

## Определение колебаний давления в газовой полости герметичных емкостей транспортно-заправочных контейнеров для ракетных топлив при температурных воздействиях

© А.Н. Кирьянова, О.П. Матвеева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Обоснована возможность применения модели идеального газа для определения параметров состояния газов в подушке емкостей транспортно-заправочных контейнеров. В модели использованы вторые вириальные коэффициенты и расчетные значения факторов сжимаемости для применяемых газов. Представлены методика расчета давления парогазовой смеси в герметичной емкости, пример расчета и рекомендации по практическому применению предложенной методики.*

**Ключевые слова:** компоненты ракетного топлива, герметичная емкость, парогазовая смесь, давление, транспортировка, газонасыщение топлива, качество топлива.

**Введение.** Для заправки разгонных блоков, двигательных установок (коллекторов), блоков выведения (в некоторых случаях и космических аппаратов) компонентами ракетного топлива (КРТ) в условиях космодромов в составе транспортно-заправочных контейнеров (ТЗК) могут использоваться герметичные емкости различной вместимости. В настоящее время имеется положительный опыт применения ТЗК для доставки КРТ из РФ на космодром Куру (французская Гвиана) и заправки разгонных блоков серии «Фрегат» (рис. 1) [1].

Преимуществом емкостей в составе ТЗК является удобство их перегрузки, складирования и транспортировки любым видом транспорта (железнодорожный, автодорожный и морской). В процессе выполнения этих операций не предусматривается технологическое обслуживание емкостей и их элементов, при этом должны соблюдаться установленные нормы безопасности [2].

Перед доставкой ТЗК на космодромы проводятся подготовка КРТ и заправка ими емкостей с использованием специально разработанных оборудования и заводской технологии. Технология, в частности, обеспечивает температурную подготовку и насыще-

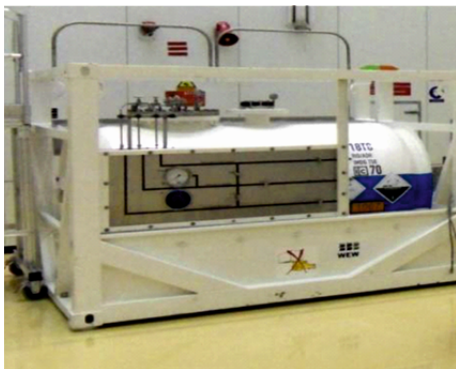


Рис. 1. Общий вид ТЗК с герметичной емкостью

ние КРТ инертным газом (азотом, гелием) до предельного состояния. По окончании этих работ запорная арматура емкости ТЗК пломбируется, емкость становится герметичной, а давление в ней избыточным.

В ходе доставки ТЗК на космодром должны обеспечиваться прочность запорной арматуры и герметичность емкости при всех возможных значениях температуры окружающей среды. Однако колебания температуры могут привести к существенному изменению давления в газовой подушке емкости и, как следствие, к необходимости сброса токсичной парогазовой смеси в атмосферу.

Для различных объектов заправки разрабатываются и комплектуются емкости ТЗК различной вместимости. Существующие отечественные и зарубежные космодромы располагаются на значительном удалении от заводов, поэтому возникает необходимость в разработке методического аппарата для определения колебаний давления в газовой подушке герметичной емкости при температурных воздействиях окружающей среды и подготовке практических рекомендаций. Это и является задачей настоящего исследования.

**Обзор источников.** В соответствии с международной классификацией по типу и свойствам перевозимых грузов ТЗК является танком-контейнером рамного типа [2]. Емкости ТЗК оснащаются предохранительными клапанами для сброса избыточного давления, чтобы предотвратить потерю прочности емкости в нештатных ситуациях. Однако колебания давления в газовой подушке емкости при температурных воздействиях окружающей среды не относятся к нештатным ситуациям и должны быть учтены при оценке давления настройки предохранительных клапанов, чтобы исключить унос парогазовой смеси в атмосферу.

Унос парогазовой смеси приведет к снижению достигнутого на заводе газосодержания КРТ в емкости, следовательно, потребуются возврат ТЗК на завод либо создание аналогичных заводским специальных условий на космодроме для корректировки газосодержания КРТ. Возникновение таких ситуаций наиболее вероятно в теплое время года, когда при проведении газонасыщения КРТ возникает необходимость в охлаждении продукта, например, с помощью жидкого азота и антифриза [3]. Однако для выполнения этих операций потребуются дополнительное оборудование, химическая лаборатория, а также продолжительное время.

В работе [4] для определения количества выбросов в атмосферу при испарении нефтепродуктов или однокомпонентных жидкостей в резервуарах или цистернах используют расчетно-экспериментальный метод. В этих емкостях над зеркалом жидкого продукта имеются газовоздушные полости, состав содержимого полостей устанавливают путем отбора и анализа проб методом газожидкостной и газоадсорбционной хроматографии в стационарных условиях.

Давление насыщенных паров рассчитывают в зависимости от измеренной температуры жидких и газозвудушных сред с учетом результатов анализа проб продукта. Использование такого подхода к анализу КРТ в емкостях ТЗК приведет к снижению эффективности заводской подготовки продуктов.

В отличие от нефтепродуктов транспортируемые КРТ имеют известный химический состав и регламентируемое качество, их физические свойства, в том числе изменение давления насыщенных паров в зависимости от температуры, изучено и представлено, например, в работе [5]. Дополнительно состав, качество и степень газонасыщения проверяют в химической лаборатории на заводе.

Неопределенность в результате определения колебаний давления в газовой подушке в зависимости от температуры окружающей среды вносят растворенные в КРТ инертные газы, заместившие воздух в ходе газонасыщения КРТ. Изменение давления в газовой подушке герметичной емкости может быть описано, например, с помощью уравнения состояния идеального газа. Это уравнение не позволяет учесть действующие межмолекулярные силы и собственный объем молекул газа. При условиях, близких к нормальным, а также при низких значениях давления и высоких значениях температуры свойства реальных газов (азота, гелия) приближаются к свойствам идеального газа [6–10]. Однако это положение требует более детального рассмотрения.

**Постановка задачи.** Вследствие токсичности высококипящих топлив перевозимый их ТЗК, как средство для перевозки опасных грузов, должен соответствовать ряду международных и российских требований и рекомендаций, среди которых требования к максимальной наполненности емкости ТЗК, обеспечению максимально допустимого рабочего давления, рекомендации по соблюдению температур продукта во время заполнения емкости [11].

Используя указанные требования и рекомендации, а также обоснованные допущения для формализованного представления параметров среды в газовой подушке, необходимо найти зависимость изменения давления парогазовой смеси в герметичной емкости от температуры при естественном нагреве КРТ и максимально возможное давление в газовой подушке. На основе полученной зависимости требуется сформулировать практические рекомендации по оценке качества доставленного на космодром продукта и его готовности для выполнения заправочных операций.

**Уравнения изменения давления в газовой подушке герметичной емкости при изменении температуры ракетного топлива.** Возможность применения модели идеального газа для определения взаимосвязи давления, температуры и объема может быть оценена с помощью фактора сжимаемости  $Z$  [7–10]. Для идеального газа

$Z = 1$ . Например, в работе [8] приводится алгоритм расчета фактора сжимаемости, основанный на вириальном уравнении состояния, записываемом в виде ряда по степеням  $1/V_m$  или по степеням  $p$ :

$$\frac{pV_m}{RT} = 1 + B'(T)p + C'(T)p^2 + \dots,$$

где  $p, V_m, T$  — давление, молярный объем, температура газа;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $B'(T), C'(T), \dots$  — второй, третий и т. д. вириальные коэффициенты.

Для газов умеренной и малой плотности (азот, гелий) при рассматриваемых значениях температуры и небольших давлениях основной вклад в фактор сжимаемости вносит второй член ряда, отражающий парные столкновения молекул.

Для выражения вириальных коэффициентов привлекают потенциалы межмолекулярного взаимодействия из статистической механики. При взаимодействии неполярных молекул часто используют двухпараметрический потенциал Леннарда — Джонса, который зависит от расстояний между частицами и характеристик атомов вещества [8–10]. Силовые постоянные этого потенциала таковы:  $\varepsilon/k$  ( $\varepsilon$  — глубина потенциальной ямы, Дж;  $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана);  $b_0 = 2/3 \pi N \sigma^3$  — второй вириальный коэффициент, см<sup>3</sup>/моль, для газа, моделируемого твердыми сферами ( $\delta$  — расстояние наибольшего сближения молекул, или диаметр столкновения, А;  $N \approx 6,023 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — число Авогадро).

В настоящей работе для определения фактора сжимаемости использованы значения силовых постоянных потенциала, измеренные по коэффициенту вязкости [10]: для гелия  $\varepsilon/k = 10,22$  К;  $b_0 = 21,07$  см<sup>3</sup>/моль; для азота  $\varepsilon/k = 91,50$  К;  $b_0 = 62,79$  см<sup>3</sup>/моль. Приведенной температуре  $T^* = kT/\varepsilon$  соответствует табличное значение второго вириального коэффициента  $B^{\cdot}$ , приведенного относительно силовых постоянных потенциала [9]. Для более точного выбора значения  $B^{\cdot}(T^*)$  выполнена аппроксимация табличных значений (коэффициенты детерминации  $R^2 \geq 0,97$ ), как рекомендовано в работе [9]:

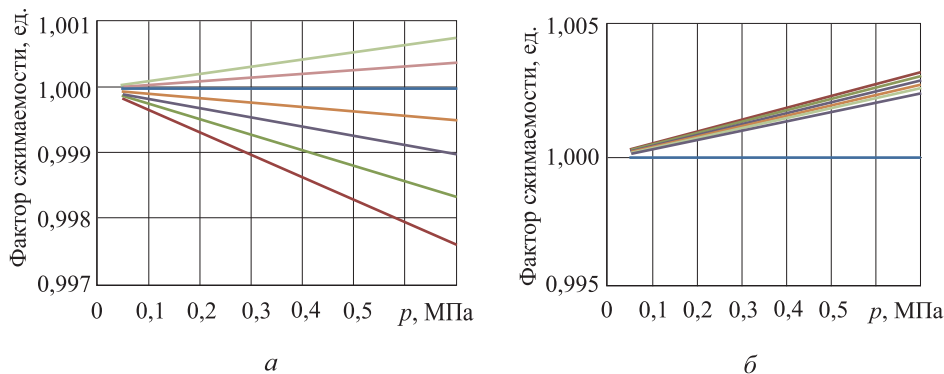
а) для азота при  $T^* = 2,60 \dots 3,70$  К

$$B^{\cdot}(T^*) = 0,0378(T^*)^3 - 0,4656(T^*)^2 + 2,0927T^* - 3,2248; \quad (1)$$

б) для гелия при  $T^* = 8,00 \dots 30,00$  К

$$B \cdot (T^*) = -0,0004(T^*)^2 + 0,0204(T^*) + 0,2875. \quad (2)$$

По формуле  $Z = 1 + \frac{b_0 B}{RT} p$  рассчитаны значения фактора сжимаемости при температуре  $T = 273 \dots 338$  К и давлении  $p = 0,1 \dots 0,7$  МПа для азота и гелия. Результаты расчета представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Расчетные значения фактора сжимаемости для азота (а) и гелия (б):

— идеальный газ; — 273 К; — 283 К; — 293 К;  
— 303 К; — 313 К; — 323 К; — 333 К

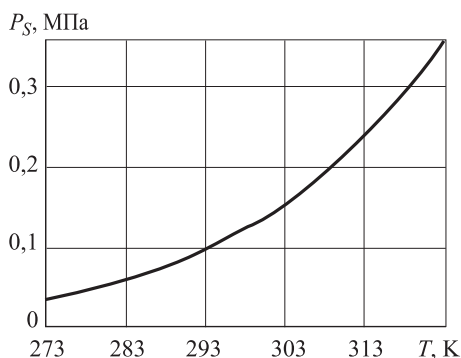
Анализ расчетных данных показывает, что максимальные отклонения значений фактора сжимаемости от его значения для идеального газа, равного единице, составляют: для азота — 0,24 %, для гелия — 0,36 %. Это подтверждает возможность использования модели и уравнения состояния идеального газа при решении поставленной задачи.

Так, определение максимально допустимого рабочего давления (МДРД) в емкости ТЗК  $P_{\text{МДРД}}$  основывается на аддитивном использовании парциального давления газа в полости емкости и давления насыщенных паров КРТ  $P_S$  при максимальной температуре газовой среды:  $P_{\text{МДРД}} = P_S + P_{\text{газа}}$ .

При этом учитываются давление настройки предохранительного клапана при температуре начала его срабатывания, а также расширение продукта в емкости вследствие повышения среднеобъемной температуры  $\Delta t = t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}$  — начальной температуры  $t_{\text{нач}}$  продукта при заполнении емкости ТЗК в заводских условиях (15 °С [11]) до максимально возможной  $t_{\text{кон}}$ .

Давление насыщенных паров компонента  $P_S$  определяется в соответствии с [5]. Характер зависимости  $P_S(T)$  для тетраоксида диазота,

имеющего низкую температуру кипения, представлен на рис. 3. Так можно определять давление насыщенных паров топлива при расчетных значениях температуры:  $P_{\text{нач}}$  при температуре  $t_{\text{нач}}$  и  $P_{\text{кон}}$  при температуре  $t_{\text{кон}}$ .



**Рис. 3.** Зависимость изменения давления насыщенных паров тетраоксида диазота от температуры

При заполнении емкости ТЗК в ней оставляют свободное пространство (недолив). Это позволяет предотвратить утечки КРТ или проявление остаточной деформации емкости в результате расширения жидкости, вызванного изменением температуры во время транспортировки. Порядок определения максимальной степени наполнения емкости ТЗК приведен в [11], где использовано среднее значение коэффициента объемного расширения жидкого топлива  $\alpha$  для интервала повышения его температуры  $\Delta t$ . Так, для тетраоксида диазота максимальная степень наполнения емкости ТЗК при температуре 15 °С составляет чуть более 90 %.

Парциальное давление газов в подушке емкости при максимальной температуре газовой среды определяют из уравнения состояния идеального газа на основе начальной температуры продукта  $t_{\text{нач}}$  и его расширения в результате повышения средней объемной температуры до значения  $t_{\text{кон}}$ :

$$P_{\text{газа}} = \frac{P_{\text{нач газа}} V_{\text{под нач}} (t_{\text{кон}} + 273)}{V_{\text{под кон}} (t_{\text{нач}} + 273)},$$

где  $P_{\text{нач газа}}$ ,  $V_{\text{под нач}}$  — парциальное давление газа в подушке и ее объем при заполнении емкости газонасыщенным продуктом в заводских условиях;  $V_{\text{под нач}}$ ,  $V_{\text{под кон}}$  — объем газовой подушки в емкости при температуре  $t_{\text{нач}}$  и  $t_{\text{кон}}$ .

Значение  $V_{\text{под кон}}$  можно определить по формуле  $V_{\text{под кон}} = V_{\text{св}} - V_{\text{пр кон}}$ , где  $V_{\text{св}}$  — внутренний (свободный) объем емкости;  $V_{\text{пр кон}} = V_{\text{пр нач}} (1 \pm \alpha \Delta t)$  — объем жидкого компонента при средне-объемной температуре  $t_{\text{кон}}$ ;  $V_{\text{пр нач}}$  — объем компонента при средне-объемной температуре  $t_{\text{нач}}$ . Аналогично определяют значение  $V_{\text{под нач}} = V_{\text{св}} - V_{\text{пр нач}}$ .

Выдача потребителю на космодроме газонасыщенного ракетного топлива осуществляется при поддержании его равновесного состояния в заправочной емкости, баках потребителя и в дренажных магистралях при определенной температуре заправки. Равновесное состояние сред в емкости обеспечивается равновесным давлением, предельное значение которого соответствует предельному значению степени газонасыщения продукта при температуре заправки. Если емкость ТЗК заполняют газонасыщенным продуктом при температуре  $t_{\text{нач}}$ , давление  $P_{\text{нач газа}}$  определяют, используя закон Генри и учитывая давление насыщенных паров:

$$P_{\text{нач газа}} = \frac{C_{\text{нач}}}{\chi_{\text{Г нач}}} + P_{S \text{ нач}},$$

где  $C_{\text{нач}}$  — степень насыщения газом топлива (или концентрация газа в топливе), кг/м<sup>3</sup>;  $\chi_{\text{Г нач}}$  — растворимость газа в топливе, кг/(м<sup>3</sup>·Па).

Общая масса газа  $G_{\text{Г}}$  в емкости ТЗК распределяется в объеме  $V_{\text{пр}}$  жидкого продукта ( $G_{\text{Г пр}}$ ) и в газовой подушке ( $G_{\text{Г под}}$ ):  $G_{\text{Г}} = G_{\text{Г под}} + G_{\text{Г пр}}$ , где  $G_{\text{Г пр}} = C_{\text{нач}} V_{\text{пр}}$ . Массу газа в подушке емкости при начальной температуре  $t_{\text{нач}}$  определяют по формуле, полученной из уравнения состояния идеального газа:

$$G_{\text{Г под}} = \frac{(P_{\text{нач газа}} - P_{S \text{ нач}})(V_{\text{св}} - V_{\text{пр}})}{R(t_{\text{нач}} + 273)}. \quad (3)$$

Рассмотрим два предельных по значению давления в газовой подушке случая: при полностью равновесном и локальном неравновесном процессах в системе жидкий продукт — газ, находящейся в герметичной емкости. Для равновесного процесса коэффициент растворимости газа в продукте при температуре  $t_{\text{кон}}$  изменится от  $\chi_{\text{Г нач}}$  до  $\chi_{\text{Г кон}}$ , при этом давление в газовой подушке емкости ТЗК  $P_{\text{равн Г}}$  можно определить по формуле

$$P_{\text{равн } \Gamma} = \frac{G_{\Gamma}}{V_{\text{пр кон}} \chi_{\text{кон}} + \frac{V_{\text{под кон}}}{R(t_{\text{кон}} + 273)}}.$$

Равновесное значение концентрации газа в топливе составит  $C_{\text{равн}} = P_{\text{равн } \Gamma} \chi_{\text{кон}}$ . Давление парогазовой смеси в газовой подушке емкости  $P_{\text{равн кон}}$  при равновесном процессе при температуре  $t_{\text{кон}}$  и соответствующем значении давления насыщенных паров

$$P_{\text{равн кон}} = P_{\text{равн } \Gamma} + P_{S \text{ кон}}. \quad (4)$$

При локальном неравновесном процессе в указанной системе максимально возможное давление газа в подушке емкости  $P_{\text{кон } \Gamma}$  при температуре  $t_{\text{кон}}$  определяют по соотношению

$$P_{\text{кон } \Gamma} = \frac{G_{\Gamma \text{ под}} R(t_{\text{кон}} + 273)}{V_{\text{под кон}}}. \quad (5)$$

В соотношении (5) для расчета значения  $G_{\Gamma \text{ под}}$  можно использовать формулу (3), в которой температуру  $t_{\text{нач}}$  следует заменить на температуру  $t_{\text{кон}}$ . Тогда максимально возможное давление парогазовой смеси в подушке емкости при локальном неравновесном процессе в системе составит

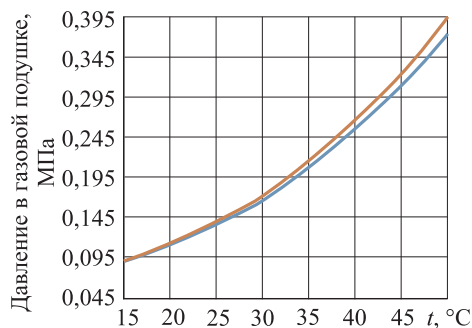
$$P_{\text{неравн}} = P_{\text{кон } \Gamma} + P_{S \text{ кон}}. \quad (6)$$

Была выполнена расчетная апробация представленной методики определения колебаний давления в газовой полости герметичной емкости ТЗК при транспортировке газонасыщенного ракетного топлива на космодром при температурных воздействиях на емкость без пассивной и активной систем термостатирования. Рассматривалась емкость ТЗК вместимостью 3,8 м<sup>3</sup> для транспортировки тетраоксида азота с отечественного завода на космодром Восточный.

Расчетные данные получены при условии, что температура топлива в емкости ТЗК изменяется от +15 °С при заполнении емкости в заводских условиях до максимально возможного значения +50 °С при транспортировке. Для равновесного процесса в герметичной емкости диапазон расчетных значений давления в газовой полости составил 0,090...0,373 МПа, для локально неравновесного процесса максимально возможное давление несколько выше — 0,390 МПа (рис. 4).

После приема ТЗК на космодроме расчетные данные могут быть использованы для оценки качества КРТ без отбора проб и исследова-





**Рис. 4.** Результаты расчета давления в газовой полости емкости ТЗК при естественном нагреве топлива:  
 — равновесный процесс;  
 — неравновесный процесс

ния их в химической лаборатории, без приведения продукта к температуре заправки и специально созданного для этой операции оборудования. При этом давление и температуру парогазовой среды внутри емкости ТЗК можно измерять с помощью встроенных датчиков и приборов. Результаты измерения согласуются с расчетными данными, представленными на рис. 4.

Если измеренные значения давления расположены на графике ниже кривой, отражающей равновесный процесс, то это означает, что утечек фаз топлива за время транспортировки не происходило. В противном случае ТЗК необходимо вернуть на завод для повторения всех подготовительных операций с КРТ либо скорректировать газонасыщение топлива на космодроме при одновременном термостатировании на заданном температурном уровне.

При расположении на графике измеренных значений между кривыми, построенными по расчетным данным для равновесного и локально неравновесного процессов, также принимают решение об отсутствии потерь парогазовой смеси. Однако заправка баков потребителей выполняется при равновесном процессе в емкости ТЗК, поэтому потребуется некоторое время для установления равновесного процесса, а также для естественного охлаждения емкости с КРТ (например, в кондиционируемом зале заправки).

Топливные баки объектов, заправляемых из емкостей ТЗК, имеют небольшую вместимость по сравнению с баками ускорителей. В связи с этим предложенная технология подготовки, транспортировки, проверки качества КРТ и заправки топливами баков потребителей позволит исключить создание запасов, систем хранения КРТ и химических лабораторий на космодромах. Это будет способствовать существенному упрощению и уменьшению продолжительности подготовительных заправочных операций, повышению безопасности работ

с КРТ, снижению расхода ресурса систем отвода и нейтрализации топлив, сокращению затрат на создание и эксплуатацию наземной инфраструктуры космодромов.

**Заключение.** Повышенное давление парогазовой смеси в газовой полости герметичной емкости ТЗК при продолжительной транспортировке в ней газонасыщенного ракетного топлива от завода до космодрома в теплое время года представляет особую опасность. Эти условия могут способствовать уносу в атмосферу части парогазовой смеси через предохранительный клапан или микрощели и привести к опасным ситуациям, а также к снижению требуемой степени газонасыщения топлива.

Представленная в работе методика позволяет определить возможные параметры равновесного и локально неравновесного состояний парогазовой смеси в герметичной емкости и установить диапазон колебаний давления смеси в зависимости от температуры. Расчетные значения давления, согласующиеся с измеренными значениями, предложено использовать для принятия решения о качестве топлива, доставленного на космодром, при минимальных временных и материальных затратах. Результаты работы могут быть также учтены при прочностных расчетах емкости и выборе предохранительных элементов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воробьев Е.В., Денисов О.Е., Кузнецов В.И. *Проектирование транспортных средств специального назначения*. Москва, Изд-во МАДИ, 2012, 91 с.
- [2] *ГОСТ 31314–2006 (ИСО 1496-3:1995). Межгосударственный стандарт. Контейнеры грузовые серийные. Технические требования и методы испытаний. Ч. 3: Контейнер-цистерны для жидкостей, газов и сыпучих грузов под давлением*. Москва, Госстандарт России, 2003, 27 с.
- [3] Павлов С.К., Чугунков В.В. Повышение эффективности системы охлаждения ракетного топлива с использованием теплообменника и антифриза, охлаждаемого жидким азотом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, № 1 (49). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-1-1461 (дата обращения 14.04.2016).
- [4] *Методика расчетно-экспериментального определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу за счет испарения из емкостей хранения нефтепродуктов*. [Электрон. ресурс]. Краснодар, 1996. URL: [http://www.infosait.ru/norma\\_doc/47/47365/](http://www.infosait.ru/norma_doc/47/47365/) (дата обращения 24.03.2016).
- [5] Сарнер С. *Химия ракетных топлив*. Москва, 1969, 488 с.
- [6] Трофимова Т.И. *Курс физики*. Москва, Высшая школа, 1990, 478 с.
- [7] Еремин В.В., Каргов С.И., Кузьменко Н.Е. *Реальные газы*. Полтораки О.М., ред. [Электрон. ресурс]. Москва, 1998. URL: <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/realgases/> (дата обращения 20.03.2016).
- [8] Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. *Молекулярная теория газов и жидкостей*. Москва, Изд-во иностранной литературы, 1961, 929 с.
- [9] Зубарев В.Н., Козлов А.Д., Кузнецов В.М., Сергеева Л.В., Спиридонов Г.А. *Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: справочник*. Москва, Энергоатомиздат, 1989, 231 с.

- [10] Никольский Б.П., ред. *Справочник химика. Т. 1: Общие сведения. Строение вещества. Свойства важнейших веществ. Лабораторная техника.* Москва, Ленинград, Химия, 1966, 1071 с.
- [11] *Европейское соглашение о международной перевозке опасных грузов (ДОПОГ). Т. 2.* Нью-Йорк, Женева, ООН, 2014, 738 с.

Статья поступила в редакцию 28.04.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кирьянова А.Н., Матвеева О.П. Определение колебаний давления в газовой полости герметичных емкостей транспортно-заправочных контейнеров для ракетных топлив при температурных воздействиях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-07-1517>

**Матвеева Ольга Петровна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области тепломассообмена, гидродинамики в агрегатах и системах стартовых комплексов и их эксплуатации. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru

**Кирьянова Александра Николаевна** — студентка пятого курса, кафедра «Стартовые ракетные комплексы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru

# **Determination of pressure fluctuations in gas cavity of sealed volumes of transportation-fueling containers for propellants at temperature exposure**

© A.N. Kiryanova, O.P. Matveeva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article justifies the possibility of ideal gas model application for determining the gas state parameters in the gas bags of transportation-fueling container volumes. The second virial coefficients and the estimated values of the compressibility factor for the used gases are used in the model. The article presents the technique for calculating gas-vapor mixture pressure in a sealed volume, calculation example and advice on the practical application of the proposed method.*

**Keywords:** *propellant components, sealed volume, gas-vapor mixture, pressure, transportation, propellant gassing, propellant quality.*

## REFERENCES

- [1] Vorobyev E.V., Denisov O.E., Kuznetsov V.I. *Proektirovanie transportnykh sredstv spetsialogo naznacheniya* [Design of special purpose vehicles]. Moscow, MADI Publ., 2012, 91 p.
- [2] *GOST 31314–2006 (ISO 1496-3:1995). Mezhgosudarstvennyy standart. Konteynery gruzovye seriynye. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy. Chast 3: Konteyner-tsisterny dlya zhidkostey, gazov i sypuchikh gruzov pod davleniem* [Interstate standard. Serial freight containers. Specifications and test methods. Part 3: Tank containers for liquids, gases and loose goods under pressure]. Moscow, Russian Gosstandart Publ., 2003, 27 p.
- [3] Pavlov S.K., Chugunkov V.V. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, no. 1 (49). DOI 10.18698/2308-6033-2016-1-1461 (accessed April 14, 2016).
- [4] *Metodika raschetno-eksperimentalnogo opredeleniya vybrosov zagryaznyashchikh veshchestv v atmosfere za schet ispareniya iz emkostey khraneniya nefteproduktov* [Computational and experimental methods of determination of pollutant emissions into the atmosphere by evaporation from petrochemical storage tanks] Krasnodar, 1996. Available at: [http://www.infosait.ru/norma\\_doc/47/47365/](http://www.infosait.ru/norma_doc/47/47365/) (accessed March 24, 2016).
- [5] Sarner S.F. *Propellant Chemistry*. New York, Reinhold Publ., 1966, 417 p. [In Russ.: Sarner S. Khimiya raketnykh topliv. Moscow, Mir Publ., 1969, 488 p.].
- [6] Trofimova T.I. *Kurs fiziki* [Physics course]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 478 p.
- [7] Eremin V.V., Kargov S.I., Kuzmenko N.E. *Realnye gazy* [Real Gases]. Poltorak O.M., ed. Moscow, 1998. Available at: <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/realgases/> (accessed March 20, 2016).
- [8] Hirschfelder J.O., Curtiss Ch. F., Bird R.B. *Molecular Theory of Gases and Liquids*. New York, Wiley Publ., London, Chapman & Hall Publ., 1954, 1219 p. [In Russ.: Hirschfelder J.O., Curtiss Ch. F., Bird R.B. Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey. Moscow, Inostrannaya Literatura Publ., 1961, 929 p.].
- [9] Zubarev V.N., Kozlov A.D., Kuznetsov V.M., Sergeeva L.V., Spiridonov G.A. *Teplofizicheskie svoystva tekhnicheskikh vazhnykh gazov pri vysokikh temperaturakh i davleniyakh. Spravochnik* [Thermophysical properties of

technically important gases at high temperatures and pressures. Reference book]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989, 231 p.

- [10] Nikolskiy B.P., ed. *Spravochnik khimika. Tom 1: Obshchie svedeniya. Stroenie veshchestva. Svoystva vazhneyshikh veshchestv. Laboratornaya tekhnika.* [The chemist's Handbook. Vol. 1: General information. The structure of the substance. Properties of the most important substances. Laboratory equipment]. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1966, 1071 p.
- [11] *European Agreement. Concerning the International Carriage of Dangerous Goods (ADR) (ECE/TRANS/242).* Vol. II. UNITED NATIONS, New York and Geneva, 2014, 752 p. [Evropeyskoe soglasenie o mezhdunarodnoy perezovke opasnykh gruzov (DOPOG). Tom II. New York and Geneva, UNITED NATIONS Publ., 2014, 752 p.].

**Matveeva O.P.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 research papers in the field of heat and mass transfer, hydrodynamics in the units and systems of launch complexes and their operation. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru

**Kiryanova A.N.**, 5<sup>th</sup> year student, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: sm8@sm8.bmstu.ru