

УДК 621.59

Тепломассообмен при истечении криогенной жидкости в воду

А.М. Домашенко

ОАО «Криогенмаш», Российская Федерация, 143907, Московская обл., г. Балашиха, пр. Ленина, д. 67
E-mail: domashenko@cryogenmash.ru

Ключевые слова: криогенные компоненты топлива, морские объекты, истечение, температура криопродукта, температурный напор, безопасная технология эксплуатации.

Тезисы. При создании криогенных топливных систем, эксплуатируемых в условиях моря, требуется решать специфические научные и технические задачи, в частности аварийного сброса криотоплива в воду. Для выяснения условий аварийного сброса криотоплива в воду экспериментально исследованы процессы тепломассообмена в зоне сбросного патрубка, испарения и нагрева паров при движении в воде, что необходимо для оценки взрывоопасной ситуации в атмосфере. Исследования проведены в условиях, близких к дренажу в промышленной системе. Установлено, что при непрерывном истечении жидкого азота в воду через насадки из различных материалов на режимах, возможных в реальной системе, обеспечивается непрерывный безопасный сброс при соответствующей ориентации насадка (направлен вниз или вниз под углом).

Исследованы процессы тепломассообмена при движении в воде жидкого азота (струи, капель жидкости, пузырьрей). Разработана методика расчета высоты нагрева струи до температуры воды.

Определен завершающий этап исследования истечения криогенных компонентов в воду, которым является образование облака газообразных кислорода и водорода над поверхностью воды, что необходимо учитывать при разработке безопасной технологии эксплуатации объектов в условиях моря.

При создании криогенных топливных систем, эксплуатируемых в условиях моря, требуется решать новые научные и технические задачи, одна из которых – аварийный сброс криотоплива в воду. Как показали исследования [1], в зависимости от термодинамических свойств жидкости, уровня заправки, допустимого давления в момент открытия дренажно-предохранительного клапана в воду может происходить истечение жидкости, пара, двухфазного потока или вещества с закритическими параметрами. При уменьшении количества жидкости в сосуде и ее нагреве параметры сбрасываемого продукта также изменяются. Необходимо учитывать, что на процесс газосброса могут существенно влиять процессы тепломассообмена в зоне концевой сбросной патрубка (насадка). Особую проблему представляет полное или частичное перекрытие сечения патрубка вследствие намерзания льда, которое может привести к недопустимому повышению давления в сосуде, особенно при разгерметизации теплоизоляционного пространства.

В связи с этим для выяснения условий аварийного сброса криотоплива в воду экспериментально исследованы процессы тепломассообмена в зоне сбросной патрубка, испарения и подогрева паров при движении в воде. Процесс подогрева паров не связан с процессами в сосуде и сбросной магистрали, но знать параметры испаряющихся криотоплива в воде необходимо для оценки их влияния на конструктивные элементы изделия, а также оценки взрывоопасной ситуации в атмосфере.

С целью выбора конструкции патрубков для условий безопасного сброса криотоплива были проведены экспериментальные исследования на опытном стенде (рис. 1), созданном на базе криогенного резервуара 8 объемом $V = 0,112 \text{ м}^3$ с рабочим давлением $p_p = 3,7 \text{ МПа}$. В качестве рабочего тела использовался жидкий азот 7, который сбрасывался в сосуд с водой 1 объемом 6 м^3 , оснащенный пятью иллюминаторами 2 для визуального контроля. Система измерений позволяла регистрировать поля температур в криогенном резервуаре и сосуде с водой, давление и уровень заправки в криогенном резервуаре, расход жидкого азота (см. позиции 6, 4, 3, 10 соответственно). Газообразный азот поступал в криогенный резервуар из баллона 5.

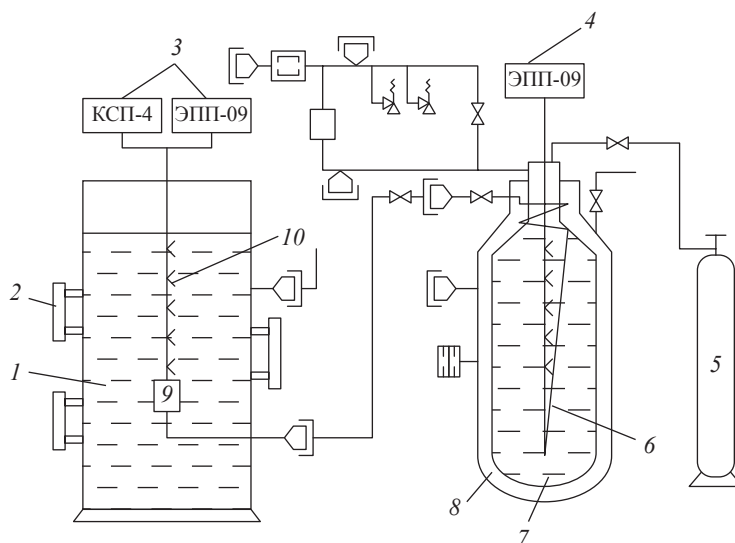


Рис. 1. Схема стенда сброса криопродукта в воду:

1 – сосуд с водой; 2 – иллюминатор; 3, 4, 6, 10 – измерительные приборы;
5 – баллон; 7 – жидкий азот; 8 – криогенный резервуар; 9 – насадка;
ЭПП-09, КСП-4 – типы потенциометров электронных

Исследования проходили в условиях, соответствующих условиям дренажа в промышленной системе: $p_p = 0,35 \dots 2,5$ МПа, скорость истечения потока $0,9 \dots 8,5$ м/с. Истечение происходило через насадки 9 из коррозионно-стойкой стали и фторопласта, ориентированные вертикально вверх, вниз или под углом 45° .

Прежде всего исследовали самый напряженный с точки зрения обмерзания патрубка режим – истечение в воду кипящей при атмосферном давлении криогенной жидкости, имеющей наибольший по сравнению с другими состояниями «запас холода». Влияние намерзания льда на сбросном патрубке изучали в зависимости от скорости истечения жидкости, материала насадки, ориентации патрубка в воде, термодинамического состояния истекающего в воду криопродукта.

При визуальном наблюдении непрерывного истечения жидкого азота установлено, что процесс намерзания льда (при сбросе азота вниз и под углом) практически заканчивается через 2...3 мин. При этом из льда образуется конус длиной 50...70 мм. Струя, вытекающая из отверстия конуса, имеет такой же вид, как и при истечении из насадки. Сужения выходного сечения и уменьшения расхода жидкости не наблюдалось. В дальнейшем ледяной нарост несколько увеличивался только в диаметре, и от него периодически (через 0,3...0,5 мин) откалывались куски льда различной величины,

иногда отламывался весь нарост, и жидкость поступала в воду непосредственно из патрубка. Такая картина наблюдалась для всех давлений и насадок из различных материалов. Картина намерзания льда принципиально не изменилась и при направленной вниз под углом 45° струе. Ледяной нарост в этом случае имел форму изогнутого вверх цилиндра.

В режиме прерывистого сброса давление в криогенном резервуаре выбирали минимальное, поскольку для таких условий истечения обмерзание трубопровода было максимальным, хоть и незначительным.

При направленном вертикально вниз или под углом насадке благодаря образованию газового затвора жидкость не затекала в трубопровод и ледяная пробка не образовывалась. При направленном вверх насадке и циклическом газосбросе наблюдалось практически полное перекрытие сечения трубопровода образующимся льдом. Применительно к истечению в воду азота, нагретого в резервуаре до критического состояния, отмечено, что при изотропном истечении в сбросном трубопроводе образуется двухфазная среда (жидкость-пар) с параметрами, соответствующими давлению в водяном сосуде, т.е. истечение двухфазной среды в воду происходит с менее интенсивным намерзанием льда на насадке трубопровода.

Главный результат исследований: при непрерывном истечении жидкого азота в воду

через насадки из различных материалов на режимах, которые возможны в реальной системе, постоянное скалывание намерзающего льда за счет гидродинамического напора потока обеспечивает независимость среднего расхода от параметров истекающего продукта, но в значительной степени зависит от ориентации потока. При направленном вверх насадке во время циклических сбросов, что характерно для работы предохранительно-дренажного клапана (ПДК), наблюдалось его полное замерзание.

После истечения криопродукта из насадка или из ледяного нароста начинается сложный процесс тепломассообмена с окружающей водой. Струя жидкости разбивается на капли, которые всплывают (плотность жидкого азота меньше плотности воды) и испаряются. В дальнейшем образовавшиеся пузырьки увеличиваются в объеме при нагреве и дробятся на более мелкие.

Предложена физическая модель исследуемого процесса тепломассообмена, включающая три зоны: струйное истечение жидкости, дробление и испарение капель, нагрев пузырей. Такое разделение условно, поскольку зоны взаимно влияют друг на друга. Оценка интенсивности тепломассообмена на прямолинейном участке струи показала [1, 2], что теплоотдача в данном случае ничтожно мала (даже при высоких поверхностных коэффициентах теплоотдачи) главным образом вследствие неразвитости межфазной поверхности.

Для анализа процесса теплоотдачи в зонах капель и пузырей необходимо знать характерный размер (диаметр) капель, пузырей и скорость их всплытия. Максимальные (критические) диаметры определяются физическими свойствами пара и жидкости:

- для пузыря $d_{кр}^п = 2 \cdot 1,5 \frac{\sigma}{w_n^2 \sqrt[3]{\rho_n \rho_j^2}}$;
- для капель $d_{кр}^к = 2 \cdot 2,3 \frac{\sigma}{\rho_j w_k^2}$,

где w_n , w_k – скорости всплытия пузыря пара и капли, м/с, соответственно; σ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз, Н/м; ρ_n , ρ_j – плотности пара и жидкости, кг/м³, соответственно.

Несмотря на кажущуюся неопределенность размеров пузырей в газожидкостной системе, в уравнениях теплообмена с точностью до $\pm 25\%$ принято использовать средний

диаметр, равный половине критического диаметра.

Скорость подъема одиночного пузыря хорошо изучена экспериментально и теоретически [3, 4]. Скорость пузыря диаметром $d^n = 1 \dots 2$ мм является функцией его размера. Средний диаметр пузыря $d_{ср}^п = (1 \dots 0,5) d_{кр}^п$ и для системы «азот – вода» составляет 10...20 мм. Для этого диапазона размеров скорость всплытия не зависит от диаметра пузыря и равна примерно 0,25...0,3 м/с. Скорость подъема одиночных капель размером больше 0,2 мм также не зависит от их диаметра и определяется уравнением

$$w_k = \sqrt[4]{\frac{4g\sigma}{\xi\rho_j} \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_j}\right)},$$

где $\xi = 1,5$ – коэффициент гидравлического сопротивления движущихся капель, g – ускорение свободного падения.

Поскольку капли жидкого азота окружены слоем пара, то их размеры и скорость движения определяются поверхностным натяжением жидкого азота на границе с собственным паром $\sigma = 10,58 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Расчеты показывают, что для азота $w_k \approx 0,08$ м/с, а высота испарения капли

$$H = \frac{r\rho_j w_k d_{ср}^к}{6\alpha_k (T_b - T_j)}, \quad (1)$$

где r – удельная теплота испарения, кДж/кг; $d_{ср}^к$ – средний диаметр капли, м; α_k – коэффициент теплоотдачи, кВт/(м²·К); T_b , T_j – температуры воды и криогенной жидкости, К, соответственно.

Для определения α_k при испарении капель азота использована зависимость [5]

$$\alpha_k = \frac{\lambda}{d_{ср}^к} \left(2 + 0,6Re^{0,5}Pr^{\frac{1}{3}}\right),$$

где $\lambda = 0,15 \cdot 10^{-3}$ – теплопроводность жидкого азота, кВт/(м·К); $Re = \frac{w d_{ср}^к \rho_j}{\mu} = 10^3$ – число Рейнольдса;

$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = 2,24$ – число Прандтля;

μ – динамическая вязкость жидкого азота, Па·с; c_p – теплоемкость жидкого азота, кДж/(кг·К).

Средняя температура газа (T_r) определяется как среднее арифметическое температур капли и воды:

$$T_r = \frac{T_b + T_j}{2} = 180 \text{ К.}$$

Тогда $\alpha_k = 1,85 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ и $H = 27 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Теплообмен в зоне пузырей осложняется тем, что температура газа в них меняется по высоте подъема. Уравнение теплоотдачи к пузырю на участке dz :

$$dQ = \alpha_r (T_r - T_{ж}) dF, \quad (2)$$

где Q – тепловая энергия; F – площадь поверхности контакта фаз на участке dz , м^2 ;

$$dF = \frac{6GR T_r dz}{p d_{cp}^n w_n}; \quad p \text{ – давление азота и воды}$$

в месте выхода газовой струи; G – расход азота, кг/с ; R – газовая постоянная азота, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; α_r – коэффициент теплоотдачи при нагреве газа в пузырях.

Уравнение теплообмена теперь можно записать в виде

$$c_p dT_r = \alpha_r (T_r - T_{ж}) \frac{6RT_r dz}{p d_{cp}^n w_n}.$$

Разделяя переменные и интегрируя уравнение на начальных условиях $z = 0$, $T_r = T_{ж}$, получим высоту столба воды, на которой газ нагревается до температуры T_r :

$$H = \frac{c_p d_{cp}^n w_n p}{\sigma \alpha_r R T_r} \ln \left[\frac{(T_b - T_{ж}) T_r}{(T_b - T_r) T_{ж}} \right], \quad (3)$$

где c_p – теплоемкость газа в пузырях, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $T_{ж}$ – температура газа в пузырях (равна температуре жидкого азота), К .

На границе раздела сред «газ» и «жидкость» основное сопротивление обусловлено теплоотдачей со стороны газовой фазы, так как $\lambda_{ж}/\lambda_r \gg 1$.

Для определения коэффициента конвективной теплоотдачи от жидкости к всплывающему пузырю использовались уравнения

$$\text{Nu} = 0,65(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{\frac{1}{4}} \text{ или } \alpha_n = \frac{\lambda}{d_{cp}^g} 0,65(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{\frac{1}{4}},$$

$$\text{где } \text{Gr} = \frac{q \Delta t_{cp} (d_{cp}^n)^2 \rho_n^2}{\mu^2 T_r}; \quad \Delta t_{cp} = \frac{T_b - T_r}{2} \text{ – средний}$$

тепловой напор [5].

На рис. 2 представлены результаты расчетов высоты нагрева азота в зависимости от температуры газа и среднего диаметра пузырей, а также экспериментальные данные по распределению температуры азотного потока на высоте. За начало отсчета высоты жидкости H принят уровень, совпадающий с концом

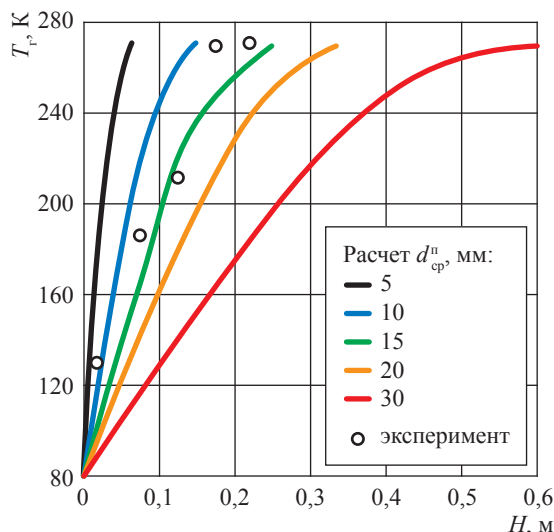


Рис. 2. Зависимость температуры газа T_r от среднего диаметра пузырей и высоты струи H

прямолинейного участка струи, находившейся в условиях экспериментов на расстоянии примерно 70 мм от среза насадка или ледяного нароста. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что их совпадение наиболее близко для $d_{cp}^n = 15 \text{ мм}$.

Анализ зависимостей (1) и (2) показывает, что высота испарения капель и нагрева пузырей не зависит от расхода азота, а определяется только физическими свойствами системы «криогенная жидкость – вода». В частности, при дренаже жидкого азота в воду на высоте $H = 0,3 \dots 0,35 \text{ м}$, охватывающей все зоны истечения, газ нагревается до положительных температур.

С учетом результатов экспериментальных и расчетных исследований тепломассообмена при истечении жидкого азота в воду выполнены расчеты для процесса истечения жидкого водорода. На промышленном объекте резервуары жидкого водорода рассчитаны на давление открытия ПДК 3,0 МПа (клапан работает в интервале давлений 2,8...3,0 МПа). Следовательно, водород в резервуаре нагревается и истекает в воду в закритическом состоянии.

Согласно принятой и экспериментально подтвержденной модели высота нагрева газа в пузырях от температуры на срезе насадка до температуры T_r определяется из выражения (3), в котором: $c_p = 14,4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $w_n = 0,3 \text{ м/с}$; $\sigma = 75,6 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$; $\rho_n = 3,2 \text{ кг/м}^3$ (при давлении среды $p = 2,0 \text{ МПа}$ и средней за процесс

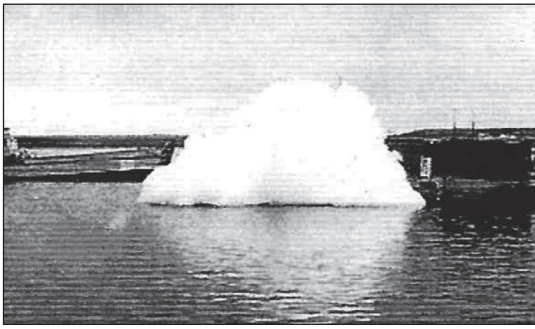


Рис. 3. Сброс жидкого водорода в воду из промышленной системы

температуре $T_{\text{cp}} = \frac{T_{\text{ж}} - T_{\text{г}}}{2}$; $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$;

$$d_{\text{cp}}^{\text{н}} = 0,5 d_{\text{кр}}^{\text{н}} \left(d_{\text{cp}}^{\text{н}} = 1,5 \frac{\sigma}{w_{\text{н}}^2 \sqrt[3]{\rho_{\text{н}} \rho_{\text{ж}}^2}} = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \right);$$

$\alpha_{\text{н}} = 0,26 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\lambda = 10^{-4} \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$;
 $\text{Gr} = 1,6 \cdot 10^6$; $\mu = 56,6 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\text{Pr} = 0,82$. В итоге высота столба воды, на которой газообразный водород нагревается до положительных температур, составила 0,122 м. Таким образом, при истечении жидких азота (кислорода) и водорода в воду длина зоны, в которой жидкость испаряется и нагревается до температуры, близкой к температуре воды, составляет примерно 0,3 м.

Следующим этапом истечения является образование облака газообразных кислорода или

водорода над поверхностью воды. Этот факт необходимо учитывать при разработке безопасной технологии эксплуатации объектов в условиях моря. В качестве примера на рис. 3 показано подоженное облако водорода при его сбросе из промышленной системы.

Список литературы

1. Либединская И.А. Теплообмен газовой струи с жидкостью / И.А. Либединская и др. // Теория и практика сжиженного газа. – Л.: Недра, 1975. – С. 192–199.
2. Аэров М.Э. Массоотдача в газовой фазе на барботажных тарелках без переливных устройств / М.Э. Аэров, Т.А. Быстрова, А.Н. Колтунова // Теоретические основы химической технологии. – 1970. – Т. 4. – № 4. – С. 467–474.
3. Аксельрод Л.С. Исследование гидродинамики и массообмена в высоких слоях барботажа / Л.С. Аксельрод и др. // Тепло- и массоперенос: сб. ст. / Ин-т тепло- и массообмена АН БССР. – Минск: [б.и.], 1972. – Т. 4. – С. 30–37.
4. Соу С. Гидродинамика многофазных систем / С. Соу. – М.: Мир, 1971. – 536 с.
5. Гребер Г. Основы учения о теплообмене = Die Grundgesetze der Wärmeübertragung / Г. Гребер, У. Экр, Д. Григуль; пер. с нем. – М.: Изд-во иностр. лит., 1958. – 566 с.

Heat-mass exchange when a cryogenic fluid discharges into water

A.M. Domashenko

Kriogenmash OJSC, Bld. 67, Prospect Lenina, Balashikha, Moscow Region, 143907, Russian Federation
 E-mail: domashenko@cryogenmash.ru

Abstract. When the cryogenic fuel systems are being designed for marine operation, the specific scientific and technical challenges are to be met, in particular regarding the emergency release of a cryogenic fuel into water. To clear up conditions of such emergency discharge, the following things were experimentally studied: heat-mass exchange processes in a zone of a discharge nipple; evaporation and heating of vapor while it moves within the water. This information was necessary for evaluation of explosion hazard in atmosphere. The named tests were done in conditions alike to the drainage in a commercial system. It was found out that at continual release of the liquid nitrogen into water through the conductors made of various materials and in the modes possible for a real system the safe continuous discharge could be provided in case the conductor is aliened downcast or angle-wise down.

The heat-mass exchange was studied for a case of the liquid nitrogen motion inside the water (for a jet, globules of a fluid, bubbles). A procedure was compiled to calculate a height of a jet when it is heated up to a temperature of water.

A final stage of studying cryogenic fluids discharge into water is determined. This is generation of a cloud of the gaseous oxygen and the gaseous hydrogen over a water face. This effect must be considered for safe operation of marine facilities.

Keywords: cryogenic fuel components, marine facilities, discharge, temperature of a cryogenic product, thermal head, safe operation technology.

References

1. LIBEDINSKAYA, I.A. Heat exchange of a gas jet and a fluid [Teploobmen gazovoy strui s zhidkostyu]. In: *Theory and practice of liquefied gas* [Teoriya i praktika szhizhennogo gaza]. Leningrad: Nedra, pp. 192–199. (Russ.).
2. AEROV, M.E., T.A. BYSTROVA, A.N. KOLTUNOVA. Mass transfer in a gas phase at bubble trays without downflow weirs [Massootdacha v gazovoy faze na barbotazhnykh tarelkakh bez perelivnykh ustroystv]. *Teoreticheskiye Osnovy Khimicheskoy Tekhnologii*. 1970, vol. 4, no. 4, pp. 467–474. ISSN 0040-3571. (Russ.).
3. AKSELROD, L.S. et al. Study of hydrodynamics and mass exchange in high bubbling layers [Issledovaniye gidrodinamiki i massoobmena v vysokikh sloyakh barbotazha]. In: *Heat and mass transfer* [Teplota i massoperenos]: collected papers. Minsk, 1972, vol. 4, pp. 30–37. (Russ.).
4. SOO, S.L. *Fluid dynamics of multiphase system* [Gidrodinamika mnogofaznykh sistem]. Translated from Engl. Moscow: Mir, 1971. (Russ.).
5. GRÖBER, H., S. ERK, U. GRIGULL. *Basics of heat exchange theory* [Osnovy ucheniya o teploobmene] = Die Grundgesetze der Wärmeübertragung. Translated from Germ. Moscow: Izdatelstvo inostrannoy literatury, 1958. (Russ.).