаны в различных комбинациях до достижения внутри бака минимально возможной относительной влажности воздуха. Эксперименты проводились при вертикальном положении установки. Во время прямых продувок выявлялся характер изменения относительной влажности воздуха по двум датчикам влажности, установленным под коллектором наддува и в районе «РК» (датчики *2, *3). По температурным датчикам выявлялись застойные зоны внутри бака и возможность организации процесса продувки для их исключения.

Результаты продувок (рис. 7) показывают, что эффективность прямой продувки, т.е. сокращение времени достижения требуемой точки росы воздуха, мало зависит от площади дренажных сечений клапанов.

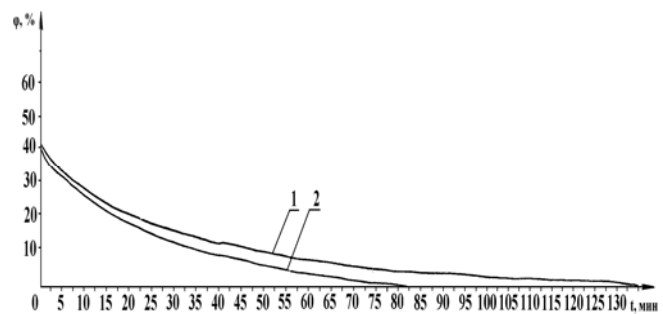


Рис. 7. Продувка бака с дренажом газа через магистраль «РК»:
1 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *3
(наддув бака проводился расходом 0,07 кг/с)

Коллектор наддува направляет сжатый газ вдоль внутренней поверхности бака и затем в выходное отверстие, а в центре бака образуется застойная зона. Для исключения застойной зоны была проведена продувка бака с дренажом воздуха через магистраль «Заправка», расположенную в застойной зоне (рис. 8). В результате удалось значительно сократить разность по временам выхода на минимальную влажность (датчики *1, *2).

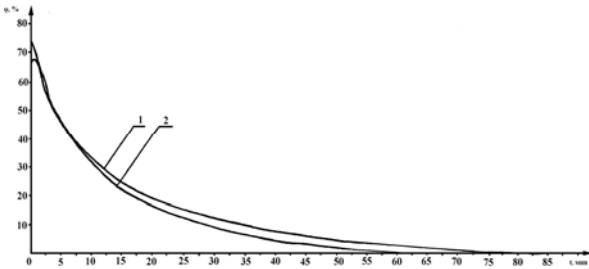


Рис. 8. Продувка бака с дренажом газа через магистраль «Заправка»: 1 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *3 (наддув бака проводился расходом 0,13 кг/с)

Эффективность прямой продувки зависит от расхода поступающего газа. Чем меньше расход газа на продувку, тем больше разница по времени достижения минимальной относительной влажности по верхнему и нижнему датчикам 2, 3. В эксперименте, показанном на рис. 9, продувка бака проводилась увеличенным расходом воздуха с дренажом через «РК», оба датчика влажности практически одновременно выходили на показания минимальной влажности. Происходило хорошее перемешивание воздушной среды в баке, что способствовало ликвидации застойных зон.

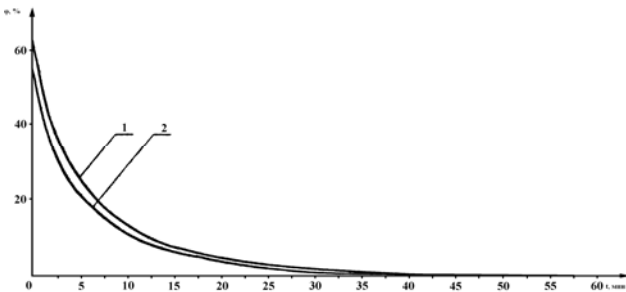


Рис. 9. Продувка бака с дренажом газа через магистраль «РК»: 1 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *3 (наддув бака проводился расходом 0,58 кг/с)

Проводилось измерение температуры точки росы в баке. Она составляла минус 25... минус 30°C. Для достижения температуры точки росы минус 45... минус 50°C необходимо увеличение времени продувки бака.

Проверка эффективности метода полоскания бака

Эксперименты проводились при вертикальном положении установки, при этом верхний датчик влажности 2 был

установлен под коллектором наддува, а нижний 3 – в районе РК.

Полоскание – это периодическое заполнение СВ рабочего объема до определенного давления, затем сброс газа до атмосферного. Операцию повторяли многократно. Количество операций определялось начальной влажностью в объеме бака, требуемой остаточной влажностью и величиной давления наддува.

Перед началом экспериментов в баке создавалась влажность 40...90%. Полоскание бака включает наддув сжатым СВ по линии бортового наддува до давления 0,147 МПа, затем дренаж воздуха из бака через открытые клапаны в различных комбинациях. В течение первых циклов полоскания относительная влажность в баке снижалась достаточно быстро, однако при достижении значения 15...20% характер дальнейшего снижения влажности мало отличался от прямой продувки. В случае повышенной первоначальной влажности увеличивается количество циклов полоскания (рис. 10, 11).

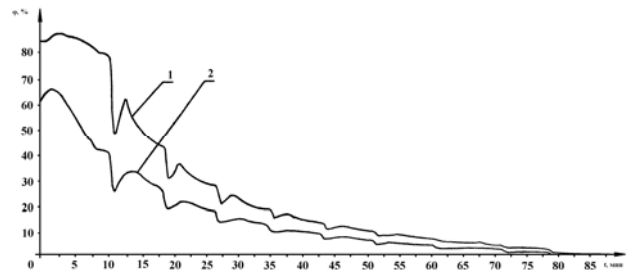


Рис. 10. Полоскание бака через магистраль «РК»: 1 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *3 (наддув бака проводился расходом 0,13кг/с, давление наддува бака P = 0,1 МПа)

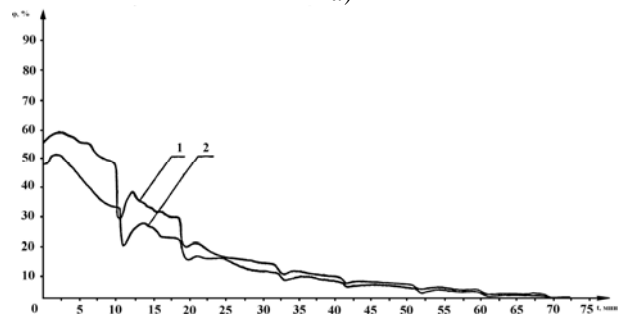


Рис. 11. Полоскание бака через магистраль «РК»: 1 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *3 (наддув бака проводился расходом 0,13кг/с, давление наддува бака P = 0,1 МПа)

Эффективность продувки бака методом полоскания, как и в случае прямой продувки,

зависит от расхода СВ, поступающего на наддув бака: чем больше расход, тем выше эффективность полоскания. Во время наддува бака малым расходом образуются застойные зоны, и моменты выхода датчиков на минимальную влажность значительно отличаются по времени.

Наддув бака увеличенным расходом (рис. 12) приводит к интенсивному перемешиванию воздуха в его объеме, и этим устраняются застойные зоны, при этом оба датчика практически одновременно выходят на показания минимальной влажности.

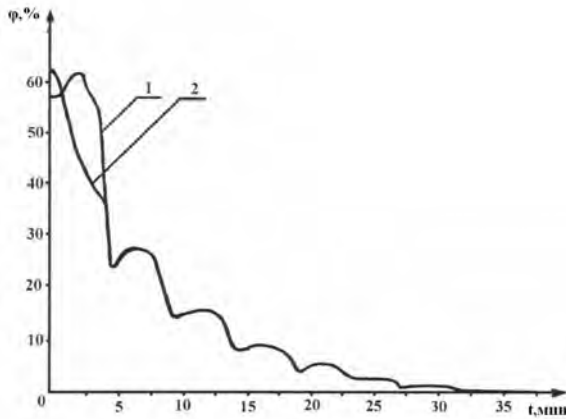


Рис. 12. «Полоскание» бака через магистраль «Авар. слив»: 1 – график изменения относительной влажности по датчику *2; 2 – график изменения относительной влажности по датчику *3 (наддув бака проводился расходом 0,19 кг/с, давление наддува бака $P = 0,15$ МПа)

Эффективность полоскания зависит от давления наддува бака и от площади проходных сечений магистралей, через которые производится дренаж газа из бака.

При малых и средних расходах наддува эффективность прямой продувки и полоскания примерно одинакова. При увеличенных расходах СВ наддува полоскание бака с дренажом газа через линии больших проходных сечений значительно эффективнее прямой продувки.

Проводилось измерение точки росы. Она составляла минус 25...минус 30°C. В конце полоскания для достижения температуры точки росы минус 45...минус 50°C необходимо провести дополнительно 3...4 цикла полоскания.

Результаты проведенного экспериментального исследования влагосодержания воздуха в модельном баке были

использованы для обеспечения требований противокоррозионной защиты штатных крупногабаритных топливных баков РН. После изготовления бак постоянно находится под избыточным давлением, величина которого определена по технологическим соображениям. Во время подготовки топливных баков к авиационному транспортированию в цехе завода-изготовителя обеспечение необходимой относительной влажности воздуха в баке проводилось методом полоскания. Многократное полоскание бака СВ с точкой росы не более минус 70°C и расходом 0,4 кг/с проводилось в диапазоне избыточного давления от 0,01 до 0,11 МПа. Наддув бака проводился по технологической линии через транспортировочную заглушку на фланце бака для исключения образования конденсата влаги на штатном коллекторе наддува.

Дренаж газа из бака проводился через технологический дренажно-предохранительный клапан (ДПК) с диаметром проходного сечения 170 мм, установленный на транспортировочной заглушке фланца бака, для сохранения ресурса срабатываний штатного ДПК. Верхний предел давления наддува и величина расхода СВ для наддува бака ограничивались требованиями безопасности при работах с баками емкостью 500 м³, 1500 м³ в помещении цеха. Предварительный расчет количества циклов полосканий определялся из соотношения

$$n = \frac{\ln \varphi_{ост} - \ln \varphi_{нач}}{\ln P_n - \ln P_{над}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{ост}$ и $\varphi_{нач}$ – остаточная и начальная относительные влажности воздуха в баке; P_n – начальное давление наддува в баке; $P_{над}$ – давление наддува бака.

Для замены воздуха в баке с начальной относительной влажностью не более 40% до достижения влажности не более 1% проводилось больше определенных расчетом 6 циклов полосканий.

Однако для достижения влажности воздуха в баке, соответствующей температуре точки росы минус 50°C, потребовалось провести дополнительно 4 цикла полоскания.

Расчет времени полоскания штатного бака определялся из соотношения:

$$\tau_{шт} = \frac{V_{шт} \tau_{мод}}{V_{мод}}, \quad (2)$$

где $\tau_{шт}$ и $\tau_{мод}$ – время процесса полоскания штатного и модельного баков, $V_{шт}$ и $V_{мод}$ – объемы штатного и модельного баков.

Процесс полоскания штатных крупногабаритных баков длителен. Для обеспечения влажности воздуха с требуемой температурой точки росы в штатном баке емкостью более 1500 м³ процесс полоскания длился около 15 часов. Ввиду дефицита времени на подготовку авиагруза влажность воздуха в баке допускалась с температурой точки росы не выше минус 45°С в зависимости от температуры атмосферного воздуха на аэродроме и ожидаемой температуры воздуха на горизонтальной высоте полета. В течение длительной предполетной стоянки на аэродроме температура газа в баках принимала значение температуры окружающей среды. За время полета в течение 3,5 ч охлаждение газа в теплоизолированных баках было незначительным. По прибытии в эксплуатирующую организацию открытие баков проводилось после отогрева бака до температуры воздуха в МИК. В случае длительной работы с открытым баком и для исключения значительного повышения в нем влажности воздуха сообщение внутренней полости бака с окружающей средой проводилось через осушительное устройство.

В результате проведенной работы по экспериментальному исследованию противокоррозионной защиты внутренних полостей топливных баков РН во время хранения и авиационного транспортирования могут быть выданы следующие рекомендации.

1. Хранение топливных баков РН должно проводиться при избыточном давлении осушенного воздуха и температуре точки росы, исключаяющей конденсацию влаги в баке при всех изменениях температуры окружающей среды.

2. Открытие бака может проводиться только после выравнивания температуры воздуха в баке и температуры окружающей среды.

3. Открытие бака для присоединения испытательных или технологических средств

допускается проводить через один клапан с трубопроводом на время не более 1 ч.

4. В случае длительной работы с открытым баком и для исключения значительного повышения в нем влажности воздуха сообщение внутренней полости бака с окружающей средой должно проводиться через осушительное устройство.

5. Для исключения увеличения влагосодержания воздуха в баке открытие его не следует проводить через клапаны, расположенные на разной высоте бака.

6. Осушку влажного воздуха в топливных баках следует проводить методом полоскания, а не прямой продувкой с возможно большими расходами газа при наддуве и дренаже бака.

Библиографический список

1. ГОСТ 9.014-78. Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования. Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам. – М.: Изд.-во стандартов, 1989. – 64 с.

2. Бронштейн, В.М. Экспериментальная обработка системы кондиционирования газа в топливных емкостях аэрокосмической техники / В.М. Бронштейн, А.А. Маркин // Ракетно-космическая техника: Науч.-техн. Сб. Сер. X11. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. – Самара: 1999. Вып.1. -С. 10 - 22.

References

1. GOST 9.014-78. Unified system of corrosion and ageing protection. Temporary corrosion protection of products. General requirements. State USSR Committee of product quality control and standards. Publisher of standards, 1989.-64 p.

2. V.M. Bronshtein, A.A. Markin, Eksperimental'naya obrabotka sistemy kondicionirovaniya gasa v toplivnyh emcostyah aerokosmicheskoi tehniky-Experimental tryout of the gas conditioning system in the fuel tanks of the aerospace products//Rocket-and-space engineering: Calculations, Designing and testing of the space systems.-Samara, 1999.

RESEARCH OF THE WET CONDITION IN FUEL TANKS OF HIGH WEIGHT BOOSTER ROCKETS DURING STORAGE AND AVIATION TRANSPORTATION PERIODS

©2009 V. M. Bronshtein, E. K. Krasnochub, A. A. Markin

«Progress» Design Bureau

In this paper, executed with participation of doctor of engineering sciences, professor of Biryuka Vladimir Vasil'evicha, there are experimental research data of wet condition in fuel tanks of high weight booster rockets for providing corrosion protection during storage and aviation transportation periods.

Fuel tanks of the high weight booster rockets, corrosion, corrosion protection, aviation transportation, humidity content, pressure charging, drying of humid air

Информация об авторах

Бронштейн Виталий Михайлович, кандидат технических наук, начальник группы Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел. (846) 228-96-49. E-mail: Teplotex_ssau@bk.ru. Область научных интересов: теплообмен, термодинамика.

Красночуб Евгений Карпович, доктор технических наук, доцент, научный консультант Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел. (846) 228-91-52. Область научных интересов: теплообмен, термодинамика.

Маркин Александр Александрович, доктор технических наук, заместитель главного конструктора Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел. (846) 228-52-65. Область научных интересов: теплообмен, термодинамика.

Bronshtein Vitalii Mihailovich, candidate of technical science, group director of «Progress» Design Bureau, Samara. Phone: (846) 228-96-49. E-mail: Teplotex_ssau@bk.ru. Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.

Krasnochub Evgenii Karpovich, doctor of engineering science, docent, scientific consultant of «Progress» Design Bureau, Samara. Phone: (846) 228-91-52. Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.

Markin Aleksander Aleksandrovich, doctor of engineering science, deputy chief designer of «Progress» Design Bureau, Samara. Phone: (846) 228-52-65. Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.