

УДК:536.21: 536.48

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕПЛОЗАЩИТЫ ДЛЯ КРИОБИОЛОГИЧЕСКИХ СОСУДОВ ДЬЮАРА

Жуль Г.Г., д.т.н., профессор

Шкутов Р.А., студент

*Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»*

*В статье описаны разработанные впервые научные подходы исследования особенностей 2-х и 3-х - мерных процессов теплопереноса в многоэлементной теплозащите на криобиологических сосудах Дьюара, используемых в животноводстве, с целью выявления причин их низкой эффективности. Проведенные исследования позволили выявить 13 ухудшающих факторов, разработать конструкции и технологии для их устранения и изготовления данных криососудов с самой низкотеплопроводной энергосберегающей теплозащитой.*

*Ключевые слова: криобиологический сосуд Дьюара, теплоизоляция, коэффициент теплопроводности, теплоперенос.*

Разработка биотехнологии репродукции высокопродуктивного скота с использованием криоконсервированной в жидком азоте спермы элитных производителей и создание Харьковской технологии работы со спермой и эмбрионами потребовали прежде всего организации производства криобиологических сосудов Дьюара [1.2]. Главным предприятием по развитию отрасли криогенного сосудостроения для искусственного осеменения был определен в 1961 году Институт животноводства Лесостепи и Полесья Украины НААН (г. Харьков), а координатором работ назначен заведующий отделом биологии размножения и искусственного осеменения животных Ф.И. Осташко [2].

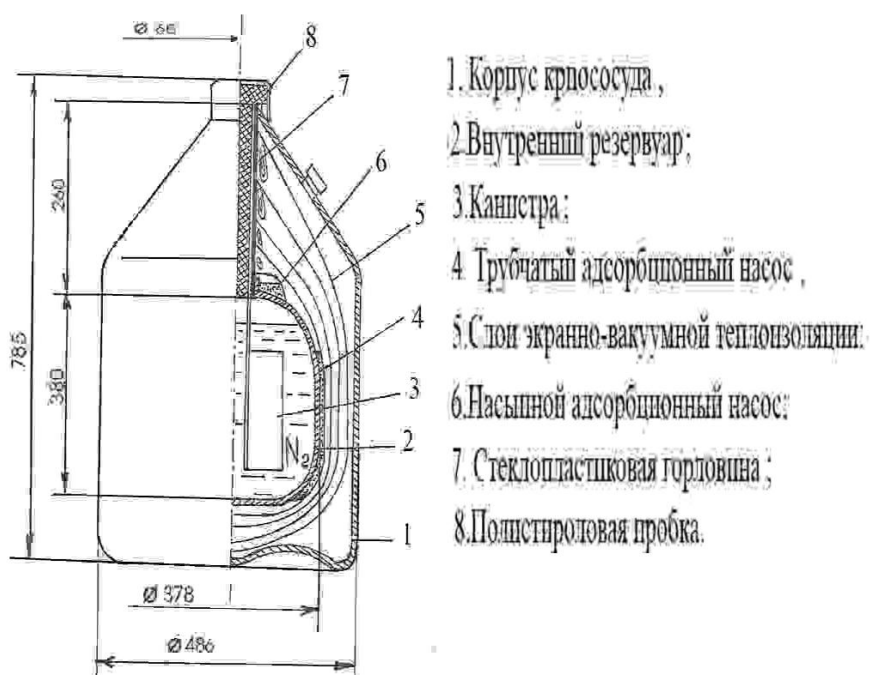
Первые небольшие партии криобиологических сосудов Дьюара с широкой горловиной, изготовленные из нержавеющей стали с вакуумно-порошковой теплозащитой, были тяжелые и имели ресурс работы (R) с жидким азотом при разовом заполнении всего 20-30 суток.

Для расширения выпуска более эффективных криобиологических сосудов в 1972 году на Харьковском заводе транспортного оборудования (ХЗТО) был создан цех криогенного сосудостроения, где началось серийное производство криососудов типа «Харьков-34А» (рис.1) с корпусом из алюминиевого сплава емкостью 34 л со стеклопластиковой горловиной диаметром 60-мм и полистироловой пробкой внутри. Техническая документация на изготовления данных криососудов была разработана в ракетно-космической НПО «Энергия» (г. Калининград). В качестве теплозащиты в них предложено использовать слои криогенной экранно-вакуумной теплоизоляции (ЭВТИ), которая на калориметрах имеет самую низкую теплопроводность [3]. Данная теплозащита представляет размещенную в среде вакуума (выше  $10^{-3}$  Па) систему из тонких экранов с высокой лучистой отражательной способностью, разделенных прокладочным материалом со значительным термическим сопротивлением.

Согласно теоретических представлений суммарный тепловой поток ( $Q_c$ ) через теплозащитный пакет ЭВТИ на криососуде должен осуществляться излучением ( $Q_i$ ), по материалу теплоизоляции ( $Q_{к.к.}$ ), молекулами продуктов

газоотделения ( $Q_m$ ) при давлениях газа выше  $10^{-3}$  Па, а также совместным лучисто-контактно-кондуктивным теплопереносом ( $Q_{л.к.к.}$ ) при больших удельных обжатыях слоев ЭВТИ и повышенной их степени черноты ( $\epsilon$ ) в соответствии с уравнением [3]:

$$Q_c = Q_n + Q_{к.к.} + Q_m + Q_{л.к.к.} \quad (1)$$



**Рис.1 Устройство криобиологического сосуда Дьюара "Х-34Б"**

В разработанном криососуде «Харьков-34А» в качестве теплозащиты предложено использовать первую отечественную композицию ЭВТИ из экранной полиэтилентерефталатной пленки (ПЭТФ-ДА) толщиной 12 мкм и прокладочной стекловуали ЭВТИ-7.

Слои данной теплоизоляции 5 (рис.1) в виде 2-х узких лент из сдублированного экранного и прокладочного материалов шириной 80-100 мм монтировались из 2-х пар бобин (мотков) ускоренно (за 35-40 мин) методом машинного орбитального бинтования на внутренний резервуар 2 криососуда, который вращается вокруг вертикальной оси на монтажном станке. При этом торцам полос ЭВТИ в процессе изолирования обеспечивался контакт с поверхностью горловины 7. После изолирования следовала полная сборка криососудов и помещение их в специальные электропечи для откачки изоляционной полости с одновременным нагревом при температуре 380-390 К в течение 7 суток форвакуумным и паромасляным насосами, а затем еще на протяжении 2-х суток турбомолекулярным насосом при постепенном остывании криососудов температуре окружающей среды. Данная технология обеспечивала достижение в изоляционной полости изготавливаемых криососудов оптимального вакуума  $P_0 \leq 10^{-3}$  Па (при котором отсутствует теплоперенос в ЭВТИ по газу). После этого сосуды подвергались контрольным испытаниям с жидким азотом по

величине суточной испаряемости из них ( $m$ , г/сутки), которая должна быть меньшей контрольной ( $m_k$ ).

Изготовленные таким образом криобиологические сосуды «Харьков-34А» оказались низкокачественными, поскольку их ресурс работы с R жидким азотом составлял 100-110 суток (см. криососуд №1 в табл.1), тогда как (согласно величине теплопроводности  $\lambda_{эф}=3.1 \cdot 10^{-5} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ , полученной для калориметрического непрогреваемого образца используемой ЭВТИ) данная характеристика должна была составлять 320-350 суток. Причины таких расхождений в то время не были понятными для ученых и специалистов. Поэтому длительное время проблема улучшения низкокачественных криобиологических и других криососудов с теплозащитой из слоев ЭВТИ (изготавливаемых как в нашей стране, так и за рубежом) не решалась из-за отсутствия теоретических соотношений и обоснованных подходов к экспериментальным исследованиям особенностей теплопереноса в многоэлементной теплозащите, а также определения теплопритоков по всем конструктивным элементам для анализа и разработки методов их совершенствования.

В связи с этим дирекция завода ХЗТО многократно привлекала к проблеме совершенствования тепловых характеристик изготавливаемых ими криососудов ведущих специалистов из основных криогенных центров страны, таких как «Уралкриогенмаш» (г. Нижний Тагил), НПО «Гелиймаш» (г. Москва), НПО «Криогенмаш» (г. Балашиха), Физико-технический институт низких температур (г. Харьков) и других. Из данных организаций прибывали специалисты, ознакомились с технологией производства криососудов, после чего отбывали, не выдав каких-либо рекомендаций по улучшению их характеристик.

Вследствие этого в 1981 году представители завода ХЗТО предположили заняться проблемой совершенствования криососудов кафедре «Технической криофизики» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Кафедра данное предложение приняла, назначив руководителем работ к. физ.-мат. наук доцента Г.Г. Жуныя.

Таким образом, **темой** данной работы является описание впервые разработанных методов исследования особенностей многомерных процессов теплопереноса в многоэлементных теплозащитных конструкциях низкокачественных криобиологических сосудах Дьюара, с целью выявления ухудшающих факторов и разработки конструкций и технологий для их совершенствования.

### **Результаты исследования и их обсуждение.**

Проведенный предварительный анализ технологии изготовления криососудов на заводе ХЗТО показал, что их совершенствование является очень сложной задачей и её осуществление возможно методом научной оптимизации. При этом значения оптимизирующих параметров, конструкций и технологий не были известными. Их следовало впервые выявить поисково-аналитическим путем, выполнив значительный объем теоретических и экспериментальных исследований.

С этой целью в условиях серийного производства (в цехе завода ХЗТО) в течение более 20 лет в рамках 9-ти научно-исследовательских хоздоговорных работ были проведены многие тысячи экспериментов с использованием новых научных подходов, значительного количества (28) разработанных оригинальных расчётно-экспериментальных методик на изготовленных специальных установках и более 7000 криососудах. Среди созданных новых таких методик была

основополагающая для определения теплопритоков по всем конструктивным элементам криососуда[4]: по горловине ( $Q_{г}$ ), пробке криососуда( $Q_{п}$ ), газовому зазору между горловиной и пробкой ( $Q_{газ}$ ) и по теплоизоляции ( $Q_{и}$ ) из соотношения :

$$Q_{и}=Q_{с}-(Q_{п}+Q_{газ}+Q_{г}), \text{ Вт}, \quad (2)$$

**Таблица 1**

**Тепловые характеристики криобиологических сосудов Дьюара «Х-34Б» с различными теплозащитными пакетами ЭВТИ с жидким азотом**

№, № криосо судов	Характеристики криососудов и прокладочного материала пакета ЭВТИ	Теплопроводность $\lambda_{эф} * 10^{-5} \text{Вт} * \text{м}^{-1} \text{К}^{-1}$		Ресурс работы криососу- да R,сутки
		На калориметре	На криососуде	
1	Криососуд «Харьков-34А» со стеклопластиковой горловиной толщиной 2мм и прокладками из стекловуали ЭВТИ-7	3,1	34-40	100-110
2	Криососуд «Харьков-34Б» со стеклопластиковой горловиной толщиной 1,2мм	3,1	34-40	120-125
3	-“- с новой полистероловой пробкой и ЭВТИ-7	3,1	34-40	130-133
4	-“- прокладка ЭВТИ-7 после предварительной термовакуумной дегазации	-	22-25	155-160
5	-“- исключение факторов, повышающих степень черноты слоев ЭВТИ на криососуде	-	16-19	178-185
6	-“- слои ЭВТИ со стекловуалью без клеевой основы, смонтированных с оптимальными монтажными параметрами	-	9,5-10	230-241
7	Пакеты ЭВТИ с бумагой СНТ-10, смонтированной с $R_{у.о}$ и $h_о$ .	3,5	4,5-4,8	345-358
8	-“- пакеты с бумагой УСТН-10 и параметрами $R_{у.о}$ и $h_о$	3,4	4,1-4,3	362-372

где  $Q_c$  – суммарный тепловой поток в криососуде, вычисляемый из величины испаряемости жидкого азота ( $m$ ) в течении суток по уравнению:

$$Q_c = m \cdot r, \text{ Вт.} \quad (3)$$

Здесь  $r$  – теплота испарения жидкого азота (равная 197.6 кДж/кг).

Данные исследования позволили установить тепловую эффективность используемых в криососудах «Харьков- 34А» пробок 5, горловин 6, а также определить величину теплопроводности  $\lambda_{эф}$  используемых в криососудах теплозащитных пакетов ЭВТИ из соотношения:

$$\lambda_{эф} = \frac{Q_n \cdot \delta}{F_{ср} \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – среднеинтегральная толщина слоев ЭВТИ на криососудах (равная 0,071 м);  
 $F_{ср}$  – средняя поверхность пакета ЭВТИ (0,861 м<sup>2</sup>);  
 $\Delta T$  – перепад температуры по толщине теплоизоляции (219 К).

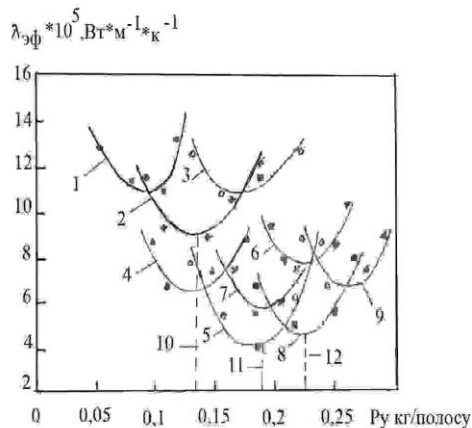
Проведенные исследования позволили установить, что в низкокачественных криососудах доля теплопритоков по теплозащите из слоев ЭВТИ, горловине, пробке и газовому зазору по отношению к суммарным  $Q_c$  составляет (72-78)%, (13-18)%, (8-10)% и 1%, соответственно. Данные результаты позволили впервые установить по уравнению (4), что эффективный коэффициент теплопроводности для пакетов ЭВТИ на неэффективных криососудах составляет  $(34-40) \cdot 10^{-5}$  Вт\*м<sup>-1</sup>\*К<sup>-1</sup>, который в 11-13 раз выше колориметрических образцов теплоизоляции (см. в табл.1 криососуд №1). Целью дальнейших исследований являлось выявление факторов, обуславливающих ухудшение тепловых характеристик теплоизоляции из ЭВТИ на криососудах, разработки конструкций и технологий для их устранения и совершенствования горловин и пробок. Следует отметить, что для оптимизированных нами в дальнейшем криососудов теплопритоки по теплоизоляции уже составляет всего (35-40)% от суммарных  $Q_c$ .

Для улучшения тепловых характеристик криососудов нами предложено прежде всего уменьшить толщину стенки полистироловой горловины с 2 мм до 1,2 мм [4]. При этом вакуумноплотность её осталась неизменной, а ресурс работы криососуда (в результате уменьшения по ней теплопритоков) увеличился на 20-25 суток (см. криососуд №2 в табл. 1). Криобиологический сосуд с данной горловиной получил название - «Харьков-34Б».

Следующим шагом по совершенствованию криобиологических сосудов стало снижение теплопритоков по их полистироловым пробкам. Для этого в них предложено вместо деревянного упрочняющего стержня использовать капроновую лёску диаметром 1,5 мм. Это позволило увеличить ресурс работы криососудов на 10-13 суток [5] (см. криососуд № 3, табл.1).

Далее следовало выяснить причины низкого уровня использованных в криососудах теплозащитных пакетов ЭВТИ. С этой целью решено прежде всего исследовать конфигурацию (профиль) температурной зависимости по среднеинтегральной толщине  $T(x/\delta)$  слоев ЭВТИ. Миниатюрных датчиков температуры для этого не существовало и никто такие исследования не проводил. Данная задача впервые была решена с помощью медь-константановых термопар по специально разработанной технологии [4]. Исследованная таким образом температурная зависимость  $T(x/\delta)$  1 представлена на рисунке 2. Её анализ показывает, что на участке пакета ЭВТИ при относительной толщине  $x/\delta = 0,65$ -

0,7 на ней образовался излом с точкой перегиба при температуре  $T_p = (255-260)K$ . Согласно теоретической работы [6] появление на температурном профиле  $T(x/\delta)$  точки перегиба должно свидетельствовать о существовании в пакете ЭВТИ локального участка с повышением давления газа и увеличенным теплопереносе по данной составляющей. В работе [6] предложено соотношение для определения повышенного давления ( $P_n$ ) по величине температуры в точке перегиба ( $T_n$ ) температурного профиля:



1,2,3 - полосы ЭВТИ с прокладками из стекловуали  
 ЭВТИ-7 без клея шириной 80, 95 и 110, соответственно;  
 4,5,6 - полосы ЭВТИ с прокладками из УСНТ-10 шириной  
 60, 70 и 80 мм, соответственно;  
 7,8,9 - полосы ЭВТИ с прокладками из СНТ-10  
 шириной 60, 75 и 90 мм, соответственно;  
 10, 11, 12 - оптимальные значения параметра Рудля полос ЭВТИ  
 с прокладками из ЭВТИ-7,  
 УСНТ-10 и СНТ-10, соответственно

Рис.3 - Зависимость эффективной теплопроводности ( $\lambda_{эф}$ ) для полос ЭВТИ на криососуде с жидким  $N_2$  от монтажных усилий натяжения ( $P_n$ ) и ширины их раскрытия ( $h$ ).

$$P_n = \frac{48T_n * \epsilon * \sigma}{\frac{\alpha}{2-\alpha} * \frac{\gamma+1}{\gamma-1} \sqrt{\frac{R * T_n}{2 * T_1 * m}}}, \quad (5)$$

где  $\epsilon$  – степень черноты экранов;  $\sigma$ - постоянная Стефана-Больцмана;  $\alpha$ - коэффициент аккомодации газа;  $\gamma$ - отношение изобарной и изохорной теплоемкостей;  $R$ –универсальная газовая постоянная;  $M$  – молекулярный вес газов в теплоизоляции.

Проведенные по уравнению (5) расчёты показали, что давление газов внутри данной теплоизоляции на криососудах может достигать (0,7-0,9) Па, что значительно выше необходимого оптимального значения данного параметра для слоев ЭВТИ  $P_{o2} \leq 10^{-3}$  Па. Однако экспериментально это не было подтверждено вследствие отсутствия (как у нас, так и за рубежом) необходимых для этого миниатюрных датчиков давления на диапазон от  $\sim 10^{-4}$  Па до 10 Па. В связи с этим нами была разработана опытная методика, позволившая впервые с помощью трубок из нержавеющей стали, деформированных в плоские каналы и введенных в слои ЭВТИ криососуда через горловину, экспериментально исследовать изменения давления газов в продольном и поперечном слоях ЭВТИ направлениях [7].

Полученные результаты одновременного исследования в одном и том же поперечном сечении слоев ЭВТИ на криососуде профилей температуры  $T(x/\delta)$  1 и давления  $P(x/\delta)$  2 предоставлены на рис.2. Из них следует, что в слоях ЭВТИ на участке  $x/\delta=0,67$  ( где образуется точка перегиба на температурной зависимости ) давление газов существенно выше (на  $\sim 3$  порядка ) значения данного параметра

возле тепловой стенки криососуда (равного  $(1,5-2,6) \cdot 10^{-3}$  Па) и достигает  $\sim 1,2$  Па. Таким образом нами получено экспериментальное подтверждение теоретического вывода, сделанного в работе [6], что излом на температурном профиле  $T(x/\delta)$  свидетельствует о наличии в пакете ЭВТИ участка с локальным повышенным давлением газа. Это обуславливает повышенный теплоперенос по газу  $Q_g$  в данной теплоизоляции, составляющего (как было установлено далее) до 40% от суммарного  $Q_c$ .

Для выявления причин образования в слоях ЭВТИ участков с локальным повышением давления газов было демонтировано несколько изготовленных криососудов. Проведенный анализ их слоев ЭВТИ показал, что они представляют слипшуюся массу. Было установлено, что в процессе термовакuumной дегазации изоляционной полости криососудов в электропечах при достижении  $\sim 360$  К, содержащаяся в прокладочной стекловуали ЭВТИ-7 клеевая основа из ПВА (помощью которой склеиваются стеклянные волокна прокладки при её изготовлении) размягчается. Это обуславливает слипание слоев в пакете ЭВТИ. В результате резко повышается их плотность ( $\rho$ ) и теплопроводность по материалу теплоизоляции. Кроме того, ухудшается процесс вакуумирования слипшихся слоев теплоизоляции, что обуславливает образование в пакете ЭВТИ участка с локальным повышенным давлением газа [7].

В связи с этим для устранения ухудшающего влияния клеевой основы стекловуали ЭВТИ-7 на теплозащитные характеристики слоев теплоизоляции криососудов предложено подвергать её предварительной (перед изолированием) термовакuumной дегазации в отдельной камере при температуре (370-380) К в течение (8-10) часов. После данной обработки клеевая основа из прокладки ЭВТИ-7 удалялась, но она становилась жесткой и из бесцветной превращалась в желто-коричневую, что способствовало увеличению теплопереноса через теплоизоляцию по контактно-кондуктивной и лучистой составляющим. Измеренный для пакета ЭВТИ со стекловуалью ЭВТИ-7 без клеевой основы температурный профиль  $T(x/\delta)_4$  (рис.2) оказался монотонным (без точки перегиба), что должно свидетельствовать об отсутствии в нем склеенных участков с локальным повышенным давлением газа. Это подтвердил профиль давления  $P(x/\delta)_3$  (рис.2), измеренный для данной теплоизоляции. Из него следует, что по всей толщине пакета ЭВТИ давление газа не превышает оптимальной величины  $10^{-3}$  Па. Монотонный характер зависимости  $T(x/\delta)$  для слоев ЭВТИ с оптимальным вакуумом был нами использован во всех дальнейших исследованиях для контроля по нему вакуумных характеристик опытных образцов пакетов ЭВТИ на криососудах.

Использование в криососудах теплозащитных ЭВТИ со стекловуалью ЭВТИ-7 без клеевой основы позволило улучшить их тепловые характеристики: уменьшить теплопроводность теплоизоляции до  $(22-25) \cdot 10^{-5}$  Вт\*м<sup>-1</sup>\*К<sup>-1</sup> и повысить ресурс  $R$  с жидким азотом на 25-30 суток (до 155-160 суток), что следует из данных для криососуда №4 в табл.1. В дальнейшем в теплозащите криобиологических сосудов уже использовалось прокладочная стекловуаль ЭВТИ-7, из которой предварительно удалялась клеевая основа.

Систематические наблюдения за температурными профилями  $T(x/\delta)$  для слоев ЭВТИ с оптимальным вакуумом на криососудах, длительно находящихся в эксплуатации показали, что со временем их температура возле холодной стенки внутреннего резервуара повышается на (8-11) К (как для зависимости  $T(x/\delta)_8$  в сравнении с кривой  $T(x/\delta)_3$  на рис.2). В результате этого уменьшался ресурс работы  $R$  данных криососудов. Анализ слоев ЭВТИ возле холодной стенки на

демонтированных криососудах позволил установить, что причиной этого является увеличение их степени черноты ( $\epsilon$ ) от попадания угольной пыли из тарельчатого адсорбционного насоса 6 (рис.1). Она образуется от истирания частичек угля в результате динамических нагрузок, которым подвергаются криососуды при эксплуатации (наклонам, опрокидываниям, резким опусканиям). Проведенные оценки по методике [8] позволило установить, что от угольной пыли степень черноты слоев ЭВТИ на криососудах увеличивалось в 7-10 раз. Для предотвращения этого в криососудах вместо тарельчатых стали использовать трубчатые гибкие адсорбционные насосы 4 диаметром 10-15см из газопроницаемой ткани. Увеличивалась степень черноты теплоизоляции и от крио осадков, образующихся из откачиваемых через холодные слои ЭВТИ продуктов газоотделения при эксплуатации, а также от пыли цеха во время изолирования [8].

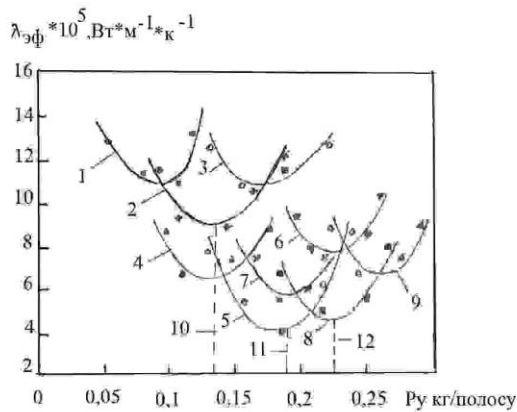
Устранение факторов, обуславливающих увеличение степени черноты слоев ЭВТИ на криососудах, способствовало уменьшению их теплопроводности и увеличению ресурса работы R до 178-185 суток (на  $\sim 25$  суток) (см. криососуд №5, табл.1).

Исследования впервые полученных профилей температуры в теплозащитных пакетах ЭВТИ на криососудах позволило установить, что теплоперенос в них имеет 3-х-мерный характер: в поперечном направлении от тепловой стенки к холодной через контакты между прокладочным и экранным материалами теплоизоляции; в продольном – по металлизированным экранным пленкам ПЭФТ-ДА к поверхности горловины с холодными парами испарившегося азота внутри, а также по спирально смонтированным вокруг внутреннего резервуара слоям ЭВТИ.

Данные результаты позволили сделать вывод, что для создания высокоэффективной теплозащиты на криососудах необходимо максимально интенсифицировать теплоперенос из пакетов ЭВТИ по металлизированным экранам ПЭФТ-ДА к поверхности горловины, а через её стенку к холодным парам испарившегося азота. Кроме того, следовало свести минимуму поперечный контактно-кондуктивный перенос  $Q_{к.к.}$  через контакты, определив впервые оптимальные монтажные усилия натяжения ( $P_{y.o}$ ) для полос ЭВТИ, монтируемых на криососуде, а также разработав метод их определения и контроля в процессе изолирования.

Для контроля монтажного усилия натяжения ( $P_y$ ) полос ЭВТИ при изолирование было предложено использовать резиновый динамометр [9]. Проведенные с его помощью исследования показали, что тепловые характеристики из полос ЭВТИ существенно зависят от величины монтажных усилий натяжения  $P_y$  (их плотности  $\rho$ ), а также ширины раскроя на полосы ( $h$ ). В результате установлено, что для ЭВТИ из ПЭТФ-ДА+ЭВТИ7 (без клеевой основы) оптимальными являются усилия натяжения  $P_{y.o} = 0.14$  кг/полосу, а также ширина раскроя на полосы  $h_o = 95$  мм, при которых достигается минимальный коэффициент теплопроводности  $\lambda_{эф\ min} = (9,5-10) \cdot 10^{-5} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ . Это следует из анализа зависимостей  $\lambda_{эф}(P_y)$  1,2 и 3 на рис 3. Изолирование криососудов полосами ЭВТИ с оптимальными монтажными параметрами  $P_{y.o}$  и  $h_o$  обеспечивает также максимальное использование охлаждающего эффекта паров азота (выходящих по горловине) для уменьшения в  $\sim 1,7$  раза суммарных теплопритоков по их конструктивным элементам. В результате ресурс работы криососуда с данной теплозащитой увеличился до 230-241 суток (на 56-60 суток) (криососуд № 6, табл.1). Следует отметить, что в низкокачественных криососудах охлаждающих эффект паров азота использовался лишь на 10-15%.





- 1,2,3 - полосы ЭВТИ с прокладками из стекловуали
- ЭВТИ-7 без клея шириной 80, 95 и 110, соответственно;
- 4,5,6 - полосы ЭВТИ с прокладками из УСНТ-10 шириной 60, 70 и 80 мм, соответственно;
- 7,8,9 - полосы ЭВТИ с прокладками из СНТ-10 шириной 60, 75 и 90 мм, соответственно;
- 10,11,12- оптимальные значения параметра Рудля полос ЭВТИ с прокладками из ЭВТИ-7, УСНТ-10 и СНТ-10, соответственно

**Рис.3 - Зависимость эффективной теплопроводности ( $\lambda_{\text{эф}}$ ) для полос ЭВТИ на криососуде с жидким  $N_2$  от монтажных усилий натяжения ( $P_y$ ) и ширины раскрыя ( $h$ ).**

Проведенные таким образом исследования позволили установить, что причинами низкой эффективности длительно серийно изготавливаемых по эмпирической (научно необоснованной) технологии криобиологических сосудов завода ХЗТО являлось образование в теплозащите из пакетов ЭВТИ 13 различных ухудшающих факторов (дефектов). Они обуславливали увеличение эффективной теплопроводности ( $\lambda_{\text{эф}}$ ) ЭВТИ от повышения молекулярной ( $\Delta\lambda_{\text{м}}$ ), лучистой ( $\Delta\lambda_{\text{л}}$ ), контактно-кондуктивной ( $\Delta\lambda_{\text{к.к}}$ ), а также образование новой лучисто-контактно-кондуктивной ( $\Delta\lambda_{\text{л.к.к}}$ ) проводимостей, согласно соотношения:

$$\lambda_{\text{эф}} = \Delta\lambda_{\text{м}} + \Delta\lambda_{\text{л}} + \Delta\lambda_{\text{к.к}} + \Delta\lambda_{\text{л.к.к}}. \quad (6)$$

Для используемых на криососудах теплозащитных пакетов ЭВТИ с прокладочной стекловуалью ЭВТИ-7 оказалось невозможным получение коэффициентов теплопроводности  $\lambda_{\text{эф}}$ , близких к значению для calorиметрических непрогриваемых образцов данной теплоизоляции, из-за наличия в ней клеевой основы и необходимости (в связи с этим) подвергать её предварительной дегазации. В результате этого она становится жесткой, а также изменяет свой цвет, что обуславливает увеличение лучистой и контактно-кондуктивной теплопроводностей. Поэтому использование данного прокладочного материала в теплозащитной ЭВТИ является нецелесообразным.

В связи с этим были начаты поиски новых более эффективных прокладочных материалов для ЭВТИ. Было установлено, что наиболее перспективными для них являются те, у которых отношение коэффициента поглощения излучения к коэффициенту отражения является минимальным. Такими материалами оказались целлюлозные (Ц), хлопковые (Х) и другие волокна. Из них по бумагоделательной технологии «мокрым» способом (без клея) были разработаны в УкрНПОбумпроме (г. Киев) следующие композиционные прокладочные бумаги для пакетов ЭВТИ: НТ-10 из смеси базальтовых (70%) и целлюлозных (30%) волокон; СТН-10 из целлюлозы (70%) и лавсана (30%); УСТН-10-из целлюлозы (65%), лавсана (30%) и углеродных волокон (5%) и многие другие [10]. Бумаги НТ-10, СНТ-10 и УСНТ-10 стали изготавливаются

серийно, а другие в виде опытных партий на Красногорском целлюлозно-бумажном комбинате в Ленинградской области.

Проведенные производственные исследования показали, что прокладочные бумаги СНТ-10 и УСНТ-10 имеют достаточную механическую прочность, позволяющих их раскраивать на полосы необходимого размера на существующем порезочном оборудовании и использовать в технологии машинного изолирования криососудов. Для пакетов ЭВТИ с данными прокладочными материалами, смонтированными на криососуды без ухудшающих факторов и с оптимальными монтажными параметрами  $P_{y.0}$  и  $h_0$  (определенными из зависимостей  $\lambda_{эф}(P_y)$  4,5 и 6 для ЭВТИ с бумагой СНТ-10, а также из кривых  $\lambda_{эф}(P_y)$  7,8 и 9 для теплоизоляции с прокладками УСНТ-10 на рис.3) получены минимальные коэффициенты теплопроводности  $\lambda_{эфmin}$ . Они лишь на 21-27 % превышают теплопроводность для колориметрических образцов данной теплоизоляции (криососуды №7 и №8, табл.1). Ресурсы работы  $R$  криососудов с жидким азотом с такими теплоизоляциями увеличился до 345-372 суток, что на 115-131 суток выше в сравнении с криососудами с использованием в ЭВТИ стекловуали ЭВТИ-7(криососудов № 6).

Из полученных результатов следует, что при использовании в теплозащитной ЭВТИ бумаги УСНТ-10 её теплопроводность  $\lambda_{эф}$  становится на (10-12)% меньшей, а ресурс криососуда №7 с ней на 14-17 суток выше в сравнении с криососудом № 6 с прокладками из СНТ-10. Причиной этого является использование в структуре прокладки УСНТ-10 углеродных волокон, которые способствуют получению в пакетах ЭВТИ на криососудах более низкого вакуума и меньшего теплопереноса по газовой составляющей.

Исследовано также влияние на характеристики пакетов ЭВТИ прокладок с другими компонентами, что позволяет изменять их оптические, газодинамические, теплофизические и другие свойства. Установленные закономерности позволяют разрабатывать теплозащитные пакеты ЭВТИ для криососудов с наперед заданными характеристиками [10].

Разработанные конструкции и технологии, а также выбранные высокоэффективные изоляционные материалы для изготовления энергосберегающей теплозащиты были внедрены в серийное производство 7-ми типов криобиологических сосудов Дьюара емкостью от 5 до 35 л на заводе ХЗТО. В результате их тепловые характеристики стали лучше существующих аналогов, что было отмечено в сравнительных испытаниях с криобиологическими сосудами Франции, США, России и других стран, которые проводил академик УААН Осташко Ф.И. в МПА «Эмбрион».

**Выводы.** 1. Выявлено в теплозащите низкокачественный криососудов 13 ухудшающих факторов, которые способствуют увеличению их теплопроводности в (34-40) раз.

2. Установлена нецелесообразность использования в теплозащите прокладочных изоляционных материалов с клеевой основой, которая в процессе термовакuumной дегазации криососудов обуславливает её склеивание и значительное ухудшение характеристик.

3. Перспективными для использования являются композиционные прокладочные изоляционные материалы на основе лавсана, целлюлозы и других волокон, которые изготавливаются по бумагоделательной технологии без использования клея.

4. Установлено значительное влияние на тепловые характеристики полос ЭВТИ на криососудах оптимальных монтажных параметров: усилия натяжения  $P_{y0}$  и ширины раскроя изоляции на полосы  $h_0$ . Они для всех изоляционных материалов различные и требуют экспериментального определения.
5. В криобиологических сосудах для хранения жидкого азота возможно уменьшение суммарных теплопритоков в  $\sim 1,7$  раза при полном использовании холода паров данного криогента, выходящих по горловине. Для этого необходимо использовать специально разработанные конструкции и технологии.
6. Значительное влияние на тепловые характеристики криососудов имеет процесс термовакuumной дегазации, включающий откачку их изоляционной полости при температуре 380-390 К в течение 3-х суток форвакуумным и на протяжении 4-х суток паромасляным насосами. После этого криососуды вынимаются из электропечей и должны откачиваться в течение 2-х суток еще турбомолекулярным насосом при постепенном охлаждении в окружающей среде цеха. Не соблюдение данной технологии не позволяет получать в изоляционной полости криососудов оптимальное давление  $P_0 \leq 10^{-3}$  Па, что обуславливает значительное ухудшение их тепловых характеристик.
7. Изготовленные по впервые разработанным нами научно обоснованным конструкциям и технологиям с использованием современных композиционных прокладочных материалов криобиологические сосуды Дьюара имеют самую эффективную энергосберегающую теплозащиту из слоев ЭВТИ.
8. Считаем, что более эффективными в эксплуатации будут криобиологические сосуды Дьюара, спроектированные на использование в них комбинированной системы охлаждения: жидкого азота, либо при его отсутствии продолжить их охлаждение уже холодильной машиной. Конструкции таких криососудов нами разработаны.

#### **Список литературы.**

1. Смирнов И.В. Глубокое охлаждение семени с.-х. животных /И.В.Смирнов//Журнал общей биологии .-1950.-№3.-185-192.
2. Осташко Ф.И. Глубокое замораживание и длительное хранение спермы производителей. / Ф.И. Осташко .-К.Урожай.- 1968.-254с.
3. Каганер М.Г. Тепломассобмен в низкотемпературных конструкциях /М.Г.Каганер.- М: Энергия.- 1979.-257.
4. Жунь Г.Г. Исследование теплофизических параметров криобиологических сосудов «Харьков-34Б»/ Г.Г.Жунь, А.Г.Подольский ,В.И.Шалаев // Криогенные системы : разработки и исследования .- К.: Наук думка. – 1984.- с.55-42.
5. Жунь Г.Г. Исследование влияния конструкции пробки на ресурс криобиологического сосуда / Г.Г. Жунь ,В.И.Шалаев, В.О.Джанашвили // Холодильная техника и технология .-К.: Техника .- 1986.- вып.42 – с.50-55.
6. Михальченко Р.С. К вопросу о механизме теплопереноса в слоисто вакуумных теплоизоляциях /Р.С. Михайличенко, В.Ф. Гетманец, Б.Я. Сухаревский // Инж.-физ.журн.-1970.-т.18,№3.-с.481-486.
7. Жунь Г.Г. Разработка оптимальной технологии вакуумирования криососудов/ Жунь Г.Г. //Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування: 1988.- №43 (110).- с.43-51.
8. Жунь Г.Г. Выявление и устранение факторов, ухудшающих эффективность криососудов / Г.Г.Жунь ,В.Ф.Гетманец , В.И. Шалаев // Инж.-физ.журн.-1989.- т.56,№2.- с.271-276.

9. Жунь Г.Г. Оптимизация технологии монтажа теплозащитных слоев криососудов / Жунь Г.Г. // Придніпровський науковий вісник. Сер.: Машинобудування .- 1998.-№28(95).- с.24-30.

10. Жунь Г.Г. Выявление и устранение дефектов в криососудах / Жунь Г.Г.// Авиационно-космическая техника и технология.-2012.-№4/91.- с.45-49.

**Дослідження та розробка енергозберігаючого теплозахисту для кріобіологічних посудів Дьюара /Жунь Г.Г., Шкутов Р.О.**

*В статті описані розроблені вперше наукові підходи для дослідження особливостей 2-х і 3-х - мірних процесів тепломасопереносу в багатоелементному теплозахисту на кріобіологічних посудих Дьюара (які використовуються в тваринництві), з метою виявлення причин їх низької ефективності. Проведені дослідження дозволили виявити 13 погіршуючих факторів, розробити конструкції і технології для їх подолання та виготовлення даних кріопосудів з найменшою теплопровідністю.*

*Ключові слова : кріобіологічний посуд Дьюара, теплоізоляція, коефіцієнт теплопровідності, тепломасопереніс.*

**STUDIES AND DEVELOPMENT OF ENERGY SAVING THERMAL SHIELDING FOR CRYOBIOLOGY DEWAR VESSELS / ZHUNN .G.G, Shkutov R.A**

The paper describes a newly developer scientific approaches to study feautres of 2-D and 3-D processes of heat and mass transfer in a multi-element thermal shielding of cryobiology Dewar vessels used in animal breeding, in order to reveal the origin of their low effectivity. The performed studies revealed 13 degrading factors, enabled development of a design and a technology for their elimination, and allowed fabrication of the cryovessels with lowest heat conducting, energy-saving, thermal shielding .

**Д.т.н., проф. Жунь Георгий Григорьевич, проф. кафедры «Техническая криофизика», Шкутов Роман Александрович., студент**

**Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»**

**М.Т. 066-44-093-48, Д.Т. 705-36-83**

