

УДК 621.385.(075.3)

Канд. техн. наук А. И. Логвиненко

## КРИТЕРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВАКУУМНЫХ УСЛОВИЙ

*Показаны особенности моделирования вакуумных условий для воспроизведения космической среды при проведении различного рода испытаний. На основании обобщенного опыта рекомендованы практические критерии с учетом сопровождающих физических явлений.*

*Показано особливості моделювання вакуумних умов для відтворення космічного середовища під час проведення різного роду випробувань. На підставі узагальненого досвіду рекомендовано практичні критерії з урахуванням фізичних явищ.*

*The paper shows the peculiarities of modeling the vacuum conditions to simulate space environment when conducting various test types. Based on generalized experience, the practical criteria are recommended with consideration for accompanying physical phenomena.*

В ракетно-космической технике одним из актуальных вопросов является проведение различного рода испытаний либо исследований в разреженной среде, воспроизводящей космический вакуум. При подготовке такого рода испытаний, выборе режимов и продолжительности их проведения весьма важно правильно организовать, подобрать соответствующее испытательное оборудование и контрольно-измерительную аппаратуру. К исследуемым важным процессам следует отнести [1, 2]:

- сброс и истечение жидких компонентов топлива и рабочих газов (наддува, управления и т.п.), хранящихся на борту РН;
- утечку рабочих продуктов из-за негерметичности через различные агрегаты автоматики, их соединения и т.п.;
- разгон и механическое воздействие истекающих и стравливающих газожидкостных тел при их предельных скоростях и фазовых превращениях;
- испарение материалов конструкций;
- возгонку красок, покрытий и смазок;
- нагрузку от перепада давления;
- переохлаждение поверхностей при стравливании криогенных компонентов;
- формирование экранно-вакуумной изоляции.

Каждый из этих вопросов требует применения индивидуальных методов и специального оборудования. Но довольно часто

исследовались вопросы истечения в вакуум жидкостей в перегретом состоянии. Они касались изучения кавитации в насосах и их расходных магистралях, обеспечения запуска и выключения жидкостных ракетных двигательных установок, борьбы с космическим мусором, в частности пассивации топливных систем, а также работы ядерных энергетических установок [2].

На основании законов молекулярно-кинетической теории газов механика их поведения в состоянии разрежения характеризуется критерием (числом) Кнудсена

$$Kn = \frac{\lambda}{L}.$$

Этот критерий представляет собой отношение длины свободного пробега молекул  $\lambda$  к характерному размеру тела или области течения  $L$ .

В общем случае длина свободного пробега определяется формулой [3]

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 P \left(1 + \frac{C}{T}\right)},$$

- где  $k$  – постоянная Больцмана;  
 $\sigma$  – диаметр молекул газа;  
 $P, T$  – давление и температура газа;  
 $C$  – постоянная Сезерленда,

зависящая от рода газа.

Величина  $\lambda$  не может быть определена прямым экспериментом, ее приходится выражать через другие количественно измеряемые величины, в которые она входит, например через коэффициент вязкости  $\mu$  [1]:

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho W}.$$

Учитывая, что средняя скорость молекул  $W$  имеет порядок скорости звука ( $W \approx a$ ) [4], можно записать

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{L} \approx \frac{\mu}{\rho WL} \approx \frac{a}{\rho WL} \approx \frac{M}{\text{Re}},$$

откуда следует условие применимости гипотезы сплошности в виде неравенства

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{L} \approx \frac{M}{\text{Re}} \ll 1.$$

В механике разреженных газов выделяют ряд характерных областей течения, границы которых показаны на рис. 1.

Эти области течения классифицируются следующим образом:

1) свободное молекулярное течение (при  $\text{Kn} \gg 1$ );

2) переходный режим;

3) течение со скольжением (когда  $\frac{M}{\text{Re}} \approx 0,1$ );

4) течение сплошной среды, когда  $\text{Kn} \approx 0,01 \dots 0,1$ ;  $\frac{M}{\sqrt{\text{Re}}} \approx 0,01$ ; справедливо применение уравнений газовой динамики.

Рассмотрим кратко каждую из этих областей.

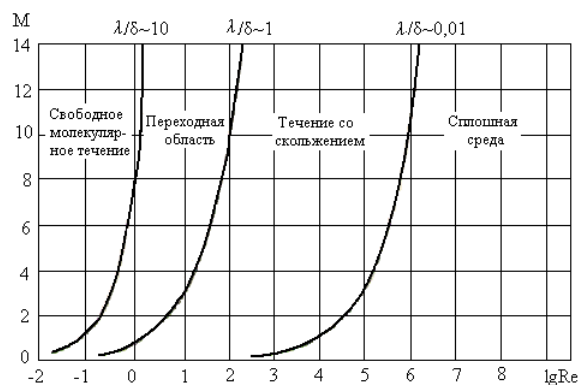


Рис. 1. Границы режимов течения разреженного газа

Так, при течении газа у твердой стенки всегда образуется пристеночный слой толщиной порядка длины свободного пробега  $\lambda$ , в котором имеют место явления микроскопического характера. Если толщина пограничного слоя  $\delta$  велика по сравнению с длиной свободного пробега  $\lambda$ , то этим пристеночным слоем можно пренебречь и можно считать скорость вязкого газа у стенки равной нулю.

Если же  $\delta \sim \lambda$ , то пренебрегать микроскопическими явлениями нельзя. В этом случае на поверхности соприкосновения твердого тела с газом имеется некоторая конечная макроскопическая скорость, газ «скользит» по стенке (из-за отсутствия непрерывного контакта с поверхностью). Отсюда и название «течение со скольжением».

Когда длина свободного пробега молекул намного больше размеров тела, то изменения движения молекул за счет соударений между собой в окрестностях тела значительно меньше, чем за счет соударений с телом. В этом случае поток в окрестностях тела можно рассматривать состоящим как бы из не взаимодействующих между собой, «свободных», молекул. Отсюда и название «свободное молекулярное течение».

Принимая в качестве характерной длины толщину пограничного слоя  $\delta$ , можно записать  $\frac{\lambda}{\delta} = \frac{\lambda}{L} \frac{L}{\delta} = \text{Kn} \frac{L}{\delta} \approx \frac{M}{\text{Re}} \frac{L}{\delta}$ .

Если  $Re \ll 1$ , то  $\frac{\lambda}{\delta} \sim 1$ ; если  $Re \rightarrow 1$ , то, как известно [5], для ламинарного течения

$$\frac{\lambda}{\delta} \sim \sqrt{Re}. \text{ Откуда следует}$$

$$\begin{cases} \frac{\lambda}{\delta} \sim \frac{M}{Re} \text{ при } Re \ll 1; \\ \frac{\lambda}{\delta} \sim \frac{M}{\sqrt{Re}} \text{ при } Re \gg 1. \end{cases}$$

Предложено [4] областью течения со скольжением считать интервал

$$0,01 < \frac{\lambda}{\delta} < 1,$$

а за границу области свободного молекулярного течения принять  $\frac{\lambda}{\delta} \approx 10$ .

В литературе [1, 3] различают три режима течения газов, границы которых соответствуют:

$Kn \leq 0,005$  – вязкостному;

$0,005 < Kn \leq 5,0$  – молекулярно-вязкостному;

$Kn > 5,0$  – молекулярному.

Характер теплообмена при этом зависит от режима течения газа. При вязкостном и молекулярно-вязкостном режимах теплообмен складывается из передачи тепла теплопроводностью, конвекцией и излучением. При молекулярном режиме конвекция и теплопроводность пренебрежимо малы и теплоотдача осуществляется главным образом благодаря лучистому обмену.

Известно, что согласно кинетической теории газов их теплопроводность в широком диапазоне не зависит от давления. Но когда средняя длина свободного пробега молекул становится больше характерного размера системы, то теплопроводность уменьшается пропорционально давлению. При переходе к молекулярному режиму теплопроводность газа становится пренебрежимо малой. Для расчета процессов теплообмена и режимов динамических процессов для каждой из этих обла-

стей в литературе разработаны конкретные методики и критерии подобия. Поэтому при проведении испытаний в вакуумной камере важно определить, какой из указанных областей соответствуют исследуемые процессы, для которых назначается соответствующая степень разрежения:

– низкий вакуум, когда  $Kn \leq 0,005$  (при  $p > 100$  Па);

– средний вакуум, когда  $0,005 < Kn \leq 1,5$  (при  $p = 100 \dots 0,1$  Па);

– высокий вакуум, когда  $Kn \geq 1,5$  (при  $p = 10^{-1} \dots 10^{-4}$  Па);

– сверхвысокий вакуум (при  $p < 10^{-5}$  Па).

Обычно при исследовании процессов испарения и теплообмена степень разрежения в вакуумной камере

$$p \leq 0,01 p_{тр.т.},$$

где  $p_{тр.т.}$  – давление тройной точки рабочих жидкостей.

Род жидкости	H <sub>2</sub> O	НДМГ	Спирт	АГ	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
$P_{тр.т.}$ мм рт. ст.	4,52	~0,5	1	122...140	1,14	94,1

При исследовании материалов в виде твердых веществ принимают

$$p \leq 0,1 p_s,$$

где  $p_s$  – давление насыщенных паров вещества при соответствующей температуре.

Температуру при испытаниях поддерживают равной натурным условиям.

При этом скорость откачки должна превышать скорость натекания образовавшихся рабочих тел  $S_{отк} > S_{обр}$ , где значение откачки следует учитывать в соответствии с областью течения разреженного газа.

При выборе объема и размеров вакуумной камеры необходимо соблюдать требование, чтобы ее размеры намного превышали характерный размер исследуемого предмета.

Интересны результаты оценки степени самозамораживания жидких компонентов топлива в условиях вакуума. Так, решая ряд

уравнений

$$m c_{pж} (t_{нч} - t_3) + m_{л} \lambda_n = m_s [c_{ps} (t_{нч} - t_3) + r] -$$

теплового баланса;

$$m = m_{л} + m_s - \text{сохранения массы};$$

$c_{ps} \approx \frac{2}{3} c_{pж}$  – соотношения удельных теплоемкостей двух фаз [6];

$\Delta t = t_{нч} - t_3 + \Delta t_{np}$  – перепада температур при замерзании жидкости с учетом ее  $\Delta t_{np} \approx 5^\circ C$  переохлаждения [7] – относительно степени замерзания массы жидкости  $\frac{m_{л}}{m}$ , после преобразований получаем

$$\frac{m_{л}}{m} = \frac{3r - c_{pж} \Delta t}{3(r + \lambda_n) + 2c_{pж} \Delta t}.$$

Это соотношение справедливо для случая постепенного самозамораживания при отсутствии теплоподвода.

В табл. 1 в качестве примера приведены результаты расчетов для нескольких жидких компонентов топлива.

Таблица 1

Исходные данные для расчета степени самозамораживания компонентов топлива в вакууме

Параметр	Компонент топлива		
	НДМГ	АТ	Жидкий кислород
Удельная теплота плавления $\lambda_n$ , ккал/кг	40	38	3,33
Удельная теплота парообразования $r$ , ккал/кг	140	99	50,92
Удельная теплоемкость жидкости $c_{pж}$ , ккал/кг-град	0,62	0,42	0,41
Температура переохлаждения жидкости $\Delta t$ , °C	5	5...8	~5
Температура замерзания $t_3$ , °C	-60	-11,3	-218,6
Начальная температура жидкости $t_{нч}$ , °C	14	14	-182,8
Массовая доля замерзшей жидкости $m_{л} / m$ , %	58	65,2	72

Используя принцип «холодного» самозамораживания, путем пошагового сброса в вакуум паров жидкого азота удалось в стендовых условиях получить его переохлаждение на 15...20°C [7, 8]. Тем самым была подтверждена работоспособность элементов автоматики при пониженных криогенных температурах.

Таблица 2

Сравнительные свойства криогенных жидкостей O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>

Физико-технические свойства жидкости	O <sub>2</sub>				N <sub>2</sub>			
Температура кипения, К	90,2				77,4			
Температура плавления, К	54,4				63,2			
Критические параметры:								
– температура, К	154,8				126,3			
– давление, МПа	5,11				3,4			
Параметры тройной точки:								
– температура, К	54,4				63,2			
– давление, Па	152				12536			
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1142				808			
Теплота, Дж/г:								
– испарения	212,8				199			
– плавления	13,95				25,8			
Удельная теплоемкость, Дж (г·К):								
– жидкости	1,7/0,925				2,05/–			
– пара	0,922/0,66				1,05/0,745			
Давление насыщенных паров при соответствующей температуре, кгс/см <sup>2</sup> абс	$T, K$	60	70	80	85	90	100	110
	$P_{s_{O_2}}$	0,01	0,08	0,3	0,7	1	2,8	5,5
	$P_{s_{N_2}}$	0,08	0,4	1,25	2,3	4	8	15

Важным фактором при испытаниях в вакууме систем сброса жидкого кислорода служит замена его на жидкий азот. Сравнение и анализ свойств жидкого кислорода и жидкого азота применительно к условиям работы системы сброса показывают, что охладить азот до температуры плавления легче, чем кислород. Такая замена повышает безопасность проведения испытаний и создает более благоприятные условия для замерзания в тракте. Это позволяет с запасом распространить результаты испытаний на жидком азоте на аналогичные процессы с жидким кислородом, что и было реализовано на практике [7].

Следует отметить, что применение жидкого азота при испытаниях вместо штатного жидкого кислорода вполне обосновано. Как видно из табл. 2, жидкий азот по своим теплофизическим свойствам близок к кислороду. Кроме того, он безопасен при проведении экспериментов, при контакте с различными маслами инертен и нетоксичен. Давление тройной точки у азота выше, чем у кислорода, что позволяет создать условия для его замерзания на имеющейся стендовой базе и промоделировать его замерзание при истечении в вакуумную камеру. При этом исходная температура криогенного компонента перед началом сброса близка к температуре кипения.

Таким образом, для воспроизведения космической среды при проведении различных исследований показаны особенности моделирования вакуумных условий. Предложены важные критерии и сделан ряд рекомендаций для учета сопровождающих физических явлений.

#### **Список использованной литературы**

1. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М., 1990. – 320 с.
2. Полухин Д. А., Орещенко В. М., Морозов В. А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок РН и КА с ЖРД. – М.: Машиностроение, 1987.
3. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. – М.: ИИЛ, 1970.
4. Борисенко А. И. Газовая динамика двигателей. – М.: Оборонгиз, 1962. – 793 с.
5. Авдучевский В. С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. – М.: Машиностроение, 1975. – 623 с.
6. Бурдаков В. П., Данилов Ю. И. Внешние ресурсы и космонавтика. – М.: Атомиздат, 1976. – 551 с.
7. Кудя С. А. и др. Исследование условий замерзания жидкого азота в магистралях при истечении в вакуум / С. А. Кудя, Ж. В. Кабакова, А. И. Логвиненко, В. И. Порубаймех. Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч-техн. ст. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», 2007. – Вып. 2. – С. 58 – 67.
8. Пат. 110307 Украина, МПК F25J 1/00. Способ получения переохлажденной криогенной жидкости / Д. И. Гудыменко, С. А. Кудя, А. И. Логвиненко, В. И. Порубаймех (Украина); заявитель и патентообладатель ГКБ «Южное». – № 201601457; заявл. 18.02.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19.

Статья поступила 18.04.2017