

УДК 621.59

## Тепломассообмен при неравновесном процессе нагрева термодинамически подобных криопродуктов до закритического состояния

**А.М. Домашенко**

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

**Ключевые слова:** криогенные продукты, термодинамическое подобие, изохорический процесс, реальный процесс, нагрев, стратификация, тепловой слой, ядро продукта, пограничный слой.

**Тезисы.** Теоретически и экспериментально исследован теплообмен в процессах нагрева в замкнутом объеме термодинамически подобных (или условно подобных) криогенных продуктов (азота, кислорода, аргона, метана). Проанализированы существующие методики расчета неравновесного нагрева этих жидкостей до рабочих давлений 0,4...0,6 МПа. Выполнены экспериментальные исследования нагрева до ранее не изученных закритических давлений. Исследованы физические особенности неравновесного нагрева двухфазной системы с переходом в однофазное закритическое состояние. Установлено, что в неравновесном процессе нагрева граница раздела фаз существует вплоть до возникновения критического давления.

Разработана методика расчета роста давления во времени. Полученные зависимости аппроксимируют экспериментальные данные с предельной относительной погрешностью  $\pm 12\%$  при доверительной вероятности 0,95. Эта методика уже на этапе проектирования позволяет рассчитывать один из основных технологических параметров – время бездренажного хранения термодинамически подобных криогенных продуктов до заданного давления.

Хранение криопродуктов при закрытом газосбросе наиболее целесообразно, когда потери продукта нежелательны или газосброс затруднен по условиям эксплуатации, в частности для подводных аппаратов. При таком способе хранения в процессе свободно-конвективного нагрева двухфазной системы «жидкость – пар» возникает температурное расслоение по высоте столба жидкости, которое приводит к сокращению времени хранения до заданного давления по сравнению с равновесным изохорным нагревом.

Для расчета процесса с учетом принятого механизма расслоения при равномерном подводе тепла к поверхности сосуда авторы большинства известных в настоящее время исследований [1–4] использовали модели, имеющие ряд принципиальных допущений. Предполагалось, что на возникновение и развитие прогретого верхнего слоя в жидкости не влияют фазовые переходы на границе раздела фаз, перемещение самой границы за счет термического расширения жидкости и фазовых переходов, переменность свойств жидкости и пара. Считалось также, что процессы теплообмена и формирование теплового слоя не зависят от процессов, связанных с изохорным нагревом двухфазной среды.

Принимаемые допущения являются достаточно обоснованными, если повышение внутренней энергии происходит в двухфазовой области состояния системы «жидкость – пар» и не приводит к значительному повышению давления. Для криогенных продуктов это давление ( $p$ ) составляет 0,4...0,6 МПа, т.е. тот диапазон, в котором и проводились практически все исследования.

Теоретически расчет параметров криогенных продуктов при их нагреве в замкнутом объеме связан с решением системы дифференциальных уравнений теплопереноса и гидродинамики, описывающих процесс естественной конвекции. Система уравнений, описывающая квазистационарный режим течения жидкости и нестационарное поле температур, включает уравнения переноса тепла в поверхностном слое и в ядре жидкости, переноса тепла вдоль стенки, а также уравнения турбулентного пограничного слоя с учетом неизотермической среды и стенки [4, 5]. Эти уравнения

записываются в безразмерном виде при масштабах отнесения<sup>1</sup>: для линейных размеров – к высоте столба жидкости  $h_f$ ; для скорости – к параметру  $\frac{v_f}{h_f}$ ; для температур – к параметру  $\frac{q_{w1} h_f}{\lambda_f}$ . В этом случае

$$\bar{x} = \frac{x}{h_f}; \bar{\delta}_s = \frac{\delta}{h_f}; \bar{U} = \frac{U h_f}{v_f}; \bar{W} = \frac{W h_f}{v_f}; \bar{\theta} = \frac{(T - T_0) \lambda_f}{q_{w1} h_f}; \bar{\theta}_w = \frac{(T_w - T) \lambda_f}{q_{w1} h_f}.$$

Тогда уравнение переноса тепла в поверхностном слое и ядре имеет вид

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \text{Fo}} - \bar{U} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} + f_q. \quad (1)$$

При  $h_f/h_w = 0,7 \dots 0,9$  ( $h_w$  – высота стенки сосуда) начальные и граничные условия записываются в следующем виде:

$$\bar{\theta} = (\bar{x}, 0) = 0; \quad \frac{\partial \bar{\theta}(0, \text{Fo})}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \bar{\theta}(1, \text{Fo})}{\partial \bar{x}} = 0;$$

$$\bar{U} = 0,585 \text{Pr} K_4 \bar{W} \bar{\delta} \text{ для } \bar{x} < 1 - \bar{\delta}_s;$$

$$\bar{U} = \text{Pr} \bar{U}_s \left( \frac{1 - \bar{x}}{\bar{\delta}_s} \right)^n \text{ для } 1 - \bar{\delta}_s \leq \bar{x} \leq 1;$$

$$f_q = 0 \text{ для } \bar{x} < 1 - \bar{\delta}_s;$$

$$f_q = 0,146 \text{Pr} K_4 \bar{W} \bar{\theta}_{ws} \text{ для } 1 - \bar{\delta}_s \leq \bar{x} \leq 1,$$

где  $\bar{\theta} = \frac{(T_f - T_{f0}) \lambda_f}{q_{w1} h_f}$  – избыточная температура по оси сосуда ( $T_f$  и  $T_{f0}$  – текущая и первоначальная температуры жидкости соответственно,  $\lambda_f$  – теплопроводность жидкости,  $q$  – плотность теплового потока);  $\text{Fo} = \frac{a_f \tau}{h_f^2}$  – число Фурье ( $a_f$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – характерное время изменения внешних условий);  $\bar{U}$  – скорость конвективного переноса тепла в поверхностном слое и ядре по оси;  $\bar{W} = \frac{W h_f}{v_f}$  – скорость жидкости в пограничном слое;  $\bar{U}_s$  – скорость опускания жидкости на оси при  $\bar{x} < 1 - \bar{\delta}_s$ ;  $\bar{\theta}_{ws}$  – избыточная температура стенки на поверхности раздела фаз;  $\bar{\delta}_s = \frac{\delta}{h_f}$  – безразмерная толщина поверхностного слоя;  $\bar{x} = \frac{x}{h_f}$  – текущая координата;  $K_4 = \frac{h_f}{D}$  ( $D$  – диаметр сосуда);  $f_q$  – функция теплового источника, характеризующая перенос тепла через пограничный слой в поверхностный слой;  $n$  – показатель степени при аппроксимации распределения в прогревом слое с помощью параболического закона.

Пограничный слой при условии неизотермичности среды записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\delta}}{d\bar{x}} &= -2,39 \text{Gr} \frac{\bar{\delta} \bar{\theta}_w}{\bar{W}^2} + (0,436 + 1,244 \text{Pr}^{-\frac{2}{3}}) (\bar{\delta} \bar{W})^{-\frac{1}{4}} - \left( 2 \frac{d\bar{\theta}_w}{d\bar{x}} + 8,16 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} \right) \frac{\bar{\delta}}{\bar{\theta}_w}; \\ \frac{d\bar{W}}{d\bar{x}} &= 2,39 \text{Gr} \frac{\bar{\theta}_w}{\bar{W}} - (0,436 + 1,244 \text{Pr}^{-\frac{2}{3}}) \bar{\delta}^{-\frac{5}{4}} \bar{W}_1^{-\frac{3}{4}} + \left( \frac{d\bar{\theta}_w}{d\bar{x}} + 4,08 \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{x}} \right) \frac{\bar{W}_1}{\bar{\theta}_w}. \end{aligned} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Здесь и далее подстрочный индекс  $f$  обозначает отнесение параметра к жидкости, индекс  $w$  – к стенке сосуда.

Здесь  $Gr = \frac{g\beta q_w h_f^4}{\lambda_f \nu_f^2}$  – модифицированный критерий Грасгофа ( $g$  – ускорение свободного падения,

$\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения теплоносителя);  $\bar{\theta}_w$  – избыточная температура стенки.

Перенос тепла вдоль тонкой стенки ( $\delta_w/h_w \ll 1$ ) записывается в виде

$$\frac{d^2 \bar{\theta}_w}{d\bar{x}^2} - 0,0228 Pr^{\frac{1}{3}} \frac{K_3}{K_1 K_2} \delta^{-\frac{1}{4}} W^{\frac{3}{4}} \bar{\theta}_w = - \left( \frac{K_3}{K_1 K_2} + \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial \bar{x}^2} \right) \quad (3)$$

при граничных условиях

$$\frac{d\bar{\theta}_w}{d\bar{x}} = \frac{d\bar{\theta}(0)}{d\bar{x}}, \quad \frac{d\bar{\theta}_w(1)}{d\bar{x}} = \frac{K_3}{K_1 K_2} - \frac{d\bar{\theta}_w(1)}{d\bar{x}},$$

где  $K_1 = \delta_w/h_w$  – характеристика геометрии стенки;  $K_2 = \lambda_w/\lambda_f$ ;  $K_3 = h_f/h_w$  – степени заполнения сосуда жидкостью.

Из приведенных уравнений и граничных условий вытекает, что температурное поле  $\bar{\theta}$  зависит от независимых параметров  $\bar{\theta} = f(\bar{x}, Fo, Pr, Gr, K_1, K_2, K_3, K_4)$ .

Для ряда частных случаев, например, при сравнительно больших плотностях тепловых потоков у поверхности сосудов при больших степенях заполнения жидкостью допустимо использовать простую физическую модель, в которой температурное расслоение возникает в основном за счет подвода тепла к зеркалу жидкости.

При этом предполагается, что тепловой поток распространяется как в полуограниченном твердом теле с теплопроводностью  $\lambda_s = \varepsilon \lambda$  ( $\varepsilon$  – поправочный коэффициент, учитывающий кон-

векцию жидкости). При этом принимается  $\varepsilon = A Ra^{\frac{1}{6}}$ , где  $A$  – эмпирическая постоянная для различной геометрии сосудов,  $Ra$  – число Рэлея. В этом случае температура в любой точке объема определяется зависимостью

$$\frac{[T_f(x, \tau) - T_{f0}] \lambda}{qR} = \frac{F_{ж}}{V} R Fo + 2 \frac{F_n}{F_s} \sqrt{Fo} \cdot \text{ierfc} \frac{x}{R \sqrt{Fo}},$$

где  $T_f(x, \tau)$  и  $T_{f0}$  – текущая и первоначальная температуры жидкости соответственно;  $q$  – плотность теплового потока из окружающей среды;  $F_{ж}$ ,  $F_n$ ,  $F_s$  – площади соответственно смоченной жидкостью поверхности, омываемой паром поверхности и поверхности раздела фаз;  $x$  – координата от поверхности раздела фаз вертикально вниз;  $R$  – радиус.

Для инженерных расчетов используются также эмпирические зависимости, полученные обработкой экспериментальных данных, например, в работе Е.М. Баслиной и др. [1] предложена зависимость

$$\frac{(p - p_0)(\nu'' - \nu')}{r} = Co \left[ Fo Ga^{-0,79} Pr^{-4,45} K^{0,95} \theta \Pi^{-0,75} \left( \frac{\nu'' - \nu'}{\nu'} \right)^{0,7} \left( \frac{D^2}{F} \right)^{1,46} \left( \frac{\lambda_w}{\lambda'} \right)^{0,3} \left( \frac{D}{\delta} \right)^{0,72} \left( \frac{Ho}{D} \right)^{-n} \right]; \quad (4)$$

$$Ga = \frac{gD^3}{\nu^2}; \quad Pr = \frac{\nu}{a}; \quad K = \frac{r\beta}{C}; \quad \theta = \frac{qD\beta}{\lambda}; \quad \Pi = \frac{r}{gD}; \quad Co = 2,45 \cdot 10^{15}.$$

В случае если тепловой поток  $q \gg 1$  Вт/м<sup>2</sup>, Э. Харпер и др. [4] рекомендуют уравнение

$$\frac{(T_s - T_0)c_p}{\ell} = 0,65 Ho^{0,76} \left( \frac{\tau}{\tau_*} \right)^n \left( \frac{1 - \varphi_0}{\varphi_0} \right)^{-0,3}, \quad (5)$$

где  $c_p$  – изобарная теплоемкость;  $\ell = \frac{V}{F}$  – характерный размер;  $Ho$  – критерий гомотронности;

$\tau$  – текущее время;  $n = f(x_0)$ ;  $\tau_*$  – начальный отрезок времени, в течение которого температура жидкости в объеме практически не меняется.

В таблице приведены основные расчетные соотношения, известные из печатных работ, и границы их применяемости. Некоторые результаты расчетов по этим соотношениям и экспериментальные данные, полученные на установке с резервуаром вместимостью  $V = 0,116$  м<sup>3</sup> при

## Основные расчетные модели тепломассопереноса

Э. Харпер [4]	$\frac{(T_s - T_0)\lambda}{qH} = \frac{2\left(\frac{H}{R}\right)}{\int \left[\frac{T_z - T_0}{T_s - T_0}\right] d\eta} \frac{v\tau}{H^2}; \eta = \frac{z}{\Delta(\tau)};$ $\frac{\Delta(\tau)}{H} = 1 - \left[ 1 + 0,0924 \frac{H}{R} \frac{v\tau}{H^2 \text{Pr}^{\frac{2}{3}}} \left( \frac{\text{Gr}^*}{1 + 0,443 \text{Pr}^{\frac{2}{3}}} \right)^{\frac{2}{7}} \right]^{-7};$ $\text{Gr} \leq 3 \cdot 10^{14}; \tau \leq 300 \text{ с}$
А.И. Винников	$p - p_o = \text{Co} \frac{D^{1,03} \lambda_w^{0,3}}{0,72 F^{1,46}} \left( \frac{\text{Ho}}{D} \right)^{-\eta} q_f \tau; \frac{\Delta(\tau)}{H} = 13 \frac{\text{Fo}^{3,5}}{\text{Pr}^2} \left( \frac{\lambda_f \delta}{\lambda D} \right)^{\frac{5}{4}};$ $\text{Fo} = 2 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-1}; \frac{\lambda D}{\lambda_f \delta} = 3 \cdot 10^{-1} \dots 8; \text{Pr} = 1,1 \dots 2,5; \frac{\text{Ho}}{D} = 0,5 \dots 2,2$
Ю.А. Кириченко	$\frac{T_s \text{Co}}{r} = 0,65 \text{Ho}^{0,76} \left( \frac{\tau}{\tau^*} \right)^{\eta} \left( \frac{1-\varphi}{\varphi} \right)^{-0,5}; \eta = f(x);$ $\text{Ra} = 0,4 \cdot 10^8 \dots 0,4 \cdot 10^{11}; \text{Pr} = 1,6 \dots 18; \text{Fo} = 1,1 \cdot 10^{-2} \dots 1,9 \cdot 10^{-1};$ $\text{Ho} = 1,2 \cdot 10^{-3} \dots 7,8 \cdot 10^{-2}; \frac{1-\varphi}{\varphi} = 0,01 \dots 4,9; x = 1,03 \cdot 10^{-6} \dots 2,4 \cdot 10^{-2}$
Ю.А. Кириченко	$\frac{(T_s - T_0)\lambda}{ql} = 2,08 \text{Fo} + \frac{1,13 \sqrt{\text{Fo}}}{\sqrt{A} \cdot \text{Ra}^{\frac{1}{12}}} - \text{цилиндр};$ $\frac{(T_s - T_0)\lambda}{ql} = 3 \text{Fo} + 5,64 \frac{\sqrt{\text{Fo}}}{\text{Ra}^{\frac{1}{12}}} - \text{сфера};$ $\text{Ra} = 10^6 \dots 10^{12}; \text{Fo} = 10^{-3} \dots 1,4; \varphi \geq 0,85$
В.Ф. Хлыбов	Численное решение уравнений гидродинамики характерных зон: пограничного слоя, теплового слоя и ядра

числах Ra и Fo и степенях заполнения  $\varphi$ , соответствующих диапазону применимости расчетных соотношений, представлены на рис. 1.

Э. Харпер с соавторами [4] получили соотношение между температурой поверхности жидкости, временем хранения и толщиной теплового слоя для случая интенсивного и кратковременного нагрева в предположении о постоянстве температуры ядра жидкости и отсутствии фазовых переходов. Е.М. Баслиной и Ю.А. Кириченко с соавторами [1, 2] использованы методы решения, основанные на теории обобщенных переменных. В первом случае [1] с учетом перетока тепла от боковых стенок в массу жидкости предложено соотношение (4) для расчета текущего безразмерного давления

$$\Pi = \frac{(T_s - T_0)(v'' - v')}{r}, \text{ где } v' \text{ и } v'' - \text{удельные}$$

объемы жидкости, пара в функции от безразмерных параметров и критериев подобия, полученных методом размерностей. Коэффициент Co зависит от рода жидкости, ее температуры и определяется экспериментально. Следует отметить, что в числе аргументов этого соотношения отсутствует такой важный параметр, как удельный объем системы (степень заполнения сосуда жидкостью  $\varphi$ ). Не является также очевидным использование числа Фурье (Fo) в качестве границы применимости расчетного соотношения, поскольку к моменту времени, определенному из предельного значения  $\text{Fo} = 0,1$ , давление в сосуде в зависимости от значения теплового потока может меняться в пределах, исключающих возможность использования принятых допущений и модели процесса (5) [4]. Например, при исследовании

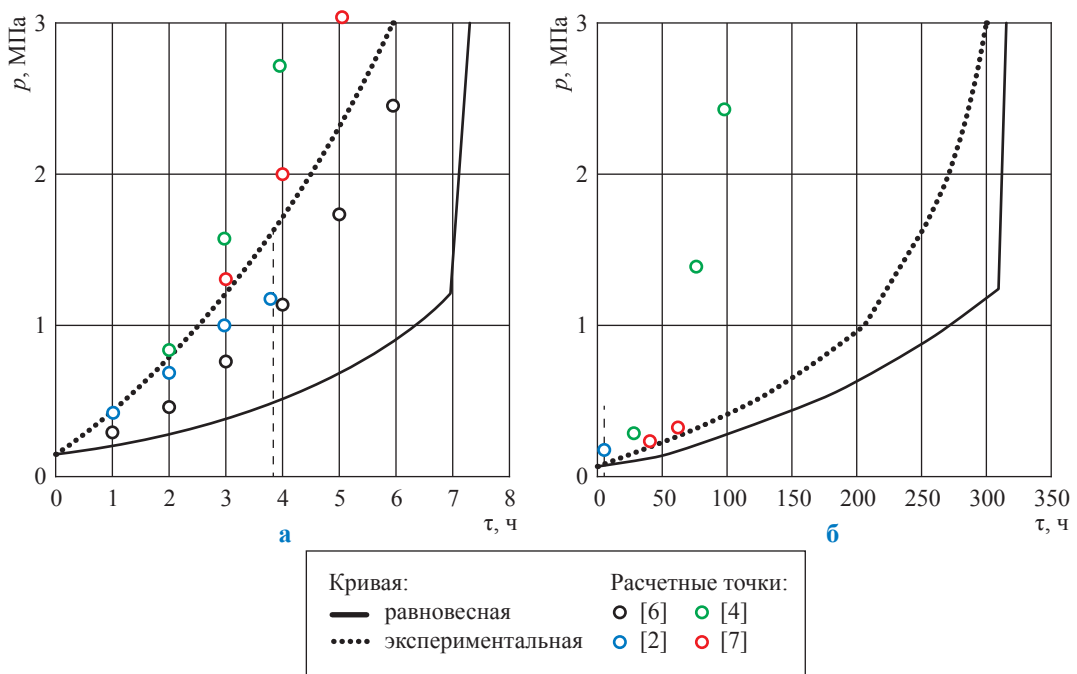


Рис. 1. Зависимость давления  $p$  от времени  $\tau$  процесса нагрева жидкого азота при  $\phi = 0,8$ ,  $Fo = 0,1$  и тепловом потоке  $q$ , равном 238 (а) и 5,5 (б) Вт/м<sup>2</sup>

процесса бездренажного хранения жидкого азота в резервуаре вместимостью  $V = 0,116$  м<sup>3</sup> при тепловых потоках  $q = 5 \dots 240$  Вт/м<sup>2</sup> и степени заполнения  $\phi = 0,9$  давление при  $Fo = 10^{-1}$  изменялось в пределах 0,04...2,0 МПа [6].

Ю.А. Кириченко и Ж.А. Супрунова [2] получили безразмерные комплексы для изучаемого процесса методом теории подобия на основе уравнений первого закона термодинамики и уравнений, описывающих процесс теплообмена на вертикальной стенке. Определяющим в этой работе является допущение о том, что системой критериев подобия, выведенной для начального интервала времени процесса нагрева (квазиравновесного), могут быть описаны температурное поле жидкости и давление в паровой фазе и на последующих стадиях, где свойства среды можно считать неизменными. Полученные соотношения для определения текущей температуры границы раздела фаз (давление в паровой фазе), включая безразмерный тепловой поток  $Но$ , степень заполнения  $\phi$  и безразмерное время  $\tau = \frac{\tau}{\tau_*}$ , приведены в таблице

в зависимости только для времени  $0 < \tau \leq \tau_*$ . В качестве масштаба времени в безразмерных комплексах  $\tau = \frac{\tau}{\tau_*}$  и  $Но$  принята временная

граница двух гидродинамических режимов – нестационарного (внутреннего переходного) и внешнего переходного, возникающих при подводе тепла к двухфазной замкнутой системе в момент времени  $\tau = 0$ .

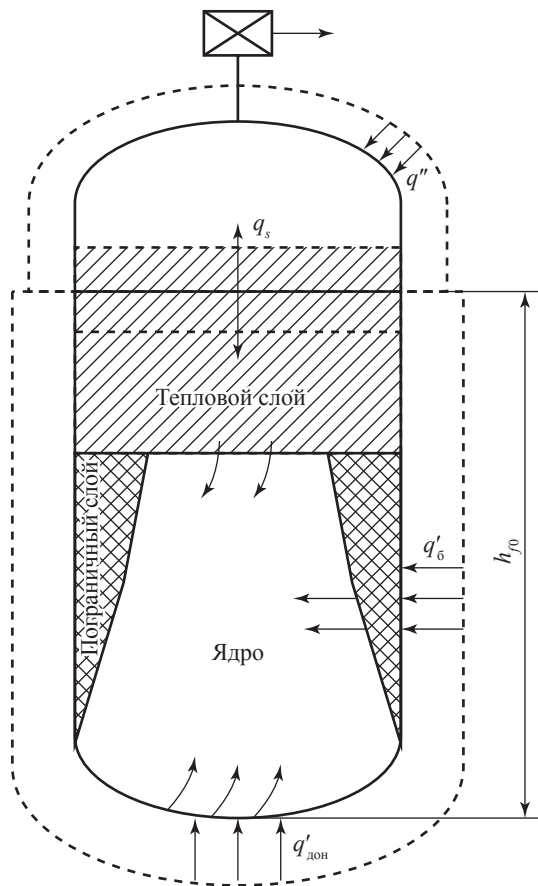
В процессе реализации внутреннего переходного режима при таком начальном условии у боковых стенок формируются пограничный слой и первый цикл конвективного движения в объеме жидкости. По мнению Ю.А. Кириченко и Ж.А. Супруновой [2], на этом этапе развития процесса происходит интенсивный вынос тепла от нагреваемых стенок нижней части объема жидкости к свободной поверхности, следствием которого является максимальный темп возрастания температуры поверхности раздела фаз. В реальных системах хранения криогенных продуктов начало процесса (закрытие газосброса) происходит в условиях стабилизированного теплового потока, сформированных пограничного слоя и циркуляционного движения, поэтому использование предложенной физической модели развития процесса для систем хранения представляется достаточно условным. Значения времени  $\tau_*$ , полученные при расчете по рекомендованной Ю.А. Кириченко и Ж.А. Супруновой [2] зависимости, в большинстве режимов превышали границу квазиравновесного состояния системы. Под квазиравновесной понимается

система, в которой разница температур в жидкости на начальном этапе нагрева не превышает 3,5 % среднemasсовой температуры.

Представляется недостаточно корректным введение в критерий гомохронности  $Но$  в качестве масштаба времени  $\tau_*$ , физически не имеющего отношения к процессу равновесного изохорного нагрева.

Анализ результатов расчета и их сравнение с экспериментальными данными показывают, что обсуждаемая методика [2] в пределах своей применимости достаточно хорошо описывает режимы только с большими тепловыми потоками и дает значительное отклонение при тепловых потоках, характерных для промышленных систем хранения криопродуктов.

Наибольшее совпадение расчетных данных с экспериментальными получено в предположении, что при степенях заполнения  $\varphi \geq 0,85$  основным фактором температурного расслоения является тепловой поток, поступающий



**Рис. 2. Физическая модель процесса нагрева двухфазной системы:** индексы  $s$ , штрих, два штриха соотносят плотность теплового потока соответственно с фазовым переходом, жидкостью, паром

от купола резервуара к верхнему слою жидкости, в котором он распространяется с эффективной теплопроводностью [6]. В данном случае необходимо обратить внимание на предел применимости расчетных соотношений по числу  $Fo$ . В ряде режимов, которые удовлетворяли заданным значениям определяющих параметров процесса, расчетная кривая к моменту времени  $\tau_*$ , соответствующему числу  $Fo = 1,4$ , пересекала не только экспериментальную, но и равновесную кривую.

Когда речь идет о бездренажном хранении криопродуктов до закритического состояния [6, 7], тепловая стратификация жидкости, возникающая в процессе свободноконвективного теплообмена и нагрева двухфазной системы в замкнутом объеме, – явление еще более сложное, зависящее от многих факторов, действия которых взаимосвязаны и часто противоположны. Физическая модель процесса представлена на рис. 2. Возникает и развивается стратифицированный слой в результате притока в него части нагретой в пограничном слое жидкости и теплоты, поступающей от купола резервуара. При этом усложнение происходящих процессов и расчета их параметров объясняется следующими причинами: существенным изменением теплофизических свойств криогенных продуктов при повышении их температуры до закритического состояния; передачей теплоты фазовых переходов и теплоты нагрева пара не всей жидкости, а поверхностному слою, что приводит к увеличению в нем градиента температуры (нагрев пара и конденсация) или к его уменьшению (испарение); изменением параметров пограничного и поверхностного слоев за счет нестационарного перемещения границы раздела фаз, связанного с термическим расширением жидкости и фазовыми переходами, разнообразием форм и объемов резервуаров.

Кроме этого, необходимо учитывать, что в изучаемом процессе реализуется изохорный нагрев, описываемый первым законом термодинамики для системы «жидкость – пар». Причем изохорный нагрев, в результате которого происходят процессы испарения, конденсации, термического расширения, перераспределения теплового потока на нагрев жидкой и паровой фаз и фазовый переход, а также значительное изменение теплофизических свойств, кардинально влияет на процессы теплопереноса и гидродинамики. Кроме

этого, в промышленных резервуарах реализуется турбулентное движение жидкости ( $Ro \gg 10^9$ ), что практически не позволяет решать уравнения гидродинамики и теплопереноса. Очевидно, что описать подобный нестационарный процесс нагрева уравнениями гидродинамики, решить их или выделить безразмерные комплексы чрезвычайно сложно. Поэтому наиболее целесообразным методом исследования был признан экспериментальный с использованием теории обобщенных переменных (приближенное моделирование).

С точки зрения изохорного нагрева криогенных продуктов, используемых в промышленных масштабах и которые можно отнести к термодинамически подобным или условно подобным (кислород, азот, аргон, метан), установлено [8, 9], что безразмерное давление перехода двухфазной системы в однофазное состояние, доли теплоты, идущие на нагрев жидкости, пара и фазовый переход, время достижения однофазного состояния при заданной степени заполнения резервуара и одинаковом безразмерном тепловом потоке для таких жидкостей отличаются незначительно. К этим жидкостям можно отнести и криптон с ксеноном.

Расчеты долей тепла в равновесном процессе выполнены с использованием термодинамических соотношений:

$$\begin{aligned}
 F' &= \frac{q'}{q^*} = \left( \frac{v'' - v^*}{v'' - v'} \right) \frac{c'_s}{c_v^*}; \quad F'' = \frac{q''}{q^*} = \left( \frac{v^* - v'}{v'' - v'} \right) \frac{c''_s}{c_v^*}; \\
 F^s &= \frac{q_s}{q^*} = - \left( \frac{i'' - i'}{v'' - v'} \right) \left[ \left( \frac{v'' - v^*}{v'' - v'} \right) \frac{dv'}{dT} + \left( \frac{v^* - v'}{v'' - v'} \right) \frac{dv''}{dT} \right] \frac{1}{c_v^*}; \\
 c'_s &= \frac{di'}{dT} - \frac{v'}{T} \left( \frac{i'' - i'}{v'' - v'} \right); \quad c''_s = \frac{di''}{dT} - \frac{v''}{T} \left( \frac{i'' - i'}{v'' - v'} \right); \\
 c_v^* &= (1-x) \left[ c'_s - \left( \frac{i'' - i'}{v'' - v'} \right) \frac{dv'}{dT} \right] + x \left[ c''_s - \left( \frac{i'' - i'}{v'' - v'} \right) \frac{dv''}{dT} \right], \quad (6)
 \end{aligned}$$

где  $F'$ ,  $F''$ ,  $F^s$  – доли тепла от общего теплового потока соответственно на нагрев жидкости, пара и фазовый переход;  $q'$ ,  $q''$ ,  $q_s$ ,  $q^*$  – теплота нагрева соответственно жидкости, пара, фазового перехода и общий тепловой поток;  $i'$ ,  $i''$  – энтальпия соответственно жидкости и пара;  $v'$ ,  $v''$ ,  $v^*$  – удельные объемы жидкости, пара и двухфазной системы соответственно;  $c'_s$ ,  $c''_s$ ,  $c_v^*$  – соответственно теплоемкость жидкости и пара на линии насыщения и изохорная теплоемкость системы;  $x$  – степень сухости пара.

Важно отметить, что сравнение значений теплоемкости, рассчитанных по зависимости (6) с использованием таблиц теплофизических свойств [2], с экспериментально определенными значениями теплоемкости [3] показали, что расхождения между ними не превышают 5 %. Поэтому расчет текущей температуры в изохорном процессе по зависимости

$$dT = \frac{dq}{Mc_v},$$

где  $dq = du$  (внутренняя энергия), дает достаточно надежные результаты.

При переходе через кривую фазового равновесия изохорная теплоемкость  $c_v$ , так же как и изобарная  $c_p$ , претерпевает скачок [8]. Это видно из соотношения

$$c_v^* = (1-x) \left\{ c'_v - \frac{T}{\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)'_T} \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)'_v - \frac{dp_s}{dT} \right] \right\} + x \left\{ c''_v - \frac{T}{\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)''_T} \left[ \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)''_v - \frac{dp_s}{dT} \right] \right\}. \quad (7)$$



Величина скачка составляет соответственно для жидкой и паровой фаз

$$c'_v - c_v^* = \frac{T}{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)'_T} \left[ \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)'_v - \frac{dp_s}{dT} \right];$$

$$c''_v - c_v^* = \frac{T}{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)''_T} \left[ \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)''_v - \frac{dp_s}{dT} \right], \quad (8)$$

где  $c''_v$ ,  $c_v^*$  и  $c'_v$  – теплоемкости на линии насыщения при подходе к линии фазового равновесия со стороны однофазного состояния вещества.

Для расчета основных параметров изохорного процесса в области однофазного состояния жидкости используется соотношение

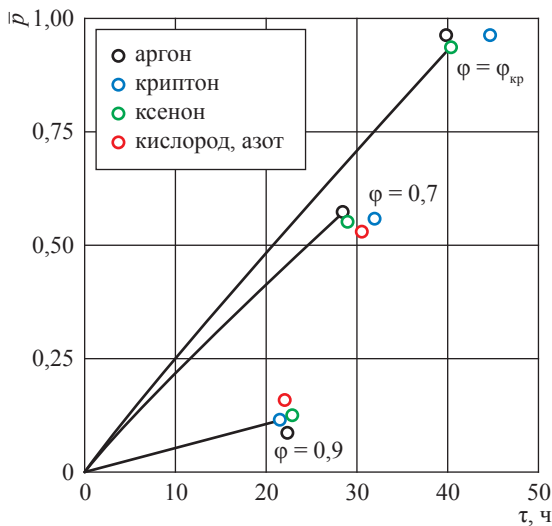
$$c_v = T \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_v, \quad (9)$$

где  $S$  – площадь поверхности сосуда.

Анализ результатов расчета показывает, что теплоемкость  $c_v$  (в однофазной жидкостной области) зависит от температуры значительно, поэтому этот фактор должен обязательно учитываться при расчете параметров изохорного нагрева. На рис. 3 приведены зависимости

безразмерного давления  $\bar{p} = \frac{p}{p_{кр.г}}$  от вре-

мени  $\tau$  при степенях заполнения  $\varphi = 0,9; 0,7; \varphi_{кр}$  и  $\bar{q} = 0,0105$ , а на рис. 4 – доли тепла, расходуемые на нагрев жидкости, пара и фазовый



**Рис. 3. Зависимость  $\bar{p} = f(\tau)$  при равновесном изохорическом нагреве для различных значений  $\varphi$  и  $\bar{q} = 0,01058$**

переход в зависимости от безразмерной температуры  $T = T/T_{кр}$  при тех же значениях  $\varphi$  и  $\bar{q}$ . Отметим, что расчетные параметры исследуемых газов различаются не более чем на несколько процентов. И только для криптона время перехода в однофазное состояние при уменьшении  $\varphi$  от 0,9 до  $\varphi_{кр}$  увеличивается (по сравнению с аналогичным параметром для аргона, кислорода и азота) примерно на 10 %. Из анализа зависимостей, представленных на рис. 3, 4, можно сделать важный вывод о том, что при изохорическом нагреве термодинамически подобных жидкостей темп роста давления для них одинаков при одинаковых условиях.

Анализ представленных методов расчета и физических моделей процесса нагрева в замкнутом объеме криогенных продуктов показывает, что при допущении о постоянной границе раздела фаз, отсутствии фазовых переходов и постоянстве теплофизических свойств криопродуктов они работоспособны. Физическая картина нагрева двухфазной системы существенно изменяется, если она нагревается до температуры и соответствующего давления, превышающих критические значения. В этом случае при  $v^* < v_{кр}$  жидкость расширяется за счет нагрева и заполняет весь объем; при  $v^* > v_{кр}$  жидкость полностью испаряется. В этих случаях граница раздела фаз, перемещаясь вверх или вниз, в значительной степени деформирует тепловые слои и за счет испарения или конденсации паровой фазы, и чисто механически. Сама же двухфазная система переходит в однофазное состояние – жидкостное или паровое. Естественно, что в таком процессе в широком диапазоне изменяются все теплофизические свойства. Следовательно, нагрев криопродуктов до закритического состояния требует отличных от рассмотренных выше подходов к решению задачи.

Если учитывать тот факт, что основными параметрами при равновесном изохорическом нагреве, определяющими все параметры процесса и состояния, являются при известных свойствах криопродукта только тепловой поток и степень заполнения резервуара жидкостью, можно подойти к экспериментальному исследованию бездренажного хранения, базируясь на сравнении расчетного равновесного темпа роста давления с экспериментально полученными данными и связывая их меж-

ду собой через безразмерное время  $\bar{\tau} = \frac{\tau_d}{\tau_p}$ ,



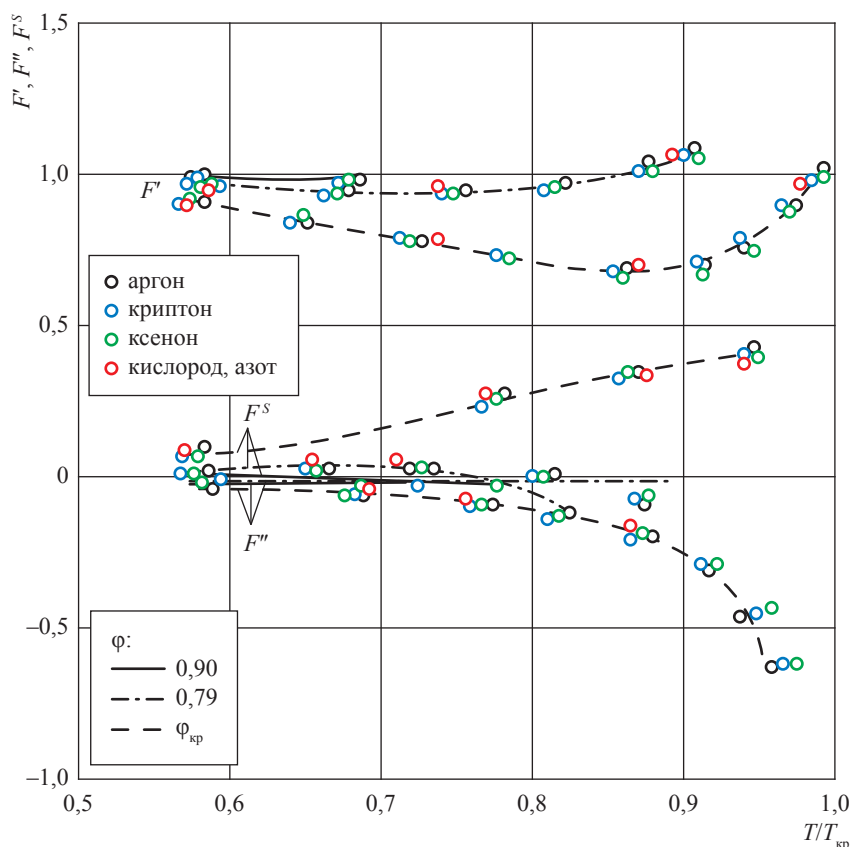


Рис. 4. Изменение долей тепла на нагрев жидкости ( $F'$ ), пара ( $F''$ ) и фазовый переход ( $F^S$ ) в зависимости от относительной температуры  $T/T_{кр}$  и степени заполнения резервуара  $\varphi$

где  $\tau_d$  – действительное время хранения, учитывающее сложные теплообменные процессы, происходящие в двухфазной замкнутой системе,  $\tau_p$  – расчетное равновесное время хранения в изохорном процессе.

**Экспериментальные исследования неравновесного нагрева криопродуктов.** Анализ физической модели показал, что количество влияющих на стратификацию жидкости факторов весьма значительно, причем действия их взаимосвязаны и часто противоположны. К особенностям изохорического нагрева до закритического состояния среды следует отнести то, что нагрев начинается с равновесного состояния двухфазной системы, далее происходит в неравновесном процессе, а оканчивается в однофазном закритическом состоянии, которое можно считать практически равновесным. С учетом описанных особенностей процесса была предпринята попытка выделить самые существенные определяющие параметры. Такими параметрами, подтвержденными предварительными экспериментами, явились уровень заполнения резервуара жидкостью и тепловой поток к системе. Уровень

заполнения влияет комплексно и на распределение доли тепла на нагрев фаз и фазовый переход, и на общую картину тепловых потоков. Это приводит к тому, что при  $\varphi < \varphi_{кр}$  стратификация практически исчезает. Также интенсивно влияет на картину тепловых потоков и их развитие тепловой поток к системе. В связи с этим данные параметры были выделены, и исследовалось их влияние на температуру границы раздела фаз. Таким образом, изменение безразмерной температуры в процессе изохорного нагрева жидкости принималось зависимым в основном от двух безразмерных комплексов:

теплового потока  $\bar{q} = \frac{q_s S \tau}{\varphi_0 \rho_{j0} V T_{j0} c_{j0}^{нас}}$  и степени

заполнения резервуара  $\varphi = V_{j0}/V$ , где  $q_s$  – удельный тепловой поток;  $S$  – площадь поверхности сосуда;  $\varphi_0$  – начальная степень заполнения;  $V_{j0}$ ,  $V$  – соответственно начальный объем жидкости и вместимость сосуда;  $\rho_{j0}$ ,  $T_{j0}$ ,  $c_{j0}^{нас}$  – начальные плотность, температура и теплоемкость жидкости на линии насыщения;  $\tau$  – время.

С учетом особенностей нагрева термодинамически подобных жидкостей (рис. 5, см. рис. 4)

при планировании эксперимента было принято допущение о том, что если в равновесном процессе при одинаковых значениях  $\varphi$  и  $\bar{q}$  темпа давления для рассматриваемых жидкостей одинаков, то он должен быть одинаковым и в неравновесном процессе. Правомерность этого допущения экспериментально подтверждена при исследовании бездренажного хранения жидких азота и кислорода. Параметром, связывающим оба процесса, в этом случае является безразмерное время  $\bar{\tau}$ . Было принято также допущение о незначительном влиянии на процесс бездренажного хранения размеров и формы резервуаров, по крайней мере, объемом до  $32 \text{ м}^3$ , которое в дальнейшем в пределах погрешности экспериментально подтвердилось [7, 10].

Перед планированием эксперимента были проанализированы диапазоны изменения основных параметров в промышленных системах. Эксплуатируемые и создаваемые системы-хранилища высокого давления оснащаются криогенными резервуарами вместимостью  $V = 0,1 \dots 32 \text{ м}^3$ , имеющими форму шара либо вертикального или горизонтального цилиндра с отношением длины

к диаметру  $\bar{L} = \frac{L}{D} = 1 \dots 4$ . Удельный тепловой

поток  $q_s = 0,0025 \dots 0,625 \text{ Вт/кг}$  (в зависимости от типа изоляции и объема резервуара). При нарушении изоляции  $q_s$  увеличивается до  $0,2 \dots 1,875 \text{ Вт/кг}$ . Степень заполнения резервуара  $\varphi = 0 \dots 1$ . Основные жидкости, которые в настоящее время хранятся в промышленных масштабах, – метан, азот, кислород, аргон и водород.

С учетом проведенного анализа входных параметров и принятых выше допущений был создан опытный стенд с вертикальным цилиндрическим резервуаром вместимостью  $V = 0,112 \text{ м}^3$  ( $\bar{L} = 1,3$ ) с рабочим давлением  $p = 4 \text{ МПа}$ . На стенде можно было проводить исследования во всем диапазоне тепловых потоков, степеней заполнения и с любой из указанных выше криогенных жидкостей.

**Анализ и обобщение полученных экспериментальных данных.** При экспериментальных исследованиях бездренажного хранения жидких кислорода, азота и аргона основные параметры изменялись в диапазонах  $\varphi = 0,9 \dots \varphi_{\text{кр}}$ ;  $\bar{q} = 0,00227 \dots 0,01638$ ;

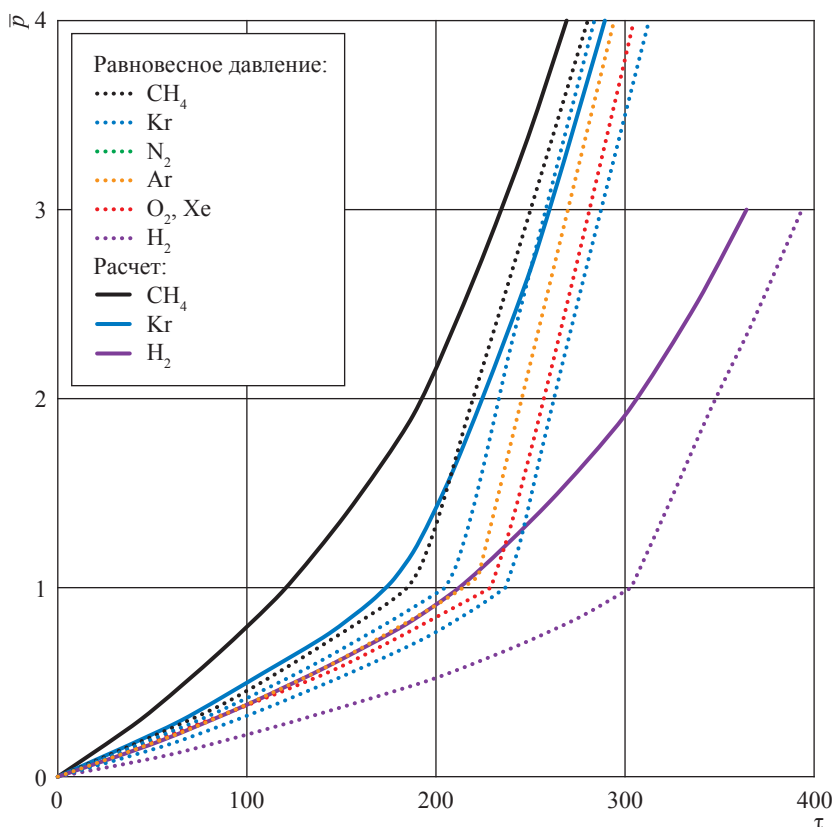


Рис. 5. Зависимость безразмерного давления от времени хранения жидких продуктов при  $\varphi = 0,9$ ,  $\bar{q} = 0,0108$ :  $\bar{p} = 1$  – переход в однофазное жидкостное состояние

$\bar{p} = 0,1 \dots 4,0$ . Здесь  $\varphi_{кр}$  соответствует степени заполнения резервуара при критическом объеме двухфазной системы  $v_{кр}$ .

Согласно принятой модели давление, равновесное температуре поверхности раздела фаз, представлялось в виде

$$\bar{p} = \frac{p_{\tau} - p_0}{p' - p_0} = f\left(\bar{q}, \frac{\tau_p}{\tau_d}, \varphi\right),$$

где  $p_{\tau}, p_0, p'$  – давление соответственно текущее, начальное и перехода в однофазное состояние при равновесном процессе.

Уравнение множественной регрессии  $\bar{\tau} = f(\bar{q}, \bar{p}, \varphi)$  определялось методом Брандона в виде  $\tau = af_1(\varphi)f_2(\bar{p})f_3(\bar{q})$ , где  $a$  – расчетный коэффициент.

В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены уравнения множественной регрессии в диапазоне относительного теплового потока  $\bar{q} = 0,00227 \dots 0,01638$  и безразмерных давлений

$$\bar{p} = 0,05 \dots 0,50;$$

$$\bar{\tau} = 1 + 0,0093e^{-2\bar{p}}e^{7\varphi}(80,6\bar{q} + 0,4); \quad (10)$$

$$\bar{p} = 0,5 \dots 4,0;$$

$$\bar{\tau} = 1 + 0,0047e^{-\bar{p}}e^{7\varphi}(80,6\bar{q} + 0,4); \quad (11)$$

Полученные зависимости аппроксимируют экспериментальные данные с предельной относительной погрешностью  $\pm 12\%$  при доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и позволяют уже на этапе проектирования рассчитывать один из основных технологических параметров – время бездренажного хранения криогенного продукта до заданного давления.

Экспериментально было также показано, что при  $\varphi = 0,36$  процесс незначительно отличается от равновесного, а при  $\varphi < 0,2$  практически равновесен, и подтверждено, что при равных параметрах  $\bar{q}$  для термодинамически подобных жидкостей при одинаковой степени заполнения  $\varphi$  темп роста давления одинаков не только в равновесном процессе, но и в неравновесном.

Таким образом, по результатам выполненных исследований получены расчетные зависимости (10)–(11) и, соответственно, расчетная методика для определения изменения давления в процессе бездренажного хранения группы термодинамически подобных (или условно подобных) криогенных жидкостей (кислорода, азота, аргона, метана и криптона, ксенона) при

$\bar{q} = 0,00227 \dots 0,01638$  и  $\varphi = 0,9 \dots \varphi_{кр}$  в резервуарах цилиндрической формы вместимостью

$$V = 0,1 \dots 32 \text{ м}^3 \text{ при } \bar{L} = \frac{L}{D} = 1 \dots 4.$$

На рис. 5 представлена характерная расчетная зависимость безразмерного давления  $\bar{p}$  (равновесный и реальный процессы) от времени  $\tau$  при постоянных степени заполнения резервуара  $\varphi$  и относительном тепловом потоке  $\bar{q}$ . Расчет процесса хранения жидкого водорода по экспериментально полученным соотношениям для жидких кислорода, азота и аргона является оценочным и требует, естественно, опытного подтверждения.

Кроме текущего давления и равновесной ему температуры поверхности раздела фаз важными характеристиками процесса являются максимальный перепад температуры  $\Delta T$  в верхнем прогревом слое и толщина этого слоя  $\Delta H$ . На основании анализа многочисленных опытных данных, полученных при хранении азота, кислорода и аргона, было установлено, что с достаточной для практики точностью вместо выражения  $\Delta T = T_s - T_{я}$  может быть использовано выражение  $\Delta T = T_s - T_p$  (здесь  $T_{я}, T_p$  – температуры ядра жидкости и равновесная), так как на всех режимах расхождение между  $T_{я}$  и  $T_p$  не превышает 3%. Ядром считался (принимался) тот объем жидкости, в котором градиент температур  $\Delta T$ , начиная от дна, не превышает 1 К.

На основании статистической обработки экспериментальных данных по зависимости относительной толщины  $\bar{H}$  прогре-

того слоя от параметров  $\varphi, \bar{q}$  и  $\bar{T} = \frac{T_p}{T_{кр}}$  полу-

чено уравнение множественной регрессии  $\bar{H} = 15\bar{T}^2 - 23,2\bar{T} - 8,4415$  для  $\varphi = 0,36 \dots 0,9, \bar{q} = 0,00125 \dots 0,06$  и предельной равновесной температуры прогрева  $\bar{T}$ , для каждого значения  $\varphi$  определяемой по зависимости  $\bar{T} = 0,96 \dots 0,27\varphi$  [10]. На рис. 6 на поле опытных точек  $\bar{H} = f(\bar{T})$ , аппроксимированных (с погрешностью  $\pm 20\%$ ) зависимостью для процесса нагрева азота и кислорода, нанесены экспериментальные данные для аргона. Поскольку они находятся в поле погрешности зависимости (3), последняя может быть рекомендована для оценки толщины прогреваемого слоя и при бездренажном хранении аргона и метана.

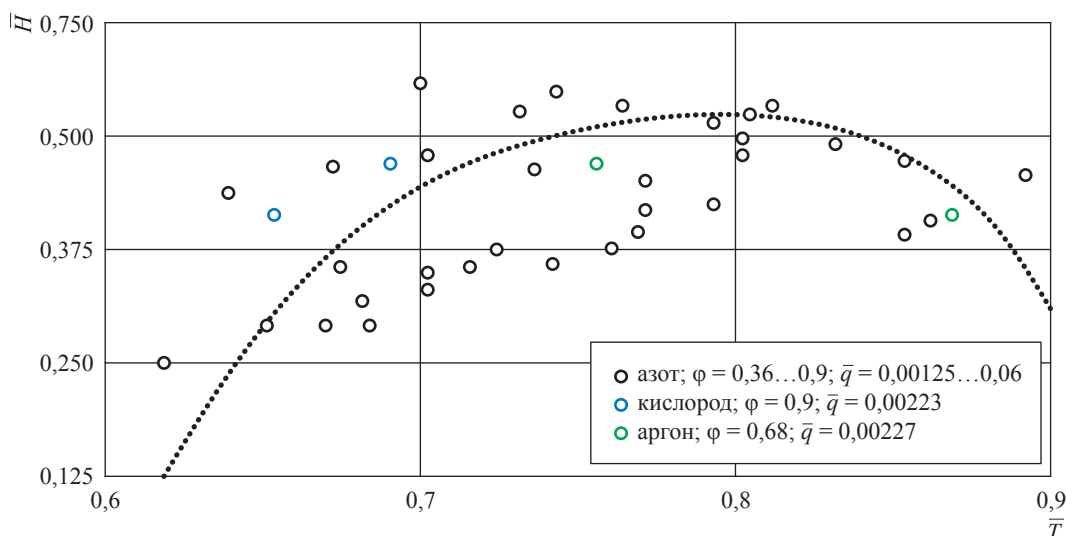


Рис. 6. Зависимость безразмерной толщины  $\bar{H}$  прогретого слоя от безразмерной температуры  $\bar{T}$

Интересным и важным результатом экспериментального исследования для обоснования в дальнейшем допустимого уровня заполнения резервуара криогенным продуктом явилось установление характера поведения границы раздела фаз. В процессе нагрева в статических условиях при  $v^* < v_{кр}$  оказалось, что граница раздела фаз существует вплоть до критического давления, т.е. в резервуаре всегда существует паровая фаза, которая при критических давлении и температуре исчезает и при дальнейшем нагреве переходит в область закритического состояния.

В процессе исследования бездренажного хранения получены шесть авторских свидетельств на способы и устройства снижения стратификации жидкости и, соответственно, увеличения времени хранения [11–16]. Кроме этого, получено авторское свидетельство, использующее бездренажное хранение для испытания сосудов на прочность при криогенных температурах [17].

\*\*\*

Таким образом, теоретически и экспериментально исследован процесс теплообмена при изохорном нагреве (бездренажное хранение) термодинамически подобных криогенных продуктов в статических условиях до закритического состояния.

Исследованы физические особенности неравновесного нагрева двухфазной системы

«жидкость – пар» с переходом в однофазное закритическое состояние, установлены основные факторы, влияющие на расслоение по температуре.

Экспериментально установлено, что в неравновесном процессе нагрева граница раздела фаз («жидкость – пар») существует вплоть до критического давления, далее двухфазная система переходит в однофазное закритическое состояние. При этом сохраняется градиент температуры с недогревом в объеме жидкости до критического состояния.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила получить расчетную зависимость текущего давления в резервуаре от определяющих параметров (теплового потока и степени заполнения) для термодинамически подобных (или близких к ним жидкостей) азота, кислорода, аргона, метана, а также криптона и ксенона с погрешностью  $\pm 15\%$  при доверительной вероятности 0,95.

Разработана инженерная методика расчета процесса изохорного нагрева криопродуктов, апробированная при создании промышленных систем.

Также разработаны способы и устройства (пять авторских свидетельств СССР), уменьшающие стратификацию жидкости и увеличивающие время хранения. Разработан способ испытания криогенного оборудования, использующий процесс бездренажного хранения (авторское свидетельство СССР).

## Список литературы

1. Баслина Е.М. Экспериментальное исследование теплообменных процессов в закрытых сосудах с низкотемпературными жидкостями / Е.М. Баслина, А.И. Винников, Л.С. Аксельрод // Тепло- и массообмен: сб. ст. в 8 т. – Минск: Наука и техника, 1968. – Т. 4: Тепло- и массообмен в технологических процессах и аппаратах химических производств. – С. 172–182.
2. Кириченко Ю.А. Особенности моделирования процесса теплообмена в замкнутом объеме, частично заполненном жидкостью / Ю.А. Кириченко, Ж.А. Супрунова. – Харьков: ФТИНТ АН УССР, 1980. – 24 с. – (Препринт 1-1980).
3. Кириченко Ю.А. К расчету температурного расслоения в заполненных жидкостью замкнутых емкостях при постоянной плотности теплового потока на оболочке / Ю.А. Кириченко // Инженерно-физический журнал. – 1978. – Т. 34. – № 1. – С. 5–11.
4. Harper E.Y. A study of liquid stratification in a cylindrical container / E.Y. Harper, S.E. Hurd, J.O. Donaldson. – Sunnyvale, California: Lockheed Missiles and Space Co., Mar. 1964. – Rept. 803973.
5. Пронько В.Т. Анализ процессов выдавливания криогенных жидкостей и определение расхода газа наддува / В.Т. Пронько, Л.С. Аксельрод, А.А. Никонов // Аппараты и машины кислородных и криогенных установок: труды ВНИИ «Криогенмаш». – 1971. – Вып. 13. – С. 3–12.
6. Агафонов И.М. Особенности теплообмена при бездренажном хранении криогенных жидкостей до критического давления / И.М. Агафонов, А.М. Домашенко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1983. – № 2. – С. 19–21.
7. Домашенко А.М. Экспериментальное исследование теплообмена при бездренажном хранении криогенных продуктов до критического давления / А.М. Домашенко, И.М. Агафонов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1984. – № 9. – С. 27–29.
8. Домашенко А.М. Расчетный анализ процессов бездренажного хранения криогенных продуктов / А.М. Домашенко, И.М. Агафонов // Химическое и нефтяное машиностроение. 1991. – № 8. – С. 18–20.
9. Домашенко А.М. Хранение жидких аргона, криптона и ксенона в резервуаре с закрытым газосбросом / А.М. Домашенко, И.М. Агафонов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1991. – № 7. – С. 14–16.
10. Домашенко А.М. Нагрев криогенных продуктов до критического состояния в резервуаре с закрытым газосбросом / А.М. Домашенко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1986. – № 5. – С. 22–25.
11. А.с. № 577893. Емкость для хранения криогенных жидкостей / А.М. Домашенко, Н.В. Филин, В.Е. Филимонов. – 28.06.77.
12. А.с. № 561430. Емкость для хранения криогенных жидкостей / А.М. Домашенко, В.П. Беляков, В.Е. Филимонов. – 22.05.75.
13. А.с. № 106797. Устройство для увеличения времени бездренажного хранения криогенной среды / А.М. Домашенко, Н.М. Ерофеев, В.Е. Филимонов и др. – 08.04.76.
14. А.с. № 117857. Емкость для хранения криогенных жидкостей / А.М. Домашенко, В.Е. Филимонов, И.Д. Блинова и др. – 05.07.78.
15. А.с. № 144092. Устройство для увеличения времени бездренажного хранения криогенной жидкости / А.М. Домашенко, И.М. Агафонов, И.Д. Блинова. – 05.08.80.
16. А.с. № 157561. Устройство для увеличения времени бездренажного хранения криогенной жидкости / А.М. Домашенко, В.П. Беляков, И.М. Агафонов и др. – 02.09.81.
17. А.с. № 894438. Способ испытания сосудов внутренним давлением на прочность при криогенных температурах / А.М. Домашенко, Г.А. Степанов, Н.В. Филин и др. – 30.12.81.

## Heat-mass exchange during non-equilibrium heating of thermodynamically similar cryogenic products up to an overcritical state

A.M. Domashenko

Kriogenmash OJSC, Bld. 67, Prospect Lenina, Balashikha, Moscow Region, 143907, Russian Federation

E-mail: domashenko@cryogenmash.ru

**Abstract.** The heat-mass exchange is studied theoretically and experimentally regarding the warm-up processes taking place in an enclosed volume of the thermodynamically similar (either conventionally similar) cryogenic



products (nitrogen, oxygen, argon, methane). The actual procedures for calculation non-equilibrium heating of liquids up to the operation pressures of 0,4...0,6 MPa are analyzed. Warming-up to the overcritical not studied pressure values is tested. The author studies physics of non-equilibrium heating of a binary system with transition to an one-phase overcritical status. He has concluded that during the non-equilibrium heating an interface of phases exists until a critical pressure appears.

A procedure for calculating time dependent pressure increase is developed. The derived dependencies approximate the test data with a limiting ratio error of  $\pm 12\%$  at probability belief of 0,95. As early as at a stage of designing, this procedure makes calculate such technological parameter like a time of the drain-free storage of the thermodynamically similar cryogenic products until the achievement of a set pressure value.

**Keywords:** cryogenic products, thermodynamic similarity, isochoric process, real process, warm-up, stratification, thermal layer, nucleus of a product, boundary layer.

## References

1. BASLINA, Ye.M., A.I. VINNIKOV, L.S. AKSELROD. Experimental testing of the heat-mass-exchange processes in the closed vessels with low-temperature liquids [Eksperimentalnoye issledovaniye teplomassoobmennykh protsessov v zakrytykh sosudakh s nizkotemperaturnymi zhidkostyami]. In: *Heat and mass transfer* [Teplo- i massoperenos]: collected book in 8 volumes. Minsk: Nauka i tekhnika, 1968, vol. 4: Heat and mass transfer in chemical industrial processes and apparatuses [Teplo- i massoperenos v tekhnologicheskikh protsessakh i apparatakh khimicheskikh proizvodstv], pp. 172–182. (Russ.).
2. KIRICHENKO, Yu.A., Zh.A. SUPRUNOVA. Peculiar features of modelling heat exchange in an enclosed partially fluid-filled volume [Osobennosti modelirovaniya protsessa teploobmena v zamknutom obeme, chastichno zapolnennom zhidkostyu]. In: *Preprint 1-1980 series*. Kharkov: FTINT AN USSR, 1980. (Russ.).
3. KIRICHENKO, Yu.A. To calculation of thermal stratification in the enclosed fluid-filled vessels in case the enveloping heat flows have constant densities [K raschetu temperaturnogo rassloeniya v zapolnennykh zhidkostyu zamknytykh yemkostyakh pri postoyannoy plotnosti teplovogo potoka na obolochke]. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*. 1978, vol. 34, no. 1, pp. 5–11. ISSN 0021-0285. (Russ.).
4. HARPER, E.Y., S.E. HURD, J.O. DONALDSON. *A study of liquid stratification in a cylindrical container*. Sunnyvale, California: Lockheed Missiles and Space Co., Mar. 1964, rept. 803973.
5. PRONKO, V.T., L.S. AKSELROD, A.A. NIKONOV. Analysis of cryogenic liquids squeezing and determination of the pressurizing gas flow rate [Analiz protsessov vydavlivaniya kriogennykh zhidkostey i opredeleniye raskhoda gaza naddyva]. In: *Apparatuses and machines of oxygen and cryogenic plants* [Apparaty i mashiny kislorodnykh i kriogennykh ustanovok]: proc. of VNII "Kriogenmash". 1971, is. 13, pp. 3–12. (Russ.).
6. AGAFONOV, I.M., A.M. DOMASHENKO. Peculiar features of heat-mass-exchange at drain-free storage of cryogen liquids up to overcritical pressure [Osobennosti teplomassoobmena pri bezdrenazhnom khraneni kriogennykh zhidkostey do zakriticheskogo davleniya]. *Khimicheskoye i Neftyanoye Mashinostroyeniye*. 1983, no. 2, pp. 19–21. ISSN 1029-8770. (Russ.).
7. DOMASHENKO, A.M., I.M. AGAFONOV. Experimental study of heat-mass exchange at drain-free storage of cryogenic products up to overcritical pressure [Experimentalnoye issledovaniye teplomassoobmena pri bezdrenazhnom khraneni kriogennykh produktov do zakriticheskogo davleniya]. *Khimicheskoye i Neftyanoye Mashinostroyeniye*. 1984, no. 9, pp. 27–29. ISSN 1029-8770. (Russ.).
8. DOMASHENKO, A.M., I.M. AGAFONOV. Design analysis of drain-free storage of cryogenic products [Raschetnyy analiz protsessov bezdrenazhnogo khraneniya kriogennykh produktov]. *Khimicheskoye i Neftyanoye Mashinostroyeniye*. 1991, no. 8, pp. 18–20. ISSN 1029-8770. (Russ.).
9. DOMASHENKO, A.M., I.M. AGAFONOV. Storage of liquid argon, krypton, and xenon in a tank with a closed gas collector [Khraneniye zhidkikh argona, kriptonu i ksenona v rezervuare s zakrytym gazosborom]. *Khimicheskoye i Neftyanoye Mashinostroyeniye*. 1991, no. 7, pp. 14–16. ISSN 1029-8770. (Russ.).
10. DOMASHENKO, A.M. Heating cryogenic products up to overcritical state in a tank with a closed gas collector [Nagrev kriogennykh produktov do zakriticheskogo sostoyaniya v rezervuare s zakrytym gazosborom]. *Khimicheskoye i Neftyanoye Mashinostroyeniye*. 1986, no. 5, pp. 22–25. ISSN 1029-8770. (Russ.).
11. Inventor's certificate no. 577893. *Vessel for storing cryogenic liquids* [Yemkost dlya khraneniya kriogennykh zhidkostey]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, N.V. FILIN, V.Ye. FILIMONOV. 28.06.77. (Russ.).
12. Inventor's certificate no. 561430. *Vessel for storing cryogenic liquids* [Yemkost dlya khraneniya kriogennykh zhidkostey]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, V.P. BELYAKOV, V.Ye. FILIMONOV. 22.05.75. (Russ.).
13. Inventor's certificate no. 106797. *Device for prolonging drain-free storage of cryogenic medium* [Ustroystvo dlya uvelicheniya vremeni bezdrenazhnogo khraneniya kriogennoy sredy]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, N.M. YEROFEYEV, V.Ye. FILIMONOV, et al. 08.04.76. (Russ.).
14. Inventor's certificate no. 117857. *Vessel for storing cryogenic liquids* [Yemkost dlya khraneniya kriogennykh zhidkostey]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, V.Ye. FILIMONOV, I.D. BLINOVA, et al. 05.07.78. (Russ.).
15. Inventor's certificate no. 144092. *Device for prolonging drain-free storage of cryogenic liquid* [Ustroystvo dlya uvelicheniya vremeni bezdrenazhnogo khraneniya kriogennoy zhidkosti]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, I.M. AGAFONOV, I.D. BLINOVA. 05.08.80. (Russ.).
16. Inventor's certificate no. 157561. *Device for prolonging drain-free storage of cryogenic liquid* [Ustroystvo dlya uvelicheniya vremeni bezdrenazhnogo khraneniya kriogennoy zhidkosti]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, V.P. BELYAKOV, I.M. AGAFONOV, et al. 02.09.81. (Russ.).
17. Inventor's certificate no. 894438. *Recipe for strength testing of vessels by inner pressure at cryogenic temperatures* [Sposob ispytaniya sosudov vnutrennim davleniyem na prochnost pri kriogennykh temperaturakh]. Inventors: A.M. DOMASHENKO, G.A. STEPANOV, N.V. FILIN, et al. 30.12.81. (Russ.).