

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерная школа энергетика

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Промышленная теплоэнергетика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ МАССИВНЫХ ЛЕДЯНЫХ СТРУКТУР ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РОБОТИЗИРОВАННЫМ АППАРАТАМ ГЛУБИННОГО БУРЕНИЯ

УДК 551.345.2:621.865.8:536.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	ЗАХАРОВА Екатерина Алексеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	С.В. Сыродой	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель Отделения социально-гуманитарных наук	Н.Г. Кузьмина			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Отделения контроля и диагностики	М.В. Василевский	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ/ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	А.М. Антонова	к.т.н., доцент		

Томск – 2018 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы бакалавриата, указанными в ФГОС ВПО по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<i>Универсальные компетенции</i>
P1	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, в том числе междисциплинарном, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач.
P3	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности с соблюдением правовых, социальных, экологических и культурных аспектов.
P4	Анализировать экономические проблемы и общественные процессы, участвовать в общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм.
P5	К достижению должного уровня экологической безопасности, энерго- и ресурсосбережения на производстве, безопасности жизнедеятельности и физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P6	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> , непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии, организации обучения и тренинга производственного персонала.
	<i>Профессиональные компетенции</i>
P7	Применять <i>базовые</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические знания в профессиональной деятельности <i>в широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности в производстве тепловой и электрической энергии.
P8	Анализировать научно-техническую информацию, ставить, решать и публиковать результаты решения задач <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, нормативной документации, современных аналитических методов, методов математического анализа и моделирования теоретического и экспериментального исследования.
P9	Проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных разработок объектов производства тепловой и электрической энергии, выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию <i>с учетом</i> нормативных документов, экономических, экологических, социальных и других ограничений.
P10	Проводить <i>комплексные</i> научные исследования в области производства тепловой и электрической энергии, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных, и их подготовку для составления обзоров, отчетов и научных публикаций с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов.
P11	Использовать информационные технологии, использовать компьютер как

	средство работы с информацией и создания новой информации, осознавать опасности и угрозы в развитии современного информационного общества, соблюдать основные требования информационной безопасности.
P12	Выбирать и использовать необходимое оборудование для производства тепловой и электрической энергии, управлять технологическими объектами на основе АСУТП; использовать инструменты и технологии для ведения комплексной практической инженерной деятельности с учетом экономических, экологических, социальных и других ограничений.
	<i>Специальные профессиональные</i>
P13	Участвовать в выполнении работ по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов теплоэнергетического производства, контролировать организацию метрологического обеспечения технологических процессов теплоэнергетического производства, составлять документацию по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках.
P14	Организовывать рабочие места, управлять малыми коллективами исполнителей, к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений, планированию работы персонала и фондов оплаты труда, организовывать обучение и тренинг производственного персонала, анализировать затраты и оценивать результаты деятельности первичных производственных подразделений, контролировать соблюдение технологической дисциплины.
P15	Использовать методики испытаний, наладки и ремонта технологического оборудования теплоэнергетического производства в соответствии с профилем работы, планировать и участвовать в проведении плановых испытаний и ремонтов технологического оборудования, монтажных, наладочных и пусковых работ, в том числе, при освоении нового оборудования и (или) технологических процессов.
P16	Организовывать работу персонала по обслуживанию технологического оборудования теплоэнергетического производства, контролировать техническое состояние и оценивать остаточный ресурс оборудования, организовывать профилактические осмотры и текущие ремонты, составлять заявки на оборудование, запасные части, готовить техническую документацию на ремонт, проводить работы по приемке и освоению вводимого оборудования.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Промышленная теплоэнергетика

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель профиля

Е.Е. Бульба

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Захаровой Екатерине Алексеевне

Тема работы:

**Математическое моделирование плавления массивных ледяных структур
применительно к роботизированным аппаратам глубинного бурения**

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

10 июня 2018 года

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объект исследования – процесс плавления ледяных структур.

Вид сырья – массивные ледяные структуры.

Предмет исследования – моделирование процесса тепло- и массопереноса, протекающих совместно, в условиях плавления больших массивов льда при движении крибота.

Перечень подлежащих

1. Аналитические обзор литературы, научных публикаций по направлению.

<p>исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>2 Физическая постановка. Формулирование математической модели на основе физической постановки</p> <p>3. Результаты численного моделирования</p> <p>4. Верификация программы (тестовые задачи)</p> <p>5. Проведение численных экспериментов</p> <p>6. Заключение.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>17 слайдов</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент</p>	<p>Н.Г. Кузьмина, старший преподаватель Отделения социально-гуманитарных наук</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>М.В. Василевский, доцент Отделения контроля и диагностики</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p> </p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>10 декабря 2017 года</p>
--	------------------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Старший преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ</p>	<p>С.В. Сыродой</p>	<p>к.т.н.</p>		<p>10.12.17</p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>5Б4Б</p>	<p>Захарова Екатерина Алексеевна</p>		<p>10.12.17</p>

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 73 с., 15 рис., 7 табл., 65 источников.

Ключевые слова: криобот, лед, плавление, моделирование, теплоперенос, массоперенос.

Объектом исследования является процесс плавления массивных ледяных структур.

Цель работы – математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно, в условиях плавления больших массивов льда при движении криобота под действием силы тяжести.

В процессе исследования проводились вычислительные эксперименты по плавлению массивных ледяных структур при различных параметрах криобота

В результате исследования изучены процессы тепло-и массопереноса, протекающие в структуре льда при воздействии зонд-робота.

Степень внедрения: результаты исследования внедрены в учебный процесс.

Область применения: робототехника, гляциология, климатология.

Экономическая эффективность/значимость работы повышение эффективности работы зонд-роботов за счет оптимального выбора конструктивных характеристик криобота и экономического обоснования мощности тепловыделения зонда.

В будущем планируется совершенствование математической модели, учитывающей полный комплекс процессов тепло- и массопереноса, термо- и мезомеханики.

Обозначения и сокращения

Латинские:

a – коэффициент температуропроводности криобота, $\text{м}^2/\text{с}$;

c – теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

h – ширина, м ;

h_p – шаг по пространству, м .

L – длина, м ;

q – тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

Q – теплота, $\text{Дж}/\text{кг}$;

\dot{S} – дифференциал координаты фронта плавления по времени;

t – время, с ;

T – температура, К ;

U – скорость движения жидкой фазы в направлении оси Ox , $\text{м}/\text{с}$;

V – скорость движения жидкой фазы в направлении оси Oy , $\text{м}/\text{с}$;

w – влажность грунта;

x, y – координаты, м ;

Dir – дельта-функция Дирака.

Греческие:

λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

ξ – толщина промерзания грунта, м .

ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Ψ – координата границы фазового перехода.

Безразмерные:

$X = x/L^*$ – безразмерная координата по оси Ox ;

$Y = y/L^*$ – безразмерная координата по оси Oy ;

$C = c/c^*$ – теплоемкость;

$P = \rho/\rho^*$ – плотность;

$\Lambda = \lambda/\lambda^*$ – коэффициент теплопроводности;

$\theta = T/T^*$ – температура;

$ht = dt/\tau$ – время;

$Fo = a \cdot \tau / L_{кр}^2$ – критерий Фурье;

$Ром_{пл} = Q_{пл} \cdot \rho^* \cdot \dot{S} \cdot Dir \cdot L_{кр}^2 / (hr \cdot \lambda^* \cdot T^*)$ – критерий Померанцева;

$Ki = q \cdot L_{кр} / (T^* \cdot \lambda^*)$ – критерий Кирпичева;

Надстрочные:

* – обозначение масштаба

e – окружающая среда (воздух);

Подстрочные индексы:

0 – начальное значение;

l – левая граница;

p – правая граница;

v – вода;

vз – воздух;

г – грунт;

з – замерзание;

кр – криобот;

л – лед;

пл – плавление;

с – сталь;

ф – фазовый переход

Оглавление

Введение	10
1. Обзор литературы	12
1.1 Актуальность темы	12
1.2 Аппараты глубоководного проникновения	14
1.3 Современное состояние математической базы описания многофротовых и многофазных задач Стефана	19
1.4 Современное состояние математической базы процессов плавления в условиях движения роботизированных комплексов в массивных ледяных структурах	25
2. Постановка задачи	29
2.1 Физическая постановка задачи	29
2.2 Математическая постановка задачи	30
3. Тестовые задачи	36
3.1 Решение одномерного уравнения теплопроводности с зависящим от температуры коэффициентом теплопроводности	36
3.2 Решение одномерного уравнения теплопроводности для двухслойной пластины	37
3.3 Решение одномерного уравнения теплопроводности с подвижной границей (промерзание влажного грунта)	39
4. Результаты математического моделирования	42
4.1 Влияние начальной температуры криобота на характеристики плавления	42
4.2 Влияние металлов на характеристики плавления	44
4.3 Влияние начальной мощности источника тепловыделения на характеристики плавления	45
5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	49
6. Социальная ответственность	55
Заключение	66
Список публикаций	68
Список используемых источников	69

Введение

В выпускной квалификационной работе (ВКР) представлены результаты математического моделирования плавления льда при движении крибота. Сформулированы физическая и математическая модели процессов тепло- и массопереноса с учетом фазовых переходов. С целью верификации модели проведены тестовые испытания.

Проведены вычисленные эксперименты процессов плавления при варьировании размеров аппарата, его температуры и мощности тепловыделения. Получены температурные распределения в системе «крибот-лед-воздух» в начальный момент времени и при полном погружении крибота в толщу льда. Определены границы жидкой фазы, позволяющей продвигаться зонд-роботу в глубь льда.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее влияние на продвижение аппарата оказывает длина зонда и мощность источника тепловыделения. Последний фактор поддается автономному изменению со стороны крибота, который в первую очередь зависит от температуры окружающих сред.

На настоящее время ведутся активные исследования широких массивов водяного льда на Южном полюсе. Последнее обусловлено быстро меняющейся климатической обстановкой. Большое внимание уделяется исследованиям структур ледяных кернов, поднятых с различной глубины. В этой связи применение надежных и экономически обоснованных аппаратов глубинного бурения льда является актуальной задачей. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых моделей крибота.

Объект исследования: процесс плавления ледяных массивов.

Предмет исследования: температурные поля в системе «крибот-лед-воздух» и граница фазового перехода.

Разработки в данной области были представлены на международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» в 2017 и 2018 годах.

1 Обзор литературы

1.1 Актуальность темы

Особое значение для геофизики, геологии, микробиологии и других естественных наук представляет изучение оледенения материков и всех видов ледников [1].

Одним из более эффективных способов изучения строения, вещественного состава и динамики ледовых отложений является бурение скважин. Основной целью глубинного бурения изначально было получение непрерывного ледяного керна. Его изучение позволяет получить наиболее полную информацию о газовом составе атмосфере, степени ее запыленности и температурных колебаниях нашей планеты за последние 900 тыс. лет [2,3].

Основным объектом исследования является Антарктида. Ученые с разных уголков планеты – Японии, США, Аргентины, России и других стран уже более 30 лет изучают ледяной покров этого континента [1]. Выяснено, что под ледяным покровом Антарктиды располагается одно большое озеро и свыше 140 средних подледниковых водоемов [4]. Помимо этого, были обнаружены типичные признаки биологических процессов, которые, по мнению ученых, протекают в изолированной экосистеме. Рассмотрение данной экосистемы позволит ученым решить множество сложнейших проблем планеты [3].

При бурении льда, как и любой породы, возникают свои проблемы. Как известно, под действием силы тяжести ледники находятся в напряженном состоянии. Стенки скважины становятся неустойчивыми за счёт деформации льда. Происходит сужение скважины, что в дальнейшем может привести к авариям. Для предотвращения данной ситуации скважина заполняется специальной жидкостью, которая компенсирует давление толщ льда. В последнее время при бурении используется смесь углеводородной жидкости типа керосина с дифлорторэтаном. Смесь при низких температурах

(до минус 60°C) сохраняет текучесть, а ее плотность близка к плотности льда. Основным недостатком является токсичность для живых микроорганизмов [4].

Входящие в состав керосина насыщенные углеводороды являются особенно опасными. Они оказывают отравляющее воздействие на низшие формы жизни водостоков и водоемов даже при малых концентрациях (более 1 мг/м³). С другой стороны, экспериментально доказано, что жидкость, используемая для промывки, также содержит различные виды бактерий [5]. Следовательно, при контакте с подледниковой водой она может оказать подавляющее воздействие на жизнеспособность микроорганизмов и вызвать попадание посторонней микрофлоры в водоем. Как следствие, взятые образцы могут быть загрязнены [4].

Не стоит забывать о различных окаменелостях, которые также попадают при бурении и наносят вред устройству.

Бурение скважин может проходить механическим, тепловым и механическим совместно, тепловым способами. Подробнее остановимся на каждом из них.

Первым является механическое бурение. В результате механического воздействия происходит разрушение породы. Инструмент может бурить скважину в заданном направлении и отбирает необходимый образец. Однако, происходит быстрый износ разрушающих инструментов и, как следствие, необходимость их замены. Чем глубже продвигается бур, тем ниже коэффициент использования энергии. [6].

Второй способ – это использование термобура – аппарата, использующего совокупность теплового и механического воздействия. Под действием газовой струи поверхностный слой породы очень быстро нагревается и разрушается. Вращаясь, термобур позволяет равномерно обработать забой скважины газовыми струями. В процессе бурения сопловая часть бура не должна касаться забоя скважины. Сопло и охлаждающая

камера сгорания превращают воду в пар, который совместно с отработавшим газом выносит частицы разрушенной породы наверх.

Данному виду бурения хорошо поддаются породы с высоким содержанием кварца, чьи минералы отличаются небольшим коэффициентом температурного расширения. В том случае, если породы обладают другим минеральным составом, разрушение происходит плохо или не происходит совсем [7]. Согласно проведенным экспериментам, на поверхности устройство достигает наибольших скоростей, однако при погружении потреблении энергии значительно увеличивается, и возникают проблемы с удалением продуктов бурения [8].

К третьему способу относится применение плавящего зонда. Его движение осуществляется за счёт нагрева льда до образования талой воды перед носовой частью. Образовавшаяся вода обтекает криобот и замерзает позади него, сам же криобот продолжает движение под действием сил тяжести [9].

В сравнении с другими способами, аппарат, использующий только плавление, будет менее уязвим к повреждениям, иметь небольшой размер и вес. Энергетические затраты на его использование относительно небольшие. Однако, как и у любого способа, имеются свои недостатки: низкая скорость проникновения и необходимость наличия жидкой фазы [10]. Представителем данного способа является криобот – специализированный зонд-робот глубоководного проникновения.

1.2 Аппараты глубоководного проникновения

1.2.1 Автоматическая станция с атомным нагревателем

Для проникновения к ложу ледника в 1963 г. у изобретателей И.А. Зотикова и А.П. Капицы возникла идея создать автоматическую станцию с атомным нагревателем. Был выбран миниатюрный реактор мощностью 100 кВт. [11], располагающийся в контейнере. Диаметр контейнера около 1 м, а длина – 10 м. Предполагалось, что он опустится на всю глубину и доставит необходимое оборудование. Сам контейнер погружается без образования

скважины и контактирует с поверхностью лишь тонким коммуникационным кабелем. Данный проект не был применен на практике.

1.2.2 Термоигла

В 60-х годах немецкий ученый К. Филберт реализовал похожий проект, но без атомного реактора [12]. Термоигла снабжена мини-катушками с проводами. Провода раскручиваясь, оставляют два провода для измерения характеристик ледника и подводу забойному нагревателю электрической энергии. По мере проникновения вместе с расплавленной водой провода вмерзают в лед без возврата бурового устройства. Движение иглы осуществляется за счёт силы тяжести. Устройство термоиглы представлено на рис.1.



Выкипировка из [4]. Рисунок 1– термоигла К. Филберта

Термоигла в 1968 году смогла углубиться на 218 м, а затем на 1005 м (Гренландия). Причиной остановки бурения стало короткое замыкание во вмерзших проводах.

1.2.3 Электромеханический снаряд

В США в Хановере примерно в те же годы через всю толщу ледникового покрова была пробурена скважина. Бурение осуществлялось электромеханическим снарядом. Стараясь выровнять давление, подледниковая вода поднялась и смешалась с промывочной жидкостью – водным раствором этиленгликоля. В нижней части скважины образовалась труднопроходимая ледяная шуга.

1.2.4 Зонд SUSI II

В 90-х годах для исследования антарктических шельфовых льдов ученые Института полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера сконструировали зонд SUSI II. В 1990 г. на леднике Реттенбах зонд достиг отметки 60 метров. Зонд можно было извлечь из ледника, поскольку скважина не замерзала в течение 8 часов. Два года спустя, зимой 1992/93 года, зонд смог пробить 225-метровый Антарктический шельфовый лед возле станции Неймайер и получил доступ к открытой воде ниже ледникового покрова. SUSI II имел следующие характеристики: длина – 2,25 м; диаметр – 10 см; мощность 3,4 кВт. [13]

1.2.5 Криобот

В 1960-е годы в рамках Международной гляциологической гренландской экспедиции (EGIG) был использован криобот, разработанный немецким физиком Карлом Филбертом. В результате бурения зонд-робот достиг свыше 100 метров глубины. [12].

К концу 1998 г. в США разработали робот-зонд с диаметром 15 см и длиной 1 м. В качестве источника выступает радиоизотопный термоэлектрический генератор (РТГ), поддерживающий на поверхности криобота постоянную температуру равную температуре протаивания ледяной массы. Вырабатываемая тепловая мощность – 1 кВт с учетом замкнутого

цикла циркуляции жидкого теплоносителя. Датчики и бортовая электроника снабжаются электрической энергией, поступающей от термоэлектрического преобразователя [4]. Крибот позволяет изучить движения и напряжения льда, его свойств (диэлектрические, сейсмические, акустические) и температуры [12].

Устройство крибота представлено на рис. 2.



Выкипировка из [4]. Рисунок 2– общий вид крибота

Благодаря сложной системе рулевого управления робот-зонд обладает возможностью изменять свой курс при отклонении сооружаемой скважины от вертикали. В головке устройства расположен эхолотатор, который оперативно определяет границу между водоемом и ледником. Достигнув подледниковое озеро, крибот разделяется на 2 части. Верхняя часть, содержащая средства связи и электронное оборудование, вмораживается в лед и исполняет роль приемно-передающего устройства. Нижняя часть с измерительным контейнером и термоголовкой опускается в подледниковый

водоем [4]. Попад в озеро, она выбрасывает гидробот – биохимический зонд, который плавает и отбирает микробиологические пробы подледниковой воды. Собранный информация передается замороженной верхней части криобота, а затем на поверхность. Криобот, двигаясь к озеру, в скважине оставлял мини-радиопередатчики, позволяющие связываться с поверхностью с помощью радиопередачи [4].

К сентябрю 2000 г. прототип был изготовлен. Эксперимент проводился на стенде – 5-метровой колонне льда. Средняя скорость протаивания составила 0,43 м/с, средняя потребляемая мощность – 418 Вт, общее время прохождения – 11,2 ч.

С ноября 2000 г. по январь 2001 г. видеоаппаратура в трех скважинах западной части Антарктиды совершила семь пробных рейсов. Скважины были предварительно пробурены гидродинамическим устройством, глубина «погружения» составила 1226 м. Полученные аппаратурой снимки оказались хорошими – были обнаружены чередующиеся слои частой воды и слои, содержащие скальные обломы.

Летом 2001 г. криобот был испытан на леднике Лонгиер, где без осложнений была пробурена скважина глубиной 23 метра [14]. На нынешнем этапе развития науки и техники данная глубина является максимально достигнутой. Скорее всего, это связано со слабой изученностью процессов плавления и кристаллизации массивных ледяных структур локальным источником нагрева. Это обусловлено тем, что в процессе плавления формируется фронт фазового перехода, который характеризуется наличием мощного и сингулярно-сконцентрированного стока теплоты, а также скачкообразным изменением теплофизических характеристик льда при переходе через него. К тому же, стоит отметить, что форма этого фазового перехода существенно не линейна и зависит от дивергентного распределения тепловых потоков во льду, соответственно, можно сказать, что процессы фазовых превращений при плавлении льда являются актуальнейшими нерешенными задачами современной физики.

1.3 Современное состояние математической базы описания многофронтных и многофазных задач Стефана

Физик и математик Йозеф Стефан в конце XIX в. представил класс задач, посвященных формированию льда. Впоследствии задачи с межфазными границами стали называть задачами Стефана. [15,16]. Под задачей Стефана понимают класс математических моделей, описывающих тепловые, диффузные или термодиффузные процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями с поглощением или выделением скрытой теплоты [12]. К ним относятся:

- испарительное охлаждение [17,18];
- кристаллизация, сублимация, сушка, широко используемые в промышленных аппаратах [18];
- промерзание и/или оттаивание грунтов [19] и др.

Анализ литературы [17-21] показывает, что математический аппарат многофронтных и многофазных задач Стефана имеет богатый опыт применения к различным прикладным задачам современной промышленности и народного хозяйства. При этом, его применение к задачам прогностического моделирования движения роботизированных аппаратов изучения массивных ледяных структур и подледных воздушных и водных образований практически не изучено.

1.3.1 Математическое описание многофронтных и многофазных задач Стефана

В литературе проблема Стефана исследовалась с теми разумными упрощениями, которые позволяют провести математический анализ. Чаще всего принимались допущения:

- а) постоянство теплофизических свойств;
- б) неизменность температуры и теплоты фазового перехода;

Если все допущения приемлемы, то специфические математические трудности при решении возникают из-за нелинейности фазовой границы.

Рассмотрим основные принципы преодоления стефановской нелинейности.

Впервые принцип автомодельности, т.е. сведение дифференциальных уравнений в частных производных к дифференциальным уравнениям в полных производных, использован в классической работе Ляме и Коапейрона по замерзанию жидкости [20]. Позднее этот подход применили к более усложненным задачам Нейман и Стефан [21], Любов Б.Я.[22], Тирский Г.А. [23] и многие другие [24-26].

Общее свойство автомодельных решений состоит в том, что фронт фазовых превращений движется по закону квадратного корня от времени. Круг решаемых таким образом задач весьма узок, но в теоретическом аспекте они имеют исключительную ценность как точные решения проблемы Стефана.

Вариационным методом Био [27,28], интегральным методом Гудмена [29], родственными приближенными методами, как например, Вейника А.И. [30], задача Стефана исследовалась в работах [31,32] и многих других. Как уже указывалось, главный недостаток этой группы методов при всей их эффективности, с физической точки зрения, – отсутствие критериев по выбору аппроксимирующей функции, особенно критериев по выбору аппроксимирующей функции, особенно для тел с осевой и центральной симметрией, а также многомерных тел.

Метод Л.С. Лейбензона [33], [34]. Схема метода Лейбензона состоит в предварительном задании функций распределения температур в жидкой и твердой фазах, удовлетворяющих начальным и граничным условиям. Постановка температурных распределений в уравнение баланса тела приводит к дифференциальному уравнению относительно подвижной границы. Полученное уравнение обычно легко разрешимо относительно переменной, характеризующей положение фронта. В более поздних работах других автором [35–36] этот метод используется для усложненных граничных условий. В [35] проведена экспериментальная апробация метода.

Основной недостаток метода Лебесона – невозможность учета теплоемкостей обеих фаз. В [37] даются некоторые уточнения метода, позволяющие учесть в расчетах теплоаккумулирующие свойства жидкой и твердой фаз.

Метод Э. М. Гольдфарба [38]. В методе Э. Гольдфарба заложена интересная физическая посылка, позволившая получать и весьма удобные в инженерном плане честные соотношения.

Идея основана на использовании свойства температурного поля в стадии регулярного режима при постоянной плотности теплового потока. В течение всего процесса рассматриваются последовательно две стадии: стадия прогрева и в период регулярного режима стадия плавления. Для учета скрытой теплоты агрегатного превращения искусственно вводится дополнительный бесконечно тонкий слой. Это дало возможность устранить разрыв функций градиента температуры на фронте раздела фаз.

Так как плавление управляется регулярной частью температурного поля, то метод применим для процессов только умеренной интенсивности плавления.

Метод Л.А. Бровкина [39] основан также на использовании в процессе плавления закономерностей температурного поля, характерных для заключительной стадии нагрева. Принимается, что поле температур твердого остатка выражается параболической зависимостью. По этой информации вычисляется средняя температура, которая подставляется в уравнение теплового баланса с некоторым корректирующим множителем. В итоге полностью определяется динамика процесса плавления. Несколько позже был предложен другой модифицированный метод решения аналогичной задачи [40].

Проведенные в [41] сопоставления показывают, что точность разработанных расчетных методик вполне приемлемо для технических расчетов. Как подчеркивается самим автором, разработанные методы эффективны в случае большой длительности процесса предварительного

нагрева, а при интенсивных тепловых воздействиях имеют недопустимо большую погрешность.

Другие методы. Можно указать способы приближенного аналитического решения, основанные на представлении окончательного решения в виде степенных рядов [42,43], последовательной смене стационарных состояний [44], принципе квазиподобия температурных полей [45], сведением к системе обыкновенных дифференциальных уравнений [46], редукции с помощью теории потенциала к интегральным уравнениям [47] и др.

Оригинальные математические исследования проблемы Стефана связаны с работами А.Н. Тихонова и А.А. Самарского [48], О.А. Олейник [49], С.Л. Каменостской [50], Л.И. Рубинштейна [51] и других. Доказательство существования и единственности решения задачи Стефана в малом и большом дано Л.И. Рубинштейном. Л.С. Каменостская и О.А. Олейник ввели понятие об обобщенном решении, единственность и существование которого обеспечиваются для пространственного случая.

Численные методы. Проблема Стефана на сегодня практикуется и как проблема вычислительной математики. Исследователями [51]–[55] предлагаются решения с применением как явных, так и неявных схем, «связанных» с подвижным фронтом. «Связывание» производится использованием метода дробных шагов и «лови» фронта в узел сетки. Экономичные разностные схемы сквозного счета к задаче со многими пространственными переменными и произвольным числом фазовых переходов применены в [56]. Более обстоятельный обзор численных схем решения проблемы Стефан приведен в монографиях А.А. Самарского [57] и Л.И. Рубинштейна [51] и др.

С.Л. Бородин в своей работе [58], сравнив 7 численных методов, говорит о том, что при решении многофронтовых задач Стефана эффективнее использовать:

1. Метод сглаживания коэффициентов с использованием неявной схемы. Однако для получения наиболее достоверного результата для начальных условий и определенной задачи необходимо правильно подобрать параметр сглаживания.

2. Метод энтальпий с использованием неявной схемы. Данный метод является авторским, согласно которому фазовые превращения не учитываются, а во всей области решается уравнение энергии и находится распределение температуры. Метод имеет свои недостатки, которые легко устраняются.

Из краткого обзора методов решения задачи Стефана следует:

а) для современных сложных задач теплопроводности с подвижным фронтом фазовых превращений самым эффективным методом является численный метод, когда последний реализуется на быстродействующих ЭВМ. Недостаток численных схем решений общеизвестен;

б) разработано достаточно много приближенных аналитических приемов преодоления стефановской нелинейности, которые основаны на разнообразных физических идеях. Однако из рассмотрения основных из них вытекает, что группа интегральных и вариационных методов дает неприемлемую для приложений точность расчёта в телах с неплоской геометрией, другая группа весьма приближенно реализует интенсивные тепловые режимы. Практически отсутствуют методы решения задачи Стефана с нелинейным управляющим тепловым воздействием (лучистый нагрев и др.);

в) рационально продолжить разработку приближенных алгоритмов расчета, которые справлялись бы с отмеченными трудностями, удовлетворяли критериям обозримости, гарантировали бы разумную точность и достаточную универсальность.

Остановимся на физических предпосылках применения асимптотических решений к задаче Стефана [59,60]. Известно, что процессы, сопровождающиеся перемещением границ фазовых превращений,

характеризуются сложным взаимодействием тепловых и динамических эффектов. Причем управляющая роль в этом взаимодействии принадлежит тепловой стороне. Наиболее простые математические модели этого явления, поддающиеся математическому рассмотрению, носят, как правило, автомодельный, либо асимптотический характер. Так, ряд исследователей выделяют асимптотику по скорости [61]. Однако, как указывается в [62], для многих процессов квазистационарность по скорости может и не наступить. Другая группа исследователей использует асимптотические свойства теплового поля. Например, Л.С. Лейбензон [34] получает расчетные соотношения по динамике затвердевания, полагая температурное поле стационарным.

Модель тепловой квазистационарности основана на следующих допущениях:

1. Теплопроводность относится к быстрым процессам переноса импульсов энергии. При выводе уравнения Фурье скорость перемещения теплового возмущения ω_ϕ положена равной бесконечности, и решения этого уравнения довольно хорошо соответствует реальным условиям (величина ω_ϕ для твердых тел с решетчатой теплопроводностью одного порядка со скоростью звука).

2. Максимальные скорости большинства технических процессов плавления и затвердевания могут быть определены и оценены. Из сопоставления скоростей переноса теплового импульса ω и скоростей перемещения границ фазовых превращений ω_ϕ следует, что в большинстве случаев $\omega_\phi/\omega_T \ll 1$. Так, в процессах выращивания кристаллов величина $\omega_\phi < 10^{-4}$ м/с. Это может служить обоснованием к принятию физической модели, в которой закон движения границы раздела фаз будет формироваться предельными свойствами температурного поля. В частности, мы отдаем управляющую роль квазистационарной асимптотике. Из сказанного следует, что координата фронта фазового превращения для теплового процесса,

предшествующего квазистационарному режиму, будет как бы «замороженной». Причем новому положению фазового фронта будет соответствовать свое квазистационарное состояние.

Данная модель успешно работает и в случае сопоставимости указанных скоростей, когда внешнее тепловое воздействие является высокоинтенсивным. Такие режимы рассматриваются особо, с использованием на начальной стадии закономерностей, характерных для процессов, протекающих в полуограниченных средах.

Здесь следует отметить, что в методологическом аспекте подобный подход неоднократно и с успехом использовался исследователями. Наиболее характерным является прием переноса законов равновесной термодинамики на неравновесные процессы. Последний базируется на принципе локального термодинамического равновесия [63]. На принцип локальных равновесных состояний накладывается главное ограничение: отклонения системы от равновесия должны быть малыми. В [63] указывается, что «малыми» можно считать такие отклонения, при которых изменение температуры (и других параметров состояния) на длине свободного пробега гораздо меньше самого значения температуры (или другого соответствующего параметра), а изменение скоростей должно быть малым по сравнению со средней скоростью теплового движения молекул (или скоростью звука).

Вероятно, область применимости модели тепловой квазистационарности будет находиться в тех же пределах, что и термодинамика неравновесных процессов.

1.4 Современное состояние математической базы процессов плавления в условиях движения роботизированных комплексов в массивных ледяных структурах

Криобот как устройство относительно новое и малоизученное требует более тщательных исследований и оптимальным является использование математического моделирования.

Полякова Л.О. в своей работе [8] рассматривала прохождение крибота в вакууме при его различных параметрах. В ход работы использовался метод конечных элементов – численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными. Используемые программы: SolidWorks, MSC Nastran/Patran, FLOW-3D. Был рассмотрен сферический крибот, крибот со сферическим и плоским наконечником.

Сферический крибот. Первый эксперимент – моделирование опыта М. Треффера. Средняя скорость движения сферического крибота составила 1,4 см/ч. Отклонение средней скорости от скорости, полученной в результате опыта, составило 59%.

Крибот со сферическим наконечником. Проведено исследование зависимости скорости плавления от температуры поверхности. В результате было определено, что наибольшая скорость достигается на первом шаге, однако скорость со временем выравнивается. С повышением температуры КПД падает.

Крибот с плоским наконечником. Тенденции, отмеченные для предыдущего крибота, сохранились. КПД зонд-робота со сферическим наконечником выше устройства с плоским наконечником.

Несмотря на то, что крибот с плоским наконечником показывает относительно неплохие скорости, автор отдает предпочтение сферическому наконечнику. Это связано с тем, что у последнего более равномерно распределение скорости во времени. В таблицах 1–3 представлены средние скорости при различных температурах поверхности для различной формы наконечника.

Таблица 1 – Средняя скорость движения крибота в зависимости от температуры поверхности (сферический наконечник)

Температура поверхности T , °С	Средняя скорость движения прибора v , см/ч
10	1,497
30	3,024
50	4,999

Таблица 2 – Средняя скорость движения криобота в зависимости от температуры поверхности (плоский наконечник)

Температура поверхности Т, °С	Средняя скорость движения прибора v, см/ч
10	1,363
30	4,728
50	5,726

Таблица 3 – Средняя скорость движения криобота в зависимости от температуры поверхности (конический наконечник)

Температура поверхности Т, °С	Средняя скорость движения прибора v, см/ч
10	2,700
30	3,285
50	5,342

В работах Чумаченко Е.Н. [9,10,64] с помощью вычислительной системы SPLEN выполнялись расчеты температурных полей и напряженно-деформированного состояния. Система основана на методе конечных элементов. В результате исследований определены вероятные зоны разрушений льда при его различных температурах. Исследовано влияние формы наконечника на продвижение криобота в ледяном массиве. Выявлено, что чем ближе форма носовой части к игле, тем выше скорость перемещения. Увеличение температуры так же увеличивает скорость продвижения, однако с энергетической точки зрения нецелесообразно. Оптимальным является поддержание температуры примерно 15-30 °С.

К основным проблемам, выявленным в работе, относятся поддержание постоянной температуры криобота и необходимость защиты его от высокого давления, возникающего в жидкой фазе. Не маловажным является образование ледовой крошки, которая может замедлить или ускорить процесс. Полученные сведения являются полезными и необходимыми при проектировании криобота в дальнейшем.

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что теоретические и экспериментальные исследования, связанные с описанием процессов тепло- и

массопереноса, протекающих при движении роботизированных комплексов термического бурения является актуальной и нерешенной в настоящее время задачей.

Исходя из этого, цель работы: математическое моделирование теплофизических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений (плавления льда) при движении модельного криобота сквозь массивный ледяной пласт.

2 Постановка задачи

Как следует из вышеизложенного, математическое описание процессов, протекающих при движении криобота довольно сложное и на данный момент в достаточной степени не разработанное. Современные математические модели, как правило, не учитывают группу факторов, которая может оказывать существенное влияние на динамику движения криобота. К последним относятся неоднородность ледяных структур, формирующаяся в результате плавления льда пленка воды, обволакивающая криобот и т.д. Основным же фактором, оказывающим существенное влияние на характеристики криобота, являются процесс плавления льда, который протекает в очень узкой (можно сказать бесконечно тонкой) постоянно перемещающейся зоне (фронт плавления). При этом во льду формируется сингулярно-сгущенный сток теплоты со сверхинтенсивным эндотермическим эффектом. При этом форма этого фронта может быть нелинейной и зависеть от дивергентного распределения тепловых потоков во льду. Такие задачи являются одними из наиболее сложных в математической физике и называются многофронтowymi (многофазными) задачами Стефана.

Можно сказать, что разработка основных элементов теории процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых превращений (плавления льда) при движении криобота в слое льда являются актуальной и нерешенной в настоящее время задачей.

2.1 Физическая постановка задачи

В начальный момент времени на ограниченную область поверхности льда воздействует тепловой поток. В результате этого слой льда начинает прогреваться. При достижении на поверхности льда температуры, равной температуре фазового перехода, инициируется процесс плавления ледяного покрова. Фронт плавления движется вглубь слоя. В результате в области решения задачи формируется гетерогенная структура, состоящая из твердой и жидкой фазы воды, существенно отличающимися теплофизическими

свойствами. В момент обтекания жидкой фазы устройства инициируется процесс затвердевания, вследствие чего устройство движется в ледяном массиве. При решении задачи лед принимался однородным.

На рисунке 3 представлена рассматриваемая схема движения криобота в условиях поставленной задачи.

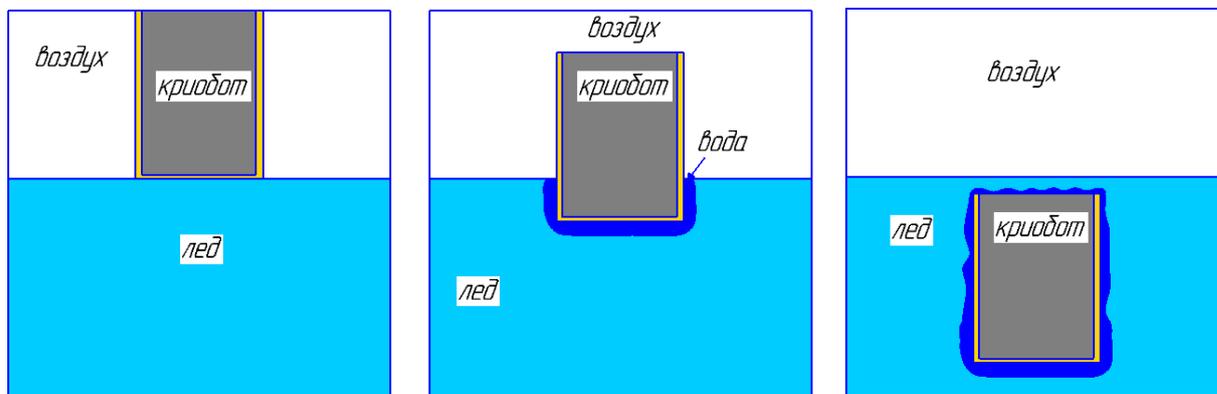


Рисунок 3 – Схема движения криобота

Крибот обладает заданной температурой, однако подвод теплоты осуществляет непосредственно к его стенкам и основанию, с верхней части теплота отводится. В результате продвижения зонд-робот оставляет тепловой след, бесполезный для данного процесса.

2.2 Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи, советуемая вышеприведенной физической модели, состоит из следующей системы дифференциальных уравнений математической физики в частных производных (1-3).

Уравнение энергии для системы лед-вода:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho U \frac{\partial T}{\partial x} + c\rho V \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{Q_{пл}\rho}{\Delta} \cdot \dot{S} \cdot Dir, \quad (1)$$

где ρ – плотность кг/м³,

c – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C);

Δ – параметр размазывания фронта, м;

\dot{S} – дифференциал координаты фронта плавления по времени;

Dir – функция Дирака;

$Q_{пл}$ – теплота плавления льда, Дж/кг;

U, V – скорости движения жидкой фазы в направлении оси ox и oy соответственно, м/с;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

x, y – координаты;

τ – время, с;

T – температура, К.

Уравнение энергии для криобота:

$$c_c \rho_c \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_c \rho_c V \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (2)$$

где ρ_c – плотность стали кг/м³,

λ_c – коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м·К);

c_c – удельная теплоемкость стали, кДж/(кг·°С);

x, y – координаты.

Уравнение энергии для воздуха:

$$c_{вз} \rho_{вз} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (3)$$

где $\rho_{вз}$ – плотность воздуха кг/м³,

$\lambda_{вз}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

$c_{вз}$ – удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°С);

x, y – координаты.

На рисунке 4 представлена математическая постановка задачи в начальный момент времени.

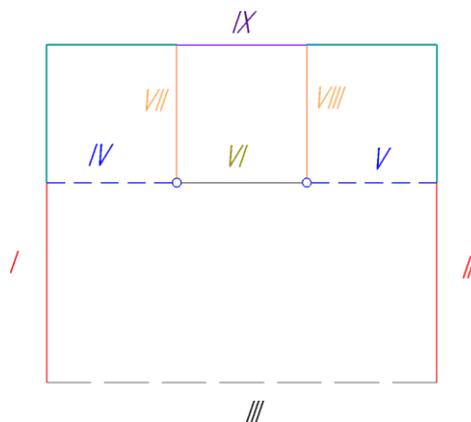


Рисунок 4 – Области решения. Крибот в начальный момент времени

Задача 1-3 решалась при следующих начальных и граничных условиях:

$$I) x = 0 \quad 0 < y < H \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \tau > 0; \quad (4)$$

$$II) y = l \quad 0 < x < H \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \tau > 0; \quad (5)$$

$$III) y = 0 \quad 0 < x < l \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \tau > 0; \quad (6)$$

$$IV) y = H \quad 0 < x < x_1 \quad \lambda_l \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (7)$$

$$V) y = H \quad x_2 < x < l \quad \lambda_l \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (8)$$

$$VI) y = H \quad x_1 < x < x_2 \quad \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial x} + q; \quad (9)$$

$$VII) H < y < H_1 \quad x = x_1 \quad \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial x} + q; \quad (10)$$

$$VIII) H < y < H_1 \quad x = x_2 \quad \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{вз} \frac{\partial T}{\partial x} + q. \quad (11)$$

При движении криобота граничные условия изменяются. Изменения представлены на рис. 5.

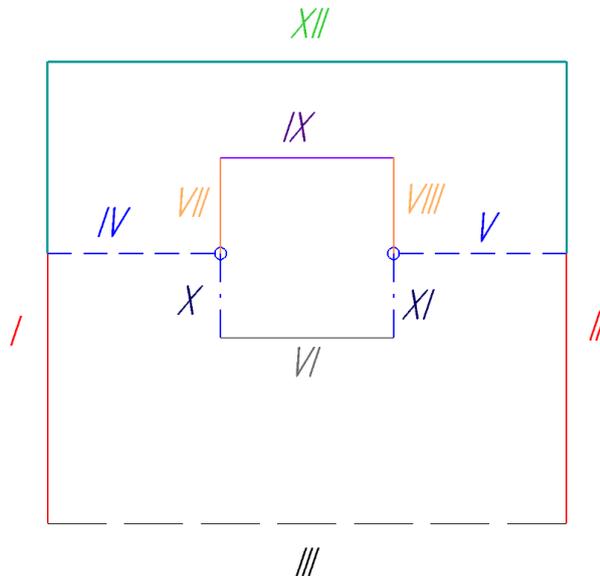


Рисунок 5 – Области решения. Крибот во время движения

Помимо уже заданных ранее областей на рисунке 5 добавляются IX – XII области.

$$\text{IX) } H < y < H_1 \quad x = x_2 \quad \lambda_c \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{\text{вз}} \frac{\partial T}{\partial x} + q; \quad (12)$$

$$\text{X) } H_{\text{л}} < y < H \quad x = x_1 \quad \lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial y} + q; \quad (13)$$

$$\text{XI) } H_{\text{л}} < y < H \quad x = x_2 \quad \lambda_c \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_{\text{л}} \frac{\partial T}{\partial y} + q; \quad (14)$$

$$\text{XII) } y = H_{\text{вз}} \quad 0 < x < 1 \quad \theta = \text{const.} \quad (15)$$

С целью проведения параметрического анализа и облегчения процедуры моделирования система (1)-(15) решалась в безразмерных переменных.

Представленная физическая постановка имеет следующее математическое выражение для системы лёд-вода:

$$\frac{C \cdot P}{Fo} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \cdot \text{Pe} \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \cdot \text{Pe} \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \text{div}(\Lambda \cdot \text{grad} \theta) \mp \text{Rom}_{\text{пл}}, \quad (16)$$

где C – безразмерная теплоемкость;

P – безразмерная плотность;

θ – безразмерная температура;

X, Y – безразмерные шаги по пространству;

Fo – критерий Фурье;

$\text{Rom}_{\text{пл}}$ – критерий Померанцева для плавления льда/затвердевания воды;

Λ – безразмерный коэффициент теплопроводности;

τ – безразмерное время.

Для решения данного уравнения принимаются следующие допущения:

1. Вода, образующая при плавлении, имеет очень тонкий слой, «прилипающий» к криоботу и льду. Соответственно, скорость движения воды не учитывается;
2. Температурное поле льда в начальный момент времени однородно;
3. Теплоперенос по координате Z не учитывается.

Для удобства анализа полученных сведений вычисления проводились в безразмерных величинах. Основным уравнением для системы лед-вода является уравнение энергии:

$$\frac{C_P}{Fo} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left(\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \mp \text{Rom}_{\text{пл}}, \quad (17)$$

Уравнение энергии для воздуха в безразмерных величинах имеет следующий вид:

$$\frac{C_{\text{вз}} \cdot P_{\text{вз}}}{Fo} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \Lambda_{\text{вз}} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \Lambda_{\text{вз}} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}, \quad (20)$$

где $C_{\text{вз}}$ – безразмерная теплоемкость воздуха;

$P_{\text{вз}}$ – безразмерная плотность воздуха;

$\Lambda_{\text{вз}}$ – безразмерный коэффициент теплопроводности воздуха.

Уравнение энергии для криобота:

$$\frac{C_c \cdot P_c}{Fo} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \Lambda_c \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right), \quad (21)$$

где C_c – безразмерная теплоемкость стали;

P_c – безразмерная плотность стали;

Λ_c – безразмерный коэффициент теплопроводности стали.

Описанные ранее граничные условия в безразмерном виде запишутся как:

$$\text{I) } x = 0 \quad 0 < y < H \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, t > 0; \quad (23)$$

$$\text{II) } y = 1 \quad 0 < x < H \quad \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, t > 0; \quad (24)$$

$$\text{III) } y = 0 \quad 0 < x < 1 \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, t > 0; \quad (25)$$

$$\text{IV) } y = H \quad 0 < x < x_1 \quad \Lambda_l \frac{\partial \theta}{\partial X} = \Lambda_{\text{вз}} \frac{\partial \theta}{\partial X}; \quad (26)$$

$$\text{V) } y = H \quad x_2 < x < 1 \quad \Lambda_l \frac{\partial \theta}{\partial X} = \Lambda_{\text{вз}} \frac{\partial \theta}{\partial X}; \quad (27)$$

$$\text{VI) } y = H \quad x_1 < x < x_2 \quad \Lambda_c \frac{\partial \theta}{\partial X} = \Lambda_{\text{вз}} \frac{\partial \theta}{\partial X} + Ki; \quad (28)$$

$$\text{VII) } H < y < H_1 \quad x = x_1 \quad \Lambda_c \frac{\partial \theta}{\partial X} = \Lambda_{\text{вз}} \frac{\partial \theta}{\partial X} + Ki; \quad (30)$$

$$\text{VIII) } H < y < H_1 \quad x = x_2 \quad \Lambda_c \frac{\partial \theta}{\partial X} = \Lambda_{\text{вз}} \frac{\partial \theta}{\partial X} + Ki. \quad (31)$$

При движении криобота граничные условия изменяются. И

$$\text{IX) } H < y < H_1 \quad x = x_2 \quad \Lambda_c \frac{\partial \theta}{\partial X} = \Lambda_{\text{вз}} \frac{\partial \theta}{\partial X} + Ki; \quad (32)$$

$$\text{X) } H_l < y < H \quad x = x_1 \quad \Lambda_c \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Lambda_l \frac{\partial \theta}{\partial Y} + Ki; \quad (33)$$

$$\text{XI) } H_l < y < H \quad x = x_2 \quad \Lambda_c \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \Lambda_l \frac{\partial \theta}{\partial Y} + Ki; \quad (34)$$

$$\text{XII) } y = H_{\text{вз}} \quad 0 < x < l \quad \theta = \text{const}. \quad (35)$$

Задача (16)-(35) решалась методом конечных разностей с применением неявного четырехточечного разностного шаблона. Задача плавления решалась с применением метода квази неявного выделения фронта плавления.

Теплофизические характеристики в системе лед-вода определялись из положения границы фронта плавления.

$$c = \begin{cases} c_{\text{в}}, & T \geq T_{\text{пл}} \\ c_{\text{л}}, & T < T_{\text{пл}} \end{cases}$$

$$\rho = \begin{cases} \rho_{\text{в}}, & T \geq T_{\text{пл}} \\ \rho_{\text{л}}, & T < T_{\text{пл}} \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\text{в}}, & T \geq T_{\text{пл}} \\ \lambda_{\text{л}}, & T < T_{\text{пл}} \end{cases}$$

3 Тестовые задачи

С целью верификации математической модели решён ряд тестовых задач.

3.1 Решение одномерного уравнения теплопроводности с зависящим от температуры коэффициентом теплопроводности

Рассматривается теплоперенос через пластину с конечной толщиной и бесконечной длиной. Начальная температура пластины – T_0 . На границах поддерживаются постоянные температуры: T_l – левая граница, T_p – правая. Геометрия задачи представлена на рис.6.

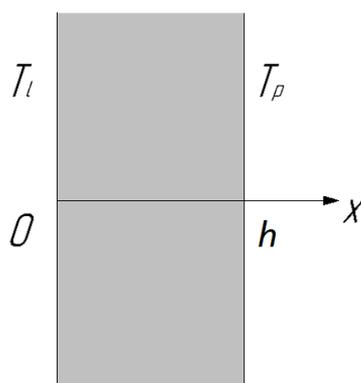


Рисунок 6 – Геометрия задачи (граничные условия первого рода)

В действительности процесс теплопереноса проходит при условии изменения коэффициента теплопроводности от температуры. Нелинейное уравнение теплопроводности для этого случая принимает вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), 0 < x < h. \quad (36)$$

Краевая задача для данного уравнения принимает вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq h; \quad (37)$$

$$x = 0: T = T_l, t > 0; \quad (38)$$

$$x = h: T = T_p, t > 0. \quad (39)$$

Заданы следующие параметры:

- материал пластины – сталь: $c = 450$ Дж/(кг · К), $\rho = 7870$ кг/м³,
 $\lambda = 79,9$ Вт/(м · К); $T_l = 400$ К; $T_p = 500$ К; $T_0 = 300$ К;

- толщина пластины $L=0,5$ м;
- время нагрева $\tau =10$ с.

В результате численного решения системы получена температурная зависимость, представленная на рисунке 7. Анализ рис.7 показал, что полученное распределение температур соответствует аналогично рассмотренному случаю в [65].

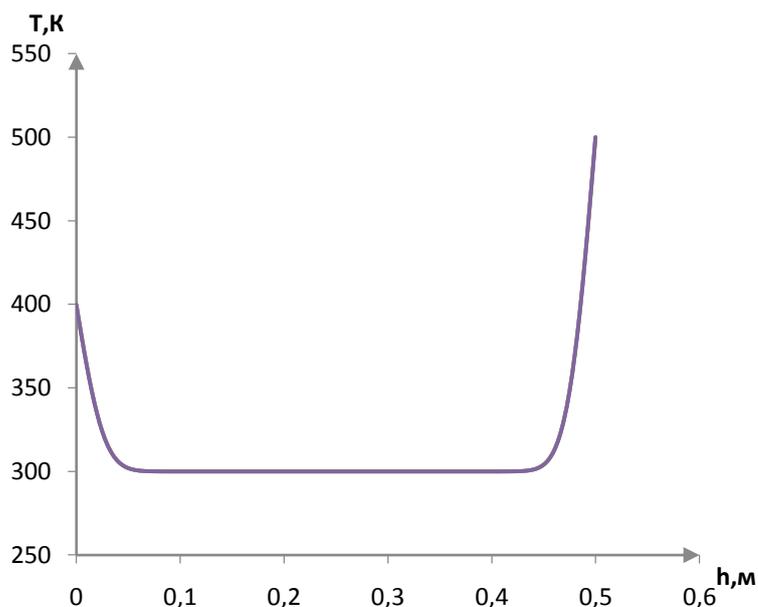


Рисунок 7 – Распределение температуры по толщине пластины

3.2 Решение одномерного уравнения теплопроводности для двухслойной пластины

Проведем анализ процесса теплопереноса в теле, состоящем из двух пластин с различными теплофизическими свойствами.

Определим температурное поле в составной пластинке конечной толщины и бесконечной длины через различные промежутки времени. Толщины частей одинаковые. Начальная температура пластины – T_0 . Границы $x=0$ и $x=h$ подвержены воздействию окружающей среды с температурой T^e .

Геометрия задачи представлена на рисунке 8.

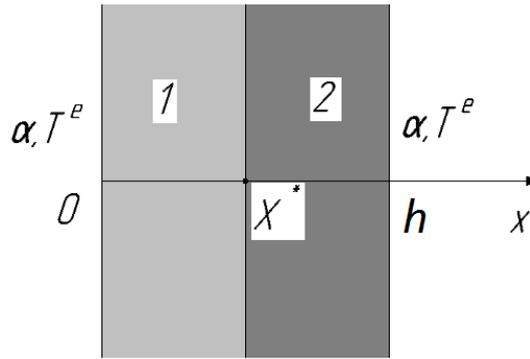


Рисунок 8 – Геометрия задачи для двухслойной пластины

Математическая постановка принимает вид:

$$\begin{cases} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x^*; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x^* < x < h; \end{cases} \quad (40)$$

где 1 соответствует левой пластине, а 2 – правой (рис.8).

Граничные и начальные условия будут следующие:

$$t = 0: T = T_0, 0 \leq x \leq h; \quad (41)$$

$$x = 0: T = T^e, \tau > 0; \quad (42)$$

$$x = h: T = T^e, \tau > 0. \quad (43)$$

$$\begin{cases} T_1(\tau, x^*) = T_2(\tau, x^*); \\ -\lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} = -\lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x = x^* \end{cases} \quad (44)$$

Заданы следующие параметры:

- первая часть пластины – сталь: $c_1 = 450$ Дж/(кг · К), $\rho_1 = 7870$ кг/м³, $\lambda_1 = 79,9$ Вт/(м · К);
- вторая часть пластины – бетон: $c_2 = 840$ Дж/(кг · К), $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\lambda_2 = 0,24$ Вт/(м · К);
- начальная температура $T_0 = 300$ К;
- температура окружающей среды $T^e = 600$ К;
- толщина пластины $h=0,5$ м;
- время нагрева $\tau = 3600, 5000$ и 6000 с.

Результаты расчетов по приведенной программе приведены на рисунке 9.

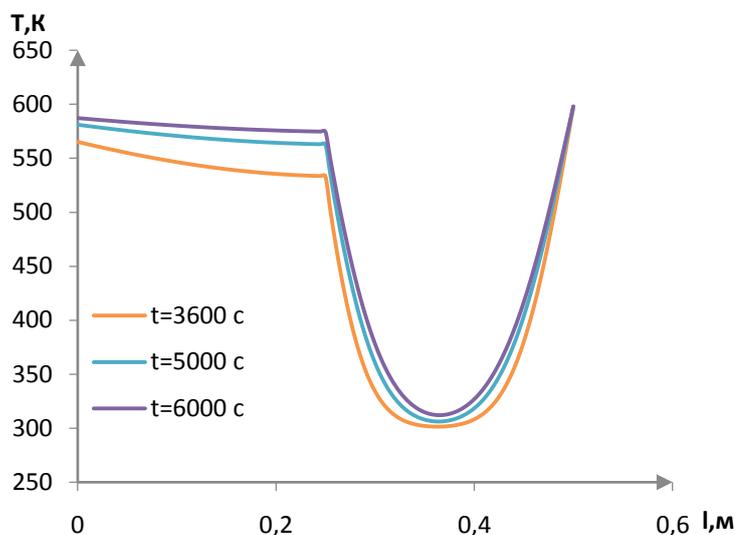


Рисунок 9 – Распределение температуры по толщине двухслойной пластины в различные моменты времени

Анализ полученных температурных полей показывает, что стальная часть составной пластины прогревается практически полностью в отличие от бетонной части, так как сталь имеет более высокий коэффициент теплопроводности, чем бетон.

Полученные результаты соответствуют аналогичной задаче, проведенной в [65].

3.3 Решение одномерного уравнения теплопроводности с подвижной границей (промерзание влажного грунта)

Влажный грунт прибывает в талом состоянии с начальной температурой T_0 . В момент времени $\tau = 0$. На поверхности грунта в начальный момент времени внезапно устанавливается температура T_r , которая будет ниже температуры промерзания T_3 . С течением времени слой промерзает на постоянно изменяющуюся толщину $\xi = f(\tau)$. Его нижняя граница подвижна и имеет постоянную температуру T_3 . На этой границе с выделением теплоты Q_ϕ инициируется фазовый переход. В результате

нижняя граница имеет температуру грунта на глубине, а верхняя граница – постоянную температуру замерзания.

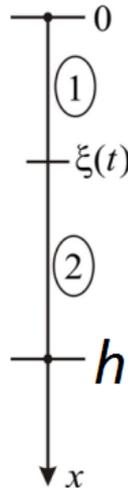


Рисунок 10 – область решения задачи промерзания влажностного грунта
Математическая постановка задачи имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < \xi(t); \tau > 0 \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \alpha_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \xi(t) < x < h; \tau > 0 \end{cases} \quad (45)$$

Граничные и начальные условия будут следующие:

$$t = 0: T(x) = T_0, 0 \leq x \leq h; \quad (46)$$

$$x = 0: T = T_r, \tau > 0; \quad (47)$$

$$x = h: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \tau > 0. \quad (48)$$

$$x = \xi(\tau) \begin{cases} T_1 = T_2 = T_3; \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = Q_{\phi} \rho_w \frac{d\xi}{d\tau} \end{cases} \quad (49)$$

Заданы следующие параметры:

- глубина слоя грунта $L=0,3$ м;
- температура поверхности грунта $T_r = 268$ К;
- температура замерзания $T_3 = 273$ К;
- начальная температура $T_0 = 293$ К;

- промерзший слой грунта: $c_1 = 2090$ Дж/(кг · К), $\rho_1 = 917$ кг/м³,
 $\lambda_1 = 2,3$ Вт/(м · К);
- талый слой грунта: $c_2 = 4220$ Дж/(кг · К), $\rho_2 = 1000$ кг/м³,
 $\lambda_2 = 0,6$ Вт/(м · К);
- Теплота фазового перехода $Q_\phi = 3,32 \cdot 10^5$ Дж/кг;
- Влажность грунта $w=1$.

Полученные распределения температур приведены на рисунке 11.

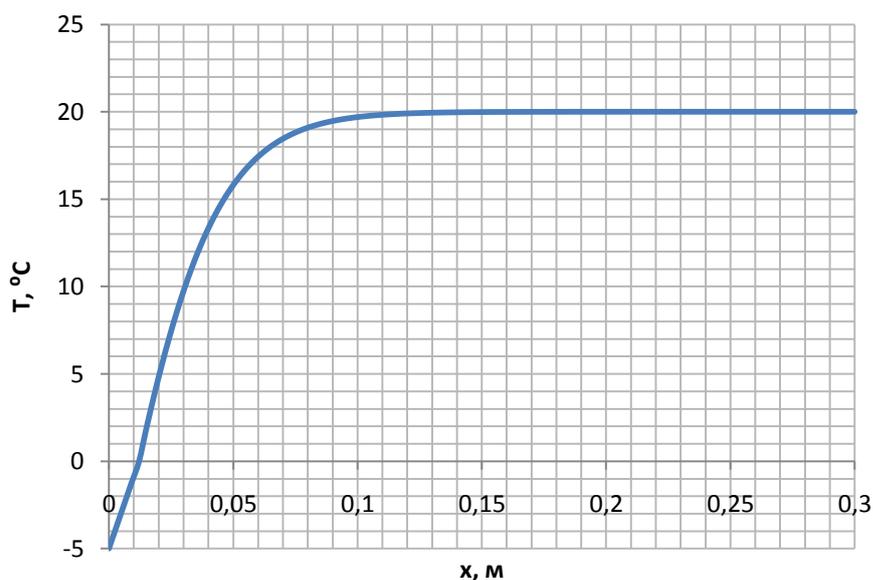


Рисунок 11 – Распределение температуры по глубине грунта

Результаты, представленные на рис.11 соответствуют результатам, полученным в [65] для аналогичной задачи.

Анализ результатов проведенных вычислительных экспериментов показывает достаточно хороший прогностический потенциал разработанной математической модели.

4 Результаты математического моделирования

В данном разделе приведены результаты математического моделирования при изменении основных параметров для анализа происходящих процессов и полученных данных. Отметим, что к основным параметрам работы криобота относятся:

- начальная температура аппарата;
- мощность источника тепловыделения;
- размеры зонд-робота.

Данные параметры оказывают существенное влияние на характеристики плавления, температурное поле системы «криобот-лед-воздух», динамику процесса. Анализ данных характеристик позволит выбрать наиболее экономически выгодные и целесообразные значения параметров для лучшей эксплуатации зонд-робота.

4.1 Влияние начальной температуры криобота на характеристики плавления

Температура криобота в любой момент времени не должна опускаться ниже температуры плавления льда, в противном случае криобот может застрять. По этой причине его температура в момент начала плавления льда, исходя из технологических соображений, поддерживается выше 300 К. Соответственно, представляет интерес вопрос исследования влияния начальной температуры аппарата на характеристики и условия плавления массивных ледяных структур при движении зонд-робота.

При математическом моделировании исследовался следующий диапазон температур: 400 К, 600 К и 800 К. Отметим, что в момент движения криобота во льду образуется «водяная чаша». При этом конусность ее увеличивается от глубинных слоев к поверхности. Данный факт объясняется тем, что при движении криобота вглубь льда, аппарат из-за низкой температуры льда начинает остывать. Соответственно, чем ниже уровень зонда, тем ниже температура у носовой части. В этом случае, когда

температура стенок крибота будет выше температуры его носовой части, это приводит к большому образованию жидкой фазы именно у стенок аппарата, особенно у верхней части (рис.12).

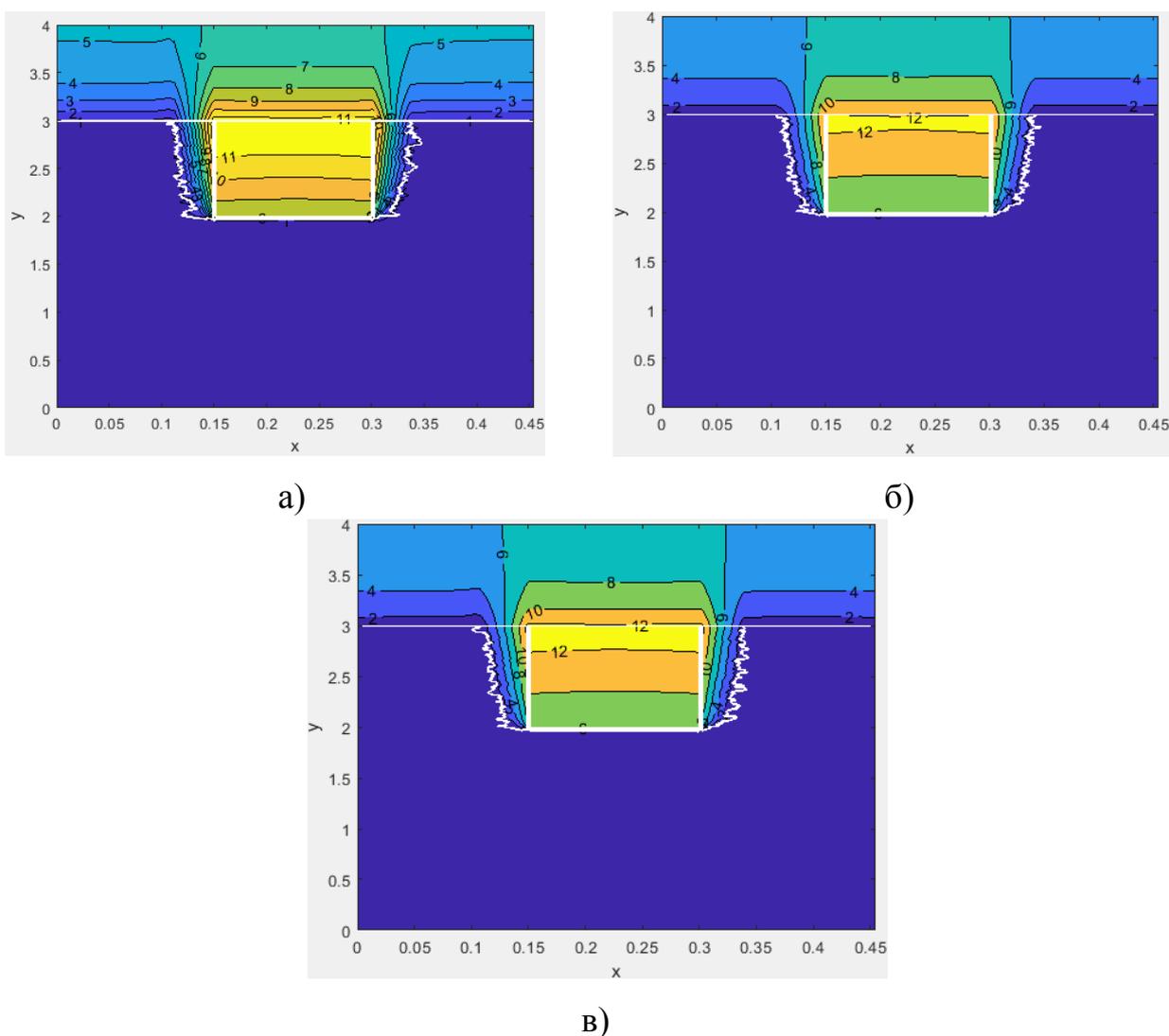


Рисунок 12 – Температурные поля в системе «крибот-лед-воздух» при температуре крибота (а) 400К, (б) 600 К и (в) 800 К.

При прохождении зонд-робота, происходит отток теплоты, при этом можно отметить наличие незначительного теплового следа. Последнее обусловлено высоким теплосодержанием крибота. Такой тепловой след может приводить к декристаллизации верхних слоев ледяной шахты, в результате повышаются риски ее разрушения.

Обратим внимание, что при повышении температуры с 400 К до 600 К температурные поля заметно различаются. Средняя температура во втором

случае намного выше, при этом отметим, что толщина расплавленного льда увеличится. Однако при повышении температуры с 600 К до 800 К различие температурных полей незначительно. Можно сделать вывод о том, что дальнейшее повышение температуры не целесообразно, так как оно не повлияет на динамику плавления.

4.2 Влияние начальной мощности источника тепловыделения на характеристики плавления

К стенкам крибота подводится теплота, связанная с наличием мощного источника тепловыделения (рис.13).

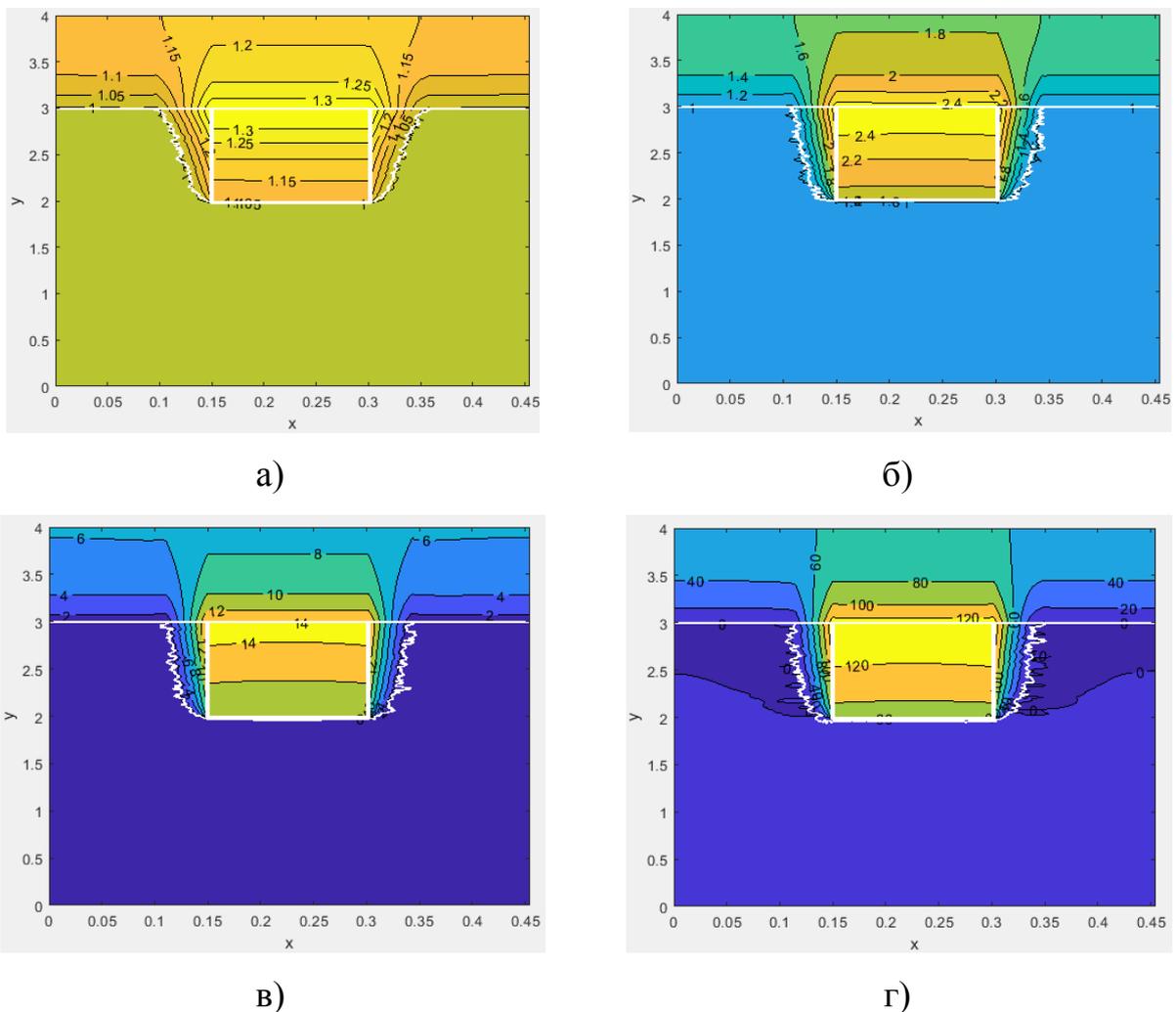


Рисунок 13 – Температурные поля в системе «крибот-лед-воздух» при варьировании критерия Кирпичева (а) $K_i=0,1$, (б) $K_i=1$, (в) $K_i=10$, (г) $K_i=100$

На рисунке 13 наблюдается изменение температурного поля крибота при незначительном изменении температурного поля льда. Это обусловлено

тем, что при движении криобота в его малой окрестности формируется пленка воды, которая образует своеобразный «барьер», обусловленный большими значениями теплоемкости жидкой фазы. Так же, стоит отметить, что при плавлении льда в его структуре формируется фронт фазового перехода, который характеризуется наличием сингулярно-сгущенного интенсивного теплового стока.

4.3 Влияние размеров криобота на характеристики плавления

При конструировании зонд-робота на характеристики плавления влияют не только внутренние параметры, но и внешние. К выбору последних необходимо подойти с особым вниманием, так как при эксплуатации изменить их будет невозможно. Следует подобрать такие внешние данные: форму, размеры криобота, материал корпуса, которые позволят экономически эффективно сконструировать аппарат.

Рассмотрим влияние длины криобота на характеристики движения аппарата. Так как математическое моделирование проводим в безразмерных величинах, запишем изменение длины устройства через соотношение его длины к ширине.

Как видно из рисунка 14, наиболее равномерное температурное распределение имеет зонд-робот при соотношении 0,15. С увеличением длины аппарата регулирование его температуры становится сложнее из-за увеличения дальности прохождения сигнала. Исходя из этого на рисунках (б) и (в) температурное поле зонд-робота имеет всего две температуры, между которыми нет плавного теплового перехода. Носовая и верхняя части криобота имеют различную температуру, что может повлиять на его работоспособность.

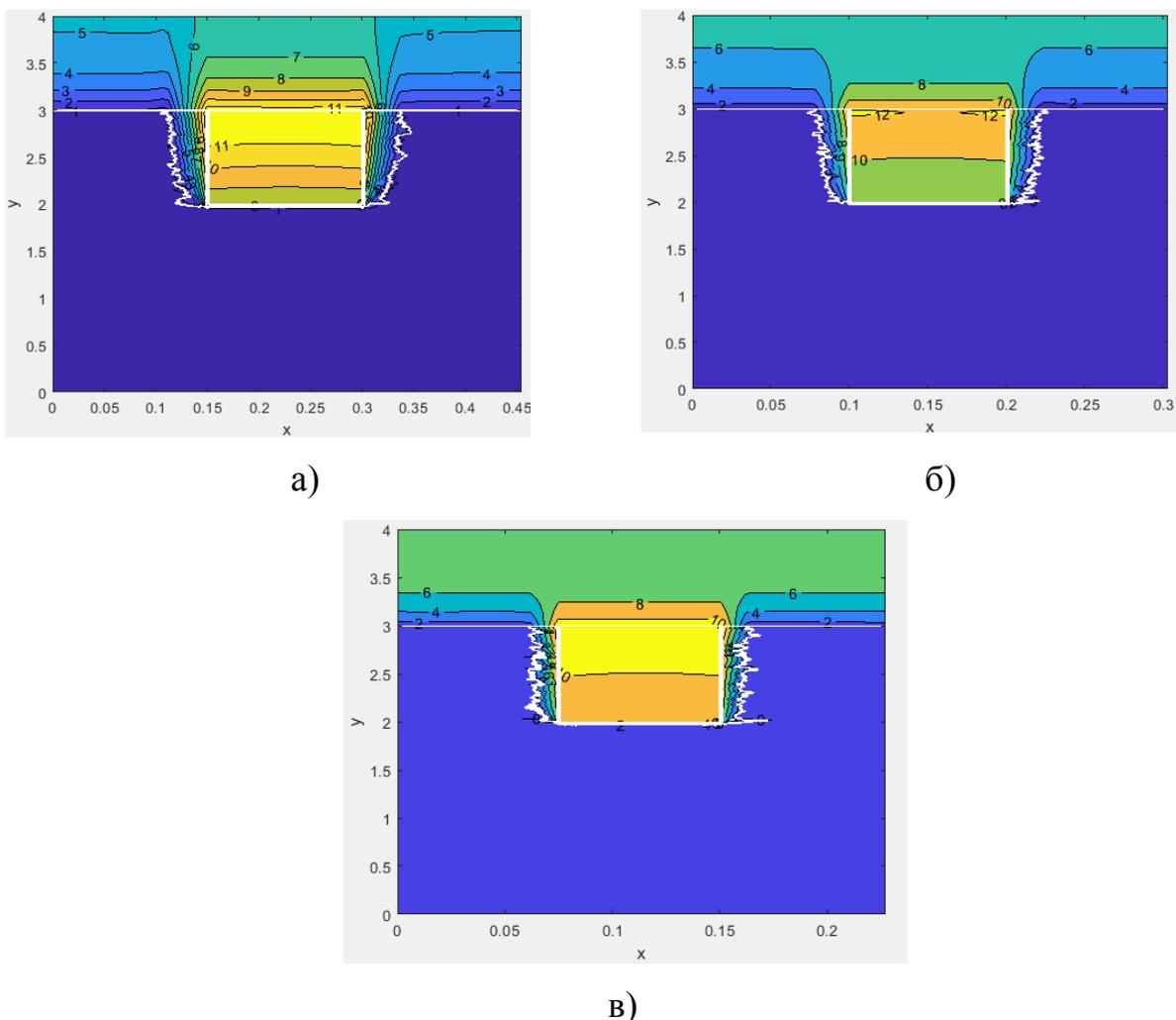
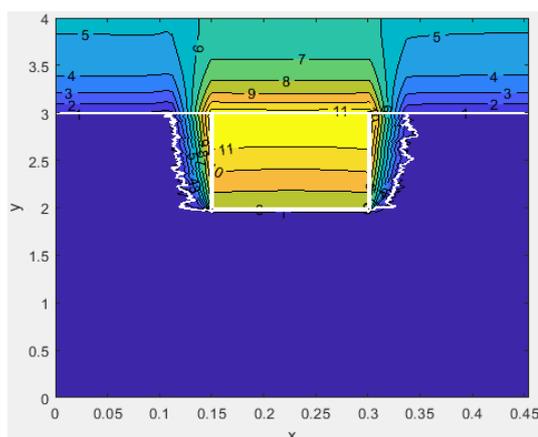


Рисунок 14 – Температурные поля в системе «крибот-лед-воздух» при отношении длины крибота к его ширине h/l (а) 0,15, (б) 0,1 и (в) 0,075 (при ширине крибота $h_{кр} = 0,15$ м)

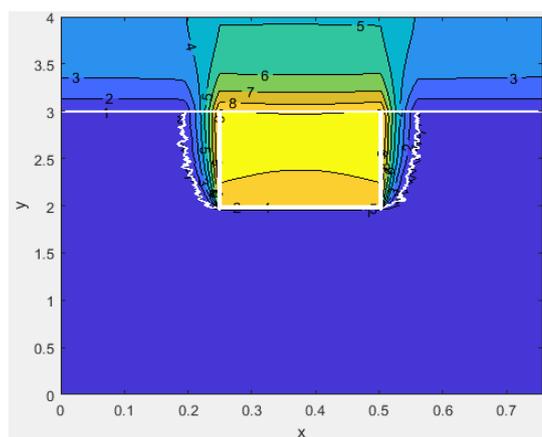
На рис. 15 представлены температурные поля при варьировании ширины крибота, как и в прошлом случае, при соотношении длины крибота к ширине.

Анализ температурных полей показывает, что геометрические параметры крибота могут оказывать значительное влияние на характеристики и условия движения зонда сквозь массивные ледяные структуры. Можно отметить, что увеличение ширины аппарата приводит к замедлению процесса его остывания. Это объясняется тем, что наиболее интенсивный теплообмен подобных аппаратов наблюдается именно с боковой стороны. В то же время стоит отметить, что увеличение ширины

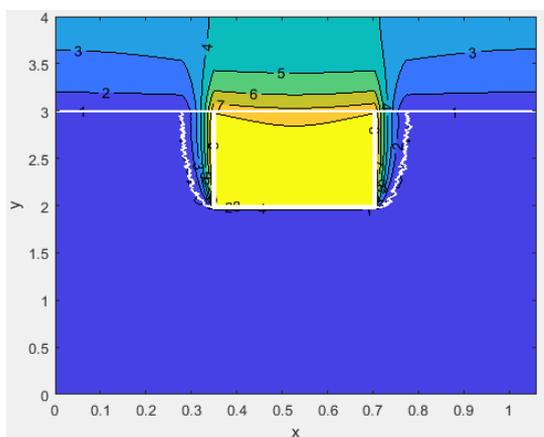
крибота приведет к формированию больших объемов воды, которую необходимо откачивать.



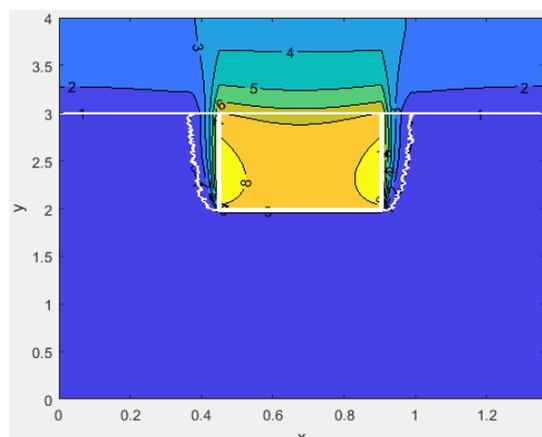
а)



б)



в)



г)

Рисунок 15 – Температурные поля в системе «крибот-лед-воздух» при отношении ширины крибота к его длине h/l (а) 0,15, (б) 0,25 (в) 0,35 и (г) 0,45 (при длине крибота $L_{кр}=1$ м)

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Захаровой Екатерине Алексеевне

Инженерная школа энергетики		Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова	
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Оклад инженера – 17000 руб., научного руководителя – 19500 руб.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений 20%</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Социальные выплаты – 30% от фактической заработной платы</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Планирование работ научного исследования</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Формирование сметы затрат на проект</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Анализ результатов научного исследования</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.04.18
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель Отделения социально-гуманитарных наук	Кузьмина Наталия Геннадиевна			23.04.18

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Захарова Екатерина Алексеевна		23.04.18

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Изучение современного материкового оледенения и всех видов ледников имеет большое значение для целого ряда естественных наук.

В связи с этим представляет интерес изучения тепло- и массопереноса в условиях плавления больших массивов льда локальными источниками тепловыделений. В условиях Антарктиды проведение натуральных экспериментов будет либо очень дорогостоящим, либо в некоторых случаях даже невозможным процессом. В этих условиях наиболее приемлемым является применение математического моделирования, позволяющего рассчитать скорость прохождения, необходимые параметры зонд-робота и наглядно продемонстрировать процесс плавления.

5.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения (табл.4)

Таблица 4 – Перечень работ и оценка времени их выполнения

№	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
1	Выдача и получение задания	Инженер, Научный руководитель	1
2	Аналитический обзор литературы	Инженер	13
3	Формирование физической и математической постановок	Инженер	2
4	Вывод математических коэффициентов	Инженер Научный руководитель	1
5	Составление программного кода	Инженер	16
6	Проведение вычислительных экспериментов	Инженер	3
7	Анализ результатов	Инженер	2

Продолжение таблицы 4

13	Оформление работы	Инженер	1
14	Прием и проверка работы	Научный руководитель	1
Итого		Научный руководитель	3
		Инженер	39

5.2 Смета затрат на проект

Для анализа эффективности проекта необходимо составить смету затрат, которая включает в себя все статьи расходов, кроме текущих затрат. Полученные результаты сводятся в таблицу.

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з.пл}} + K_{\text{с.о}} + K_{\text{проч}} + K_{\text{накл}}, \text{ руб.},$$

$K_{\text{мат}}$ – материальные затраты, руб;

$K_{\text{ам}}$ – амортизация компьютерной техники, руб.;

$K_{\text{з.пл}}$ – затраты на заработную плату инженера и научного руководителя, руб.;

$K_{\text{с.о}}$ – затраты на социальные нужды (отчисления), руб.;

$K_{\text{проч}}$ – прочие затраты, руб.;

$K_{\text{накл}}$ – накладные расходы, руб.

5.2.1 Материальные затраты

К материальным затратам относятся траты на канцелярские товары, принимаемые в размере 1000 руб.

5.2.2 Затраты на амортизацию компьютерной техники

Амортизация – это процесс переноса стоимости оборудования на созданную при его участии продукцию (выполненные работы, оказанные услуги) и создания источника для простого воспроизводства.

К амортизируемому оборудованию относится оборудование, используемое для реализации данного проекта с первоначальной стоимостью более 10000 руб.

Затраты на амортизацию компьютерной техники рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}}, \frac{\text{руб}}{\text{год}},$$

$T_{\text{исп.кт}}$ – время использования компьютерной техники, дней;

$T_{\text{кал}}$ – календарное время, принимается равным 365 дням;

$C_{\text{кт}}$ – цена компьютерной техники, принимаем равной 25 тыс. руб.;

$T_{\text{сл}}$ – срок службы компьютерной техники, принимаем равным 5 лет.

$$K_{\text{ам}} = \frac{39}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 535 \frac{\text{руб}}{\text{год}}.$$

5.2.3 Затраты на заработную плату

Оплата труда работников – цена трудовых ресурсов, зависящих от количества и качества труда. В проекте принимают участие 2 исполнителя: инженер и научный руководитель, соответственно, затраты на заработную плату рассчитываются по формуле:

$$K_{\text{з.пл}} = ЗП_{\text{инж}} + ЗП_{\text{НР}}, \text{руб.},$$

$ЗП_{\text{инж}}$ – заработная плата инженера, руб.;

$ЗП_{\text{НР}}$ – заработная плата научного руководителя соответственно, руб.

С учетом повышающих коэффициентов месячная заработная плата рассчитывается как:

$$ЗП_{\text{мес}} = K_1 \cdot K_2 \cdot ЗП_0, \text{руб.},$$

K_1 – коэффициент, учитывающий отпуск, принимается 1,1;

K_2 – коэффициент, учитывающий географическое расположение района (районный коэффициент), принимается 1,3;

$ЗП_0$ – месячный оклад, принимаемый для инженера 10-го разряда – 17000 руб., для старшего преподавателя – 19500 руб.

Тогда месячная заработная плата инженера и научного руководителя составит:

$$ЗП_{\text{инж.мес}} = 1,1 \cdot 1,3 \cdot 17000 = 24310 \text{ руб.},$$

$$ЗП_{\text{НР.мес}} = 1,1 \cdot 1,3 \cdot 19500 = 27885 \text{ руб.}$$

Фактическая заработная плата определяется по формуле:

$$ЗП_{\phi} = \frac{ЗП_{\text{мес}}}{21} \cdot n^{\phi}, \text{руб.},$$

21 – число рабочих дней в месяце;

n^{ϕ} – фактическое число дней в проекте.

Тогда фактическая заработная плата инженера и научного руководителя составит:

$$ЗП_{\text{инж.}\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 39 = 47404,5 \text{ руб.},$$

$$ЗП_{\text{НР.}\phi} = \frac{27885}{21} \cdot 3 = 3984 \text{ руб.}$$

5.2.4 Затраты на социальные отчисления

Социальные отчисления – это обязательные отчисления предприятий во внебюджетные социальные фонды: фонд занятости, фонд обязательного медицинского страхования, пенсионный фонд и фонд социального страхования.

Данные отчисления позволяют участнику системы обязательного социального страхования, за которого производились социальные отчисления, получать социальные выплаты.

Социальные выплаты принимаются 30% от фактической заработной платы:

$$K_{\text{с.о}} = 0,3 \cdot K_{\text{з.пл}}, \text{руб.},$$

$$K_{\text{с.о}} = 0,3 \cdot (47404,5 + 3984) = 15416,5 \text{ руб.}$$

5.2.5 Прочие затраты

Прочие затраты это комплекс статей затрат, не вошедших в другие элементы. К ним относятся: сборы, налоги, оплата услуг банков, связи, отчисления во внебюджетные фонды. Данные затраты могут быть ощутимой частью общей суммы затрат отчетного периода и, как правило, принимаются в размере 10% от суммы перечисленных ранее статей:

$$K_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з.пл}} + K_{\text{с.о}}), \text{руб.},$$

$$K_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (1000 + 535 + 47404,5 + 3984 + 15416,55) = 6834 \text{ руб.}$$

5.2.6 Накладные расходы

Понятие накладных расходов подразумевает траты, которые нельзя отнести непосредственно к технологическим процессам производства, сопровождающие процесс производства, но не входящие в стоимость работы и сырья. Другими словами, накладные расходы – косвенные издержки.

Принимаем косвенные расходы в размере 200% от размера заработной платы:

$$K_{\text{накл}} = 2 \cdot (47404,5 + 3984) = 102777 \text{ руб.}$$

Сведем полученные данные в таблицу 5.

Таблица 5 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, руб.
Материальные затраты	1000
Амортизация компьютерной техники	535
Заработная плата	51388,5
Социальные отчисления	15416,5
Прочие	6834
Накладные расходы	102777
Итого	177951

В ходе работы были сформулированы физическая и математическая постановки задач плавления. Выбран метод решения задач, проведены вычислительные эксперименты на примере плавления пресного льда криоботом с различными характеристиками: температурой, размерами, материалом. Выявлено, что при увеличении температуры поверхности криобота скорость прохождения толщи льда увеличивается.

Также результаты численного моделирования показали, что геометрические размеры криобота оказывают существенное влияние на характеристики и условия движения аппарата термического бурения. Так увеличение высоты приводит к существенному увеличению периода остывания. Соответственно, можно обоснованно предположить, что для стабильного бурения криобот должен обладать обеспечивающими оптимальный тепловой режим геометрическими характеристиками.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5Б4Б	Захаровой Екатерине Алексеевне

Инженерная школа энергетики		Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова	
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – процесс плавления ледяных структур. Вид сырья – массивные ледяные структуры.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	При разработке: – возможное появление усталости и головной боли; постоянная работа с компьютером и недостаточная освещенность помещения; несоблюдение влажностного и температурного режима воздуха При эксплуатации: – работа людей в условиях низких температур.
1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	При разработке: – исключения поражения людей электрическим током, отсутствие оголенных проводов. При эксплуатации: – при возникновении особо низких температур возможность обморожения.
2. Экологическая безопасность:	При разработке: – должная утилизация компьютерной техники минимизирует воздействие на окружающую среду. При эксплуатации: – используемый зонд-робот использует в качестве действующей силы лишь плавление, что позволяет не влиять на структуру льда и состав подледникового озера
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	При разработке: – возгорание вследствие неисправности ПК. При эксплуатации: – отсутствие контакта с человеком, что позволяет миновать ЧС.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	Проведение плановых тренировочных эвакуаций. Обучение персонала действиям в ЧС. Наличие средств индивидуальной защиты в доступном месте

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	23.04.18
--	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Отделения контроля и диагностики	Василевский М.В.	к.т.н., доцент		23.04.18

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5Б4Б	Захарова Е.А.		23.04.18

6 Социальная ответственность

Введение

В современных условиях развития рыночных отношений, любой организации, стремящейся занять лидирующие позиции и оказывать существенное влияние на процессы, протекающие в обществе, необходимо учитывать, что большинство ведущих компаний, сформировало собственную политику корпоративной социальной ответственности (КСО).

Корпоративная социальная ответственность – ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этичное поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения;
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется в ее взаимоотношениях.

Индивидуальная социальная ответственность возникает, когда человек перестает заботиться только о себе, когда в круг объектов заботы включает ближнее окружение, местное сообщество, среду обитания.

Изучение подледных водоемов Антарктиды ученые проводят уже несколько десятков лет. К одним из наиболее известных водоемов относят озеро Восток. Четырехкилометровый слой льда служит надежной преградой между внешним миром и озерной водой. В течение 15 миллионов лет жизнь в этом озере развивалась своим путем, пока неизвестно каким. Погибли ли находящиеся там живые существа, не справившись с исключительными для себя условиями, нашли ли особые пути выживания, используя эти условия в свою пользу, – неизвестно. Проект бурения льда над озером, как все надеются, поможет ответить на эти интригующие вопросы.

Процесс проникновения криобота – очень дорогостоящий и, несомненно, требующий предварительной теоретической проработки. Оборудование должно быть максимально компактно и эффективно. В этих условиях целесообразно использовать моделирование процесса, которое позволит максимально подобрать необходимые параметры аппарата и создать возможные условия его эксплуатации. На основании полученных данных робототехники смогут сконструировать аппарат, который сможет достигнуть поставленной цели – достичь подледных водоемов.

6.1 Производственная безопасность

Производственная безопасность – состояние защищенности производственного персонала от вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, условий и режимов труда на производстве.

В данном параграфе представлены вредные и опасные факторы, присутствующие при выполнении работ на рабочем месте (см. табл. 6). Если при воздействии фактора происходит ухудшение состояния здоровья, которое может привести к заболеванию, то такой фактор является вредным. К опасным факторам относят те, воздействие которых может привести к травме или гибели.

Таблица 6 – Опасные и вредные факторы производственной среды

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1	2	3	4
Освещенность	недостаточная освещенность рабочей зоны		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03
Вибрация	повышенный уровень вибрации на рабочем месте		СН 2.2.4/2.1.8.566-96
Шум	повышенный уровень шума на рабочем месте		СН 2.2.4/2.1.8.562-96
Электробезопасность		повышенное значение напряжения в электрической цепи,	ГОСТ 12.1.038-82

продолжение таблицы 6

		замыкание которой может произойти через тело человека	
	повышенный уровень электромагнитных излучений		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03
Состояние воздушной среды	повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны		СанПиН 2.2.4.548-96
Пожароопасность		повышенный уровень пожароопасности	НПБ 105-03

Подробнее рассмотрим каждый фактор.

6.1.1 Шум и вибрация в помещении

Основными вредными факторами при работах за компьютерами являются шум и вибрация. Основным источником шумов в помещении являются электродвигатели системы охлаждения ПЭВМ. Шум отрицательно сказывается на органах слуха, способствует быстрой утомляемости и возникновению головных болей.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 допустимый уровень шума в аудитории 75 дБ. Вентиляторы системы охлаждения ПЭВМ имеют частоту порядка 37 дБ, что находится в пределах нормы. Для снижения уровня шума возможно заключение вентиляторов в защитный кожух.

6.1.2 Освещенность

Для обеспечения нормативных условий работы в помещении проводится оценка освещенности рабочей зоны согласно СанПиНу 2.2.1/2.1.1.1278-03. Реальную освещенность рабочей зоны измеряют при помощи люксметра или определяют из паспорта производственного помещения. При отсутствии люксметра и паспорта освещенность определяется путем расчета, изложенного в методических указаниях.

Искусственное освещение – освещение, созданное искусственными источниками света. В зависимости от назначения подразделяется на следующие типы:

- 1) рабочее – освещение в местах работ, обеспечивающее необходимые регламентированные условия;
- 2) аварийное освещение включает в себя освещения безопасности и эвакуации;
- 3) дежурное – освещение в нерабочее время.

Правильное освещение рабочего места позволяет человеку поддерживать хорошее самочувствие и максимально выполнять свою работу. Для этого, составлен краткий список главных требований по освещению в рабочей зоне.

6.1.3 Состояние воздушной среды

Микроклимат помещения включает в себя температуру воздуха, его влажность и скорость движения на рабочем месте.

1. Оптимальная температура помещения 21°C-25°C;
2. Относительная влажность воздуха 40%-60%;
3. Регулярное проветривание помещения;
4. Проведение ежедневной влажной уборки;
5. Содержание вредных химических веществ в воздухе помещений, предназначенных для использования ПЭВМ во всех типах образовательных учреждений не должно превышать предельно допустимых среднесуточных концентраций для атмосферного воздуха в соответствии с действующими санитарно–эпидемиологическими нормативами;
6. Скорость движения воздуха порядка 0,1-0,3 м/с.

6.1.4 Электробезопасность

Электробезопасность – это совокупность мероприятий и средств, нормативных документов, защитного снаряжения, направленная на защиту людей от воздействия электрического тока.

К факторам опасного и вредного воздействия, связанным с использованием электроэнергии, относятся:

- 1) Воздействие ЭМИ – электромагнитного излучения;

- 2) Воздействие электрического и магнитного полей;
- 3) Протекание электрического тока через организм;
- 4) Высокое напряжение электросети, замыкание.

В отношении опасности поражения людей электрическим током существуют следующие классы помещений:

1. Помещения без повышенной опасности;
2. Помещения с повышенной опасностью;
3. Особо опасные помещения;
4. Территории размещения наружных электроустановок.

Согласно данной классификации, компьютерная аудитория библиотеки относится к помещениям без повышенной опасности, так как отсутствуют факторы, создающие повышенную или особую опасность, а именно:

- 1) токопроводящая пыль;
- 2) относительная влажность воздуха >75 %;
- 3) высокая температура воздуха (>35 °С);
- 4) токопроводящие полы;

При работе с ПЭВМ допустимые уровни электромагнитных полей указаны в таблице 7.

Таблица 7 – Разрешенные уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ

Наименование параметров		ВДУ ЭМП
Напряженность электрического поля	диапазон частот 5 Гц - 2 кГц	25 В/м
	диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	диапазон частот 5 Гц - 2 кГц	250 нТл
	диапазон частот 2 кГц – 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м
Электростатический потенциал экрана видеомонитора		500

6.1.5 Пожароопасность

Пожароопасность – состояние объекта защиты, характеризующееся возможностью возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара.

Помещения согласно пожарной и взрывопожарной опасности делятся на группы А, Б, В, Г и Д. Помещение компьютерного класса библиотеки ТПУ относится к группе Г – умеренная пожароопасность.

Для предотвращения возникновения пожароопасной ситуации необходимо до начала работы за компьютером убедиться в исправности розеток, электропроводов, заземления компьютера.

Основная угроза при работе за компьютером, как было сказано ранее, это электрический ток, который может так же стать причиной пожара. Чтобы такого не произошло необходимо соблюдать несколько правил:

- 1) Очистка электрооборудования от пыли и грязи только в выключенном состоянии;
- 2) Без необходимости часто не включать и не выключать ПК;
- 3) При обнаружении нарушения изоляции трубопроводов, неисправности компьютера не проводить работу за данной ЭВМ;
- 4) Не использовать огнеопасных веществ на рабочем месте.

Пожар может быть следствием как электрического, так и неэлектрического процесса. При возникновении пожара персонал должен немедленно принять необходимые меры для его ликвидации, одновременно оповестить о пожаре администрацию.

Согласно нормам пожарной безопасности для помещений, в которых используются ЭВМ, первичным средством пожаротушения служат огнетушитель углекислотный ОУ-5, либо хладоновый ОХЛ-10. Они позволяют потушить установки и материалы с напряжением до 1000 В.

Организационные и технические мероприятия, направленные на пожарную профилактику, позволят снизить вероятность возникновения

пожарноопасной ситуации, либо предотвратить распространение пожара и гарантировать безопасность людей.

6.1.6 Производственная безопасность при эксплуатации проектируемого решения

Эксплуатация проектируемого решения включает в себя работу за компьютером, а также в условиях низких температур. Однако большую часть времени люди проводят в помещении, наблюдая за ходом процесса у мониторов, что позволяет снизить риск получения обморожения в случае особо низких температур.

6.2 Экологическая безопасность проекта

6.2.1 В условиях разработки

Экологический вред в данной работе может нанести неверная утилизация применяемого оборудования – ПЭВМ, электропроводов, ламп.

Компьютеры и оргтехника содержат драгметаллы, вредные вещества: свинец, мышьяк, ртуть. Мониторы, например, могут быть отнесены к классу опасных отходов, поскольку за годы работы в дисплеях накапливается радиация (ст. 1 Федерального закона от 24.06.1998 N 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления"). При наличии в ПЭВМ рабочих компонентов их можно использовать повторно в другом оборудовании, нерабочие необходимо отправлять на переработку или утилизацию. Утилизацию могут проводить только специализированные лицензированные организации (постановление Правительства РФ от 26.08.2006 N 524).

Грамотная утилизация позволит отдельные виды отходов (металлы, лом, пластик) повторно использовать в производстве, снизить количество вредных отходов и уменьшить размеры свалок, которых с каждым годом все больше и больше.

6.2.2 В условиях эксплуатации

В последние годы при глубоком бурении в ледниках используют смесь углеводородной жидкости типа керосина (авиационные топлива или

специальные растворители) с дихлорфторэтаном. Эта смесь не теряет текучести при крайне низких температурах (до -60°C), а плотность ее примерно равна плотности льда. Но, к сожалению, для живых организмов смесь очень токсична.

Особенно опасны насыщенные углеводороды, входящие в состав керосина. Даже при малых концентрациях (более 1 мг/м^3) они оказывают отравляющее действие на низшие формы жизни в водоемах и водостоках. С другой стороны, экспериментально доказано, что промывочная жидкость и сама содержит бактерии различного. Поэтому при контакте с подледниковой водой она может оказать не только подавляющее действие на жизнеспособность микроорганизмов, находящихся в подледниковой воде, но и вызвать попадание в водоем посторонней микрофлоры. Вот почему гренландские образцы оказались загрязненными.

Использование криобота позволяет избежать ранее изложенных проблем, так как для его работы не создается шахта, а воздействие на лед происходит только за счет высокой температуры.

6.3 Безопасность при чрезвычайных ситуациях

6.3.1. В условиях разработки

В ходе математического моделирования на ПЭВМ наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией (ЧС) является пожар. В целях безопасности применяют систему противопожарной защиты – совокупность технических средств и организационных мероприятий, направленных на уменьшение материального ущерба от пожара и предотвращения воздействия его на людей.

Противопожарная защита включает в себя:

- наличие противодымной защиты, пожарной сигнализации и средств оповещения о пожаре;
- наличие и применение первичных средств пожаротушения;

- использование в конструкции помещения огнестойкие и малогорючие материалы;
- эвакуация людей.

6.3.2 В условиях эксплуатации

Проводимые учеными исследования не влекли за собой возникновения чрезвычайных ситуаций. Чрезвычайная ситуация может возникнуть лишь при мониторинге процесса (противопожарная защита в данной ситуации описана ранее).

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно ГОСТ 12.2.032-78 Конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. При проектировании оборудования и организации рабочего места следует учитывать антропометрические показатели женщин (если работают только женщины) и мужчин (если работают только мужчины); если оборудование обслуживают женщины и мужчины - общие средние показатели женщин и мужчин.

Конструкцией производственного оборудования и рабочего места должно быть обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием:

- высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног;
- высоты сиденья и подставки для ног (при нерегулируемой высоте рабочей поверхности).

Согласно СанПиНу 2.2.2/2.4.1340-03 основными требованиями к ПЭВМ выступают:

- Конструкция ПЭВМ должна обеспечивать возможность поворота корпуса в горизонтальной и вертикальной плоскости с фиксацией в заданном положении для обеспечения фронтального наблюдения экрана ВДТ.

– Дизайн ПЭВМ должен предусматривать окраску корпуса в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус ПЭВМ, клавиатура и другие блоки и устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность с коэффициентом отражения 0,4-0,6 и не иметь блестящих деталей, способных создавать блики.

Выводы:

Источники загрязнения окружающей среды не однозначны по своим качественным и количественным показателям воздействия на окружающую среду. Особое значение имеет характер опасности воздействия источников на окружающую среду. Среди всех ингредиентов при бурении, оказывающих влияние на окружающую среду, основными являются отработанные буровые растворы, шламы, сточные воды и различные реагенты. Все эти вещества являются с точки зрения воздействия на окружающую среду опасными, многие из которых даже токсичными.

Значительную токсичность имеют промывочные жидкости, содержащие твердую фазу, нефтепродукты, а также ПАВ. Малотоксичны промывочные жидкости с низким содержанием твердой фазы (и без нее) и с добавками органических водорастворимых полимеров природного происхождения или синтетических. ПДК водорастворимых полимеров в воде составляет примерно 6 мг/л. Криобот может работать при отсутствии шахт, что позволяет минимизировать вредное воздействие на окружающую среду.

Стоит отметить, что зонд-робот позволит определить состав и возраст толщ льда, биологический состав подледных водоемов и наличие там микроорганизмов, тем самым внесет вклад в естественные науки.

Деградация окружающей природной среды, прежде всего, сказывается на здоровье человека и состоянии его генетического фонда. Более 20% территории России находится в критическом экологическом состоянии, в районах экологического бедствия и более 50% населения имеет ослабленное здоровье. Экологический кризис проявляется в неспособности

правоохранительных органов обеспечить надежный контроль и надзор за выполнением законов об охране окружающей среды. Именно поэтому, люди должны стараться минимизировать отрицательное воздействие, ведь каждый человек ощутит на себе обратную отдачу со стороны природы.

Заключение

В работе представлена новая математическая модель процессов тепло- и массопереноса, протекающих в условиях плавления льда при движении криобота. Она учитывает комплексное (совместное) протекание основных процессов. По результатам численного моделирования установлено:

1 Геометрические характеристики могут оказывать влияние на динамику плавления льда и движение криобота. Однако основным параметром является длина роботизированного комплекса. Исходя из полученных результатов, оптимальная высота аппарата составляет 1 м, что соответствует ранее разработанным прототипам.

2. Повышение начальной (в момент времени $\tau=0$) температуры криобота (с 400 К до 800 К) приводит к изменению динамики плавления льда.

3. По результатам численного моделирования установлено, что повышение мощности тепловыделения зонд-робота может оказывать значительное влияние на характеристики и условия плавления льда. Увеличение с $1,24 \cdot 10^3$ Вт до $1,24 \cdot 10^6$ Вт приводит к повышению температуры криобота.

4. При моделировании совместно протекающих процессов тепло- и массопереноса в условиях плавления льда установлено, что скорость прохождения криобота практически не зависит от мощности его тепловыделения, геометрических характеристик и температур. Последнее обусловлено тем, что при фазовых переходах в массиве льда формируется очень узкая (практически бесконечно тонкая) зона локального теплостока (фронт плавления).

Также, стоит отметить, что при фазовых переходах образуется неоднородная гетерогенная структура, состоящая из жидкой и твердой фаз со значительно отличающимися характеристиками. При этом жидкая фаза

обладает очень высокой теплоемкостью (4,2 кДж/(кг·К)). Комплекс вышеприведенных факторов создает тепловой барьер, тормозящий процесс плавления.

6. Моделирование процессов позволяет инициировать различные ситуации, возникающие при эксплуатации аппарата. Благодаря этому, можно максимально приблизиться к необходимым параметрам криобота, предотвратить возможные аварии. Численное решение требует невысоких энергетических и материальных затрат, не оказывает негативного влияния на окружающую среду.

Крибот не использует ядовитых жидкостей, не разрушает структуру льда и не влияет на флору микроорганизмов, обитающих в подледных водоемах.

Список публикаций студента

1. Ekaterina Zakharova, Arkadii Zakharevich and Nadegda Gutareva. The dynamics of ice melting in the conditions of crybot movement //MATEC Web of Conferences 110, 01090 (2017).– Available at: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/24/mateconf_hmt2017_01090/mateconf_hmt2017_01090.html

Список использованных источников:

1. Васильев Н.И. Рациональная технология бурения скважин в ледовых массивах с использованием электромеханического снаряда на кабеле: Дис. док. техн. наук: 25.00.15/ СПб. гос. горн. инст-а. СПб., 2004. – 212 л.
2. Васильев Н.И., Дмитриев А.Н., Липенков В.Я. Результаты бурения скважины 5Г на Российской станции «Восток» и исследования кернов льда// Записки горного журнала. – 2016. – С.161–169.
3. Озеро «Восток» – капсула древности [Электронный ресурс]: МЭФ «ИНТЕНТ». URL: <http://www.fund-intent.ru/Article/Show/1257>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 15.03.2018 г.
4. Талалай П.Г. Проникновение в подледниковые озера: планы и реальность // Природа. – 2006. – №9. – С. 45–53.
5. Булат С.А., Васильева Л.П., Пети Ж.Р. и др. Молекулярно-биологическое исследование бактериального состава жидкости для бурения из скважины 5Г-1, станция Восток, Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2003. №74.– С.88-102.
6. Классификация способов бурения. Их сущность и область применения. [Электронный ресурс]: Крибс Ми. URL: https://cribs.me/burenieskvazhin/klassifikatsiya-sposobov-bureniya-ikh-sushchnost-i-oblast-primeneniya_, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения:
7. Васильев Н.И. Глубокое бурение антарктического ледникового покрова как метод исследования палеоклимата //Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. №76.– С.78–88.
8. Полякова Л.О. Двумерная задача Стефана для переохлажденных структур: диплом. работа. Высш. шк. эконом, Москва, 2013.

9. Парфенова Г.В., Чумаченко Е.Н. Анализ двухфазной задачи Стефана для процесса перемещения криобота // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2010.– С.232–235.
10. Чумаченко Е.Н., Данхэм Д. и др. Компьютерное моделирование проникновения криобота под ледяной покров Европы // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011.– №6(1) – С.205-213.
11. Зотиков И.А. Антарктический феномен — озеро Восток // Природа. – 2000. – №2.– С.61–68.
12. Philbert K. The thermal probe deep-drilling method by EGIG in 1968 at Station Jarl-Joset, Central Greenland // Ice-Core Drilling: Proc. of the Symp. Univ. of Nebraska, Lincoln, USA, 28–30 Aug. 1974. Lincoln, 1976. P. 117–132.
13. Ulamec S., Biele J., Funke O., Engelhardt M. Access to glacial and subglacial environments in the solar system by melting probe technology // Rev. Environ. Sci. Biotechnology. 2007. 6. P. 71–94.
14. Семенов Д.В. Криобот плавит льды // Природа. – 2002. – №12.– С.75.
15. Данилюк И.И. О задаче Стефана/ И.И. Данилюк// Успехи математических наук. – 1985.– Т.40. – №5.– С.133–185.
16. Jozef Stefan: His Scientific Legacy of the 175th Anniversary of His Birth/ J.C. Crepeanu (Ed.).M.–Idaho –USA, 2013.
17. Полежаев Ю.В. Тепловая защита/ Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич.; под. общ. ред. А.В. Лыкова. М: Энергия, 1976. – 392 с.
18. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химической технологии. СПб: НПО «Профессионал». – 2004. –Ч.1.
19. Основы геокриологии. В 5 ч. Ч.4 Динамическая геокриология // под ред. Э.Д. Ершова. М.: Из-во МГУ. 2001. – 688с.
20. Кузьмин А.В., Саломатов В.В., Пузырев Е.М. Некоторые результаты теории микрослоя (обзор). Теплоф. высок. темпер. – 1978. – №5.

21. Пузырев Е.М., Кузьмин А.В., Саломатов В.В. Гидродинамические и теплофизические аспекты теории микрослоя (обзор). // Инж.-физ. журнал. – т. 35. – 1978.
22. Iacob M. Heat Transfer. – 1949. – Vol. 1. – P.614.
23. Майкик К., Розеноу J. «Труды америк. общ-ва инж.-мех. Серия С. Теплопередача». – 1969. – №2.
24. Hamburger L.G. Int. J. Heat and Mass Transfer. –1965. – Vol. 8. – №11.–P. 1369.
25. Rohsenow W.M., Clark I.A. Trans. ASWE. –1951. – s. C. – v.73. –P. 609.
26. Rohsenow W.M. Trans. ASWE, s. C. –1952. – v.79. –P. 969.
27. Толубинский В. И. «Изв. вузов. Энергетика». – 1963. – №10. – С. 77-83.
28. Fontana D.M. Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1972. – v.15. – №4. – P. 707.
29. Han Chi-Ven, Griffith P., Part. I, Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1967. – v.8. – №6. – 887.
30. Robin T.T. Ir., Snyder N.W. Int. J. Heat and Mass Transfer. – 1970. – v. 13. – №2.
31. Moore F.D., Mesler R. B. AIChE J. –1961. – v. 7. – №4.
32. Rogers T.F., Mesler R. B. AIChE J. – 1964. – v. 10. – №5.
33. Hospeti N.B., Mesler R. B. AIChE J. –1965. – v. 11. – №4.
34. Cooper M. G., Lloyd A. I. P. J. Sci. Inst. –1965. – v.42.
35. Cooper M. G., Lloyd A. I. P. Proc. of the Third Int Heat Transfer Conf. – Chicago. – 1966.
36. Folz G.E., Mesler R.B. AIChE J. –1970. – v. 16. – №1.
37. Sharp R. R. NASA, TND-1997. //Lewis Research Centre. – Ohio. – 1964.

38. Torikai K., et al. Third Int. Peacefull Uses of Atomic Energie. –1965. – v.8. – 146.
39. Torikai K., Jamasaki T. Processings of the Third Int. Heat Transfer Conf. – Chicago. – 1966.
40. Katto Y., Iokova S. Processing of the Third Int. Heat Transfer Conf. – Chicago. – 1966.
41. Ouwerkerk Van H. I. The Role of the Evaporatig Microlayer and Dry Surface Areas in Bolling, Drukkerij Demmenic N. V. – Leiden. – 1970.
42. Jawuarek H. H. Int. J. Heat and Mass Transfer. –1969. – v. 12. – № 8.
43. Cooper M. G., Lloyd A. I. P. Int. J. Heat and Mass Transfer. –1969. – v.12. – №8.
44. Олэндер, Уоттс. «Труды америк. общ-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача». – 1969. – №1.
45. Ouwerkerk Van H. J. Int. J. Heat and Mass Transfer. –1971. – v.14. – №9.
46. Torikai K. Bull. of the ISME. –1967. – v.10. – №38.
47. Смирнов Г. Ф. Инж.-физ.журнал. – 1975.– т. 28.– №3.
48. Johnson M. A. Ir., Javier de la Pena, Mesler R. B., AIChE J. –1966. – v. 12.
49. Hospeti N. B., Mesler R. B. AIChE J. –1969. – v.15. – №2.
50. Dzakowic G. S., Frost W., Fourth. Int. Heat Transfer Conf. – 1970. – v.5.
51. Купер М., Мурри Дж. Тепло- и массоперенос. – Минск. – 1972.– Т.9. – Ч.1.
52. Cooper M.G., Viyuk R. M. Fourth. Int. Heat Transfer Conf. –1970. – v. 5.
53. Григорьев В. А. и др. «Труды Московского энергетического института». – М., 1974.– вып. 198.
54. Cooper M.G., Int. Heat and Mass Transfer. –1969. – v. 12. – №8.

55. Plesset M. S., Zwick S. A. J. Appl. Phys. –1952. – v. 23. – №1.
56. Григорев В.А. и др. «Изв. вузов. Энергетика». –1974. – №7.
57. Cole R., Shulman H. L. Int. J. Heat and Mass Transfer. –1966. –v. 12. – №12.
58. Бородин С.Л. Численные методы решения задачи Стефана// Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Том 1. – №3(3) – С.164–175.
59. Кутателадзе С. С. Теплоотдача при конденсации и кипении. – М.: Машгиз. –1952.
60. Кутателадзе С. С., Стырикович М. А. Гидравлика газо-жидкостных систем. – М.: ГЭИ. – 1958.
61. Лабунцов Д. А. В сб.: Теплообмен и физическая газодинамика. – М.: «Наука». – 1974.
62. Боришанский В. М. В сб.: Теплообмен при конденсации и кипении. Труды ЦКТИ. – 1965.– вып. 57.
63. Толубинский В. И. и др. В сб.: Теплофизика и теплотехника. – Киев. – 1971.– вып. 19.
64. Чумаченко Е.Н., Полякова Т.В и др. Математическое моделирование в нелинейной механике. – Москва. – 2009.
65. Кузнецов Г.В, Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учеб. пособие. /Г. В. Кузнецов, М.А Шеремет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.