

РОЛЬ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА В ФОРМИРОВАНИИ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ВОЛНОВЫХ ДВИЖЕНИЙ В АЗОВСКОМ МОРЕ

В.А. Иванов, Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

В работе представлены результаты численного моделирования сгонно-нагонных процессов в Азовском море с учетом стационарных течений и водообмена через Керченский пролив. Выполнен анализ зависимостей изменений уровня поверхностных и глубинных течений от направления и скорости ветра.

Введение. Азовское море сообщается с Черным через Керченский пролив посредством движения воды, возникающего из-за разности уровней в северной (азовской) и южной (черноморской) частях и под действием ветра, влияние которого на уровень воды в проливе в среднем в 5 – 6, а при штормах – в 10 – 15 раз сильнее, чем воздействие речного стока [1]. Изучению сгонно-нагонных явлений и течений Азовского моря без учета Керченского пролива посвящена работа [2], в которой выявлены особенности формирования полей уровня моря и течений, генерируемых различными полями ветра. В данной работе с использованием трехмерной нелинейной численной модели [3] выполнен анализ экстремальных отклонений уровня, а так же поверхностных и глубинных течений в зависимости от направления и скорости постоянного ветра с

учетом и без учета водообмена с Черным морем.

В качестве исходных, принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [3]. На свободной поверхности удовлетворяются кинематическое и динамические условия. На дне ($z = -H(x, y)$) равна нулю нормальная составляющая скорости, придонные касательные напряжения связаны со скоростью квадратичной зависимостью. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания, на жидкой границе принимается условие свободного прохождения жидкости.

Расчетная область включает в себя Азовское море, Керченский пролив и прилегающую к нему часть Черного моря. Открытая зональная граница (Γ), представленная на рисунке 1, соответствует вертикальному разрезу бассейна Черного моря по $44,81^\circ$ с.ш. Во всех точках, расположенных на этой границе ($60 \leq x \leq 240$ км, $y = 0$), выполняется условие $v'_n|_{\Gamma} = 0$, где \mathbf{n} – нормаль к жидкой границе. При решении задачи без учета пролива, рассматривается замкнутый бассейн, в котором вдоль $39,33^\circ$ с.ш. ($177 \leq x \leq 192$ км, $y = 66$ км) имеет место вертикальная боковая стенка (рисунок 1 пунктирная линия).

Численные эксперименты реализованы для трех направлений стационарного ветра различной скорости. Развитие ветра над поверхностью моря происходит в два этапа. От начального момента времени ($t = 0$) на водную поверхность начинает действовать

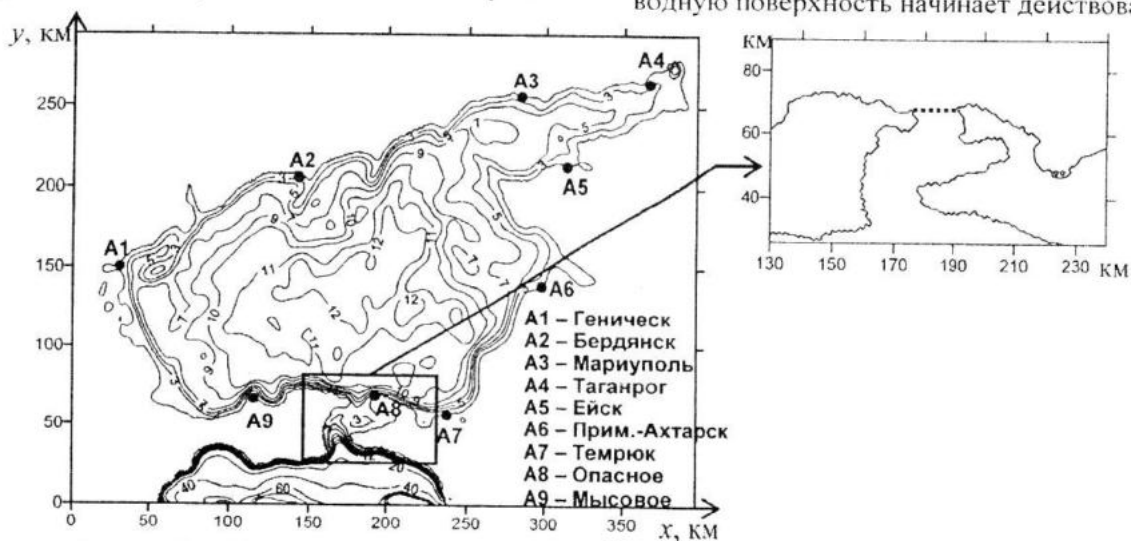


Рисунок 1 – Положение станций вдоль побережья Азовского моря и зональной границы

ветер заданного (постоянного) направления, скорость которого нарастает со временем (3 ч) по линейному закону. Затем скорость ветра в каждой точке акватории достигает заданного значения и далее не меняется. Исследование проводится для трех направлений ветра (южного, западного и восточного) различной скорости: и 5, 10 и 15 м/с. Установлению стационарного режима течений соответствует изменение средней по объему моря полной энергии, не превышающее 1 % на соседних временных шагах.

Для численной реализации в исходных уравнениях, граничных и начальных условиях выполняется переход от координаты z к σ -координате [3]. Количество расчетных уровней по вертикали равнялось 11, линейные размеры ячейки сетки $\Delta x = \Delta y = 1$ км. Выбор шагов интегрирования по временным координатам осуществляется в соответствии с критерием устойчивости для баротропных волн. Отклонения уровня Азовского моря анализируются на девяти станциях (рисунок 1), расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

В серии численных экспериментов исследуется влияние скорости и направления постоянного ветра на стационарные течения, экстремальные значения сгонов и нагонов. Полученные результаты сравниваются с расчетами, выполненными при моделировании установившихся движений в Азовском море без учета водообмена с Черным морем. В таблице 1 приведены зависимости максимальных отклонений уровня на береговых станциях Азовского моря от направ-

ления и скорости ветра с учетом и без учета водообмена через пролив. Из анализа этих данных следует, что действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости, приводит к возрастанию максимальных отклонений уровня ($|\zeta_{\max}|$), не более чем на 60 %.

Сравнение величин $|\zeta_{\max}|$, полученных при решении задачи с учетом и без учета пролива, показывает, что учет водообмена приводит к увеличению экстремальных значений уровня. Так, при скорости ветра 10 м/с, максимальные различия абсолютных максимумов на станциях составляют: 43 % (западный ветер), 45 % (южный ветер), 46 % (северный ветер); при скорости ветра 15 м/с – 44 % (западный ветер), 43 % (южный ветер), 45 % (северный ветер).

Существенно влияет на максимальные отклонения уровня и направление стационарного ветра. Отметим, что на рассматриваемых станциях наибольшие подъемы или опускания уровня имеют место при определенном направлении ветра одной и той же скорости. Так, при западном ветре максимальные нагоны отмечаются на станциях Таганрог (138 см), Ейск (96 см), Приморско-Ахтарск (73 см), а максимальные сгоны – на станции Геническ (112 см).

При южном ветре максимальные подъемы уровня имеют место на станциях Бердянск (46 см) и Мариуполь (79 см), максимальные опускания уровня – на станциях Темрюк (59 см), Опасное (56 см), Мысовое (58 см).

Таблица 1 – Максимальные отклонения уровня в установившемся режиме ($|\zeta_{\max}|$, см) на береговых станциях Азовского моря, вызываемые постоянным ветром трех направлений, действующим со скоростью 10 и 15 м/с, без учета (1) и с учетом (2) пролива

Береговые станции	$W_{st}^1 = 5$ м/с						$W_{st}^2 = 10$ м/с						$W_{st}^3 = 15$ м/с					
	З		Ю		С		З		Ю		С		З		Ю		С	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Геническ	7	7	0	1	0	1	29	42	1	0	1	0	69	112	4	2	4	1
Бердянск	0	1	3	4	3	4	2	4	11	17	12	18	4	5	28	46	-26	47
Мариуполь	2	4	5	6	6	8	6	27	24	31	25	32	14	25	57	79	-60	82
Таганрог	10	11	8	11	8	9	44	57	32	44	34	48	100	138	80	108	-82	140
Ейск	6	7	4	6	4	5	22	38	16	14	16	13	52	96	41	36	-37	29
П.-Ахтарск	5	5	1	1	1	2	21	29	3	-8	4	8	49	73	12	20	8	14
Темрюк	1	2	3	5	3	7	7	5	14	-22	13	22	20	15	33	59	31	55
Опасное	1	1	3	5	3	6	3	4	12	-21	11	21	5	9	29	56	28	53
Мысовое	3	4	3	4	3	5	13	18	15	-22	15	21	30	45	35	58	36	53

Северный ветер вызывает наибольшие нагоны на станциях Темрюк (55 см), Опасное (53 см), Мысовое (53 см), наибольшие сгоны – на станциях Бердянск (47 см), Мариуполь (82 см) и Таганрог (140 см).

Как следует из анализа полей приведенных на рисунке 2, течения в установившемся режиме характеризуются выраженными вихревыми образованиями. Их положение и конфигурация определяются направлением ветра, наиболее интенсивные

течения имеют место в глубоководной части моря.

При западном ветре (рисунок 2 а) в Азовском море возникают две системы круговоротов, которые ориентированы в зональном направлении. На границе между этими круговоротами направление потока жидкости противоположно скорости действующего ветра. В Таганрогском заливе формируется пара вихрей различных знаков.

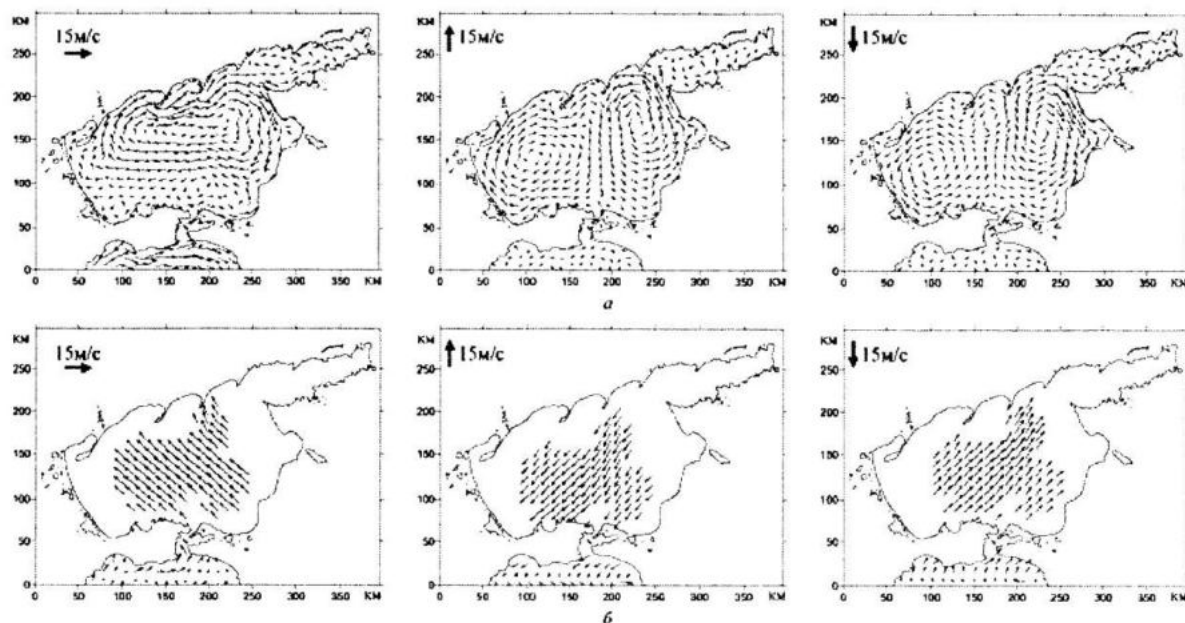


Рисунок 2 – Поля скоростей поверхностных (а) и придонных (б) стационарных течений в Азовском море, вызываемые действием постоянного ветра различных направлений со скоростью 15 м/с

При северном ветре в центральной части моря образуются два круговорота противоположных знаков. Бóльший по площади (циклонический) примыкает к западному берегу и содержит малое вихревое образование. Меньший по площади, но более мощный (антициклонический), находится в восточной части моря. Между этими двумя круговоротами располагается узкая полоса переноса водных масс противоположно скорости ветра.

Южный ветер формирует течения, поля которых являются "зеркальным отражением" полей течений при северном ветре (прослеживается та же конфигурация вихревых образований, но они имеют различные знаки).

На глубине 10 м (рисунок 2 б) в центральной части акватории наблюдаются течения, отклоняющиеся южнее на 135° и более от скорости ветра. Отметим, что в придонном слое под действием западного и

северного ветров течения в Керченском проливе направлены из Черного в Азовское море, в поверхностном слое в противоположную сторону.

Литература

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. V. Азовское море // Сп-б: Гидрометеиздат. – 1991. – 234 с.
2. Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Доповіді Національної академії наук України. – 2006. – № 12. – С. 110 – 115.
3. Blumberg A. F., Mellor G. L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coast Ocean Models. Coastal and Estuarine Science, 4, 1987. – P. 1–16.