

УДК [536.248.2+532.241.1]:629.224:001.891.573

2D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОГО БАРБОТАЖА В ЗАМЕРЗАЮЩЕМ ПОРТУ

В.Ю. Чанцев

Российский государственный гидрометеорологический университет, val@rshu.ru

Приводится описание 2D-модели пристеночного барботажа. В основе модели лежит система уравнений термогидродинамики в негидростатическом представлении. Движение подогретой воды осуществляется только воздушно-пузырьковой завесой, генерируемой барботажной установкой. Формируемая вертикальная циркуляционная ячейка обеспечивает плавление поверхностного льда. Результаты моделирования сравнивались с данными натурального эксперимента в порту Сабетта.

Ключевые слова: уравнения термогидродинамики, негидростатическое представление, барботаж, борьба со льдом.

2D SIMULATION OF PARIETAL BARBOTAGE IN FREEZING PORT

V.Yu. Chantsev

Russian State Hydrometeorological University

The 2D model of parietal barbotage is described. At the base of this model is a system of thermohydrodynamics equations in the non-hydrostatic performance. Heated water movement is realized only by an air-bubble curtain generated by the barbotage equipment. Generated vertical circulation cell provides a melting of surface ice. The simulation results were compared with those of full-scale experiment in the port of Sabetta.

Keywords: thermohydrodynamics equation non-hydrostatic performance, bubbling, struggle with ice.

Введение

Необходимость продления зимней навигации в портах замерзающих морей обуславливает потребность в разработке методов уменьшения скорости нарастания ледяного покрова. Взлом льда ледоколами лишь кратковременно обеспечивает свободу передвижения судов на акватории порта. Через некоторое время за счет накопления ледяной массы и ее смерзания толщина ледяного покрова резко возрастает, что приводит к полному прекращению функционирования порта. К тому же использование ледоколов не обеспечивает очистки от льда водного пространства непосредственно возле причалов, где накопление ледяной массы может проследиваться до дна и препятствовать нормальной швартовке судов.

На сегодняшний день наиболее перспективным способом борьбы с ледяным покровом на акватории порта признается его растапливание с использованием технических средств. В качестве таких средств выступают теплобарботажные системы, устанавливаемые непосредственно у причальных стенок. Однако одна проблема использования такой системы остается — необходимо знать оптимальные параметры ее работы для обеспечения эффективной борьбы с нарастанием льда.

Для осуществления оперативной оценки условий работы теплобарботажной установки в порту в зимних условиях была разработана простая негидростатическая гидродинамическая 2D-модель, позволяющая в вертикальной плоскости, ориентированной перпендикулярно причальной стенке, воспроизводить основные процессы вертикальной термогидродинамической циркуляции вод.

Описание 2D-модели пристеночного барботаж

Модель представляет собой систему уравнений движения в негидростатической постановке:

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

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

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 не из гидростатического баланса, а с помощью уравнения Пуассона:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = -\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right]. \quad (3)$$

Термодинамические процессы, протекающие в толще воды в районе действия барботажной установки, описываются уравнениями теплопроводности и диффузии соли:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = K_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_T, \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = K_S \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) + q_S, \quad (5)$$

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

Характер и особенности пространственно-временной эволюции термогидродинамических процессов в большой степени зависят от задания краевых условий. Рассматриваемая задача поставлена для ограниченного пространства порта, где глубина не превышает 20 м, для зимних условий с возможностью образования ледяного покрова на поверхности моря или формирования ледяной каши. С учетом этого краевые условия можно представить в виде начального распределения параметров среды ($t = 0$):

$$\begin{cases} T(x, z, 0) = T(x, z)|_{t=0}; S(x, z, 0) = S(x, z)|_{t=0}, \\ u(x, z, 0) = 0; w(x, z, 0) = 0, \\ p(x, z, 0) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

и соответствующих потоков на границах вода — земля и вода — лед. При этом из-за наличия льда на поверхности воды мы можем принять условие «твердой крышки»:

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

где λ — превышение уровня моря.

На границе вода — лед ($z = 0$) и вода — дно ($z = H$) для расчетов вертикальных потоков тепла и импульса использовались балк-формулы, основанные на градиентном методе, представленном в работах [3, 4].

Ввиду упрощения модели на поверхности моря не рассматривается изменение толщины, солёности и структуры льда, а также не учитываются распределение теплопроводности внутри ледяного покрова и тепловое взаимодействие с атмосферой. Наличие распресненного пограничного слоя под льдом в период подогрева воды барботажной установкой учитывается подбором безразмерного коэффициента теплопроводности.

На левой боковой границе ($x = 0$), которая является причальной стенкой с установленной на ней барботажной установкой, помимо условия непроницаемости для потока импульса, задается условие теплообмена вода — стенка (в связи с наличием наледи) и условия работы барботажной системы:

$$\begin{aligned} Q_T &= \begin{cases} \rho C_p C_T (T(0, z, t) - T_p(z, t)), & z \neq h_q, \\ q_T, & z = h_q, \end{cases} \\ Q_S &= \begin{cases} 0, & z \neq h_q, \\ q_S, & z = h_q, \end{cases} \\ u(0, z, t) &= 0, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + g \frac{\delta \rho}{\rho_0} + K_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + Barb, \end{aligned} \quad (7)$$

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

Противоположная расчетной ($x = L$) боковая граница области также задавалась в виде твердой вертикальной поверхности. Такой подход позволяет с течением расчетного времени в исследуемой области сформироваться вертикальной циркуляционной ячейке.

Формирование вертикального ускорения, генерируемого барботажной установкой (*Barb*), подробно описано в работе Чанцева [2]. Оно основано на анализе скорости всплытия воздушных пузырей с глубины, на которой установлены

выпускные сопла барботажной установки. Уравнение, описывающее скорость всплытия воздушного пузыря, является частным случаем уравнения, полученного Маленковым [1] для турбулентного режима ($Re \sim 10 \dots 1000$):

$$w_b = \left(A \cdot \frac{2\sigma}{D_b(\rho_w - \rho_a)} + B \cdot g D_b \frac{\rho_w - \rho_a}{2\rho_w} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где A и B — числовые коэффициенты, которые у Маленкова являются единичными; D_b — диаметр воздушного пузыря; σ — поверхностное напряжение на границе вода — воздух; ρ_w и ρ_a — плотность воды и воздуха соответственно.

Поднимаясь к поверхности, пузыри воздуха в режиме турбулентного всплытия попутно затягивают окружающую воду. Объемный расход воды через горизонтальную площадку (Q_w) может определяться скоростью всплытия воздушных пузырей и их размерами:

$$Q_w(z) = A_w \cdot \sum_{i=1}^N \left[w_{b_i} \cdot \pi D_{b_i}^2 \right] \Big|_z. \quad (9)$$

Выбранный подход построения численной 2D-модели термогидродинамических процессов в районе действия барботажной системы 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.

Численные эксперименты с 2D-моделью

Модель реализована для акватории порта Сабетта, вблизи одного из причалов, на котором была установлена экспериментальная барботажная установка. Численное решение модели выполнено на расчетной сетке Аракавы с пространственным шагом 0,25 м по горизонтали и 0,1 м по вертикали. Интегрирование по времени осуществлялось по неявной схеме.

Начальное распределение температуры и солености воды в расчетной области должно соответствовать условиям стратификации, предшествующим началу действия барботажной системы. Считается, что в этот момент водные массы находятся в неподвижном состоянии, вертикальная стратификация является устойчивой, а поверхность воды покрыта сплошным льдом.

На рис. 1 представлено вертикальное распределение температуры и солености воды в исследуемой области. Оно получено на основании первичного анализа массовых данных натуральных наблюдений, проведенных на акватории порта Сабетта. Сформированные поля температуры и солености воды нельзя считать наиболее точно отражающими истинное распределение исходных параметров, так как наблюдения не имели четкой систематизации, позволяющей получить наиболее близкую к реальной картину распределения температуры и солености воды. При этом обеспечивается устойчивая стратификация вод в расчетной области.

На период времени моделирования задавались характеристики работы системы подачи подогретой воды и барботажной установки. К таким характеристикам относятся: температура и соленость выпускаемой воды и ее расход, а также

температура и расход воздуха в барботажной установке. На начало проведения численных экспериментов имелись только общие параметры действия системы подачи подогретой воды и барботажной установки. В связи с этим при проведении численных экспериментов пришлось исходить из имеющейся информации. Расход воды задавался равным $0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ ($36 \text{ м}^3/\text{ч}$), а температура воды на выходе – $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Формируемый при этом импульс направлен строго вверх. Источник подачи подогретой воды располагался на глубине 6 м, а соленость подаваемой воды составляла 9 ‰.

Численные эксперименты были разделены на две части:

1) моделирование действия источника подогретой воды без работы барботажной установки,

2) моделирование действия источника подогретой воды совместно с работой барботажной установки.

Эксперимент по моделированию действия источника подогретой воды при отсутствии барботажа проводился на период 12 ч. На рис. 2 а представлено распределение температуры воды через 30 мин после начала действия системы подачи подогретой воды. Незначительное смещение прогретой воды вверх связано исключительно с формируемым импульсом, направленным вверх. Свободная конвекция не возникает, так как устойчивость вертикальной стратификации не

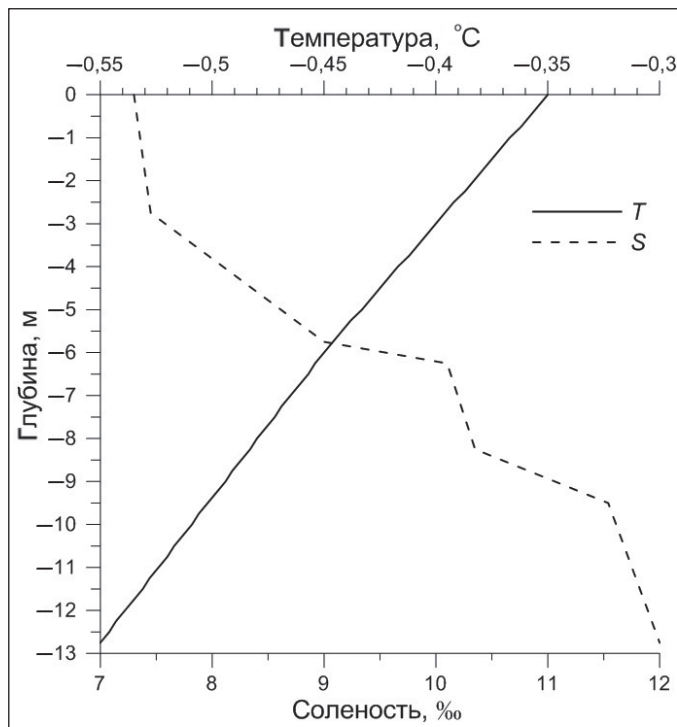


Рис. 1. Начальное распределение температуры и солености по вертикали в расчетной области.

нарушается. Вертикальный импульс порождает горизонтальную составляющую адвективного переноса тепла. Адвекция тепла совместно с диффузией формируют теплый факел, распространяющийся в горизонтальном направлении.

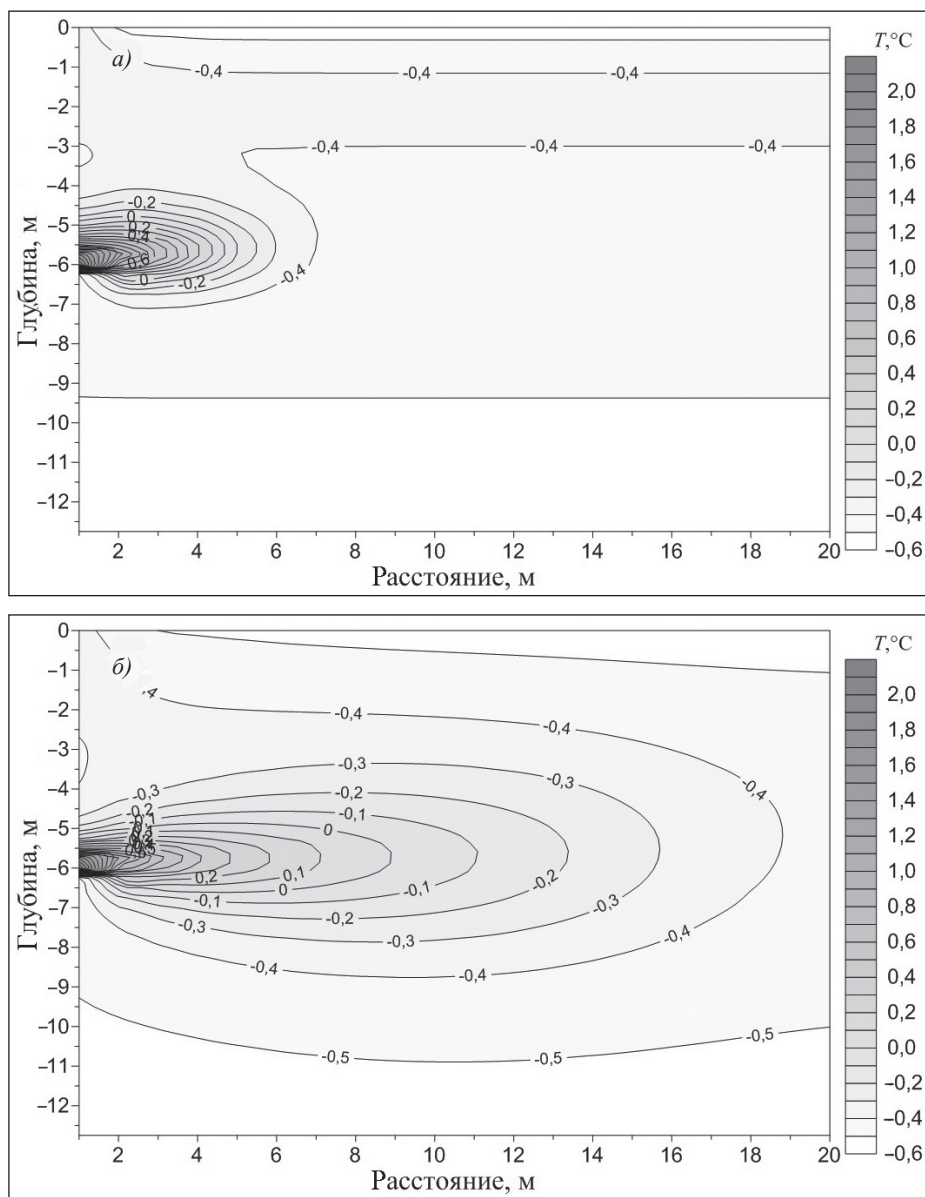


Рис. 2. Распределение температуры воды через 30 мин (а) и через 5 ч (б) после начала действия системы подачи подогретой воды.

На рис. 2 б представлено распределение температуры воды через 5 часов после начала действия системы подачи подогретой воды. За счет действия только этой системы вода с температурой выше 0°C распространяется не дальше 10 м от источника тепла. При этом теплая вода не достигает поверхности моря, т.е. нижней поверхности льда, что не приводит к его таянию. Даже непосредственно у стенки наличие наледи не позволяет теплу диффундировать вверх, к поверхности моря.

Этот численный эксперимент сопровождался натурными наблюдениями вблизи работающей установки подачи подогретой воды, что позволило оценить результаты моделирования. Наблюдение за вертикальным распределением температуры и солености воды начали проводить примерно через 30 мин после начала работы системы на удалении 2 м от нее и продолжали до конца светлого времени суток.

На рис. 3 а представлено совместное вертикальное распределение температуры и солености воды, полученное в результате моделирования и натурального наблюдения через 30 мин после начала действия системы подачи подогретой воды.

Необходимо отметить, что модельное распределение температуры и солености воды в основном отражает фактическое распределение. Присутствующие отклонения в результатах натурных наблюдений отражают наличие мелкомасштабных динамических флуктуаций, влияющих на характер диффузии и адвекции тепла и соли. При этом полученной точности модели вполне достаточно для получения адекватной оценки формирования термодинамического режима вод вблизи источника тепла.

На рис. 3 б представлено совместное вертикальное распределение температуры и солености воды, полученное в результате моделирования и натурального наблюдения через 5 ч после начала действия системы подачи подогретой воды. Общий характер модельного распределения температуры и солености воды и на этот момент времени адекватно отражает распределение, полученное при натурных наблюдениях. Возрастание невязки на верхней границе связано с характером задания условий на границе вода — лед. Для уменьшения этой невязки необходимо иметь информацию о характеристиках ледяного покрова, позволяющую уточнить процесс обмена теплом на границе вода — лед.

Для проведения численных экспериментов совместного действия системы подачи подогретой воды и барботажной установки был задан расход воздуха, равный $0,04 \text{ м}^3/\text{с}$ (2400 л/мин). Источник подачи воздуха размещался на глубине 11 м. Как и в первых численных экспериментах, распределение температуры воды фиксировалось через 30 мин и через 5 ч после начала действия систем.

На рис. 4 а представлено распределение температуры через 30 мин после начала работы всех систем. Теплая вода под действие барботажа поднимается к поверхности в ближайшей к стенке трехметровой зоне. Формируемая при этом система течений (вертикальная циркуляционная ячейка) начинает вытягивать факел теплой воды вблизи от нижней поверхности льда в сторону от вертикальной стенки с действующими системами.

Через 5 ч после начала действия всех систем (рис. 4 б) факел теплой воды под нижней поверхностью льда распространяется более чем на 20 м от источника тепла.

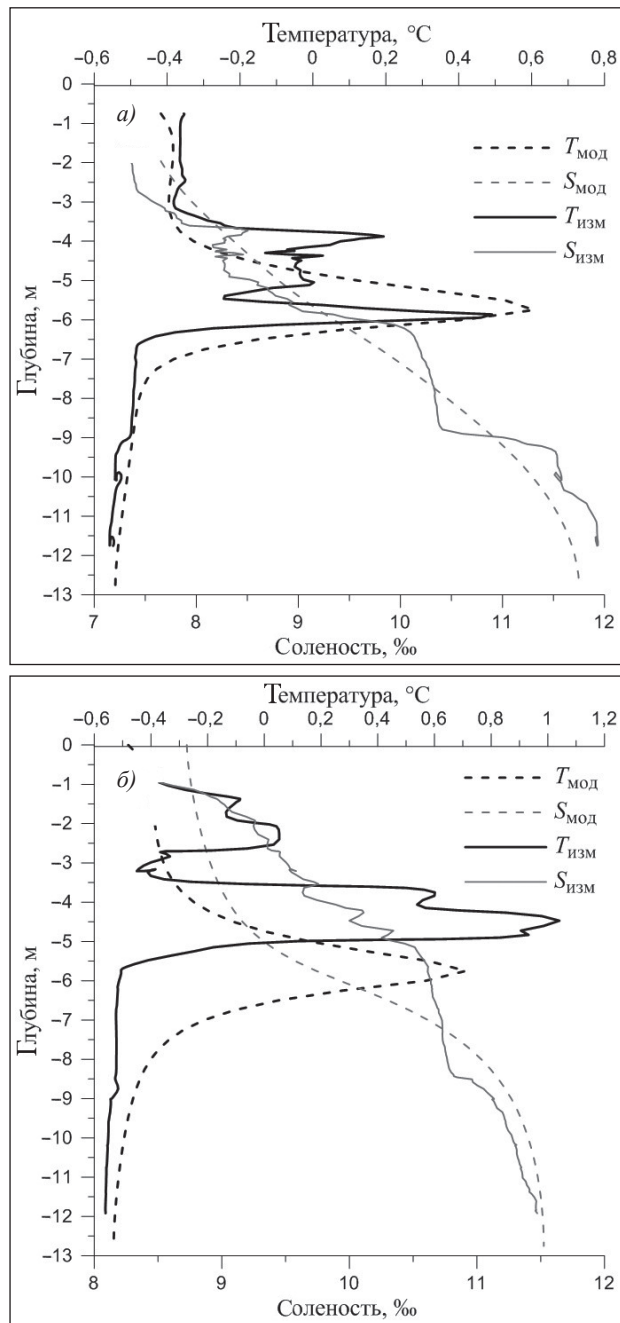


Рис. 3. Модельное и натурное вертикальное распределение температуры и солености воды на удалении 2 м от источника тепла через 30 мин (а) и через 5 ч (б) после начала действия системы подачи подогретой воды.

При этом вследствие постоянства характеристик льда зона с положительными значениями температуры воды не выходит непосредственно к поверхности моря. Тем не менее и формирующегося градиента температуры достаточно для обеспечения таяния ледяного покрова.

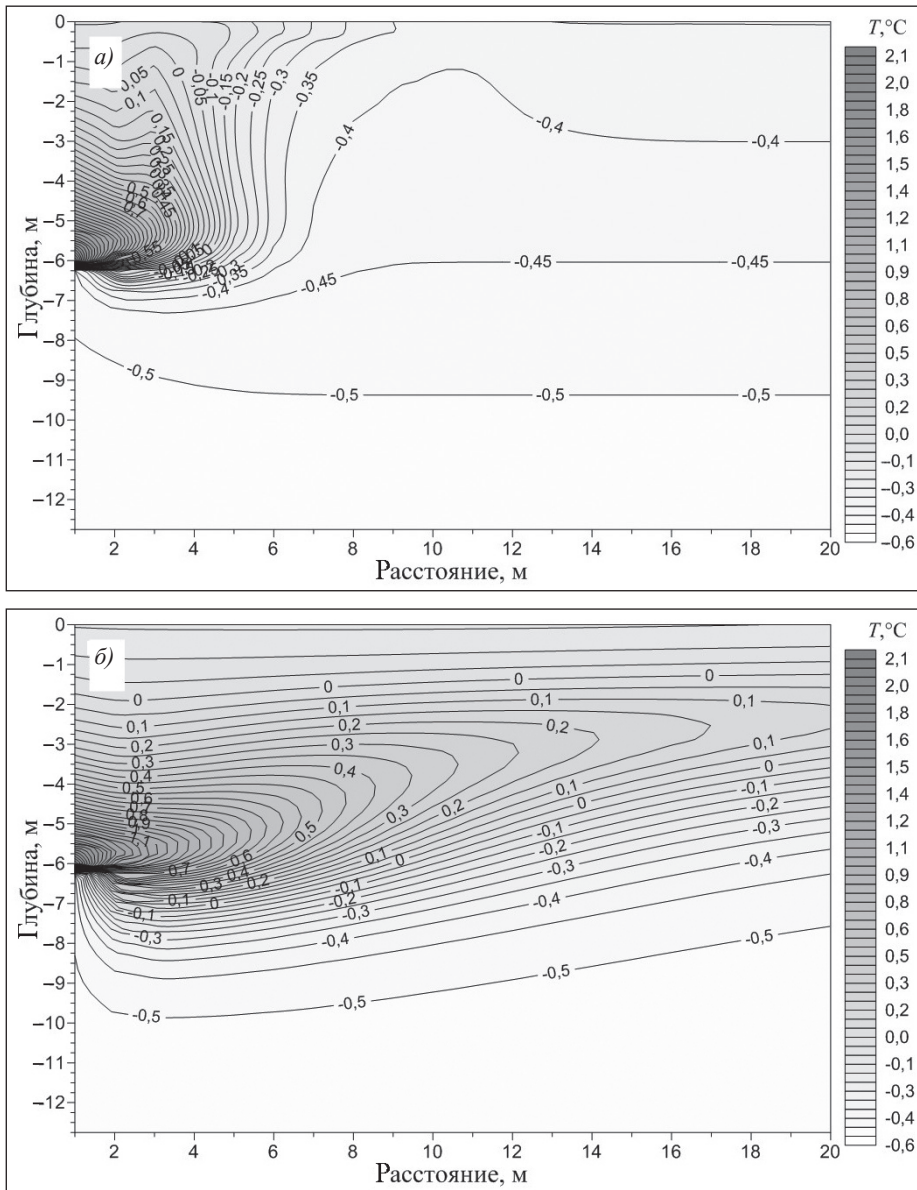


Рис. 4. Распределение температуры воды через 30 минут (а) и 5 часов (б) после начала действия системы подачи подогретой воды и барботажной установки.

Заключение

Приведенные результаты численных экспериментов только в общих чертах демонстрируют возможность использования 2D-модели при анализе результатов применения термобарботажных установок для управления локальной ледовой обстановкой на акватории порта вблизи причалов. Результаты экспериментов показали некоторые отклонения численных решений от наблюдаемых распределений термодинамических параметров. Эти отклонения возрастают при увеличении периода интегрирования по времени. Такая погрешность вычислений связана с точностью задания граничных условий на поверхности воды и дополнительным движением воды, формируемым работой судовых винтов. 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.

Список литературы

1. Маленков И.Г. О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. № 6. С. 130—134.
2. Чанцев В.Ю. Анализ вертикального движения воздушно-пузырьковой завесы в воде // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 46. С. 64—70.
3. McPhee M.G., Kikuchi T., Morison J.H., Stanton T.P. Ocean-to-ice heat flux at the North Pole environmental observatory // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30 (24). 2274. doi:10.1029/2003GL018580.
4. 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.