

## Исследование характеристик криозондов при различных режимах работы

### Аннотация

Авторами экспериментальным путем были получены температурные распределения по длине рабочей поверхности малоинвазивного криозонда в зависимости от времени при различных режимах эксплуатации (охлаждение и нагрев), определено время захлаживания. Для этого был разработан и собран стенд, позволяющий проводить опыты для различных типов малоинвазивных инструментов. Полученные результаты возможно использовать как для планирования проведения хирургической операции с использованием серийно выпускаемых криозондов, так и для оценки эффективности разрабатываемых инструментов криохирургического оборудования.

В настоящее время в России активно внедряются технологии многозондовой малоинвазивной криохирургии, которые в первую очередь применяются в урологии. Данный метод имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам криохирургии по сравнению с традиционной хирургией можно отнести малые кровопотери при операции, безболезненность и малый срок нахождения пациента в стационаре. После криодеструкции (процесс разрушения клеток тканей путем замораживания криозондом) не наблюдается заметной общей реакции организма [1]. Однако у криохирургии имеются и серьезные недостатки: сложность планирования операции, сложность контроля хода операции, что ограничивает возможности рационального дозирования низкотемпературного воздействия на патологически измененные биологические образования, и высокая стоимость операции по сравнению с традиционной хирургической [2].

Необходимо отметить, что существует достаточно много различных аппаратов и инструментов для криохирургических операций, однако лишь часть из них сертифицирована и может применяться на территории РФ. В данной статье описаны граничные условия, получаемые на криозондах типа «IceRod 1.5», работающих в составе аппарата «Galil SeedNet». При этом из 5 типов криозондов, которые могут применяться в составе аппарата «Galil SeedNet», лишь «IceSeed 1.5» и «IceRod 1.5» сертифицированы на территории РФ.

В настоящее время планирование операции осуществляется с использованием номограмм, в которых указываются ре-

жимы охлаждения и полученные в результате зоны заморозки. Необходимо отметить, что данные номограммы были получены при использовании геля, они носят лишь справочный характер [3]. Во время операции врачам приходится руководствоваться личным опытом и данными средств визуализации, которые не способны показать поле распределения температуры во всей оперируемой области, а потому есть вероятность того, что не все ткани опухоли будут разрушены в ходе операции.

За рубежом проводились исследования по изучению криовоздействия на биологические ткани, при этом необходимая для моделирования рабочая температура криозонда определялась только в одной точке и датчик температуры был установлен внутри инструмента [4], [5]. В рассматриваемом же исследовании температура определяется экспериментально на границе зонд-целевая область, что является более корректным.

Таким образом, двумя главными направлениями повышения точности планирования операции можно назвать получение граничных условий на поверхности криозонда, которые будут использоваться в компьютерном расчете при подготовке к операции, и уточнение теплофизических свойств биотканей оперируемых областей.

### Экспериментальная установка

Для определения граничных условий на поверхности криозонда был разработан экспериментальный стенд (рис. 1), состоящий из 6 основных элементов: 1 – газового баллона высокого

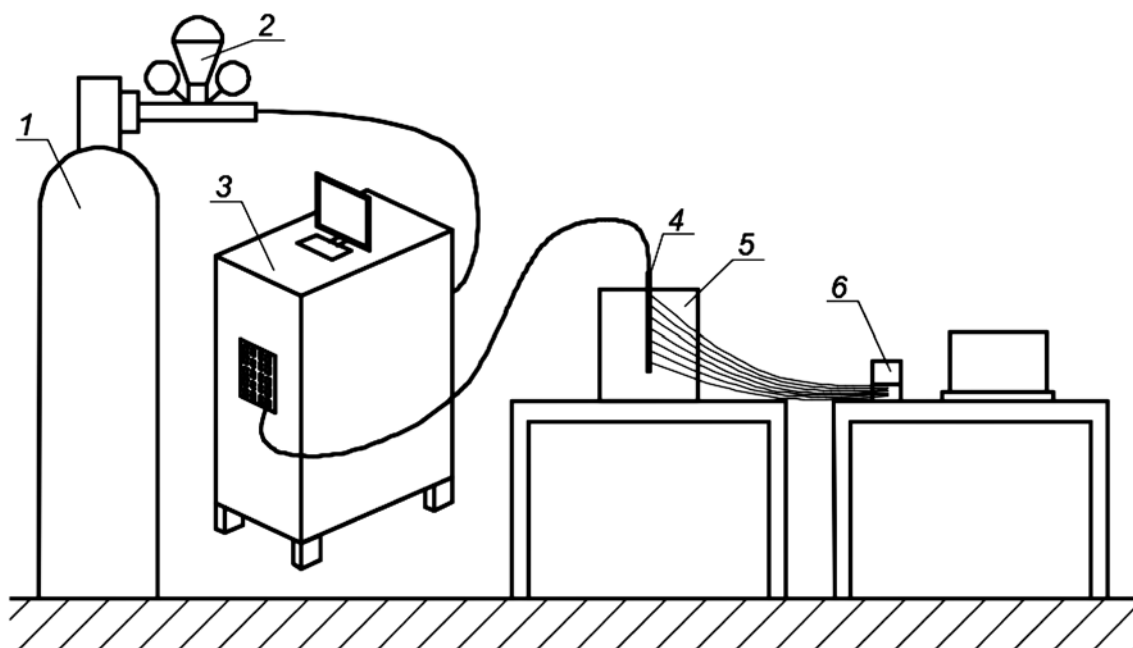


Рис. 1. Схема экспериментального стенда (пояснения – в тексте)

давления (300 бар) с чистым аргоном (марка «4.8» 99,998 %); 2 – газового редуктора; 3 – проточной части, представляющей собой аппарат «Galil SeedNet», включающей в себя соединитель криозонда с баллоном; 4 – криозонда; 5 – фиксирующей криозонд конструкции; 6 – измерительного модуля, включающего в себя термометры сопротивления, расположенные на поверхности криозонда, а также блоки обработки и преобразования сигнала в цифровой формат.

Проточная часть 3 в данном эксперименте может быть различной – как обычным переходником с газового редуктора на разъем криозонда, так и аппаратом «Galil SeedNet». Важно, чтобы в данной системе отсутствовали утечки газа. В данном эксперименте использовался именно аппарат «Galil».

Для определения граничных условий на поверхности криозонда, работающего без нагрузки, была собрана фиксирующая конструкция 5, состоящая из теплоизоляции, зажима криозонда и платиновых термометров сопротивления, размещенных на равном расстоянии друг от друга. На *рис. 2* показана схема расположения термометров сопротивления и направления течения аргона внутри криозонда. Для исключения воздушной прослойки между термометрами сопротивления и криозондом на термометры сопротивления тонким слоем была нанесена низкотемпературная термопаста (Arctic Silver Ceramique 2).

Определение граничных условий криозонда, работающего под нагрузкой, происходило в емкости, заполненной желатиновым гелем (5 % желатина, 95 % воды). Глубина погруже-

ния криозонда в желатин была выбрана по рекомендации врачей и близка к имеющей место в ходе операции. В данном эксперименте термометры сопротивления были зафиксированы на поверхности криозонда с помощью винтовых зажимов.

При работе установки в режиме охлаждения газообразный аргон из баллона проходит через редуктор, где его давление опускается до 240 бар (нормальное рабочее давление). После редуктора газ поступает в аппарат «Galil», к которому подключен изучаемый криозонд (сам аппарат позволяет одновременно работать с 25 криозондами). Поток аргона, попадая из аппарата в криозонд, разделяется на два и дросселируется внутри инструмента в двух местах на разном расстоянии (давление газа падает с 240 бар до атмосферного давления), тем самым его температура понижается примерно до  $-140^{\circ}\text{C}$  вблизи наконечника криозонда. Фактически криозонд является теплообменным аппаратом с микродресселем [6]. Холодный поток газа движется от острия криозонда обратно к выходу, при этом охлаждая наружные стенки криозонда. Для более эффективного разрушения клеток опухолей на практике применяют следующий алгоритм охлаждения: 10 мин заморозки, 5 мин естественного оттаивания, 10 мин заморозки. Данный алгоритм является типовым, однако в зависимости от формы разрушаемой опухоли возможно и охлаждение с другими параметрами.

При работе в режиме нагрева в криозонд подается гелий, который, ввиду особенностей теплофизических свойств, при

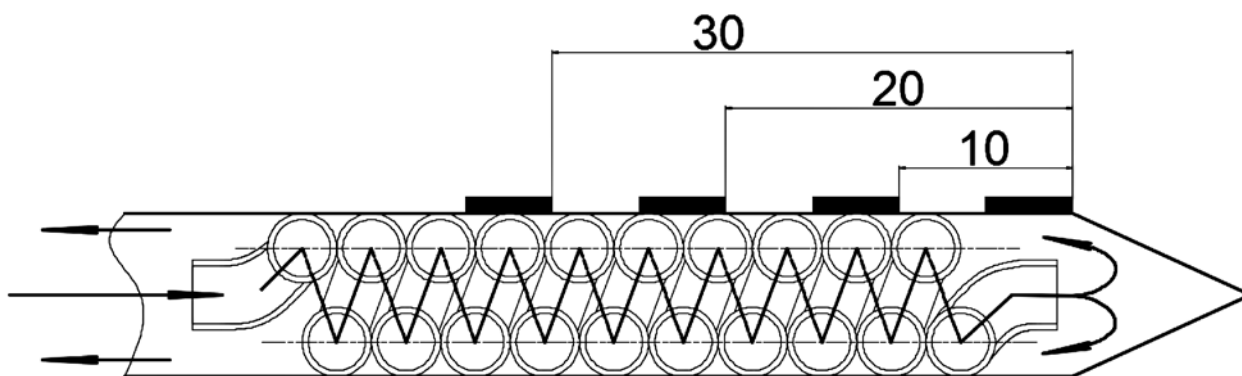


Рис. 2. Схема проточной части криозонда и расположения термометров сопротивления на нем

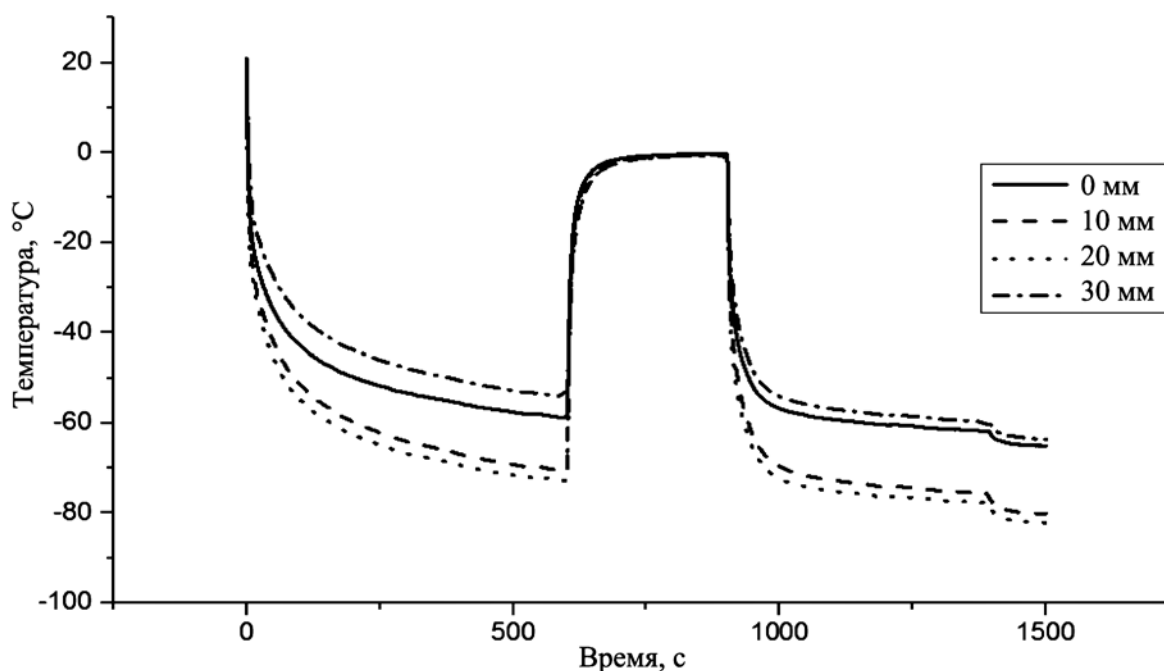


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности криозонда, работающего под нагрузкой при охлаждении, от координаты и времени

протекании через дроссель нагревается (происходит инверсия дроссель-эффекта). При этом линии тока газа в установке остаются прежними.

Таким образом, в разных точках криозонда температура его поверхности будет различна. Температура поверхности будет также зависеть от длительности охлаждения и расхода газа. В данном эксперименте были получены распределения температур при номинальном расходе аппарата «Galil SeedNet». В результате проведенного эксперимента были получены точечные зависимости температур от времени и координаты для режимов охлаждения и нагрева.

#### Граничные условия на поверхности криозонда

В результате экспериментов получены граничные условия на поверхности криозонда при охлаждении (рис. 3) и при нагреве (рис. 4), работающего под нагрузкой, в зависимости от времени в различных точках поверхности криозонда.

Охлаждение в эксперименте осуществлялось по следующему алгоритму: 10 мин охлаждения, 5 мин естественного оттаивания, 10 мин охлаждения – данный алгоритм предпочтительно использовать при операциях, так как в этом случае выше вероятность разрушения клеток опухоли.

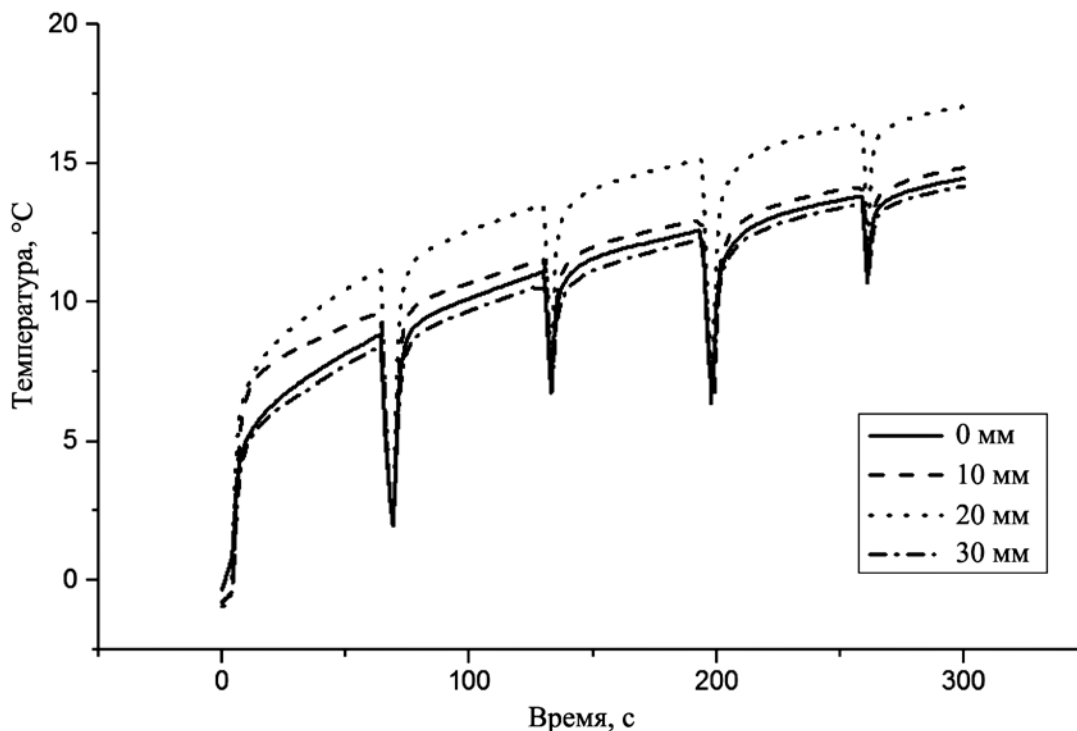


Рис. 4. Зависимость температуры на поверхности криозонда, работающего под нагрузкой при нагреве, от координаты и времени

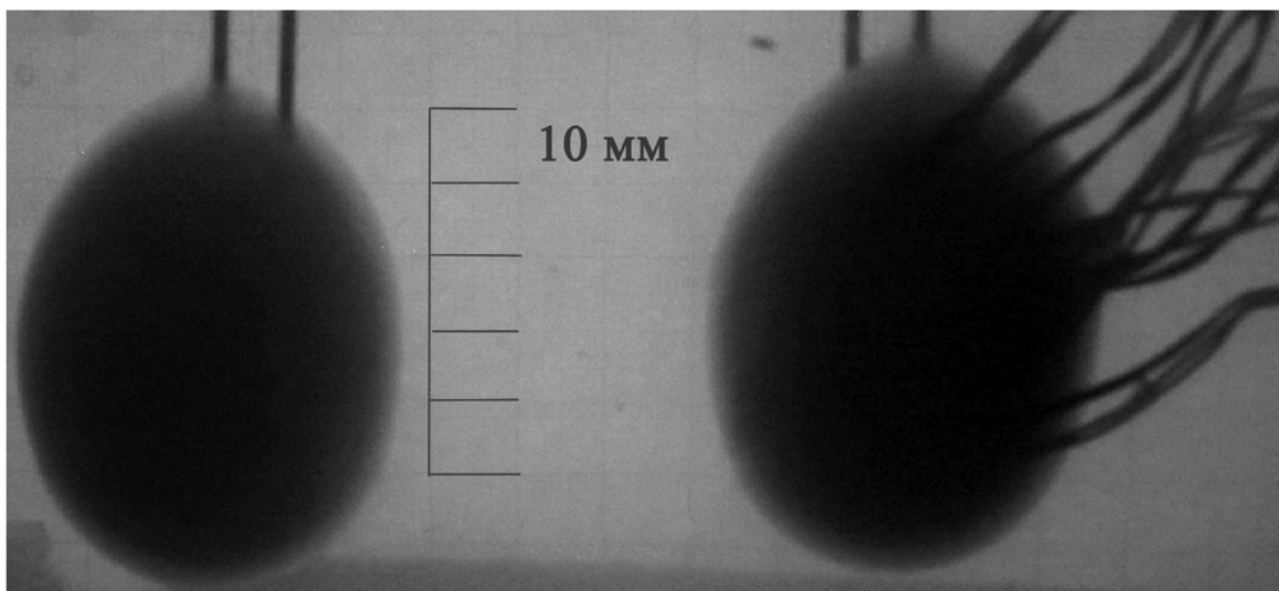


Рис. 5. Ледяные эллипсоиды, полученные за время охлаждения (термометры сопротивления расположены только на правом криозонде)

Как видно из *рис. 3*, температура в самой холодной точке криозонда в конце цикла охлаждения достигает  $-80^{\circ}\text{C}$ . Небольшой скачок в конце второго цикла охлаждения объясняется тем, что именно в этот момент ледяной эллипсоид достигает размеров, полученных до оттайки (при оттайке отключается охлаждение через криозонды и ледяной эллипсоид начинает оттаивать за счет теплопритока).

При реализации нагрева аппарат «Galil Seednet» осуществляет его циклически – по 1 мин, соответственно скачки температуры вниз объясняются окончанием цикла нагрева. Из этого графика видно, что максимальная температура, которая была получена за цикл нагрева, составляет  $17^{\circ}\text{C}$ , при этом максимально допустимая температура ткани при нагреве составляет  $+43^{\circ}\text{C}$  (температура денатурации белка).

## Результаты и обсуждение

При определении граничных условий необходимо учитывать погрешности, возникающие во время физического эксперимента. Во-первых, имеют место погрешности измерения термометрами сопротивления. В данном эксперименте применялись термометры сопротивления класса А ( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ), поэтому данную погрешность можно не учитывать [7]. Погрешностью, возникающей от применения термопасты, пренебрегаем. Также необходимо иметь в виду наличие погрешности позиционирования датчиков. Само размещение термометров сопротивления вблизи криозонда может внести погрешность из-за отличия их теплоемкости от теплоемкости биомоделирующей среды. Для ее определения был проведен следующий эксперимент: цикл охлаждения осуществлялся одновременно на двух криозондах, на одном из которых были установлены термометры сопротивления. На *рис. 5* показаны ледяные эллипсоиды, полученные на обоих криозондах за время охлаждения.

Левый криозонд (без термометров) образовал эллипсоид правильной формы, в то время как на правом криозонде в начале охлаждения были видны небольшие выступы, обусловленные наличием термометров сопротивления. Однако к концу охлаждения габаритные размеры обоих эллипсов практически совпадают, отсюда можно сделать вывод о незначительности погрешности, вносимой наличием термометров сопротивления.

Полученные результаты возможно использовать при моделировании проведения криохирургических операций в программных комплексах численного моделирования. Применение подобных программ при планировании операций – перспективное направление в совершенствовании методики проведения операций. Программы планирования позволят повысить точность расчета дозы криовоздействия, в особенности для сложных конфигураций области криодеструкции, с использованием группы малоинвазивных криозондов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 16-19-10567).*

## Список литературы:

1. *Беляев М.К.* Метод криодеструкции в лечении келоидных рубцов у детей // Медицина в Кузбассе. 2007. Спецвыпуск № 1. С. 27-28.
2. *Васильев А.О., Говоров А.В., Пушкарев А.В., Цыганов Д.И., Шакуров А.В.* Теплофизическое моделирование криохирургической операции на примере рака предстательной железы // Технологии живых систем. 2014. Т. 11. № 4. С. 47-53.
3. <https://www.galilmedical.com/>.
4. *Rewcastle J.C., Sandison G.A., Muldrew K., Saliken J.C., Donnelly B.J.* A model for the time dependent three dimensional thermal distribution within iceballs surrounding multiple cryoprobe // Medical Physics. 2001. Vol. 28 (6). PP. 1125-1137.
5. *Popken F., Seifert J.K., Engelmann R., Dutkowski P., Nassir F., Junginger T.* Comparison of ice-ball diameter and temperature distribution achieved with 3 mm accuprobe cryoprobe in porcine and human liver tissue and human colorectal liver metastases in-vitro // Cryobiology. 2000. Vol. 40. PP. 302-310.
6. *Бурков И.А., Пушкарев А.В., Цыганов Д.И., Шакуров А.В.* Исследование температурного распределения на рабочей поверхности малоинвазивного криозонда // Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 9. С. 23-25.
7. ГОСТ 6651-2009 ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний.

*Анатолий Анатольевич Жердев,  
д-р техн. наук, профессор,  
руководитель,*

*НУК «Энергомашиностроение»,  
Алексей Валерьевич Шакуров,  
зав. отделом,*

*Александр Васильевич Пушкарев,  
инженер 1-й категории,*

*Иван Александрович Бурков,  
инженер 2-й категории,*

*Евгений Алексеевич Антонов,  
инженер 2-й категории,*

*НИИ «Энергомашиностроение»,  
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,*

*Александр Олегович Васильев,  
канд. мед. наук, ассистент,*

*кафедра урологии,  
ФГБОУ ВО «МГМСУ им. А.И. Евдокимова»,*

*Антон Георгиевич Белозеров,  
канд. техн. наук, ведущий инженер,*

*НИИ «Энергомашиностроение»,  
ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»,*

*г. Москва,*

*e-mail: azherdev@bmstu.ru*

\* \* \* \* \*