

На правах рукописи

МАКАРОЧКИН МАКСИМ НИКОЛАЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСТРУЙНОЙ  
УСТАНОВКИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ДРОССЕЛЕМ  
ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО РАССЕЧЕНИЯ  
И ОХЛАЖДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

Специальность 05.04.03

Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники,  
систем кондиционирования и жизнеобеспечения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОМСК-2004



На правах рукописи

МАКАРОЧКИН МАКСИМ НИКОЛАЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОСТРУЙНОЙ  
УСТАНОВКИ С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ДРОССЕЛЕМ  
ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО РАССЕЧЕНИЯ  
И ОХЛАЖДЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ**

Специальность 05.04.03

Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники,  
систем кондиционирования и жизнеобеспечения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



ОМСК-2004

Работа выполнена в Омском государственном техническом университете.

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Бумагин Г.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Кузнецов В.И.

кандидат технических наук  
Ляпин В.И.

Ведущее предприятие: ООО НПФ "Экотерм", г. Омск

Защита состоится "\_\_\_\_" мая 2004 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.02 при Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, Омск, пр. Мира, 11, аудитория 6-340.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета.

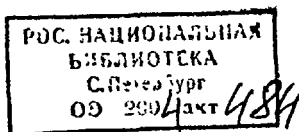
Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 644050, Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.178.02.

Автореферат разослан "\_\_\_\_" мая 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.178.02  
кандидат технических наук, доцент



В.Л. Юша



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время все шире находят применение процессы и аппараты холодильной и криогенной техники в медицинской практике. В современной медицине для рассечения различного рода биологических тканей используются в основном электрохирургические медицинские аппараты, основанные на тепловом воздействии на биоткани пациента с целью их рассечения и коагуляции кровеносных сосудов. Так же используются жидкоструйные режущие устройства.

Однако, в процессе их применения во время рассечения биотканей значительной оказывается зона различных поражений, существенны кровопотери, особенно на таких органах как печень, селезенка, поджелудочная железа, желудок, легкие, значительно время заживления операционных ран. Жидкостные режущие устройства уменьшают зону поражения, но струя жидкости кроме описанных травматических последствий, связанных с малой дифференцированностью рассечения, имеет один важный недостаток - это разлив жидкости, образующей режущую струю на операционном поле. Как следствие, необходимость ликвидации этих последствий - организация откачки жидкости из тела пациента, где она, накапливаясь, может привести к нежелательным последствиям.

С целью устранения этого недостатка данного класса хирургического оборудования, было предложено использовать для образования режущей струи вместо жидкости охлажденный газ. В качестве источника, осуществляющего дифференцированное рассечение газовой струей, было предложено использовать распределенный дроссель капиллярного типа, широко используемый в низкотемпературной технике. Применение газоструйной установки с распределенным дросселем капиллярного типа позволит не только дифференцированно рассекать биологическую ткань, но и охлаждать её, что обеспечивает малые кровопотери и существенное уменьшение травмирования пациента при операции. Это решение позволяет устранить перечисленные недостатки жидкоструйных режущих устройств, однако они требуют проведения как теоретических, так и экспериментальных исследований.

Таким образом, задачи связанные с разработкой и исследованием процессов и аппаратов низкотемпературной техники для медицинского оборудования, дающего возможность уменьшить травмирование пациента при операции, а так же уменьшения объёма интраоперационной кровопотери, снижения степени операционного риска, экономии переливаемой донорской крови, уменьшения времени реабилитационного периода пациента, являются и сегодня актуальными.

Цель данной работы - разработка газоструйного устройства дроссельно-капиллярного типа, которое позволяет создать новое хирургическое оборудование для дифференцированного рассечения и охлаждения биологической ткани.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Анализ существующих хирургических аппаратов предназначенных для разрушения биотканей и коагуляции сосудов, используемых как у нас в стране, так и за рубежом. Оценка возможности применения газоструйных установок с истечением охлажденного газа для создания медицинских хирургических аппаратов.

2. Анализ путей решения задач создания газоструйных установок дроссельно-капиллярного типа с истечением охлажденного газа.

3. Разработать математическую модель рабочих процессов истечения газа в газоструйном капиллярном дросселе для определения силового воздействия и расхода газа, а так же геометрические параметры газовой струи.

4. Разработка рабочего органа основанного на распределённом дросселе капиллярного типа, образующего холодную газовую струю для обеспечения дифференцированного рассечения и охлаждения биологических тканей.

5. Разработать экспериментальный стенд для исследования течения газа из распределённого дросселя капиллярного типа рабочего органа.

6. Разработать методики экспериментального исследования течения газа из распределённого дросселя капиллярного типа рабочего органа.

7. Проведение экспериментальных исследований течения газа из распределённого дросселя рабочего органа и степени его охлаждения.

8. Анализ результатов экспериментального исследования и сопоставление их с результатами полученными теоретически.

9. Разработка и создание газоструйной хирургической установки, рабочий орган которой оснащён распределённым дросселем капиллярного типа для обеспечения дифференцированного рассечения и охлаждения биологических тканей.

10. Анализ возможного применения газоструйной установки для дифференцированного рассечения паренхиматозных органов с их охлаждением.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Разработана, апробирована и экспериментально проверена математическая модель рабочих процессов газоструйной установки на основе дросселя капиллярного типа для дифференцированного рассечения и охлаждения биологических тканей.

2. Осуществлены экспериментальные исследования и найдены зависимости расхода газа при истечении из распределённого дросселя капиллярного типа, и силового воздействия газовой струи, с учётом вязкости газа и геометрии газоструйного источника. Определены геометрические параметры газовой струи

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований создана принципиально новая газоструйная установка на основе дросселя капиллярного типа для дифференцированного рассечения и охлаждения биологических тканей.

4. Предложенная конструкция газоструйной установки для дифференцированного рассечения тканей паренхиматозных органов защищена патентом на полезную модель.

На защиту выносятся следующие основные научные положения.

1. Математическая модель процессов истечения охлаждённого газа из распределенного дросселя капиллярного типа.

2. Конструкция рабочего органа газоструйной установки с распределённым дросселем капиллярного типа для дифференцированного рассечения и охлаждения биологической ткани.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований газоструйной установки для дифференцированного рассечения и охлаждения биологических тканей

### Практическая ценность работы

Создана принципиально новая газоструйная установка для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов с рабочим органом, основанным на распределённом дросселе.

На основе математической модели разработана программа расчёта рабочих процессов установки на ПЭВМ, которая позволяет проектировать газоструйную установку и оптимально подбирать требующиеся хирургам типоразмеры распределённого дросселя капиллярного типа.

Разработана техническая документация, которая используется в ООО НТК «Криогенная техника» для создания газоструйных установок для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов.

Реализация результатов работы Разработано и изготовлено ООО НТК «Криогенная техника» 2 образца газоструйной установки для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов, первое применение которых показало хорошие результаты при хирургических операциях.

Достоверность результатов работы обоснована применением классической газовой динамики и термодинамики, современных методов планирования и проведения эксперимента, статистических методов обработки экспериментальных данных, удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных.

Апробация работы Основные положения диссертации докладывались на Международной научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, ОмГТУ 2002), научной конференции «Диагностика и лечение заболеваний печени и поджелудочной железы» (Санкт-Петербург, 2002), научной конференции «IV ежегодная Российская онкологическая конференция» (Москва, 2002) и научно-техническом семинаре в ООО НТК «Криогенная техника» (Омск, 2003).

Публикации По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 7 статей, 1 тезисы, 1 патент на полезную модель.

Структура и объём диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения. Объём диссертации: 170 страниц, включая 71 рисунок, 3 таблицы и библиографию на 151 наименование.

Автор выражает благодарность Е.А.Бабенко, к.т.н., доценту кафедры ТФНТ, а так же д.м.н., В.А.Рудакову за ценные консультации по вопросам использования разработанной газоструйной установки в медицинской практике.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность работы, научная и практическая значимость, сформулированы цель и задачи исследования, методы её достижения, дано краткое содержание работ по главам.

В первой главе проведён обзор медицинских приборов, использующихся для рассечения биологической ткани - это лазерный, плазменный, электрохирургический аппараты, электрокаутер и применение безыгольного инъектора для дифференцированного рассечения тканей паренхиматозных органов, которые представлены в таблице 1. Предложена газоструйная установка на основе распределённого дросселя капиллярного типа для дифференцированного рассечения и охлаждения биологической ткани. Дан анализ методам решения газоструйных установок с распределённым дросселем и определения геометрических параметров истекающей газовой струи.

Таблица 1

Наименование хирургического медицинского аппарата	Диаметр воздействия (электрода), мм	Размеры зоны термического поражения d, мкм	Вероятность несанкционированной перфорации окружающих полостей и биотканей	Другие возможные нежелательные последствия
1. Плазменный аппарат	5-8 (плазменный поток)	1500-2000	высокая	газовая эмболия
2. Лазерный аппарат	0,1-0,5 (лазерный луч)	250-1000	средняя	травматический отек, ожоги
3. Ультразвуковой аппарат	3-5	400 - 800	средняя	гемолиз
4. Электрокаутер	3-5	2000 - 3000	невысокая	ожоги
5. Электрохирургический аппарат	0,5-1	500-1500	малая	ожоги
6. Применение безыгольного инъектора	2	-	невысокая	рассечения, кровопотеря
7. Газоструйная установка для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов	0,2, 0,3,0,35, 0,45,0,55	-	малая	незначительная вероятность - газовая эмболия

Все представленные медицинские аппараты, осуществляют рассечение биоткани с относительно небольшой кровопотерей, однако все они, кроме применения безыгольного инъектора для дифференцированного рассечения, абсолютно не пригодны для дифференцированного рассечения биоткани. Эти аппараты при попытке хирурга выделить очаг поражения, рассекут как биоткань, скрывающую очаг так и сам очаг, что неприемлемо.



С целью устранения недостатков хирургического оборудования, было предложено использовать для образования режущей струи охлажденный газ. Источником истечения холодного газа, осуществляющим дифференцированное рассечение газовой струей было решено использовать распределённый дроссель капиллярного типа, широко используемый в низкотемпературной технике. В качестве рабочих сред истечения выбраны азот и углекислый газ, которые так же широко применяются в холодильной технике. Это решение позволяет устранить перечисленные недостатки.

Предложена новая конструкция газоструйной установки для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов, которая изображена на рис.1., фиг. 1 схематично изображено данное газоструйное устройство, а на фиг. 2 разрез по А-А, показывающий схему рабочего органа. Установка содержит баллон с сжатым газом 1, редуктор 2, клапан регулирования подачи газа 3, кнопку клапана регулирования подачи газа 4, исполнительный орган 5 со сменными наконечниками - источниками истечения 6. Редуктор источника сжатого газа 2 и исполнительный орган 5 соединены между собой с помощью гибкого пневмопровода 7. Установка работает следующим образом. Из баллона 1 газ поступает в редуктор 2, где редуцируется до необходимого давления с понижением температуры газа. После редуктора холодный газ по пневмопроводу 7 поступает в исполнительный орган 5, где с помощью клапана 3 регулируется расход газа или прекращение подачи. Далее газ поступает в капиллярный источник истечения, где газ вторично дросселируется с увеличением скорости его истечения. При вторичном дросселировании, когда давление на входе в источник истечения относительно невелико, температура газа понижается незначительно, а при более низких давлениях практически остаётся постоянной величиной. Капиллярный источник истечения газа - это по существу распределённый дроссель капиллярного типа имеющий широкое применение в бытовой холодильной технике. Следует отметить, что по мере истечения газа - азота из баллона в течение продолжительного промежутка времени, температура газа в баллоне понижается. При этом в случае быстрого истечения температура газа понижается по закону близкому к адиабатному:

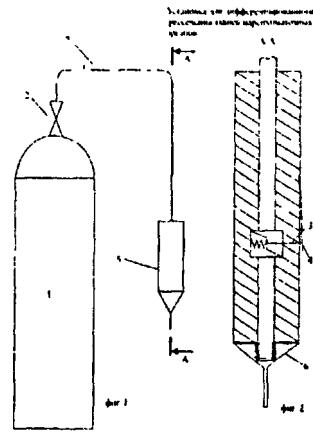


Рис. 1. Схема установки для дифференцированного рассечения тканей паренхиматозных органов.

$$T_s = T_H \left( \frac{p_a}{p_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1)$$

При медленном истечении, как в случае с газоструйной установкой, газ успевает подогреться от стенок сосуда за счёт теплопритоков  $\Delta Q_a$ , и температура его понижается менее значительно в зависимости от  $\Delta Q_a$ :

$$T_3 = t_H \left[ \left( \frac{t'_H}{t'_H} \right)^{\frac{k-1}{k}} + \Delta Q_H \frac{k-1}{k P t'_H} \right] \quad (2)$$

где  $V$  - внутренний объём сосуда.

Учитывая массу газа - азота в сосуде и массу самого сосуда - баллона, газ при истечении в течение продолжительного промежутка времени из источника, обеспечивающего наибольший расход, понижает свою температуру до 282 °К. Соответственно газоструйная установка на азоте, осуществляя дифференцированное рассечение, способна локально охладить биоткань, обладающую температурой 309 °К, струёй холодного газа с температурой в диапазоне от 295 до 282 °К, в зависимости от продолжительности непрерывной работы установки (рис.2.).

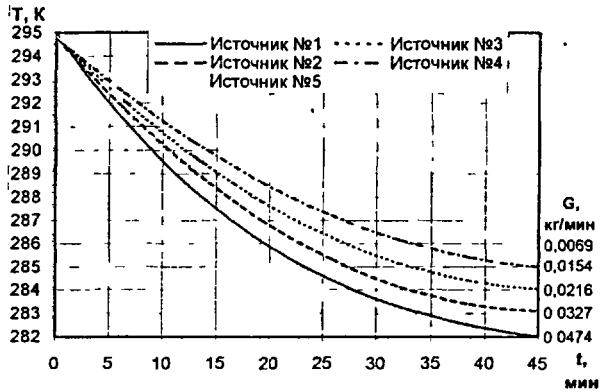


Рис.2. Температура истекающего газа в зависимости от времени работы установки и типоразмера источника истечения.

В случае истечения углекислого газа, находящегося в баллоне в жидком состоянии, основное охлаждение газа происходит при первом дросселировании в редукторе, где его температура понижается от 295 °К до 260-250 °К. Однако в связи с малым расходом газ подогревается в газопроводе при его подачи в источник истечения до температуры 295 °К. Истекая из капиллярного источника, холодный газ осуществляет рассечение и охлаждение тканей паренхиматозных органов, оставляя неповреждёнными кровеносные сосуды.

Для изменения расхода газа используется ряд капиллярных источников истечения исполнительного органа с различными внутренними диаметрами 0,2, 0,3, 0,35, 0,45, 0,55 мм.

Использование охлаждённого газа для дифференцированного рассечения обуславливает теоретическую возможность газовой эмболии. Однако, рассечение мелких кровеносных сосудов, как показывает медицинская практика не способно привести к её возникновению, а крупных сосуды не повреждаются. Известны методы решения задач по определению расхода газа истекающего из дроссельных устройств относительно большого диаметра. В этом случае расход газа, вытекающего

в одну секунду из дросселя, вычисляется по формуле (3):

$$Q_m = I_0 \left( \frac{P_{01}}{P_s} \right)^k \sqrt[2k]{\frac{2k}{k-1} P_s \rho_s \left[ 1 - \left( \frac{P_{01}}{P_s} \right)^k \right]^{k-1}} \quad (3)$$

При этом считается, что в самом дросселе режим течения газа турбулентный. В распределённом дросселе капиллярного типа режим течения газа считается ламинарным. Существует решение задачи по определению расхода вязкой несжимаемой жидкости в цилиндрической трубе при установившемся ламинарном движении полученное из уравнений Стокса и неразрывности, известное как закон Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (4)$$

Однако это, решение не учитывает особенностей течения газа в капиллярных трубках и существенной зависимости вязкости газа от геометрии капилляра и параметров истекающего газа.

Имеются ряд других решений течения газа в узких каналах (Пешти Ю.В., Шейнберг С.А.), но все они проведены для другой геометрии канала течения газа, либо очень сложны для решения и используют опытные данные.

Необходимо найти новое решения газодинамической задачи истечения газа из капиллярно-дроссельного устройства, которое позволило бы определить необходимые расход газа, силовое воздействие газовой струи при истечении газа из капиллярно-дроссельного устройства в зависимости от параметров и вязкости сжимаемого газа, а так же геометрии газоструйного устройства, в частности внутреннего диаметра капиллярного дросселя и его длины. Анализ литературных и патентных данных позволил сформулировать цель и задачи исследований.

Во второй главе приведены физическая и математическая модели рабочих процессов газоструйной установки для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов, дано решение математической модели, представлены результаты теоретического исследования и проведён их анализ.

За основу математического решения истечения газа из дросселя капиллярного типа принята классическая модель Рейнольдса (8),

$$\left. \begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = \\ & = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} + \frac{\partial}{\partial x} \left( - \rho \bar{u}'^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( - \rho \bar{u}' \bar{v}' \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( - \rho \bar{u}' \bar{w}' \right) \\ & \rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) = \\ & = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \frac{\partial}{\partial x} \left( - \rho \bar{u}' \bar{v}' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( - \rho \bar{v}'^2 \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( - \rho \bar{v}' \bar{w}' \right) \\ & \rho \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) = \\ & = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} + \frac{\partial}{\partial x} \left( - \rho \bar{u}' \bar{w}' \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( - \rho \bar{v}' \bar{w}' \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( - \rho \bar{w}'^2 \right) \\ & \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

которая базируется на следующих допущениях:

- 1) газ рассматривается как сплошная среда;

2) течение газа в газовом слое ламинарное, а тепловой режим изотермический, то есть,  $T = \text{const}$  во всем объеме газа, так как при вторичном дросселировании непосредственно в источнике из-за низкого давления температура при дросселировании изменяется незначительно, а с учётом теплопритоков практически остается постоянной, как у азота так, и диоксида углерода. Это позволяет исключить из модели уравнение баланса энергии, а уравнение состояния записать в виде:

$$p = \frac{\alpha_s^2}{k} \rho; \quad \alpha_s^2 = \lambda RT = \text{const}. \quad (9)$$

где  $p$  - давление газа;  
 $\rho$  - плотность газа;  
 $\alpha_s$  - скорость звука в газе;  
 $k$  - показатель адиабаты газа;  
 $R$  - газовая постоянная;  
 $T$  - абсолютная температура газа.

3) силы инерции газового слоя пренебрежимо малы по сравнению с вязкими силами, то есть, полагают

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = 0, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $\vec{v}$  ( $v_1, v_2, v_3$ ) - вектор скорости частиц газа;  
 $t$  - время.

4) массовые силы не учитываются, так как собственный вес частицы газа очень мал;

5) газовый слой в капиллярных источниках физически относительно тонок ( $b^*/L^* \ll 1$ , где  $b^*$  - толщина (диаметр) газового слоя и  $L^*$  - характерная длина газового слоя), величинами порядка  $b^*/L^*$  по сравнению с единицей в уравнениях и граничных условиях можно пренебрегать. Если координату  $q_3$  произвольной криволинейной ортогональной системы координат  $0q_1, q_2, q_3$  направить поперек слоя и учесть, что кривизна слоя мала, то можно принять

$$\left. \begin{aligned} p &= p(q_1, q_2, t), \quad H_3 = 1, \\ H_1 &= H_1(q_1, q_2, t), \quad r_{1,3} = \mu \frac{\partial v_1}{\partial q_3}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

остальные компоненты  $\tau_{ik}$  тензора вязких напряжений полагаются равными нулю.  $H_i$  - коэффициенты Ляме.

Так как предметом нашего исследования являются осесимметричные цилиндрические источники, то совершим переход к цилиндрическим координатам  $r, \varphi, z'$ . В качестве координатной поверхности  $q_3 = 0$  примем неподвижную цилиндрическую поверхность радиуса  $r_0$ , равного радиусу капиллярного источника, ось  $0z'$  проходит по оси цилиндрической поверхности. Поместим начало системы координат  $(r, \varphi, z')$  на оси капиллярного источника и его торце с давлением  $P_0$ . На границе областей течения газа функции распределения давлений  $P(\varphi, z', t)$  и  $P_r(r, \varphi, t)$  должны удовлетворять следующим граничным условиям

$$P(\varphi, 0) = P_s, \quad P(\varphi, l) = P_a \quad (12)$$

Разработанная математическая модель (8)-(12) решалась аналитически. Получено выражение характеризующие расход истекающего газа из распределённого дросселя капиллярного типа:

$$Q = \frac{\pi \cdot D_0^4}{32 \cdot L \cdot \nu} \cdot \frac{P_s - P_u}{\ln\left(\frac{P_s}{P_u}\right)},$$

где

- $D_0$  - диаметр капиллярного источника истечения, м;
- $L$  - длина капиллярного источника истечения, м;
- $P_s$  - абсолютное давление газа подаваемого в (капиллярный) источник истечения, Па;
- $P_u$  - давление окружающей среды, Па;
- $\nu$  - кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Кроме этого, проведён расчёт силового воздействия газовой струи реального газа при истечении из распределённого дросселя капиллярного типа. Для расчёта силового воздействия газовой струи применялось уравнение количества движения (импульса сил):

$$m_T d\bar{v} = \bar{F}_c dt, \tag{14}$$

оттуда найдена сила воздействия струи на преграду, не рассматривая процессы, происходящие внутри потока газа:

$$F_c = \rho S u^2 \tag{15}$$

Определение силового воздействия производилось как для случая, когда газ вытекает в атмосферу и наталкивается на безграничную стенку, установленную нормально к потоку, так и для случая столкновения потока со стенкой расположенной под углом к потоку газа. Результаты расчёта представлены на в виде графиков  $Q=f_1(P)$ ,  $F=f_2(P)$  для двух криогенных газов - углекислота и азота, широко применяемых в медицине; и пяти капиллярных источников (рис. 4-7).

Дано математическое описание геометрии затопленной изотермической струи истекающего газа (рис. 3.), проведён расчёт интересующего нас начального участка струи, так как в нём присутствует максимальная скорость, которую развивает газ при истечении.

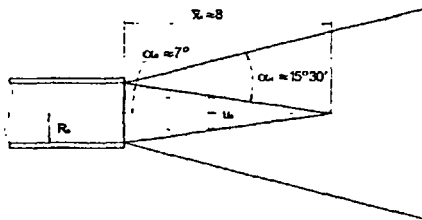


Рис. 3. Упрощённая схема затопленной изотермической струи.

Проанализированы результаты расчёта расхода газа и силового воздействия газоструйного источника, формы и параметры истекающей струи газа.

В третьей главе приведены схема экспериментального стенда и методика изме-

рения основных параметров работы газоструйной установки, разработанный капиллярный источник, представлены результаты экспериментальных исследований, на основании которых произведена проверка адекватности разработанной математической модели, произведена оценка погрешностей полученных экспериментальных данных.

Для проведения экспериментальных исследований газоструйной установки для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов в лаборатории 152 отдела НТК "Криогенная техника" был разработан и создан экспериментальный стенд.

На стенде давление газа контролируется образцовым манометром МО класса 0,1. Температура газа замерялась с помощью хромель-копелевой термопары, выполненной в металлической армировке для электрической изоляции термоэлектродов. Давление газа, поступающего в газовый питатель, регулируется дроссельными вентилями КВО 7220000

Источники истечения газа для экспериментальных исследований были изготовлены из медицинских игл для инъекций широко используемых типоразмеров. Размеры изучаемых источников истечения - распределённых дросселей капиллярного типа указаны в таблице 2.

Таблица 2.

Источник, №	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Длина, мм
1	0,8	0,55	41,3
2	0,7	0,45	34,7
3	0,6	0,35	29,8
4	0,5	0,3	21,6
5	0,4	0,2	17,2

Для проведения экспериментальных исследований было спроектировано и изготовлено два варианта конструкции газового питателя для обеспечения подачи газа в исследуемые источники истечения, с целью изучения различных характеристик процесса истечения. Первый вариант сборки газового питателя с источником истечения предназначен для изучения расхода газа через источник. Второй вариант сборки газового питателя с источником истечения предназначен для изучения силового воздействия газовой струи.

Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков (рис. 4-7) для двух криогенных газов - углекислота и азот, широко применяемых в медицине, и пяти капиллярных источников.

В четвертой главе приведены основные результаты экспериментальных и теоретических исследований газоструйной установки, произведены их сравнение и анализ формулы расхода и силового воздействия газоструйной установки для дифференцированного рассечения и охлаждения биологических тканей.

Сопоставление опытных данных расхода газов при истечении из источников с результатами, полученными при теоретическом исследовании, показали, что результаты решения принципиальной математической модели дают качественно сопоставимые результаты. Однако расхождение в количественной оценке составляет до 50%. Это объясняется введением допущений в математическую модель процесса

течения газа, а так же усилением влияния геометрии капиллярных источников истечения на вязкость газа с повышением давления на входе в источник. При обработке экспериментальных результатов, получен безразмерный коэффициент кинематической вязкости газа:

$$\lambda = 50 \cdot \left( \frac{10 \cdot D_{\min} \cdot D_0}{D_{\max}^2} + \frac{(P_s - P_{\min})}{P_{\min} - P_a} \right), \quad (16)$$

где  $D_{\min}$  - минимальный диаметр источника истечения газа, прошедший практическое исследование, м ;  $D_{\max}$  - максимальный диаметр источника истечения газа, прошедший практическое исследование, м ;  $D_0$  - рассчитываемый диаметр источника истечения газа, прошедший практическое исследование, м ;  $P_s$  - давление газа на входе в источник истечения, т.е. давление газа в газовом питателе, Па ;  $P_{\min}$  - минимальное давление газа, при котором производились опытные исследования, на входе в источник истечения, т.е. давление газа в газовом питателе, Па ;  $P_a$  - давление в среде, куда происходит истечение газа, Па.

После подстановки (16) в формулу (13) расхода газа, получаем:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^4}{32 \cdot L \cdot k \cdot \nu} \cdot \frac{P_s - P_a}{\ln \left( \frac{P_s}{P_a} \right)}. \quad (17)$$

Погрешность получаемых результатов при использовании формулы (17) составляет 8-10 %. Результаты расчетов по формуле (17) в сравнении с опытными данными расхода газов при истечении из источников истечения показаны на рис. 4. и рис. 5.

Сравнение опытных данных силового воздействия газовой струи при истечении из источников с результатами, полученными при теоретическом исследовании, показывают, что полученное решение математической модели даёт сопоставимые результаты.

Обработка опытных данных показывает, не смотря на то, что нами был выбран закон изменения плотности, устанавливающий зависимость плотности газа взаимодействующего с препятствием, от плотности газа в источнике истечения, рост значений согласно этому закону, всё же недостаточен. Практические исследования это однозначно подтверждают. Для расчёта плотности газа при взаимодействии его с преградой использовалось корреляционное соотношение, по которому производилась обработка экспериментальных данных:

$$y = a \cdot e^{cx}, \quad (18)$$

где  $y = \rho_{av}$ ;  $a = \rho_{кр}$ ;  $x = \frac{c_{кр}}{c_a}$ .

При обработке экспериментальных результатов, было получено значение постоянной с равной - 0,09. Подставляя это эмпирическое значение в формулу закона изменения плотности, получим:

$$\rho_{av} = \rho_{кр} \cdot e^{-0,09 \frac{c_{кр}}{c_a}}. \quad (19)$$

Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными показало, что предложенная методика расчета удовлетворительно согласуется с экспериментом. Результаты расчётов в сравнении с опытными данными силового воздействия газовой струи при истечении из источников показаны на рис. 6 и 7. Расхождение результатов расчетов силового воздействия газовой струи и экспериментальных данных не превышает 10 %.

Для исследования рассеечения и охлаждения ткани паренхиматозных органов была выбрана свиная печень, как самая близкая по своим свойствам к печени взрослого человека. Во время рассеечения паренхиматозной ткани срез распределённого дросселя капиллярного типа находился на расстоянии не более 1 мм от поверхности печени.

В результате проведённого эксперимента было установлено, что необходимое дифференцированное рассеечение и охлаждение паренхиматозной ткани осуществляется при использовании обоих исследуемых газов - углекислоты и азота. Для каждого капиллярного источника истечения получена зависимость воздействия на паренхиматозную ткань. Представленные на рисунках графики показывают, что на участке экспериментальной кривой, окрашенном в жёлтый цвет рассеечение паренхиматозной ткани практически не происходит, на участке, окрашенном в зелёный цвет осуществляется необходимое дифференцированное рассеечение паренхиматозной ткани с сохранением в целости кровеносных сосудов на участке, окрашенном в красный цвет происходит разрыв кровеносных сосудов, что недопустимо, так как это может привести к гибели пациента.

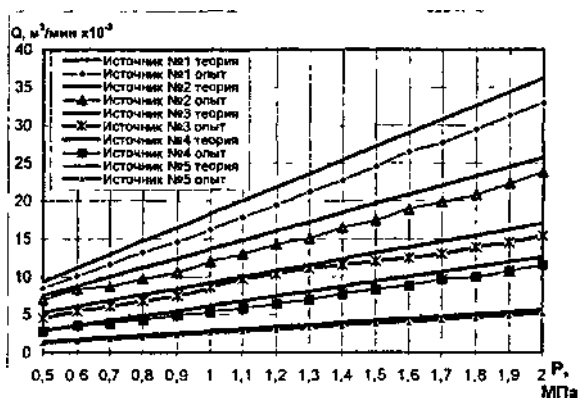


Рис. 4. Зависимость расхода углекислоты от давления на входе в источник, при истечении газа



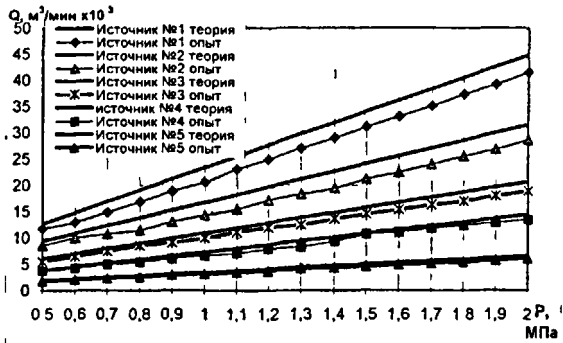


Рис. 5. Зависимость расхода азота от давления на входе в источник, при истечении газа

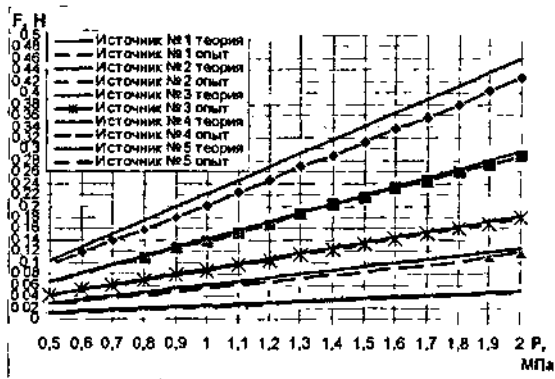


Рис. 6. Зависимость силового воздействия газовой струи при истечении углекислоты от давления на входе в источник

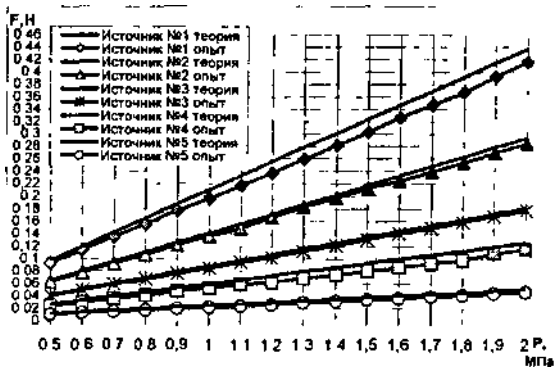


Рис. 7. Зависимость силового воздействия газовой струи при истечении азота от давления на входе в источник

Таким образом, разработанная математическая модель процесса истечения из газового источника в необходимых рамках, даёт возможность получать достоверные рекомендации для проектирования подобных хирургических установок.

В пятой главе разработана газоструйная установка для дифференцированного рассечения с одновременным их локальным охлаждением тканей паренхиматозных органов. Взяв за основу разработанную в Омском государственном техническом университете газоструйную установку для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов и результаты проведённых исследований в ООО НТК «Криогенная техника» разработан пакет конструкторской документации и изготовлено 2 экспериментальных образца установки для проведения клинических испытаний.

На рис. 8. представлены фотографии экспериментального образца установки для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов. Газоструйная установка представляет собой баллон со сжатой углекислотой, редуктор, исполнительный орган с клапаном регулирования подачи газа и со сменными наконечниками - источниками истечения. Редуктор источника сжатого газа и исполнительный орган соединены между собой с помощью гибкого пневмопровода.

Несмотря на то, что установку планировалось использовать только для операций на паренхиматозных органах - это печень, почки, желудок, селезёнка, предварительные медицинские исследования показали, что газоструйную установку можно использовать при операциях на мозге, лёгких и некоторых видах мышц. На установку для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов получен патент на полезную модель.

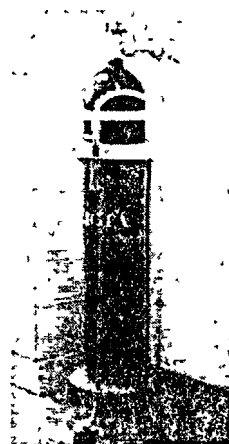


Рис. 8. Установка для дифференцированного рассечения и охлаждения тканей паренхиматозных органов

## ВЫВОДЫ

Основные результаты проведенных в диссертации исследования можно сформулировать в виде следующих выводов:

1. Проанализированы существующие хирургические аппараты, предназначенные для разрушения биотканей и коагуляции сосудов, используемых как у нас в стране, так и за рубежом. Выявлены их недостатки. Предложен новый рабочий орган в виде распределенного дросселя капиллярного типа, для дифференцированного рассечения и охлаждения биологической ткани.

2. Сделан анализ основных методов расчёта газоструйных установок дроссельно-капиллярного типа;

3. Разработана математическая модель рабочих процессов истечения газа в газоструйном капиллярном дросселе для определения силового воздействия и расхода газа, а так же геометрических параметров газовой струи;

4. Разработан рабочий орган, основанный на распределённом дросселе капиллярного типа, образующий газовую струю для обеспечения дифференцированного рассеечения и охлаждения биологических тканей;

5. Разработан экспериментальный стенд для исследования течения газа из распределённого дросселя капиллярного типа рабочего органа;

6. Разработана методика экспериментального исследования течения газа из распределённого дросселя капиллярного типа - рабочего органа;

7. Проведены экспериментальные исследования течения газа из распределённого дросселя капиллярного типа - рабочего органа;

8. Представлены и проанализированы результаты экспериментального исследования, проведено их сопоставление с результатами, полученными теоретически, их совпадение признано удовлетворительным, уточнены основные уравнения для определения расхода газа, его силового воздействия и степени охлаждения;

9. Разработана и создана газоструйная хирургическая установка, рабочий орган которой оснащён распределённым дросселем капиллярного типа для обеспечения дифференцированного рассеечения и охлаждения биологических тканей с их охлаждением;

10. Проведён анализ возможного применения установки для дифференцированного рассеечения и охлаждения паренхиматозных органов.

В диссертации решена одна из важных квалификационных задач холодильной и криогенной техники по разработке газоструйного устройства дроссельно-капиллярного типа, которое позволяет создать новое хирургическое оборудования для дифференцированного рассеечения и охлаждения биологической ткани. Первые применения данного оборудования в медицине показали высокий результат - практическое отсутствие интраоперационной кровопотери.

#### Список публикаций по теме диссертации

1 Хирургическое лечение гемангиом печени с использованием новых технологий / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, Л.И.Фадина, Р.П.Гвашев, В.В.Ныров, О.В.Рудакова, Ю.Г.Литовко, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарочкин, В.В.Педдер// Анналы хирургической гепатологии. - 2002. - Т. 7. - № 1. - С. 263.

2 Криометод - основа новых технологий в хирургии глистных опухолей и неоперабельных очаговых поражений печени / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина,

Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, О.В.Рудакова // *Анналы хирургической гепатологии*. - 2002. - Т. 7. - № 1. - С. 296.

3 Разработка устройства для дифференцированного рассечения тканей паренхиматозных органов / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, О.В.Рудакова // *Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IV Международной научно-технической конференции 12-14 ноября 2002 г. - Омск, 2002. - С. 389-391.*

4 Криометод как составляющая новых технологий в хирургии очаговых поражений печени воротных локализаций / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, Л.И.Фаина, Р.П.Гвашев, В.В.Ныров, О.Д.Перевезев, М.Ю.Лобов, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, В.М.Голубничий, О.В.Рудакова, Ю.Г.Литовка, А.Н.Воротынцев // *Диагностика и лечение заболеваний печени и поджелудочной железы: Материалы научной конференции 20-21 ноября 2002г. - Санкт-Петербург, 2002. - С. 66-67.*

5 Построение дифференциально-диагностического алгоритма гемангиоматоза печени / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, Л.И.Фаина, Р.П.Гвашев, В.В.Ныров, О.Д.Перевезев, М.Ю.Лобов, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, В.М.Голубничий, О.В.Рудакова, Ю.Г.Литовка, А.Н.Воротынцев // *Диагностика и лечение заболеваний печени и поджелудочной железы: Материалы научной конференции 20-21 ноября 2002г. - Санкт-Петербург, 2002. - С. 67-68.*

6 Хирургическое лечение метастазов печени с использованием новых технологий / Г.Н.Охотина, В.А.Рудаков, Л.И.Фаина, Р.П.Гвашев, М.Ю.Лобов, О.В.Рудакова, А.В.Пахомов, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, В.В.Педдер // *IV ежегодная Российская онкологическая конференция: Материалы конференции 26-28 ноября 2002г. - Москва, 2002. - С. 159.*

7 Криометод основа новых технологий в хирургии глистных опухолей и неоперабельных очаговых поражений печени / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, О.В.Рудакова // *Анналы хирургической гепатологии*. - 2003. - Т. 8. - № 2. - С. 172-173.

8 Новые технологии в хирургическом лечении гемангиоматоза и метастазов печени множественных локализаций / В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, Е.А.Бабенко, М.Н.Макарошкин, О.В.Рудакова, В.В.Педдер // *Анналы хирургической гепатологии*. - 2003. - Т. 8. - № 2. - С. 336-337.

9 Установка для дифференцированного рассечения тканей паренхиматозных органов / Е.А.Бабенко, В.А.Рудаков, Г.Н.Охотина, М.Н.Макарошкин, О.В.Рудакова, А.Г.Михайлов // *Патент на полезную модель № 30259 зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей РФ 27.06.2003г.*

Отпечатано с оригинала-макета, предоставленного автором

ИД №06039 от 12.10.2001

Подписано к печати 19.04.2004. Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16  
Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 277.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр-т. Мира, 11  
Типография ОмГТУ





№ 12100

3

484