

СГОНЫ, НАГОНЫ, ОБЛАСТИ ОСУШЕНИЙ И ЗАТОПЛЕНИЙ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ ДЕЙСТВИЕМ ВЕТРА

В.А. Иванов, О.В. Матузаева,
Л.В. Черкесов, Т.Я. Шульга*

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net
*Севастопольский национальный
университет ядерной энергии
и промышленности

Методом математического моделирования изучаются сгонно-нагонные процессы и их влияние на величины областей осушений и затоплений в прибрежных районах Азовского моря. В качестве факторов, вызывающих эти явления, рассматриваются амплитуды волн и скорости течений, вызываемые действием атмосферных возмущений.

Введение. Достоверные знания о сгонно-нагонных процессах в Азовском море являются основой для обеспечения безопасности судоходства, гидротехнического и рекреационного строительства, а так же прогнозов процессов динамики береговой зоны моря. Натурные наблюдения за волнением на береговой гидрометеорологической сети не имеют достаточной точности и не полно отражают волновые условия в открытых районах моря. Поэтому наиболее обоснованное представление о гидрометеорологических процессах, возможно путем анализа расчетов, базирующихся на применении современных трехмерных численных моделей, что представляет несомненный научный интерес и имеет важное прикладное значение.

Исследование течений и колебаний уровня, возникающих в Азовском море под действием полей ветра и атмосферного давления, полученным по данным модели SKIRON [1] при отсутствии стационарных течений, проведено в [2, 3]. В этих работах для изучения динамических процессов в Азовском море применяется трехмерная нелинейная σ -координатная модель, которая основывается на нелинейных уравнениях движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении гидростатики. При по-

строении численного алгоритма в этой модели используется криволинейная система координат [4, 5].

В данной работе указанная выше математическая модель применена для изучения влияния стационарных течений на величины сгонов и нагонов, размеров областей затоплений и осушений в Азовском море, возникающих также под действием приводного ветра, параметры которого получены на основании метеорологических данных прогностической системы SKIRON.

В исходных уравнениях, граничных и начальных условиях осуществляется переход от координаты z к σ -координате. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам соответствует критерию устойчивости Куранта для баротропных волн.

Рельеф дна и конфигурация береговой линии Азовского моря, используемые для проведения численных экспериментов, интерполированы на расчетную сетку с навигационных карт. В качестве входных метеорологических данных берутся поля приводного ветра и атмосферного давления модели SKIRON за период с 8 по 18 сентября 2007 г. Пространственное разрешение атмосферных полей составляет 10 км, дискретность по времени – 2 часа.

Для установления физических закономерностей влияния интенсивности атмосферных воздействий выбраны поля приводного ветра модели SKIRON, а также поля ветра увеличенные и уменьшенные в два раза по отношению к указанным выше ($\gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$; $\gamma = 1/2, 1; 2$).

Анализ результатов численных экспериментов. Целью первой серии численных расчетов явилось установление чувствительности характеристик волн и течений, вызванных полями ветра SKIRON, на наличие или отсутствие стационарных течений в море.

В табл. 1 приведены максимальные значения скоростей стационарных течений, вызванных постоянным ветром ($\mathbf{W}^{1, 2}_{\text{st}}$), максимальные величины скоростей течений, генерируемых приводным ветром ($\gamma \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$) и их суперпозицией. Здесь же указаны горизонты и координаты наибольших значений скоростей, а также время их достижения.

Таблица 1

Максимальные значения скоростей течений на различных глубинах Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты

Скорость ветра	Горизонт (м)	U_{\max} , (м/с)	x_{\max} , (км)	y_{\max} , (км)	t_{\max} , (ч.мин)
$W_{st}^1 = 5$ м/с	1	0,16	236,29	174,08	8.00
	3	0,13	236,39	173,44	8.02
	5	0,12	237,01	173,31	8.22
	10	0,09	235,34	173,00	9.44
	1	0,34	235,38	172,19	8.35
$W_{st}^2 = 10$ м/с	3	0,28	235,97	172,86	8.55
	5	0,24	237,07	171,50	8.26
	10	0,17	235,99	171,16	9.34
	1	0,35	198,78	188,36	131,8
	3	0,28	242,27	184,59	132,0
$1/2W_{SKIRON}$	5	0,25	259,84	194,38	135,3
	10	0,24	228,97	174,97	140,0
	1	0,45	206,25	189,27	128
	3	0,39	241,76	188,88	130
	5	0,37	263,30	199,05	137
W_{SKIRON}	10	0,28	238,20	175,76	145
	1	0,58	206,69	190,59	132,6
	3	0,54	236,96	184,66	134,1
	5	0,52	263,53	193,96	136,4
	10	0,41	238,66	174,55	142,6
$2W_{SKIRON}$	1	0,61	201,47	109,47	128
	3	0,59	224,43	183,70	130
	5	0,54	225,04	161,18	137
	10	0,35	174,63	166,87	145
	1	0,73	201,48	106,15	128
$W_{st}^1 + 1/2W_{SKIRON}$	3	0,69	224,73	176,44	130
	5	0,61	225,31	156,78	137
	10	0,35	174,86	160,92	145
	1	1,57	208,72	111,75	128
	3	1,39	229,55	183,06	130
$W_{st}^1 + 2W_{SKIRON}$	5	1,24	229,67	161,92	137
	10	1,02	175,72	168,25	145
	1	0,57	166,19	176,81	152
	3	0,45	204,45	162,96	154
	5	0,43	258,30	194,36	157
$W_{st}^2 + 1/2W_{SKIRON}$	10	0,40	210,08	147,40	162
	1	0,91	159,09	175,58	152
	3	0,78	199,38	159,67	154
	5	0,70	258,19	188,40	157
	10	0,40	209,66	146,44	162
$W_{st}^2 + W_{SKIRON}$	1	1,32	161,14	176,58	152
	3	1,12	202,31	166,34	154
	5	0,77	259,62	194,33	157
	10	0,66	214,06	147,13	162

Анализ скоростей течений показал, что в поверхностном слое величины U_{\max} под действием суперпозиции ветров $W_{st}^1 + \gamma W_{SKIRON}$ становятся больше в 1,7; 1,6 и 2,7 раза, а под действием $W_{st}^2 + \gamma W_{SKIRON}$ становятся больше в 1,6; 2,0 и 2,2 раза, чем только при

γW_{SKIRON} ($\gamma = 1/2; 1; 2$ соответственно). При этом для всех скоростей ветра U_{\max} убывают с ростом горизонта. Скорости течений, рассчитанные без учета стационарных течений, для полей прогностического ветра интенсивности $1/2W_{SKIRON}$ и $2W_{SKIRON}$, отличаются не бо-

лее, чем на двадцать пять процентов по сравнению со скоростями, вызванными действием $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$.

В табл. 2 приведены максимальные значения подъемов (ζ_{\max}) и понижений ($|\zeta|_{\max}$) уровня в открытой части Азовского моря.

Максимальные значения подъемов (ζ_{\max}) и опусканий ($|\zeta|_{\max}$) уровня в открытой части Азовского моря, время их достижения и соответствующие им координаты

Скорость ветра	ζ_{\max} , (м)	x_{\max} , (км)	y_{\max} , (км)	t_{\max} , (ч.мин)	$ \zeta _{\max}$, (м)	x_{\min} , (км)	y_{\min} , (км)	t_{\min} , (ч.мин)
$\mathbf{W}_{\text{st}}^1 = 5 \text{ м/с}$	0,20	366,51	219,61	17.10	0,10	4,02	95,07	13.23
$\mathbf{W}_{\text{st}}^2 = 10 \text{ м/с}$	0,69	367,86	218,27	18.46	0,39	4,02	107,13	13.47
$\frac{1}{2}\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,32	282,98	96,36	168.14	0,17	24,23	126,50	190.55
$\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,43	278,50	90,10	168.15	0,25	20,10	122,50	190.55
$2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,97	284,71	92,17	168.15	0,56	20,14	122,91	190.55
$\mathbf{W}_{\text{st}}^1 + \frac{1}{2}\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,46	299,39	104,55	171.11	0,27	29,63	127,36	191.30
$\mathbf{W}_{\text{st}}^1 + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,55	296,14	100,05	171.11	0,28	22,34	124,14	191.30
$\mathbf{W}_{\text{st}}^1 + 2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	1,21	303,08	100,36	171.11	0,59	28,90	131,27	191.30
$\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + \frac{1}{2}\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,62	295,10	102,18	172.20	0,49	22,78	124,08	192.45
$\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	0,72	290,20	101,10	172.20	0,58	21,25	124,00	192.45
$\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + 2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$	1,54	291,71	103,85	172.20	1,23	24,17	131,44	192.45

Анализ этих данных свидетельствует о том, что при увеличении скорости действующего ветра увеличиваются максимумы отклонений свободной поверхности. Так, удвоение скорости только стационарного ветра (\mathbf{W}_{st}^2), приводит к росту величин ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ в 2 и 1,7 по сравнению с действием \mathbf{W}_{st}^1 .

При изменении интенсивности полей ветра, полученных по модели SKIRON ($\gamma\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$; $\gamma = 1/2; 1; 2$), значения ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$ возрастают соответственно в 1,3; 3 и 1,4; 3,3 по сравнению с действием $1/2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$.

Совместное действие рассматриваемых ветров ($\mathbf{W}_{\text{st}}^{1,2} + \gamma\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$) также приводит к росту величин экстремальных отклонений. Так, при $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + 1/2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ζ_{\max} в 1,3 и $|\zeta|_{\max}$ в 1,8 раза больше, чем при $\mathbf{W}_{\text{st}}^1 + 1/2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$. При $\mathbf{W}_{\text{st}}^2 + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ ζ_{\max} в 1,3 и $|\zeta|_{\max}$ в 2 раза больше, чем при $\mathbf{W}_{\text{st}}^1 + \mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$.

Таким образом, действие стационарного ветра одного направления, но большей скорости (10 м/с) вызывает воз-

растание максимальных отклонений уровня ζ_{\max} и $|\zeta|_{\max}$: при $\frac{1}{2}\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ на 48% и 65%; при $\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ на 40% и 57%; при $2\mathbf{W}_{\text{SKIRON}}$ на 37% и 54% соответственно.

Во второй серии численных экспериментов выполнен анализ зависимости размеров областей осушения и затопления в ряде береговых районов Азовского моря от направления и скорости постоянного ветра. Для четырех направлений ветра (северный, восточный, южный и западный) установлены те районы, где затопления и осушения максимальны.

В табл. 3 приведены размеры областей осушений и затоплений для наиболее опасных направлений ветра. Для северного и южного ветра это районы станций Бердянск и Опасное, для восточного и западного ветра – Геническ и Таганрог.

Протяженность областей возможных осушений и затоплений в табл. 3 даны в зависимости от скорости постоянного ветра (10, 15 и 20 м/с) и от характерных величин углов наклона ($\beta = 1^\circ \div 3^\circ$) и подъема побережья ($\alpha = 1^\circ \div 3^\circ$).

Таблица 2

Таблица 3

Размеры (м) областей осушения и затопления, обусловленные действием постоянного ветра четырех направлений со скоростями 10, 15 и 20 м/с в зависимости от угла наклона (подъема) прибрежной области

Береговые станции	Скорость ветра, (м/с)	Размеры затопления, (м)			Размеры осушения, (м)		
		$\alpha = 1^\circ$	$\alpha = 2^\circ$	$\alpha = 3^\circ$	$\beta = 1^\circ$	$\beta = 2^\circ$	$\beta = 3^\circ$
		западный					
Геническ	10	30,37	15,19	10,13	22,35	11,17	7,45
	15	75,63	37,82	25,22	59,59	29,8	19,87
	20	107,15	53,58	35,73	120,33	60,17	40,13
		восточный					
Таганрог	10	34,38	17,19	11,46	39,54	19,77	13,18
	15	81,36	40,69	27,13	99,13	49,57	33,06
	20	145,54	72,78	48,53	131,79	65,9	43,95
		южный					
Бердянск	10	13,75	6,88	4,59	13,18	6,59	4,39
	15	36,1	18,05	12,04	33,23	16,62	11,08
	20	52,14	26,07	17,39	44,12	22,06	14,71
		северный					
Опасное	10	16,04	8,02	5,35	14,32	7,16	4,78
	15	40,68	20,34	13,57	37,82	18,91	12,61
	20	57,3	28,65	19,11	47,56	23,78	15,86

Из анализа представленных здесь данных следует, что для полученных в результате моделирования величин нагонов и сгонов, угла наклона (подъема) побережья определен максимальный размер возможной области затопления (осушения) в данном береговом районе. При этом, из четырех рассмотренных направлений ветра наиболее опасным является западный ветер, который при скорости 20 м/с приводит к затоплению, достигающему в окрестности станции Таганрог до 150 м.

Заключение. Для оценки ветровых течений и волнения в Азовском море методом математического моделирования получены количественные характеристики динамических процессов: нестационарных и стационарных течений, сгонно-нагонных явлений, вызванных атмосферными возмущениями различной интенсивности. Установлены направления ветра, для которых определены размеры наиболее опасных затоплений и осушений в ряде районов побережья Азовского моря.

Авторы выражают благодарность С.В. Станичному за предоставленные им массивы атмосферных полей модели SKIRON.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weather and Wave Forecast for Greece, Europe – Mediterranean Sea. – <http://forecast.uoa.gr>.
2. Иванов В.А., Фомин В.В., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доповіді НАНУ. – 2006. – № 11. – С. 109 – 113.
3. Иванов В.А., Черкесов Л.В., Шульга Т.Я. Динамические процессы и их влияние на распространение и трансформацию загрязняющих веществ в ограниченных морских бассейнах. – Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2010. – 178 с.
4. 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. – Р. 1 – 16.
5. Фомин В.В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря. Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – вып. 249. – С. 246 – 255.