М 355483.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО
КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ
имени Н.Э.БАУМАНА

...ОСЯ

На правах рукописи

Будрик Виктор Владиславович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОХИРУРГИЧЕСКИХ ЗОНДАХ С ВЫНУЖДЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ КРИОАГЕНТА

(05.04.03—Гидравлические машины, машины и аппараты холодильной и криогенной техники)

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

МОСКВА—1979

Работа выполнена в Балашихинском ордена Ленина научно-производственном объединении криогенного машиностроения им. 40-летия Октября и в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им.Н.Э.Баумана.

Научный руководитель-

лауреат Ленинской премии, член-корреспондент АН СССР, профессор БЕЛЯКОВ В.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.И. ЛЕОНТЬЕВ

кандидат технических наук, доцент В.В. ЯГОВ

Ведущее предприятие: Омское научно-производственное объединение микрокриогенной техники (НПО"Микрокриогенмаш")

Защита диссертации состоится "19" ноября 1979 г. в 14[30] час. на заседании специализированного совета по присуждению ученой степени кандидата наук К.053.15.07 факультета [illegible] Баумана по адресу: г. Мо-
5.

заверенные печатью уч-
секретарю по указанному

в библиотеке МВТУ им.

" " 1979 г.

М355983

совета

В.Н.Козлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы актуальной стала задача создания криогенного оборудования для нужд медицины, в частности криохирургии, в связи с многими достоинствами и эффективностью криохирургического метода лечения. Развитие и внедрение его в широкую медицинскую практику тормозится отсутствием метода расчета криохирургического инструмента и размеров зоны промораживания живой ткани.

Цель работы. Основной целью работы является системное исследование теплообменных процессов, сопровождающих работу криохирургических зондов, и создание метода расчета, позволяющего по требуемым размерам зоны промораживания живой ткани и времени охлаждения находить рациональные геометрические размеры инструмента и режимные параметры криоагента.

В диссертации защищаются:

- результаты анализа теплообменных процессов, сопровождающих работу криохирургических зондов;
- результаты исследования интенсивности теплообмена между живой (незамороженной) и замороженной тканями;
- результаты исследования теплообмена и критического теплового потока при пузырьковом и пленочном кипении, а также результаты интенсификации теплообмена при пленочном кипении в условиях истечения криоагента с различным паросодержанием в рабочую камеру криохирургических инструментов;
- метод расчета криохирургических зондов и размеров зоны промораживания живой ткани.

Научная новизна. Установлен и обоснован факт влияния величины поверхности замороженной зоны на интенсивность кровотока в прилегающих к замороженной зоне слоях ткани. В соответствии с этим предложены расчетные соотношения для теплоподвода от живой ткани.

Выполнено экспериментальное исследование теплообмена и критического теплового потока при пузырьковом и пленочном кипении в условиях истечения парожидкостной струи в небольшой объем. Установлены определенные аналогии между получен-

№ 1355983

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1355983
Будрик В.В.Исследование т

ными данными и известными результатами по кипению при вынужденном движении в канале, в частности наличие характерных по механизму теплообмена областей - четырех при пузырьковом и двух при пленочном кипении. В соответствии с полученными данными и физическими представлениями предложены расчетные критериальные соотношения для выявления границ указанных областей, для теплоотдачи и критического теплового потока при пузырьковом и пленочном кипении и, как крайний случай, для теплоотдачи к однофазному потоку. Установлено, что при взаимодействии парожидкостной струи со стенкой камеры достигаются значения теплоотдачи и максимальных критических тепловых потоков близкие к предельным теоретически возможным величинам.

Практическую ценность работы представляют:

- полученные результаты по теплоподводу от живой ткани к границе замороженной, которые могут быть использованы для прогнозирования размеров замороженной зоны в живой ткани различного типа при любой форме промораживания;
- полученные результаты по интенсивности теплосъема со стороны криоагента, которые необходимы как при расчете криохирургических, так и криоэлектронных и других устройств, охлаждаемых однофазным и парожидкостным потоком в условиях истечения в небольшой объем, а также при разработке устройств с высокоэффективной теплопередачей;
- предложенный и защищенный авторским свидетельством метод интенсификации минимального критического теплового потока пленочного кипения, обеспечивающий наибольшие скорости промораживания ткани и достижение величины температуры стенки рабочей камеры близкой к температуре насыщения криоагента;
- разработанный и экспериментально подтвержденный метод расчета криохирургических зондов и построенные в соответствии с ним номограммы, связывающие динамику роста замороженной зоны в живой ткани с геометрическими размерами инструмента и режимными параметрами криоагента.

Внедрение результатов работы. На основании разработанного метода расчета создан и внедрен в практику в клинике I-го Московского медицинского института им. И.М.Сеченова

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА

универсальный криохирургический прибор со сменными зондами и рабочими камерами, предназначенный для различных областей клинической медицины. Испытания показали высокие эксплуатационные качества прибора и достаточно хорошее совпадение расчетных и реальных скоростей промораживания живой ткани. Ряд различных криохирургических устройств, разработанных в результате выполненной работы, защищен 6 авторскими свидетельствами.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены на:

- I Всесоюзном совещании по криохирургии (Москва, 1973);
- XIУ Международном конгрессе по холоду (Москва, 1975);
- XXI Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 1978).

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ и получено 6 авторских свидетельств.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка литературы из 117 наименований, приложения и включает 214 стр., в том числе 122 стр. основного текста, 45 рисунков, 3 таблицы и 36 стр. приложения, где приведены опытные данные; описание, расчет и испытания криохирургического прибора; акт о внедрении в практику результатов работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и общая методика выполнения работы.

В ГЛАВЕ I (АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ РАБОТУ КРИОХИРУРГИЧЕСКИХ ЗОНДОВ) проведен комплексный анализ теплообменных процессов и сделан краткий обзор и анализ существующих решений, в результате чего установлены недостатки и сформулированы задачи исследований.

В настоящее время наибольшее распространение находят зонды, охлаждаемые кипящим азотом и имеющие внешний диаметр кор-

пуса от 2 до 8 мм и отношение высоты рабочей камеры H к диаметру D около единицы. На рис.I схематически показан такой зонд, включающий теплоизолирующий корпус 3, охлаждаемую рабочую камеру 4 и каналы для подвода 2 и отвода I криоагента из камеры. Зонд внедряется в ткань, которая имеет температуру $T_т \approx +37^{\circ}C$. После подачи криоагента в ткани вокруг охлаждаемой камеры образуется замороженная зона в виде сферы радиусом $R_з$, который по мере течения времени увеличивается и стремится к некоторому предельно достижимому размеру $R_{з\,max}$. Саму камеру можно также рассматривать как шар с радиусом $r=\sqrt{f_н/4\pi}$, где $f_н$ - наружная поверхность камеры. Внутренняя граница замороженной зоны имеет переменную температуру, равную температуре стенки камеры T_w. На внешней границе происходит замерзание ткани при постоянной температуре $T_з$ с выделением теплоты кристаллизации L (Дж/кг). Требуется найти решение, обеспечивающее прогнозирование размера замороженной зоны $R_з$ во времени τ в зависимости от геометрических размеров зонда и режимных параметров криоагента.

Проведенный анализ существующих решений показал, что квазистационарный метод решения обеспечивает достаточно хорошую точность (до I0%) в прогнозировании размера замороженной зоны в мертвой ткани. Метод можно улучшить введением поправки, учитывающей влияние теплоемкости незамороженной ткани C_2. Теплофизические свойства мертвой ткани различных органов человека (за исключением кожи и жира) незначительно отличаются друг от друга. Основным недостатком существующих решений является то, что они не учитывают изменение температуры стенки камеры зонда T_w, теплопроводности замороженной зоны λ_1 и изменение интенсивности теплоподвода от живой ткани за счет кровотока в зависимости от структуры кровеносной системы и температуры ткани.

Решение задачи искали квазистационарным методом при следующих условиях:

- изменение T_w находится из условия равенства подводимого и отводимого от камеры тепловых потоков, а λ_1 может быть с точностью до 5% аппроксимирована уравнением

$$\lambda_1 = \lambda_0 [1 + 0.0058(T_з - T)],$$ где $\lambda_0 = 2.1$ Вт/м·К;

- характеристика теплоподвода от живой (незамороженной) ткани к замороженной зоне выявляется экспериментальным путем от разных типов ткани с резко различной интенсивностью кровоснабжения в виде зависимости эффективной (условной) теплопроводности $\lambda_э$ от размера замороженной зоны $R_з$;
- учет влияния C_2 осуществляется введением в условие сопряжения на границе раздела фаз (замороженная-незамороженная ткань) поправки, физический смысл которой заключается в замене теплоты кристаллизации фиктивной теплотой, равной сумме истинной теплоты кристаллизации ткани и теплоты охлаждения этой же ткани от температуры $T_т$ до $T_з$.

При этом условие сопряжения на границе раздела фаз примет следующий вид:

$$\lambda_0\left[1+0{,}0029(T_з-T_w)\right]\frac{(T_з-T_w)z}{(R_з-z)R_з}-\frac{\lambda_э}{R_з}(T_т-T_з)=\left[L\rho_2+C_2\rho_2(T_т-T_з)\right]\frac{dR_з}{d\tau}\quad(1)$$

где T_w находится из уравнения (принято, что наружная поверхность камеры на 10% больше внутренней, термосопротивление стенки камеры пренебрежимо мало):

$$1{,}1\lambda_0\left[1+0{,}0029(T_з-T_w)\right]\frac{(T_з-T_w)\cdot R_з}{(R_з-z)\cdot z}=\alpha\left(T_w-T_x\right),\quad(2)$$

ρ_2 - плотность незамороженной ткани, кг/м^3; α - коэффициент теплообмена между стенкой камеры и криоагентом, Вт/м^2·К; T_x - температура криоагента, К.

Введя в уравнение (1) значение T_w из (2), нетрудно убедиться, что для решения задачи необходимо знание характеристик теплообмена между живой и замороженной тканями ($\lambda_э$) и между стенкой камеры и криоагентом (α).

В ГЛАВЕ II (ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ЖИВОЙ И ЗАМОРОЖЕННОЙ ТКАНЯМИ) содержится описание методики проведения экспериментов. Приведены анализ и обобщение полученных результатов.

Экспериментальная установка позволяла определить коэффициент теплопроводности λ живой ткани на основе известных решений о теплоподводе к круглой площадке и полусферической поверхности от бесконечного тела. Опытную камеру приводили в плотный контакт с поверхностью живой ткани собаки и человека,

охлаждали и поддерживали постоянными температуру стенки T_w, равную температуре замерзания ткани $T_з$ и на 2^0 ниже ($T_w = T_з$). Поверхность ткани и камеры, за исключением площади их контакта, была теплоизолирована.

В результате первой серии экспериментов, проведенных на камере в виде плоского круга радиусом $R_{кр.}$ = 0,5; I; I,5; 2; 3 и 4 см, было установлено, что коэффициент теплопроводности λ, рассчитанный по известной формуле $Q_{кр} = 4\lambda \cdot R_{кр}(T_т - T_w)$, где $Q_{кр} = Q = G \cdot \Delta i$; G – массовый расход азота, кг/с; Δi – разность энтальпий на входе и выходе газообразного азота из камеры, Дж/кг, изменяется с изменением $R_{кр.}$, уменьшаясь и стремясь с увеличением $R_{кр}$ к постоянной величине теплопроводности мертвой ткани λ_2.

Результаты второй серии экспериментов, проведенных на камере в виде полусферы радиусом $R_{п.сф.}$ = 0,35; 0,6; I,05 и I,5 см, для которой тепловой поток $Q_{п.сф.} = 2\pi \cdot R_{п.сф.} \cdot \lambda (T_т - T_w)$ и сопоставление с первой серией показали:

– линейный размер охлажденной камеры в области небольших ее размеров не определяет однозначно $\lambda_э$ конкретной ткани, однако при равных площадях охлаждающей поверхности $S_{кр} = S_{п.сф.}$ имеет место одинаковая теплопроводящая способность конкретной живой ткани

$$4\lambda_{э.кр} R_{кр} = 2\pi\lambda_{э\,п.сф.} R_{п.сф} = \frac{Q}{T_т - T_w},$$

что иллюстрируют экспериментальные данные, представленные на рис.2 в координатах $q_т = \psi(S)$. В области больших поверхностей кривые $q_т = \psi(S)$ расслаиваются, причем это расслоение соответствует расчетному при постоянном $\lambda_э$, равном λ_2. Для окончательной проверки были проведены эксперименты на плоских прямоугольниках со сторонами Ix6; I,5x8; 2xI2; 3xI6 см. Данные (см.рис.2) подтвердили указанные закономерности.

Таким образом, теплоподвод от каждого типа живой ткани в области малых значений S (вплоть до S' на рис.2) может быть однозначно описан величиной поверхности раздела независимо от ее формы

$$q_т = A/S^n. \qquad (3)$$

Для мышечной ткани $q_т = 1{,}5/S^{0{,}85}$, а для ткани печени $q_т = 2/S^{1{,}1}$

Рис. I

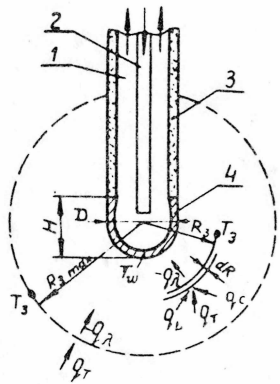


Рис. 2

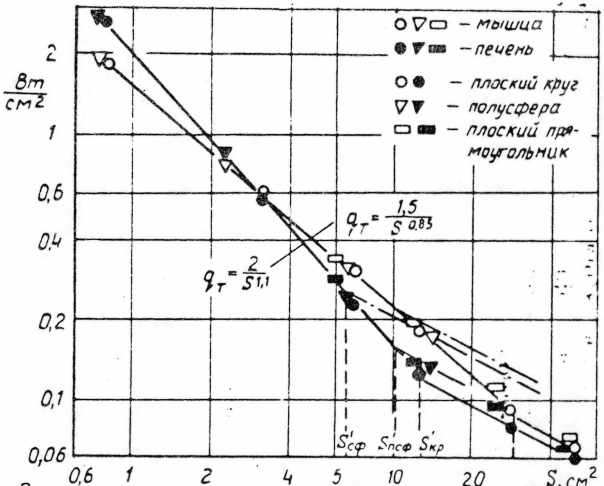


Рис. 3

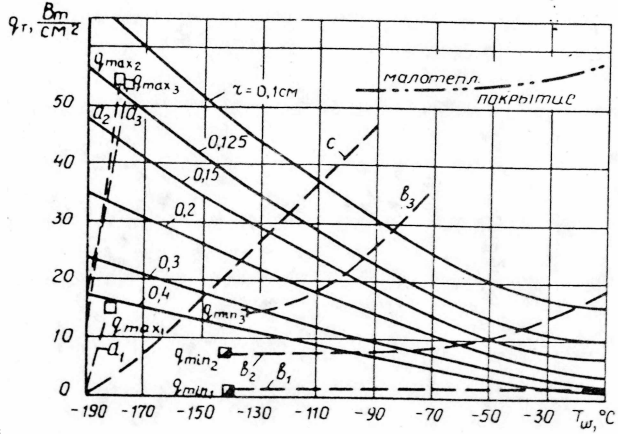
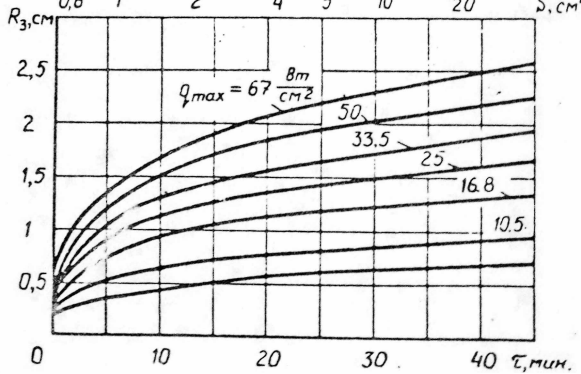


Рис. 4



Вт/см^2, где S - см^2. Для $S > S'$ теплоподвод легко определяется по известным зависимостям при $\lambda_э$ равном λ_2.

При сферическом промораживании различных тканей (за исключением жира) удобно пользоваться в области $S \leq S''$, (т.е. для начального этапа промораживания, когда преобладающим является теплоподвод в результате кристаллизации ткани) вместо соотношения (3) одним уравнением, для $r < R_з \leq \sqrt{S''/4\pi}$ или $R_з \leq 0{,}8$ см

$$\lambda_э = 0{,}8\,(\lambda_2 / R_з) \qquad (4)$$

и для $R_з > 0{,}8$ см (для жировых тканей с самого начала промораживания)

$$\lambda_э = \lambda_2. \qquad (5)$$

В ГЛАВЕ III (ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ИСТЕЧЕНИЯ ОДНОФАЗНОГО И ДВУХФАЗНОГО КРИОАГЕНТА В НЕБОЛЬШОЙ ОБЪЕМ) содержится описание методики проведения экспериментов; рассмотрены теория пограничного слоя и известные данные применительно к истечению однофазного потока в небольшой объем; приведены экспериментальные результаты по теплоотдаче и сравнение их с теоретическими, а также представлены исходные экспериментальные данные по теплообмену и критическому тепловому потоку при пузырьковом (q_{max}) и пленочном (q_{min}) кипении, анализ и обобщение которых приведены в главе IУ.

Опытный элемент имитировал рабочие объемы зондов с отношением высоты к диаметру близким к единице и был выполнен из меди в виде толстостенной ($\delta > 5$ мм) цилиндрической камеры с плоским и полусферическим дном диаметром D = 3,5; 5,5; 7,5 мм и абсолютной шероховатостью поверхности 2-I0 мк.

При экспериментах изменяли диаметр на срезе сопла d_o = 0,7÷2 мм; геометрический параметр D/d_o = 2÷I0; безразмерное расстояние от среза сопла до дна камеры $\bar{h} = h/d_o$ = 0,25÷5; массовую скорость на срезе сопла W_o = 76÷3I00 кг/м^{2}с, входное массовое паросодержание X_i = 0÷I и приведенное давление $P_o/P_{кр}$ = 0,03÷0,I. Скорость парожидкостного потока на срезе сопла изменялась в пределах $w_{осн}$ = 0,05÷60 м/с.

Проведенные исследования показали:

I. Характер течения однофазного потока в камере в основном

аналогичен известному характеру течения для окрестности передней критической точки, где имеет место ламинарный режим течения и происходит наиболее интенсивный теплообмен. Данные по теплоотдаче к однофазному потоку хорошо обобщаются при числе Прандтля $0{,}5 < Pr < 10$ уравнением

$$\frac{\alpha \cdot d_0}{\lambda} = 5 \left(\frac{d_0 \cdot W_0}{\mu}\right)^{0,5} \cdot Pr^{0,4} \left(\frac{d_0}{D}\right) \bar{h}^{-0,07}, \quad (6)$$

где μ – вязкость потока, кг/м·с.

2. Форма поверхности дна камеры и наличие в камере зон с возвратным течением, аналогичных известной зоне возвратного течения перед двухмерным уступом, а также ассиметрия центральных осей сопла и камеры (при прочих одинаковых условиях) практически не влияют на средние значения теплоотдачи к однофазному потоку и теплоотдачи, q_{max}, q_{min} при кипении. Изменение $\bar{h}$ в диапазоне от I до 5 не сказывается на теплоотдаче и q_{min} при кипении. При $\bar{h} < I$ теплообмен и q_{max}, q_{min} интенсифицируются. Однако при этом существенно увеличивается гидравлическое сопротивление.

3. Все полученные данные по теплообмену при пузырьковом кипении можно разделить, подобно кипению в канале при вынужденном движении, на четыре характерные по теплообмену области – области частично пузырькового, полностью развитого и предкризисного кипения, а также испарения при вынужденной конвекции.

В областях частично пузырькового кипения и испарения теплоотдача определяется главным образом условиями вынужденной конвекции с учетом паросодержания и скольжения фаз. Эти области имеют место при удовлетворении условия

$$B'_{0x} = \frac{q}{r_s \cdot W_0 [x + (1-x)(\rho_{vs}/\rho_{ls})^{2/3}]} \left(\frac{\rho_{vs}}{\rho_{ls}}\right) \leq 4{,}3 \cdot 10^{-5}$$

(где $x = x_i + \frac{Q}{2 \cdot r_s \cdot G}$; r_s – теплота парообразования, Дж/кг; ρ_{vs}, ρ_{ls} – плотность пара и жидкости при температуре насыщения) и разграничиваются значением расходного объемного паросодержания, примерно $\beta \cong 0{,}985$ (или $x \cong 0{,}4$). Данные по теплоотдаче в области частично пузырькового кипения достаточно хорошо обобщаются уравнением ($0 < \beta \leq 0{,}985$)

$$\frac{Nu_{экс}}{Nu_{рас}} = 1{,}6 \left(\frac{1}{X}\right)^{0,35},$$

а в области испарения ($0,4 < X < 0,9$)

$$\frac{Nu_{экс}}{Nu_{рас}} = 1,9\left(\frac{1}{X}\right)^{0,2},$$

где $Nu_{экс} = \frac{\alpha \cdot d_o}{\lambda_{ls}}$; $Nu_{рас} = 5\left[\frac{d_o \cdot W_o(1-X)}{\nu_{ls}}\right]^{0,5}\left(\frac{d_o}{D}\right)\cdot \rho_{r_{ls}}^{0,4}$

$X = \left(\frac{\rho_{vs}}{\rho_{ls}}\right)^{0,5}\left(\frac{\mu_{ls}}{\mu_{vs}}\right)^{m/2}\cdot\left(\frac{1}{X}-1\right)^{\frac{2-m}{2}}$ – параметр Локкарта и Мартинелли при $m = 0,5$,

В области полностью развитого кипения, имеющей место при $B'_{o_x} \geq 4,3\cdot10^{-5}$ и $0 < \beta < 0,985$, теплоотдача в основном зависит (подобно кипению в большом объеме) от плотности теплового потока q и давления, и практически не зависит от условий вынужденной конвекции и паросодержания во внешнем течении. Для определения теплоотдачи к азоту в этой области получено соотношение $\alpha = 500\left[q(1-X)\frac{\rho_{vs}}{\rho_{ls}}\right]^{0,55}$, где α (Вт/м^2·К); q (Вт/м^2).

Это же уравнение можно распространить на область предкризисного кипения, где на теплоотдачу вновь начинает оказывать влияние вынужденная конвекция и началу которой соответствует условие

$$B''_{o_x} = \frac{q}{r_s \cdot W_o\left[X+(1-X)(\rho_{vs}/\rho_{ls})^{1/3}\right]} = 8,3\cdot10^{-3}.$$

При инженерных расчетах можно не выделять специфичной области полностью развитого кипения и пользоваться в диапазоне $0 < \beta < 0,99$ (или $0 < X \leq 0,5$), т.е. в зоне ядерного кипения, единой зависимостью

$$\frac{\alpha \cdot d_o}{\lambda_{ls}} = 135\, Re_x^{0,5}\cdot Bo_x^{0,3}\cdot\left(\frac{d_o}{D}\right)\cdot \rho_{r_{ls}}^{0,4}, \qquad (7)$$

где в числах Рейнольдса

$$Re = \frac{d_o \cdot W_o(1-X)}{\nu_{ls}}\left[X+(1-X)\frac{\rho_{vs}}{\rho_{ls}}\right]$$

и кипения

$$Bo_x = \frac{q}{r_s \cdot W_o\left[X+(1-X)(\rho_{vs}/\rho_{ls})\right]}$$ введена скорость парожидкостного потока без учета скольжения фаз.

4. При пленочном кипении на теплообмен в основном влияют условия вынужденной конвекции с учетом паросодержания и скольжения фаз. Наряду с этой общей зависимостью в элементе могут иметь место две характерные по теплообмену области кипения.

Одна из них соответствует обращенному стержневому режиму течения, который всегда имеет место на начальном участке пленочного кипения (вплоть до $X_i \cong 0{,}9$), а другая - соответствует структуре потока дисперсного типа. Переходу от обращенного режима течения к структуре потока дисперсного типа (или началу преобладания последнего на среднее значение теплоотдачи) соответствует минимальная величина теплоотдачи α_{min} и вполне определенное значение генерируемого на участке пленочного кипения паросодержания $X^* = Q/2 \cdot r_s \cdot G$, которое в экспериментах изменялось от 0,01 до 0,1. Это значение, названное граничным ($X^*_{гр}$), зависит от входных условий и определяется соотношением

$$X^*_{гр} = 2{,}5\left[X_i + (1-X_i)\left(\rho_{vs}/\rho_{ls}\right)^{1/3}\right] \cdot \left(\frac{d_0 \cdot W_0}{\mu_{ls}}\right)^{-0{,}4}.$$

В обеих областях пленочного кипения при $0 < X \leq 1$ данные по теплоотдаче достаточно хорошо обобщаются единым уравнением

$$\frac{\alpha \cdot d_0 \cdot \varphi^*}{\lambda_{vs}} = 3\left[\frac{d_0 \cdot W_0 \cdot X}{\mu_{vs}}\right]^{0{,}5} \cdot \left(\frac{d_0}{D}\right) \cdot \rho_{2\,vs}^{0{,}4}, \quad (8)$$

где

$$\varphi^* = \frac{X}{X + (1-X)\left(\rho_{vs}/\rho_{ls}\right)^{0{,}8}}.$$

Уравнение (8) имеет экстремум по теплоотдаче (α_{min}) и при подстановке значения $X = 1$ переходит в формулу для газа.

5. Все данные по q_{max} достаточно точно обобщаются соотношением

$$\frac{q_{max}}{r_s \cdot \mu_{ls}}\left[\frac{\sigma}{g(\rho_{ls}-\rho_{vs})}\right]^{1/2} = 0{,}21\left(\frac{d_0 \cdot W_0}{\mu_{ls}}\right)^{0{,}6} \cdot (1-X)\left[X + (1-X)\left(\frac{\rho_{vs}}{\rho_{ls}}\right)^{1/3}\right] \cdot \left(\bar{h}\right)^{-0{,}25}. \quad (9)$$

6. q_{min} имел место при T_w, примерно равной критической температуре криоагента. При этом данные по q_{min} обобщаются уравнением

$$\frac{q_{min}}{r_s \cdot \mu_{ls}}\left[\frac{\sigma}{g(\rho_{ls}-\rho_{vs})}\right]^{1/2} = 0{,}21\left\{\frac{d_0 \cdot W_0}{\mu_{ls}}\left[X_i\left(\frac{\rho_{ls}}{\rho_{vs}}\right)^{1/3} + (1-X_i)\right]\right\}^{0{,}6}\left[X^* + (1-X^*)\left(\frac{\rho_{vs}}{\rho_{ls}}\right)^{0{,}8}\right]. \quad (10)$$

Нанесение на стенку камеры малотеплопроводного покрытия, загрязнения или наличие окисной пленки приводит, при прочих одинаковых условиях, к увеличению q_{min} и соответствующей ему T_w. При этом значение q_{min} определяется не только гидродинамическими, но и термодинамическими условиями контакта жидкости со стенкой. Покрытие толщиной 0,2÷0,5 мм с теплопроводностью не более 0,3 Вт/м·К позволяет увеличить значение q_{min} практически до величины q_{max}, выраженного уравнением (9).

Следует отметить, что при $(\bar{h})^{0,25}_{x}$ I и X→0 отношение уравнений (9) и (10), равное $\frac{q_{max}}{q_{min}} = \left(\frac{\rho_{l3}}{\rho_{v3}}\right)^{0,47}$, аналогично отношению q_{max}/q_{min} при кипении в большом объеме. В условиях истечения можно получить наибольшие (для конкретной жидкости) значения теплоотдачи и q_{max}, по сравнению с другими условиями течения.

В ГЛАВЕ У (СИНТЕЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ТЕПЛОПОДВОДУ СО СТОРОНЫ ЖИВОЙ ТКАНИ И ТЕПЛОСЪЕМУ СО СТОРОНЫ КРИОАГЕНТА) приведены решения для расчета криохирургических зондов и построения номограмм, связывающих динамику роста замороженной зоны в живой ткани с геометрическими размерами зондов и режимными параметрами криоагента. Представлены результаты экспериментального исследования эффективного пути интенсификации теплообмена при пленочном кипении.

В частности показано, что отправным пунктом при расчете зондов и выборе способа охлаждения (лучше всего отвечающего требованиям криохирургического метода лечения) удобно пользоваться номограммой по предельному теплоподводу от живой ткани к замороженной $(q_T)_{R_{3max}}$, который имеет место при максимальных размерах замороженной ткани R_{3max}, соответствующих различным значениям температуры стенки T_w для каждого условного радиуса камеры зонда r. Из уравнения (I) при $dR_3/d\tau = 0$ имеем

$$R_{3max} = r\left\{1 + \frac{\lambda_0[1+0,0029(T_3 - T_w)](T_3 - T_w)}{\lambda_э(T_T - T_3)}\right\},$$

где $\lambda_э$ выражена соотношениями (4) и (5). Номограмма для $(q_T)_{R_{3max}}$, построенная по соотношению

$$(q_T)_{R_{3max}} = 1,1\lambda_0\left[1+0,0029(T_3 - T_w)\right]\frac{(T_3 - T_w)}{(1/r - 1/R_{3max})\cdot r}, \quad (11)$$

приведена на рис.3 (сплошные линии). Очевидно, что уравнение (II) (рис.3) характеризует требования к теплосъему со стороны криоагента и тем самым определяет всю совокупность его параметров, обеспечивающих достижение некоторой температуры T_w и соответствующего этой температуре размера замороженной ткани. Если нанести на рис.3 кривые теплоотвода со стороны криоагента при различных способах охлаждения и режимных параметрах

криоагента, то пересечение этих кривых с кривыми $(q_T)_{R_3 max}$ определит температуру стабилизации стенки, т.е. наименьшую T_w, соответственно для каждого режима охлаждения. На рис.3 нанесены кривые пузырькового (a_I; a_2 и a_3 на рис.3) и пленочного ($в_I$; $в_2$ и $в_3$) кипения азота, включающие q_{max} и q_{min} при P = I,5 бар, соответственно для большого объема и при истечении в камеру ($r \cong$ I-4 мм) с W_o = I500 кг/м^2·с и $(X_i)_2$= 0; $(X_i)_3$= 0,6 и $(X_i)_4$= I (кривая С), выраженные уравнениями (6 - I0).

Из рис.3 видно, что охлаждение зондов с $r < 4$ мм кипящим азотом при естественной циркуляции неприемлемо. В случае приведения в контакт с тканью захоложенного зонда $r >$ I,5 мм с вынужденной циркуляцией кипящего азота возможно на практике выполнение условия $q_{max} > q_T$ и промораживание ткани при практически постоянной температуре стенки. Во всех остальных случаях стабилизация T_w произойдет при пленочном режиме кипения, что подтверждено практикой.

Единственным простым и эффективным выходом для обеспечения перехода на пузырьковое кипение при небольших расходах криоагента является значительное повышение величины q_{min} за счет нанесения на внутреннюю поверхность рабочей камеры зонда малотеплопроводного покрытия толщиной ~ 0,2 мм с теплопроводностью не более 0,3 Вт/м·К. Это позволяет существенно увеличить скорость промораживания ткани. Для этого случая охлаждения в качестве примера на рис.4 в координатах $R_3 = \psi(\tau)$ приведена номограмма, построенная по уравнениям (I) и (2) с учетом (4) и (5) для r = 0,I5 см при различных значениях q_{max}, выраженного зависимостью (9) через режимные параметры азота. Такую экспериментально подтвержденную номограмму удобно иметь в практике для каждого конкретного зонда. При этом криогенная система должна снабжаться расходомером, который можно проградуировать непосредственно в значения q_{max} или α при пленочном кипении и использовании газообразного криоагента.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.

I. Исследование интенсивности теплообмена между замороженной и живой (незамороженной) тканями показало:

- теплоподвод от каждого типа живой ткани (за исключением жира) к границе замороженной зоны в области малых ее поверхностей S, в среднем до 15 $см^2$, можно однозначно выразить через величину поверхности раздела фаз S независимо от ее формы в виде $q_T = A/S^n$ (где А-постоянная; $0,5 < n < 2$), достаточно хорошо отражающим влияние кровотока на механизм теплоподвода и удобного для практических расчетов;
- теплоподвод от каждого типа живой ткани к границе замороженной зоны в области больших ее поверхностей (больше 15 $см^2$), а для жировой ткани во всем диапазоне изменения S, осуществляется в основном теплопроводностью, значение которой соответствует теплопроводности мертвой ткани.

Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования размеров замороженной зоны в живой ткани различного типа при любой форме промораживания.

2. Исследование теплообмена в условиях истечения криоагента в небольшую камеру показало:
- характер теплообмена при однофазном течении аналогичен известному для окрестности передней критической точки;
- при кипении имеют место, подобно кипению в канале при вынужденном движении, четыре характерные по теплообмену области при пузырьковом и две- при пленочном кипении;
- значения максимального критического теплового потока могут быть примерно на порядок выше, чем при кипении в большом объеме.

Полученные результаты и обобщающие соотношения по выявлению границ характерных областей кипения и по теплоотдаче и критическому тепловому потоку при пузырьковом и пленочном кипении, а также по теплоотдаче к однофазному потоку могут быть использованы при расчете криохирургических, криоэлектронных и прочих устройств, охлаждаемых однофазным и парожидкостным потоком в условиях истечения в небольшой объем, и при разработке различных высокоэффективных охлаждающих струйных устройств.

3. Синтез полученных результатов по теплоподводу со стороны живой ткани и теплосъему со стороны криоагента показал, что при работе зондов с малой рабочей камерой очень трудно получить криогенную температуру на стенке (и соответственно уве-

личить размер зоны замораживания в живой ткани) без применения специальных мер по интенсификации теплосъема. Наиболее эффективной мерой при этом является применение кипящего криоагента с входным паросодержанием до 60% и нанесение на внутреннюю поверхность камеры зонда малотеплопроводного покрытия толщиной 0,2 мм с теплопроводностью не более 0,3 Вт/м·К. Это обеспечивает при небольших расходах криоагента значительное увеличение скорости промораживания ткани и достижение значения температуры стенки, близкого к температуре насыщения криоагента.

4. Системное исследование теплообменных процессов позволило:
- создать метод расчета криохирургических зондов и построить номограммы, связывающие динамику роста замороженной зоны в живой ткани с геометрическими размерами инструмента и режимными параметрами криоагента. Эти экспериментально подтвержденные номограммы могут быть использованы как в практике, так и при исследовании оптимальных скоростей промораживания ткани и выяснения механизмов криодеструкции и некроза;
- разработать эффективные конструкции криохирургических приборов и ряд других устройств, многие из которых защищены 10 авторскими свидетельствами, а также создать универсальный криохирургический прибор, опытный образец которого внедрен в практику в клинике I-го Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени медицинского института им.И.М.Сеченова.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Belyakov V.P., Boudrik V.V., Chapochnikov V.A. Study of Heat Flux into Small Rooms. - Progress in Refrigeration Science and Technology: Proceedings of the XIV International Congress of Refrigeration, Moscow, 1975. Moscow, 1978, v.1, p. 269-278.

2. Беляков В.П., Будрик В.В. Теплообмен и критический тепловой поток при пузырьковом и пленочном кипении в условиях истечения двухфазного криоагента в небольшой объем.- В кн.: Теплообмен и гидрогазодинамика при кипении и конденсации: Материалы XXI Сибирского теплофизического семинара, Новосибирск,

окт., 1978. Новосибирск, 1979, с.250–257.

3. Беляков В.П. и др. Экспериментальное исследование теплоотдачи к кипящему азоту и его парам при истечении в малую камеру / В.П.Беляков, В.А.Шапошников, В.В.Будрик, Ю.С.Блинов. – В кн.: Криогенная техника. Балашиха, 1975, с.14–27. (Труды НПО "Криогенмаш", вып. 17).

4. Беляков В.П., Будрик В.В., Шапошников В.А. Кризис пузырькового и пленочного кипения в условиях истечения двухфазного криоагента в малый объем.– Химическое и нефтяное машиностроение, 1978, №12, с.23–26.

5. Будрик В.В. Теплопередача при локальном промораживании биологической ткани и охлаждении инструмента однофазным и двухфазным криоагентом.– В кн.: Процессы, технология и контроль в криогенном машиностроении. Балашиха, 1978, с.125–140.

6. А.с. 449716 (СССР). Устройство для локального охлаждения тканей/Авт. изобр. В.В.Будрик, В.А.Шапошников.– Заявл. 25.12.72, №1861056/31–16. Опубл. 15.11.74. МКИ А61в 17/36.

7. А.с. 424563 (СССР) Криохирургический зонд/Авт.изобр. В.В.Будрик, В.А.Шапошников.– Заявл. 25.12.72, №1861051/31–16. Опубл.25.04.74. МКИ А61в 17/36. УДК 615.473.9(088.8).

8. А.с. 475998 (СССР). Наконечник криохирургического зонда/Авт.изобр. В.В.Будрик, Р.М.Мухамедьяров, В.А.Шапошников. – Заявл. 29.11.73, №1974201/28–13. Опубл.05.07.75. МКИ А61в 17/36. УДК 615.832.9(088.8).

9. А.с. 480411 (СССР). Устройство для криовоздействия на ткани/Авт.изобр.В.В.Будрик, Н.М.Волкова, В.А.Шапошников.–Заявл. 28.12.73, №1982307/28–13. Опубл.15.08.75.МКИ А61в 17/36.

10. А.с. 545348 (СССР). Криоскальпель/Авт.изобр.В.П.Беляков, Ю.С.Блинов, В.В.Будрик, В.А.Смирнов, В.А.Шапошников.– Заявл.09.06.75. №2164011/13. Опубл.05.02.77. МКИ А61в 17/36.

11. А.с. 567913 (СССР). Устройство для низкотемпературного охлаждения контейнера/Авт.изобр.В.П.Беляков, В.В.Будрик, М.С.Мартынов, В.А.Шапошников.– Заявл.08.04.76, №2347532/13. Опубл.05.08.77. МКИ F 25 D 3/10, УДК 629.114.44(088.8).

12. Полож.решение. Криохирургический прибор/Авт.изобрет. В.В.Будрик, Р.М.Мухамедьяров, В.А.Шапошников.– Заявл.12.04.79 №2744832/13. МКИ А61в 17/36.

Л-105379 Подписано к печати 4/X 1979 г. Формат 60x84/16.
Объем 1,0 печ. л. Тираж 125 экз. Заказ № 1310.

Ротапринт НПО "Криогенмаш"

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА