

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Моделирование свободной конвекции под действием термобарботажа.

Исполнитель	Харченко Инга Сергеевна
	(фамилия, имя, отчество)

Руководить кандидат географических наук, доцент (ученая степень, ученое звание)

Чанцев Валерий Юрьевич

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат географических наук (ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна (фамилия, имя, отчество)

«___» ____ 2022 г.

Санкт-Петербург 2022

Оглавление.

Введение
Глава 1. Проблема замерзающих портов и ее решение 5
1.1. Проблема замерзающих портов
1.2. Опыт использования барботажных установок
1.3. Описание барботажной установки 14
Глава 2. Материалы и методы исследования17
2.1. Математическое описание процесса барботажа17
2.1.1. Зависимость параметров воздушно-пузырьковой завесы от величины
объемного расхода воздуха17
2.1.2. Аналитическое решение уравнения баланса сил, действующих на
воздушный пузырь
2.1.3. Уравнения для скорости свободного всплытия воздушного пузыря в
воде в стоксовом, переходном и турбулентном режиме21
2.2. Описание 2D-модели пристеночного барботажа24
2.3. Валидность модели
Глава 3. Численные эксперименты
3.1. Исходные данные и постановка задачи
3.2. Эксперимент №1 34
3.3. Эксперимент №2 40
3.4. Эксперимент №3
Заключение
Список источников

Введение.

В данной работе исследуется проблема замерзающих портов, то есть портов, в которых круглогодично в холодный сезон образуется лед, препятствующий привычной навигации. Таким образом, возникает ситуация, которая требует дополнительных действий со стороны администрации порта, направленных либо на разрушение ледяного покрова, либо на предупреждение его образования.

С этой проблемой сталкиваются множество стран, которые территориально расположены в умеренном, субарктическом и арктическом климатических поясах. Это Россия, Канада, Норвегия, Финляндия и т.п.

Одним из решений является использование пузырьков воздуха вдоль линии причала для разрушения или предупреждения образования льда, который нарушает привычные условия стоянки и навигации судов. Ключевым моментом является тепловой запас водной массы.

Таким образом, система, состоящая из источника подаваемой теплой воды и барботажной установки у стенки причала, может решить исследуемую проблему.

Целью данной работы является исследование динамики конвективного перемешивания, возникающего вследствие термобарботажа в замерзающих портах Арктического региона, с помощью численного моделирования в рамках мелкомасштабной изменчивости.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Изучить методы использования барботажных установок в ряде акваторий и их специфику;

2. Описать структуру негидростатический модели циркуляции воды под действием барботажа;

3. Выполнить численные эксперименты, направленные на исследование возникающей конвекции и ее влияния на поля температуры и солености;

4. Проанализировать полученные результаты.

Объектом исследования является покрытая льдом часть замерзающего порта. Предметом исследования – образовавшийся под действием системы источника подаваемой воды и барботажной установки конвективный обмен.

Глава 1. Проблема замерзающих портов и ее решение.

1.1. Проблема замерзающих портов.

С проблемой замерзающих портов сталкиваются множество стран, которые территориально расположены в умеренном, субарктическом и арктическом климатических поясах. Это Россия, Канада, Норвегия, Финляндия и т.п.

Интенсивность ледообразования зависит от географического расположения акватории, типа зимы (суровая, мягкая, нормальная), от глубины акватории, от наличия теплых течений. По этим факторам порты можно разделить на две категории – замерзающие и незамерзающие.

Разницу между ними нетрудно проследить, исходя из перечисленных факторов. Например, из-за своего северного расположения акватория порта Санкт-Петербурга, как и многих других портов Балтийского моря, замерзает, что естественно не позволяет работать зимой в нормальных условиях. То есть порт является замерзающим, однако организация климатических факторов по типу мягкой зимы могут повлиять на образование льда, то есть отсрочить приостановку навигации или вовсе ее не останавливать в аномально теплый сезон.

Еще одним примером послужит порт в Калининграде. Он является незамерзающим, так как находится под влиянием теплых воздушных масс, нагретых Гольфстримом. Они переносятся ветрами Атлантики в осенний и зимний периоды, вследствие этого поддержание навигации в эти сезоны не требует дополнительных мер.

В данной работе исследуются замерзающие порты, то есть порты, в которых круглогодично в холодный сезон образуется лед, который препятствует привычной навигации. Таким образом, возникает ситуация,

которая требует дополнительных действий со стороны администрации порта, направленных либо на разрушение ледяного покрова, либо на предупреждение его образования.

Наиболее распространенный механизм ответа на данную проблему – это разрушение льда в сезоны его образования, то есть ледовая проводка судов с помощью ледоколов в акваторию порта, механическое разрушение образованных полей и очищение от дрейфующих обломков льда и т.п. Это устойчивый механизм, в котором уже налажены все логистические решения, и они являются достаточно эффективными для ряда ситуаций.

Однако с некоторыми проблемами портовые ледоколы не справляются, или их использование является затратным по времени и усилиям, что, соответственно, влияет на экономическую составляющую.

Примером такой проблемы служит накопление и уплотнение льда, который имеет тенденцию прикрепляться к стенке пирса. Так называемый ледяной воротник образуется вследствие многократного разрушения льда в портовой гавани и ускоренного роста ледяной каши, которая накапливается и уплотняется у стен пирса из-за движения судов (рис.1.1.). Это приводит к затруднению доступа к причалу и пирсу, а решение проблемы отнимает много времени даже при помощи портовых ледоколов [1].

Экономические последствия тяжелых ледовых условий в портах накапливаются главным образом в суровые зимы. Они поступают из нескольких источников, таких как [2]:

• Издержки для отрасли при задержке грузов и поставок;

• Затраты судовладельцев на топливо, сверхурочные и другие расходы, когда графики сталкиваются с соблюдением специальных мер и не пропускаются к причалу;

• Расходы судовладельцев на помощь ледокольного буксира в районе порта;



Рис.1.1. Схематичный процесс накопление льда в акватории порта [1].

• Расходы на ремонт для судовладельцев и порта, когда при маневрах в порту используется чрезмерная сила;

• Расходы порта на ледокольную проводку и сверхурочную работу;

• Затраты на экстремальные меры, такие как подъем льда из бассейна гавани с помощью кранов или разрушение ледяного воротника, прикрепленного к стене пирса, с помощью пневматических инструментов в экстремальных условиях.

Очевидно, что описанный выше процесс накопления льда и его последствия требуют практически всех расходов порта и судовладельцев из списка в том или ином объеме. Эти затраты выплачиваются ежесезонно и растут при аномально суровых зимах.

Помимо использования механических методов борьбы с накопившимся льдом в порту, можно попробовать помешать его образованию, что достигается с помощью термических методов. Например, путем увеличения теплоотдачи от прилежащего слоя воды или снижения температуры

кристаллизации, что можно осуществить с помощью барботажных установок, создающих воздушно-пузырьковую завесу [3].

Некоторые финские гавани с переменным успехом использовали пузырьки воздуха вдоль линии причала для борьбы со льдом. Ключевым моментом является тепловой запас водной массы. Опыт показал, что, когда устраняется ледяной воротник, и уплотненный слой ледяной каши становится рыхлым и не чрезмерным на линии причала, навигационные проблемы со льдом в значительной степени решаются [1].

Данный подход использовался и развивался во многих странах, сталкивающихся с проблемой замерзающих портов и нарушению навигации в холодный сезон. В следующей части будут рассмотрены несколько примеров таких исследований.

1.2. Опыт использования барботажных установок.

Использование воздушных барботажных систем для подавления образования льда является методом, который применялся в различных ситуациях с разной степенью успеха.

Впервые проблемой заинтересовался этот автор [4] и сообщил о своих наблюдениях за двумя воздушными барботажными установками в Канадской Арктике на Восьмой Международной конференции по прибрежной инженерии. Причиной проектирования установок послужило разрушение свайных конструкций вследствие образования толстого слоя льда, который захватывает сваи и перемещает их вверх и вниз в ответ на прилив. В апреле 1961 года автор исследовал барботажную систему и ее океанографическую среду в Кембриджском заливе, штат Нью-Йорк, где организованная система не выполнила обещанного, и причал был поврежден. А в апреле 1962 года — в Туктояктуке, штат Нью-Йорк, в котором барботажная установка успешно

функционировала продолжительное время и предупредила повреждения причала. Результатами послужили больше появляющиеся в ходе исследования вопросы, чем ответы на них.

Автор продолжает свое исследование и представляет в статье [5], где предпринимает попытку разработать некоторые руководящие принципы для надлежащего использования теплового резерва, который, по мнению автора, является решением проблемы плавления льда. Поскольку нет достаточных экспериментальных данных, статья представляет собой попытку поставить на более рациональную основу конструкцию воздушных барботеров для таяния ледяного покрова и поддержания свободных ото льда районов в озерах и в море, а также дать простые рабочие правила для практикующего инженера, чтобы помочь ему в эффективном проектировании установок.

Авторы статьи [6] исследовали условия формирования и разрушения ледяного покрова во внутренних частях заливов и фьордов в прибрежных районах юго-западной Гренландии. Результаты их полевых наблюдений за образованием льда в заливе показали, что некоторое уменьшение образования льда может быть достигнуто путем создания вертикального перемешивания воды в заливе. Чтобы проверить гипотезу, зимой 1966/67 авторы провели пилотный эксперимент с двумя пластиковыми трубами, в которые подавался воздух от стандартного компрессора и которые были помещены на дно во внутреннем конце залива.

В периоды со сравнительно легким ледяным покровом над каждой трубкой образовывались отверстия диаметром 1-1,5 м, при более холодной зиме диаметр отверстий уменьшался (около 0,5 м). В некоторых случаях они не образовывались, но было ясно, что лед над трубками был значительно тоньше, чем в других местах.

То есть, эксперимент показал, что очень значительное улучшение ледовых условий может быть достигнуто с помощью правильно

спроектированной системы воздушных пузырей. В сочетании с частым движением судов в гавани представляется весьма вероятным, что воздушнопузырьковая система может обеспечить вполне приемлемые условия навигации в течение всего зимнего периода.

В 1974 году двумерные системы пузырьков линейного источника были проанализированы Г. Д. Эштоном [7] в попытке сделать доступным инструмент, который может быть использован при проектировании установки барботера. Этот анализ представлял собой стационарную оценку скорости таяния ледяного покрова над барботажной системой, предсказанной на основе входных переменных (глубина, скорость выпуска воздуха, температура воды), что являлось несколько идеализированной картиной.

Моделирование, представленное в [8], использует анализ установившегося состояния, разработанный ранее Эштоном, и выполняет его во времени с каждым новым условием, определяемым из результатов предыдущего временного шага.

Пример результата моделирования представлен для участка Говардс-Бей в Супериоре, штат Висконсин, с использованием данных о температуре за зимний период 1973-1974 гг. Натуральный эксперимент длился 40 суток, численный – 80 суток. Результаты иллюстрируют изменение ширины открытой акватории, то есть очевидное влияние эффекта перемешивания вследствие барботажа на ледовый покров. Помимо хорошего соответствия модельных и натуральных данных, результаты выдержали проверку с данными, представленными другими авторами.

В статье [1] авторы использовали численный метод потока и теплопередачи для прогнозирования эффективности воздушных барботеров в борьбе с накоплением льда в гаванях.

Основываясь на расчетах, пузырьки воздуха вызывают крупномасштабную циркуляцию воды вблизи причала. Если масса воды даже незначительно превышает температуру замерзания, большое количество тепловой энергии отводится в зону причала для таяния льда на краю больших движущихся водоемов. При воздействии барботеров на потери тепловой энергии эффект плавления концентрируется на линии причала со скоростью плавления, соответствующей более чем 100 Вт/м2. Этого достаточно для предотвращения уплотнения ледяного воротника на линии причала. В то время как новый лед неоднократно прижимается к линии причала, слякоть тает, а грубый лед остается рыхлым, облегчая доступ к причалу. Условия стоянки могут быть значительно улучшены за счет барботажа воздуха в северной части Балтийского моря при наличии только геотермальной тепловой энергии, и даже более того, если термальные стоки могут быть привлечены к циркуляции воды [1].

Также авторами упомянут [1] наиболее удачный пример использования барботажных установок в порту Муссало, Котка, гавань которого имеет роскошь иметь термальные стоки, дрейфующие в район гавани. В Котке теплая вода тепловой мощностью 50-200 МВт сбрасывается в море зимой с электростанции Муссало. Эта теплая вода дрейфует вдоль побережья примерно на 2 км в виде слоя толщиной 3 м под ледяным покровом. Воздух, бурлящий вдоль линии причала бассейна контейнерной гавани Муссало, затем втягивает значительную часть этой теплой воды в бассейн гавани для борьбы со льдом. Сочетание термальных стоков и пузырьков воздуха оказывает существенное влияние на ледовую обстановку в бассейне гавани (см. рис.1.2).

Авторы продолжили свои труды в статье [2], где показали, как моделирование потока и теплопередачи под действием циркуляции, возникающей с помощью барботажных установок, может быть использовано для проектирования систем управления льдом в новой гавани Хельсинки

Вуосаари. Были изучены пять вариантов проектирования с различными местами теплого водоснабжения и расположением барботеров с использованием численного моделирования.

Найдено решение, которое обеспечивает довольно равномерное таяние льда для причалов в конкретной ситуации. Полученная установка с барботажными линиями обеспечивает расчетную экономическую эффективность более 70% в сравнении с инженерным решением ранее. В течение экстремальной зимы в бассейне главной гавани будет растоплено около 400000 м³ грубого льда. Ожидается, что эксплуатационные ледовые условия останутся без проблем даже в течение экстремальных зим. Теоретическая окупаемость этой системы оценивается в 3 года [2].

Чтобы окончательно сделать выводы о теоретической и практической обоснованности метода воздушно-пузырьковой завесы, следует рассмотреть механизм действия барботажной системы и его влияния на физические и динамические процессы в акватории.



Рис.1.2. Сравнение ледовых условий в бассейне южной гавани Хельсинки и в бассейне контейнерной гавани Котка-Муссало, 31.01.2003 г. Последний оснащен системой воздушных барботеров, отводящих тепловые стоки в бассейн гавани [1].

1.3. Описание барботажной установки.

Барботеры – это механические устройства для образования воздушнопузырьковой завесы под водой. Функция барботажной системы заключается в том, чтобы вызвать конвекцию теплой воды против ледяного покрова с помощью водной струи, приводимой в действие барботером, тем самым плавя и подавляя рост ледяного покрова [8]. Теплая вода увлекается либо из внешнего источника (стоковые воды, термальные источники), либо из теплового резерва со дна [1].

Схематический вид барботажной системы в поперечном сечении представлен на рис. 1.3. Компрессор в точке А подает воздух в линию подачи В. Воздух проходит через отверстие (или отверстия) диффузора С. В процессе действия системы образуются пузырьковые потоки, которые по мере подъема (область D) непрерывно увлекают воду в поднимающийся шлейф [8].

Вблизи поверхности (область E) шлейф распространяется под ледяным покровом, первоначально в относительно тонком слое (область F), но постепенно захватывает больше воды и рассеивается (область G). Теплопередача и последующее таяние льда происходят главным образом за счет конвекции вдоль нижней стороны льда в областях E, F и G [8].



Рис.1.3. Схематический чертеж действия барботажной установки [8].

Автор [1] представил похожую схему (рис.1.4.), но уже в случае действия в портовой акватории у стены пирса. Прослеживается механизм образования вертикальной циркуляционной ячейки.



Рис.1.4. Принцип использования барботажной установки в системе управления льдом [1].

Другим автором [5] составлена похожая схема действия барботажной установки и развивающейся циркуляции в воде (рис.1.5). Также приводится выражение, позволяющее определить поток тепла через лед, и сделан вывод о том, что максимум горизонтальной скорости V_0 отмечается приблизительно на расстоянии x = d/2, где d – глубина места.



Рис. 1.5. Схема циркуляции воды в процессе действия барботажной установки и профиль горизонтальной скорости течения [5].

Представленные схемы работы барботажных установок и их влияние на физические и динамические процессы в воде взяты из представленных ранее научных исследований, большинство из которых подтверждено натурными экспериментами. Также можно проследить сходство схем и выводов, сделанных авторами при разных постановках задачи.

Анализируя в совокупности результаты использования барботажных установок, можно сделать вывод о том, что данный метод борьбы с образованием льда в портах является перспективным и экономически эффективным. С 1962 года наращивалась база численных и натурных экспериментов по исследуемой проблеме, что является хорошим подспорьем для данной работы.

Глава 2. Материалы и методы исследования.

2.1. Математическое описание процесса барботажа.

Основными параметрами, которыми характеризуется процесс барботажа, являются частота отрыва воздушных пузырьков и их размер. Для того чтобы качественно и количественно исследовать процесс подъема воздушных пузырьков, нужно определить физическую взаимосвязь между перечисленными параметрами и скоростью всплытия спудного потока воды, а также расхода воздуха.

Данная работа представлена в работе [3], где автор рассмотрел возможности расчета основных параметров воздушно-пузырьковой завесы (частоты отрыва и диаметра пузырьков); продемонстрировал быстрый выход решения на стационарный режим; описал теоретические уравнения для скорости свободного всплытия пузыря в воде в ламинарном, переходном и турбулентном режимах; а также графически сравнил с экспериментальными данными.

2.1.1. Зависимость параметров воздушно-пузырьковой завесы от величины объемного расхода воздуха.

Выражение для частоты отрыва пузырей было получено в работе [3] с использованием теории размерностей на основе обобщенного анализа лабораторных экспериментальных данных [9].

$$f = A \left(\frac{p_w \, g^3}{p_a \, Q}\right)^{0,2} \,, \tag{2.1}$$

где A – численный коэффициент; g – ускорение свободного падения; Q – объемный расход воздуха; p_w , p_a – плотность воды и воздуха, соответственно.

На этот параметр влияет величина расхода источника воздуха, а также внешнее давление водной среды, то есть глубина расположения источника. Чем больше глубина расположения источника воздуха, тем меньше частота отрыва пузырей, также частота снижается при увеличении расхода воздуха (рис.2.1*a*) [3].



Рис.2.1. Влияние глубины расположения источника воздуха: *a* – на частоту отрыва пузырьков; *б* – на их диаметр [3].

Выражение для диаметра воздушного пузыря, который определяет формирование своей же скорости всплытия, также получено в работе [3] с помощью представления частоты отрыва пузырей воздуха в виде отношения объемного расхода воздуха к объему пузыря, тогда:

$$D_b = \frac{g}{f_b^2} \left(\frac{c}{\pi} \frac{p_w}{p_a}\right)^{1/3}$$
(2.2)

или

$$D_b = \left[\frac{c}{\pi} \left(\frac{p_w \, Q^6}{p_a \, g^3}\right)^{0,2}\right]^{1/3} \,, \tag{2.3}$$

где С – числовая константа.

На диаметр также влияет величина расхода воздуха и глубина расположения источника. Увеличение глубины расположения источника увеличивает диаметр отрывных пузырей при увеличении его расхода (рис.1.3.1, *б*) [3].

Частота отрыва воздушных пузырей в водной среде и их размеры являются основными элементами расчета вертикальной скорости спудного потока воды [3].

2.1.2. Аналитическое решение уравнения баланса сил, действующих на воздушный пузырь.

Для выявления взаимосвязи диаметра отрывных пузырей и скорости их всплытия автор [3] рассматривает уравнение баланса сил для отрывного воздушного пузыря в воде:

$$m_a \frac{dw}{dt} = G_a + F_A + F_R , \qquad (2.4)$$

где m_a — масса воздушного пузыря; G_a — гравитационная сила; F_A — сила плавучести; F_R — сила сопротивления.

После раскрытия сил правой части уравнение переписано в следующем виде:

$$\frac{\pi D_B^3}{6} \frac{dw}{dt} = \frac{\pi D_B^3}{6} (\rho_a - \rho_w) g + C_D \frac{\pi D_B^2 \rho_w}{8} w^2 , \qquad (2.5)$$

где *C*_D – безразмерный коэффициент сопротивления.

Данное уравнение описывает свободное всплытие воздушного пузыря, как в ламинарном режиме, так и в турбулентном [3].

Для ламинарного, или стоксового, режима всплытия воздушного пузыря, который характеризуется числом Рейнольдса *Re* ~ *1* и меньше, автор [3] определяет коэффициент сопротивления как:

$$C_D = \frac{24}{Re}.$$
(2.6)

При этом *Re* имеет вид:

$$Re = \frac{\rho_w D_B w}{\mu}$$

где *µ* – динамическая вязкость воды.

После решения уравнения (2.2) в ламинарном режиме с учетом формулы для коэффициента сопротивления (2.3), автором [3] получено выражение:

$$w = g \frac{(\rho_a - \rho_w) D_b^2}{18\mu} \left[1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{\rho_a D_b^2}\right) \right].$$
 (2.7)

Результат решения графически представлен на рис.2.2. для разных значений диаметра пузырей, и из него видно, что скорость всплытия воздушного пузыря очень быстро переходит в стационарный режим (за время, значительно меньшее 1 с) и зависит только от его объема [3].



Рис. 2.2. Выход скорости всплытия пузырей воздуха на стационарный режим для различного диаметра пузырей [3].

2.1.3. Уравнения для скорости свободного всплытия воздушного пузыря в воде в стоксовом, переходном и турбулентном режиме.

Анализ аналитического решения уравнения баланса сил, представленный в предыдущей части, выявил факт, который позволяет рассматривать всплытие воздушных пузырей в воде как стационарный процесс [3].

И в этом случае можно определить максимальный диаметр пузыря, который обеспечивает ламинарный режим всплытия, записав уравнение баланса сил после раскрытия сил в стационарной форме [3]:

$$D_{max} = \left(\frac{18\mu^2}{\rho_w(\rho_w - \rho_a)g}\right)^{1/3}.$$
 (2.8)

То есть на максимальное значение диаметра влияют лишь характеристики внешней среды. Исходя из полученного выражения, можно сделать вывод о том, что размер всплывающего «стоксового» пузыря сильно ограничен и не превышает 2-3 мм, а также на него практически не влияет глубина расположения источника [3].

Теоретическое уравнение для скорости свободного всплытия воздушного пузыря в ламинарном режиме [3]:

$$w = ag \,\frac{D_b^2(\rho_w - \rho_a)}{18\mu},\tag{2.9}$$

где a – числовая константа. В теоретическом выводе a = 1.

Для турбулентного режима всплытия воздушного пузыря выделено два размерных диапазона, соответствующим числам Рейнольдса $Re \sim 10...100$ и $Re \sim 10...1000$, то есть, так называемый, промежуточный и основной, соответственно. Особенности данного режима подробно проанализированы в работах Маленкова [10] и Кутателадзе [11].

Теоретическое уравнение для скорости свободного всплытия воздушного пузыря в промежуточном режиме находится из автомодельности относительно вязкости воды [3]:

$$w = a \sqrt{\frac{2\sigma}{D_b(\rho_w - \rho_a)}} \,. \tag{2.10}$$

Этот режим можно считать переходной формой, связанной с изменениями формы пузыря и зависящей от силы поверхностного натяжения, действует при $D_b = 5 \dots 10$ мм и демонстрирует снижение скорости при увеличении размеров пузыря [3]. Уравнение является частным случаем следующего уравнения, полученного Маленковым для всего турбулентного режима.

Теоретическое уравнение для скорости свободного всплытия воздушного пузыря для всего турбулентного режима [3]:

$$w = a \left(\beta \frac{2\sigma}{D_b(\rho_w - \rho_a)} + g D_b \frac{\rho_w - \rho_a}{2\rho_w}\right)^{1/2}.$$
 (2.11)

Здесь числовые коэффициенты *α* и β, по Маленкову, являются единичными.

Далее автор [3] представляет графическую зависимость скорости всплытия воздушных пузырей от их диаметра на основе решения представленных уравнений для ламинарного, переходного и турбулентного режима, а также экспериментальных данных из исследований всплытия газовых пузырей в воде во второй половине XX столетия [12, 13, 14, 15].



Рис.2.3. Зависимость скорости всплытия воздушных пузырей от их диаметра: Δ – экспериментальные данные [12, 13, 14, 15]; W1 – по формуле (2.9) при α = 0,42; W2 – по формуле (2.10) при α = 1,45; W3 – по формуле (8) при α = 1 и β = 1; W4 – по формуле (2.11) при α = 0,8944 и β = 1,625 [3].

Формулы (2.9) и (2.11) для ламинарного и турбулентного режимов, соответственно, достаточно хорошо воспроизводят зависимость скорости всплытия воздушных пузырей от их диаметра. Автором [3] предложены другие числовые коэффициенты $\alpha = 0,8944$ и $\beta = 1,625$ (кривая W4), с которыми получается лучшее распределение.

Кривая W2, описываемая уравнением (2.10), оказалась несколько смещенной относительно данных экспериментов, автор [3] делает вывод, что промежуточный участок турбулентного режима лучше описывать совместно с режимом больших чисел Рейнольдса.

Таким образом, что экспериментальные данные [12, 13, 14, 15] полностью подтверждают распределение ламинарного и турбулентного режимов всплытия на всем размерном диапазоне воздушных пузырей.

Проведенный анализ скорости всплытия воздушных пузырей с глубины будет использоваться в 2D-модели пристеночного барботажа в качестве вертикального ускорения, генерируемого барботажной установкой. Далее перейдем к описанию используемой в работе модели.

2.2. Описание 2D-модели пристеночного барботажа.

Описание 2D-модели пристеночного барботажа взято из статьи [16]. Она состоит из системы уравнений движения в негидростатической постановке:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2},$$
(2.12)

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \frac{\delta \rho}{\rho_0} + K_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + K_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + Barb, \qquad (2.13)$$

где u и w — горизонтальная и вертикальная компоненты скорости течения; p — давление; ρ — плотность воды; K_x и K_z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной вязкости; *Barb* вертикальное ускорение воды, вызванное действием барботажной установки.

Давление воды определяется с помощью уравнения Пуассона [16]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = -\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right].$$
(2.14)

Уравнения теплопроводности и диффузии соли описывают термодинамические процессы, протекающие в толще воды в районе действия барботажной установки [16]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = K_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_T, \qquad (2.15)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = K_S \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) + q_S, \qquad (2.16)$$

где T и S — температура и соленость воды; K_T — коэффициент турбулентной температуропроводности; K_S — коэффициент турбулентной диффузии соли; q_T и q_S — источник теплой и соленой воды.

Краевые условия представлены в виде начального распределения параметров среды и соответствующих потоков на границах вода — земля и вода — лед для порта с глубиной не более 20 м в зимних условиях с возможностью образования ледяного покрова или ледяной каши на поверхности (t = 0) [16]:

$$\begin{cases} T(x, z, 0) = T(x, z)|_{t=0}; S(x, z, 0) = S(x, z)|_{t=0}, \\ u(x, z, 0) = 0; w(x, z, 0) = 0, \\ p(x, z, 0) = 0 \end{cases}$$
(2.17)

При этом из-за наличия льда на поверхности воды можно принять условие «твердой крышки» [16]:

$$w(x,0,t) = 0; \frac{\partial \lambda}{\partial t} = 0,$$

где λ — превышение уровня моря.

Для расчетов вертикальных потоков тепла и импульса на границе вода — лед (z = 0) и вода — дно (z = H) автор модели [16] использовал балкформулы, основанные на градиентном методе, представленном в работах [17, 18].

В модели не рассматривается изменение параметров льда на поверхности (толщины, солености и структуры), не учитываются распределение теплопроводности внутри ледяного покрова и тепловое взаимодействие с атмосферой. Образовавшийся в процессе работы барботажной установки распресненный слой подо льдом учитывается подбором безразмерного коэффициента теплопроводности [16].

На причальной стенке, где установлена барботажная установка (левая боковая граница (*x* = 0)), задано условие непроницаемости для потока импульса, условие теплообмена вода — стенка (в связи с наличием наледи) и условия работы барботажной системы [16]:

$$Q_{T} = \begin{cases} \rho C_{p} C_{T} \left(T(0, z, t) - T_{p}(z, t) \right), & z \neq h_{q} \\ q_{T}, & z = h_{q} \end{cases}$$

$$Q_{S} = \begin{cases} 0, & z \neq h_{q}, \\ q_{S}, & z = h_{q}, \end{cases}$$

$$u(0, z, t) = 0,$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_{0}} \frac{\partial p}{\partial z} + g \frac{\delta \rho}{\rho_{0}} + K_{x} \frac{\partial^{2} w}{\partial x^{2}} + K_{z} \frac{\partial^{2} w}{\partial z^{2}} + Barb, \qquad (2.18)$$

где T_p — температура стенки с учетом формирования наледи; h_q — глубина расположения источника подогретой и соленой воды.

Правая боковая граница (x = L) также задавалась в виде твердой вертикальной поверхности, чтобы прослеживалось формирование вертикальной циркуляционной ячейки [16].

Формирование вертикального ускорения, генерируемого барботажной установкой (*Barb*), основано на анализе скорости всплытия воздушных пузырей с глубины. Анализ проводился автором [3] и подробно описан в предыдущей части.

Выбранный метод построения модели не учитывает фоновые движения водных масс в исследуемом районе. Считается, что только действие барботажной установки в течение нескольких часов в значительной степени определяет формирование термодинамических процессов на близлежащей акватории [16]. 2.3. Валидность модели.

Модель реализована в статье [16] для акватории порта Сабетта, где на одном из причалов была установлена экспериментальная барботажная установка. Начальное распределение отражало устойчивую вертикальную стратификацию, на поверхности образован сплошной лед.

Автором [16] проводилось два численных эксперимента: моделирование действия источника подогретой воды без работы барботажной установки и совместно.

Общие параметры действия системы подачи подогретой воды и барботажной установки заданы таким образом [16]: «Расход воды задавался равным 0,01 м³/с (36 м³/ч), а температура воды на выходе – 30 °C. Формируемый при этом импульс направлен строго вверх. Источник подачи подогретой воды располагался на глубине 6 м, а соленость подаваемой воды составляла 9‰».

Результаты моделирования действия источника подогретой воды без работы барботажной установки представлены на рис.2.4.

Этот численный эксперимент сопровождался натурными наблюдениями вблизи работающей установки подачи подогретой воды, что позволило оценить результаты проведенного моделирования (рис.2.5).



Рис.2.4. Распределение температуры воды через 30 мин (а) и через 5 ч (б) после начала действия системы подачи подогретой воды [16].



Рис.2.5. Модельное и натурное вертикальное распределение температуры и солености воды на удалении 2 м от источника тепла через 30 мин (а) и через 5 ч (б) после начала действия системы подачи подогретой воды [16].

Анализируя графики (рис.2.5), можно отметить, ЧТО модельное распределение характеристик вполне соответствует фактическому распределению. Автор [16] отмечает, что «полученной точности модели для получения адекватной оценки вполне достаточно формирования термодинамического режима вод вблизи источника тепла». Возникшая неточность в распределении на поверхности на рис.2.6 связана с заданием условий на границе вода-лед, ее можно уменьшить путем добавления информации о характеристиках ледяного покрова.

Далее автор [16] проводит второй численный эксперимент, моделируя действие источника совместно с действием барботажной установки, задавая расход воздуха равным 0,04 м³/с (2400 л/мин) и расположение источника на глубине 11 м. Результаты моделирования представлены на рис.2.6. Сравнивая полученные распределения температуры в расчетной области совместно и без учета действия барботажной установки, можно сделать вывод о более эффективном воздействии на ледяной покров в первом случае. Помимо увлечения и поднятия теплой воды из источника воздушно-пузырьковым потоком, можно отметить формирование вертикальной циркуляционной ячейки, которая начинает вытягивать факел теплой воды к правой стенке (противоположной теплому источнику и барботажной установке).





Рис. 2.6. Распределение температуры воды через 30 минут (а) и 5 часов (б) после начала действия системы подачи подогретой воды и барботажной установки [16].

В итоге можно сделать вывод о том, что выбранная 2D-модель может быть использована для проведения численных экспериментов по изучению механизмов управления ледовой обстановкой в портах вблизи причалов. Она соотносится с теоретическими выкладками других научных источников, которые были использованы при подготовке данной работы.

Однако модель показала некоторые неточности, связанные с точностью и характером задания граничных условий на поверхности воды, а также дополнительным движением воды, формируемым внешними условиями. «При более точном задании параметров ледяного покрова — его толщины, сплоченности и состояния, а также атмосферных форсингов данную модель вполне можно использовать для уточнения требуемого режима работы технических систем борьбы с нарастанием ледового покрова», - отмечает автор в своей статье [16].

Глава 3. Численные эксперименты.

3.1. Исходные данные и постановка задачи.

Расчетная область.



Ледовый покров

Рис.3.1. Схема расчетной области.

Расчетная область отражает пристеночную часть портовой акватории с глубиной 12,75 м и расстоянием от стенки до свободной границы – 100 м. Модель рассчитывает значения каждые 0,25 м по горизонтали и 1 м по глубине.

Для анализа брался период интегрирования в 12 часов с начала действия барботажной установки и источника подаваемой теплой воды. На схеме выделена область расположения действующей системы, которая наиболее подвержена ее влиянию. Чтобы комплексно изучить процесс действия исследуемой системы «источник – барботажная установка» на акваторию порта, проведем несколько численных экспериментов, направленных на варьирование исходных данных и параметров модели.

Исходные данные.

Исходными данными для модели являются начальные распределения температуры и солености в исследуемой области, которые отражают устойчивую стратификацию по вертикали. Одному значению глубины соответствует одно значение данных характеристик. Начальные значения скорости течения равны нулю.

Исходные значения подобраны автором [16], исходя из физикогеографических и климатических условий в порту Сабетта. Значения температуры отрицательные, убывают с глубиной, а соленость имеет характерные для арктических акваторий невысокие значения.

Параметры модели.

В модели учитываются характеристики среды (коэффициенты турбулентной вязкости и теплопроводности, стандартная плотность воды, коэффициенты трения о дно и лед, коэффициент теплоотдачи при таянии), автор [16] подбирал их в соответствии с физическими условиями, установившимися в порту Сабетта.

Также автором [16] задаются параметры, изменение которых мы не будем рассматривать в данной работе. Это диаметр сопла (0,01 м²), температура воздуха в системе барботажа (10°С) и соленость источника подаваемой воды (14,3‰).

Выбранные для изучения параметры – это:

- Глубина источника тепла и глубина барботажной установки;
- Температура источника;

• Давление воздуха в системе барботажа.

Все эти параметры прямо или косвенно влияют на верхнюю стенку (лед) посредством образования циркуляционной ячейки с определенным потоком температуры, движущимся с определенной скоростью. Как быстро начнет таять лед, при каких условиях он будет таять быстрее, – на эти вопросы мы можем теоретически ответить, сравнив результаты расчета на модели.

Выделенными для изменения параметрами можно управлять и в физическом (натурном) эксперименте, поэтому полученные результаты можно будет использовать в последующих работах, связанных с темой исследования.

3.2. Эксперимент №1.

Для начала проведем расчет при параметрах, заданных автором [16], чтобы проверить действие модели и сделать выводы, от которых будем отталкиваться при последующем анализе.

Источник тепла расположен на глубине 6,25 м, барботажная установка на глубине 11 м. Приведенная температура источника – 3°С, давление воздуха в барботажной системе – 2,2е5 Па. Исходные данные по температуре и солености представлены на рис.3.2 и рис.3.3.



Рис.3.2. График исходного распределения температуры воды для численного эксперимента №1.



Рис.3.3. График исходного распределения солености воды для численного эксперимента №1.

Рисунок 3.4а отражает устойчиво стратифицированную картину, которую начинает нарушать действие системы источника и барботажной установки. Минимальные значения на поверхности (-0,4°C) и у дна (-0,6°C). До 30 минут наблюдается образование факела теплой воды, который

распространяется вглубь бассейна от стенки пирса по горизонтали и по вертикали. Далее очаг теплых температур опускается по глубине, уже к 50 минутам достигая дна (рис. 3.4г). К этому же времени, можно заметить, из расчетной области исчезают самые низкие значения температуры, минимальным значением становится -0,4°C.



Рис.3.4. Распределение температуры воды через 5 минут (а), 10 минут (б), 30 минут (в), 50 минут (г), 3 часа (д), 12 часов (е) после начала действия системы в условиях Эксперимента №1.

За 3 часа (рис. 3.4д) действия системы устанавливается характерное распределение для всех экспериментов. В зоне действия системы подачи подогретой воды и барботажной установки (у стенки порта) наблюдается область теплых температур, растянутая по вертикали от дна до поверхности. Распределение, как видно на рис. 3.4е, мало меняется после установления. В результате конвективного теплообмена оставшаяся часть акватории (расчетной области) принимает минимальное значение температуры. Далее эта область будет понемногу вытесняться вправо теплой массой.

Установившееся равновесие будет поддерживаться постоянным действием системы источника и барботажной установки. Если его остановить, в результате перемешивания будет наблюдаться другая картина, которая покажет увеличение средней температуры расчетной области.

Распределение солености подкрепляет выводы, сделанные ранее при анализе распределения температуры. Рисунок 3.5а также отражает исходную стратифицированную картину, на которую начинает влиять действие системы. Наибольшие значения солености у дна (13,5‰), которые вследствие горизонтального движения массы воды вытесняются за свободную границу расчетной области, а поступающая вода из источника с соленостью 14,3‰ становится максимальной в акватории.

С течением времени распределение солености приходит в соответствие с распределением температуры. Здесь также наблюдается установившаяся картина горизонтального распределения характеристики к 3 часам (рис.3.5а). К 12 часам (рис.3.5б) распределение мало меняется, однако, видно, что область повышенных значений солености и температуры (рис.3.5е) движется от стенки пирса вглубь акватории (расчетной области), вытесняя минимальные значения.



Рис.3.5. Распределение солености воды через 5 минут (а), 10 минут (б), 30 минут (в), 50 минут (г), 3 часа (д), 12 часов (е) после начала действия системы в условиях Эксперимента №1.

Таким образом, водная масса в акватории обновляется после совместного действия системы источника подаваемой воды и барботажной установки и становится более теплой и соленой.



Рис.3.6. Скорость течения через 3 часа после начала действия системы в условиях Эксперимента №1.

Проиллюстрированные на рис.3.6 и 3.7 скорости течения отражают основные вектора распространения подаваемой воды. За 3 часа (рис.3.6) образуется характерное конвективное перемешивание. В зоне действия установки наблюдается восходящий поток, направленный к поверхности и распространяющийся на верхней границе по горизонтали. Этот поток, исходя из распределения температуры, имеет большую температуру, чем ледовая поверхность. Лед тает, распресняя и охлаждая водную массу, поэтому образуется нисходящий поток в остальной части рассматриваемой зоны.



Рис.3.7. Скорость течения через 12 часов после начала действия системы в условиях Эксперимента №1.

К 12 часам (рис.3.7) скорости движения подаваемой воды увеличиваются, но уменьшается их горизонтальное распространение на поверхности, что отражается на интенсивности конвективного перемешивания. Его практически нет, то есть устанавливается картина близкая к стационарной.

3.3. Эксперимент №2.

Чтобы исследовать процессы конвективного обмена при разных условиях, изменим исходные данные. Повысим на поверхности значения температуры до -0,15°C и понизим значения солености до 5,75‰ (см. рис.3.8

и рис.3.9), при подобных условиях среды будет наблюдаться следующая картина (рис.3.10).



Рис.3.8. График исходного распределения температуры воды для Эксперимента №2.



Рис.3.9. График исходного распределения солености воды для Эксперимента №2.



Рис.3.10. Распределение температуры воды через 5 минут (а), 10 минут (б), 30 минут (в), 50 минут (г), 3 часа (д), 12 часов (е) после начала действия системы в условиях Эксперимента №2.

При увеличении исходных значений температуры и солености повышается средняя температура в расчетной области. Также увеличивается размер образованного факела теплой воды, и он распространяется до поверхности, наиболее интенсивно влияя на лед у пирса.



Рис.3.11. Распределение солености воды через 5 минут (а), 10 минут (б), 30 минут (в), 50 минут (г), 3 часа (д), 12 часов (е) после начала действия системы в условиях Эксперимента №2.

Тот же процесс происходит и с распределением солености, но в обратную сторону, так как ее исходные значения понижали. Минимальное значение – 5,5‰, когда как в Эксперименте №1 – 7‰.



Рис.3.12. Скорость течения через 3 часа после начала действия системы в условиях Эксперимента №2.

Проиллюстрированные на рис.3.12 и рис.3.13 скорости течения практически не отличаются от скоростей в Эксперименте №1 (рис.3.6, 3.7), однако они несколько меньше по значениям.

То есть при действии системы подаваемой воды и барботажной установки в условиях повышенной температуры и пониженной солености образуется менее интенсивное конвективное перемешивание. Имеет смысл использовать данный метод в среде с большей разностью температур между исходной и подаваемой водой.



Рис.3.13. Скорость течения через 12 часов после начала действия системы в условиях Эксперимента №2.

3.4. Эксперимент №3.

Чтобы более подробно изучить механизм воздействия системы подачи подогретой воды и барботажной установки, можно обратить внимание на изменение способа установки системы и ее основных характеристик, которые обуславливают конвективные движения акватории.

В пункте 3.1. были описаны параметры модели, а также предпосылки для их изменения. Для изменения параметров будем использовать исходные данные Эксперимента №2.

Температура воды источника.

В данном эксперименте уменьшим и увеличим приведенную температуру подаваемой воды на 2 единицы (1°С и 5°С, соответственно).



Рис.3.14. Распределение температуры воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при понижении температуры воды источника (1°С).

Понижая (рис.3.14) и повышая (рис.3.15) температуру воды источника, мы можем регулировать влияние системы на акваторию. Воздействие данных изменений на распределение температуры следующее. Чем больше температура воды источника, тем больше температура у образовавшегося факела, который привносит больше тепла и будет впоследствии влиять на конвективный обмен и лед в акватории. Стоит выделить то, что при большей температуре источника теплая масса, образовавшаяся у стенки пирса, значительно быстрее вытесняет область низких температур вправо, вглубь акватории (рис.3.14г, 3.15г).



Рис.3.15. Распределение температуры воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при повышении температуры воды источника (5°С).

Также изменение температуры воды источника влияет на минимальную температуру, образовавшуюся в акватории (-0,4°С при большей, -0,6°С при меньшей), но не так характерно как было бы в нестационарных условиях. При конвективном обмене более теплая вода, подаваемая в бассейн, поднимет среднюю температуру и повлияет на процессы теплообмена, убыстряя их.

Таким образом, увеличивая или уменьшая температуру воды источника, помимо влияния на теплосодержание бассейна мы можем повлиять на скорость конвективных процессов. При увеличении температуры вливаемой воды увеличивается скорость и наоборот.



Рис.3.16. Распределение солености воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при понижении температуры воды источника (1°С).

Распределение солености также подтверждает сделанные выводы (рис.3.16, 3.17). Видно, что процессы при повышенном значении температуры воды источника происходят быстрее на одних временных точках.

Например на 50 минут видно, что горизонтальное и вертикальное движение быстрее при температуре подаваемой воды 5°С (рис. 3.16б, 3.17б).

Картина на 12 часов также отражает немного отличающее распределение, которое подтверждает ускоренное вытеснение водных масс с меньшей соленостью через свободную границу.



Рис.3.17. Распределение солености воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при повышении температуры воды источника (1°С).

Глубина источника.

При установлении системы в порту мы должны знать, на какой глубине установить источник подаваемой воды, и как это будет влиять на процессы теплообмена.

На рис.3.18а наблюдается образовавшийся больший факел теплых температур, а также меньшая область низких температур у поверхности, а на

рис. 3.186 меньшая область низких температур у дна и большая протяженность теплых температур по вертикали.

К 12 часам действия системы установившееся распределение также отличается при разных глубинах расположения источника. На рис. 3.18в видна большая протяженность по горизонтали с небольшой областью максимальных температур, а на рис. 3.18г наблюдается обратная картина. То есть процесс вытеснения воды с наименьшей температурой происходит гораздо быстрее, чем при большей глубине установки источника, но область максимальной температуры гораздо меньше.



Рис.3.18. Распределение температуры воды через 10 минут и 12 часов после начала действия системы при понижении (а, в) и повышении (б, г) глубины источника.

Можно сделать вывод о том, что уменьшение глубины источника влияет на горизонтальные процессы, убыстряя их, а увеличение – на вертикальные, также увеличивая скорость распространения тепла в этом направлении.

При разной постановке задачи можно эффективно использовать варьирование глубины источника теплой воды в акватории порта, либо делая упор на прогрев боковой стенки пирса, либо используя для подогрева всей толщи.



Рис.3.19. Распределение солености воды через 10 минут и 12 часов после начала действия системы при понижении (а, в) и повышении (б, г) глубины источника.

Изменение глубины источника подаваемой воды также влияет на распределение солености, как и в случае с температурой.

На 12 часов можно наблюдать (рис.3.19г) более растянутую и по горизонтали, и по вертикали область теплых температур при более глубоком расположении источника подаваемой воды.

Глубина барботажной установки.

Увеличение глубины установки барботажной системы до 11,75 м приводит к тому же, что и увеличение глубины источника подаваемой воды. Образовавшийся факел теплой воды быстрее распространяется по вертикали и медленнее по горизонтали. Уменьшение, соответственно, наоборот. То есть варьирование этого параметра дополняет изменение глубины источника.



Рис.3.20. Распределение температуры воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при повышении глубины барботажа.



Рис.3.21. Распределение солености воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при повышении глубины барботажа.





Рис.3.22. Распределение температуры воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при повышении давления воздуха в барботажной установке.

Увеличение давления воздуха в барботажной установке на одну сотую (до 2,3e5 Па) приводит к большим изменениям, которые видны при сравнении рис.3.22 и рис.3.10. Сравнивая одни и те же временные точки, можно увидеть, что скорость распространения теплой воды увеличилась. То есть происходящие процессы, включая образование циркуляционной ячейки в результате конвекции, будут происходить быстрее.

С физической точки зрения при увеличении давления в барботажной увеличивается частота отрыва воздушных пузырьков, но не их всплытия. Это форсирует движение воды, что приводит к увеличению скорости течения, которая в свою очередь убыстряет конвективное перемешивание, возникающее в расчетной области.



Рис.3.23. Распределение солености воды через 10 минут (а), 50 минут (б), 3 часа (в), 12 часов (г) после начала действия системы при повышении давления воздуха в барботажной установке.

Распределение солености (рис.3.23) в сравнении с результатами Эксперимента №2 (рис.3.11) подтверждает сделанные выводы. Увеличилась скорость распространения факела большей солености, как и вытеснение меньших значений в горизонтальном направлении.



Рис.3.24. Скорость течения через 12 часов после начала действия системы при повышении давления воздуха в барботажной установке.

По полю скорости течения (рис.3.24) видно, что при увеличении давления воздуха в барботажной установке увеличиваются как значения скоростей, так и поток воды в горизонтальном направлении на поверхности.

Таким образом, можно сделать вывод о наибольшей эффективности изменения параметра давления для того, чтобы ускорить потоки течения и конвективного обмена в портовой акватории.

Заключение.

В данной работе было проведено исследование динамики конвективного перемешивания, возникающего вследствие термобарботажа в замерзающих портах Арктического региона, с помощью численного моделирования в рамках мелкомасштабной изменчивости.

Было выдвинуто предположение, что система, состоящая из источника подаваемой теплой воды и барботажной установки у стенки причала, может решить исследуемую проблему. С 1962 года наращивалась база численных и натурных экспериментов по исследуемой проблеме, что является хорошим подспорьем для данной работы. В работе учтены исследования, проведенные в акваториях Хельсинки [1, 2], Канадской Арктики [4, 5], Гренландии [6] и США [7, 8]. Анализируя в совокупности результаты использования барботажных установок, можно сделать вывод о том, что данный метод борьбы с образованием льда в портах является перспективным и экономически эффективным.

Используемая в работе численная негидростатическая модель реализована в статье [16] для акватории порта Сабетта, где на одном из причалов была установлена экспериментальная барботажная установка. Начальное распределение отражало устойчивую вертикальную стратификацию, на поверхности образован сплошной лед.

На основе этой модели проведен ряд численных экспериментов, направленных на варьирование параметров модели, а также исходных данных, что позволило сделать следующие выводы:

1. С начала действия системы образуется факел теплой и соленой воды, который распространяется с течением времени в горизонтальном и вертикальном направлении, вглубь расчетной области, вытесняя исходные значения в сторону свободной границы и повышая среднюю температуру.

Образовавшиеся скорости создают восходящий вертикальный поток в области причала, который распространяется в горизонтальном направлении на поверхности, далее трансформируясь в нисходящий поток. То есть возникает циркуляционная конвективная ячейка;

2. Изменение (повышение исходных данных температуры, понижение солености) мало влияет на общую картину. Однако можно заметить, что значения скорости течения несколько ниже, что позволяет сделать вывод об образовании менее интенсивного конвективного перемешивания;

 С помощью такого параметра как температура воды источника помимо влияния на теплосодержание бассейна мы можем повлиять на скорость конвективных процессов, увеличивая ее с помощью больших значений температуры вливаемой воды и наоборот;

4. Уменьшение глубины источника или барботажной установки влияет на горизонтальные процессы, убыстряя их, а увеличение – на вертикальные, также увеличивая скорость распространения тепла в этом направлении. При разной постановке задачи можно эффективно использовать варьирование глубины установки системы в акватории порта, либо делая упор на прогрев боковой стенки пирса, либо используя для подогрева всей толщи;

5. К наиболее эффективным изменениям приводит увеличение давления воздуха в барботажной установке, в результате которого увеличивается частота отрыва воздушных пузырьков. Это форсирует движение воды, приводит к ускорению потоков течения. То есть происходящие процессы, включая образование циркуляционной ячейки в результате конвекции, будут происходить быстрее.

Список источников.

 Pan Huachen, EsaEranti. Applicability of Air Bubbler Lines for Ice Control in Harbours // China Ocean Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 215 – 224, 2009.

2. Pan H., Eranti E. Flow and heat transfer simulations for the design of the Helsinki Vuosaari harbour ice control system // Cold Regions Science and Technology 55, 2009. PP. 304–310.

3. Чанцев В. Ю. Анализ вертикального движения воздушнопузырьковой завесы в воде // Ученые записки РГГМУ №46, 2017, с. 64-70.

4. Ince, S. (1962). Winter regime of a tidal inlet in the Arctic and the use of air bubblers for the protection of wharf structures: Eighth International Conference on Coastal Engineering, Mexico, pp. 521-£32.

 Simon Ince. A guide to the design of air bubblers for melting ice. // Hydraulics Section, National Research Council. Ottawa, Canada. - Chapter 39, 2001

6. E. Hulgard, Torben Serensen, Hostrup-Schultz. Ice cover prevention by means of air bubbles, Nassaq, Greenland. // Port and ocean engineering under Arctic conditions. Technical University of Norway, 2003.

 ASHTON.G.D. 1974. Air bubbler systems to suppress ice. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover. NH. Special Report 210.

8. Ashton, G. D. (1978). Numerical simulation of air bubbler systems. Canadian Journal of Civil Engineering, 5(2), 231–238. doi:10.1139/178-027

9. Елисеев В.И., Толстопят А.П., Флеер Л.А. Частота отрыва пузырей от газового прифурменного объема // Вестник Днепропетровского ун-та. Сер. «Механика». Т. 1, вып. 17, 2013. – С. 86–94.

 Маленков И.Г. О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости // Журнал прикл. мех-ки и техн. физике, 1968. № 6. – С. 130–134.

11. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

12. Козлов Б.К., Мологин М.А. О скорости подъема и гидравлическом сопротивлении газовоздушных пузырей в жидкости // Издво АН СССР, 1951. № 8. – С. 47–62.

Лодыженский Р.М. Исследование движения воздушного пузырька в воде при высоких значениях Re // Прикладная химия. Т. 27, вып.
 1, 1954. – С. 103–119

14. Сахаров В.А. Экспериментальное определение относительной скорости движения газового пузыря в потоке жидкости // Изв. вузов; Нефть и газ, 1966. № 6. – С. 84–102.

15. Krevelen D.W., von Hoftizer P.I. Studies of gasbubble formation.
Calculation of interfacian agrea in bubble contactors // Chem. Engng. Progr., vol.
46, № 1, 1950. PP. 72–88.

16. Чанцев В. Ю. 2D моделирование пристеночного барботажа в замерзающем порту // Ученые записки РГГМУ №49, 2017, с. 89-98.

McPhee M.G., Kikuchi T., Morison J.H., Stanton T.P. Ocean-to-ice heat flux at the Nort Pole environmental observatory // Geophys. Res. Lett. 2003.
V. 30 (24). 2274. doi:10.1029/2003GL018580.

Shaw W.J., Stanton T.P., McPhee M.G., Morison J.H., Martinson D.G. Role of the upper ocean in the energy budget of Arctic sea ice during SHEBA // J. Geophys. Res. 2009. V. 114 (C06012). doi:10.1029/2008JC004991.