

Т. Я. Шульга

Динамические процессы, возникающие в Азовском море под действием прогностического ветра при наличии стационарных течений

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Л. В. Черкесовым)

С использованием прогностических полей приводного ветра и атмосферного давления на основе трехмерной нелинейной модели проведен анализ сгонно-нагонных явлений в Азовском море. Выполнено сравнение результатов численных расчетов с данными прямых измерений уровня моря на ряде береговых станций. Исследовано влияние изменения интенсивности атмосферных воздействий на максимальные значения отклонений уровня и скоростей течений.

Проблема взаимодействия технических комплексов с природными приобрела в настоящее время очень большое значение. Это связано с научным обоснованием крупных инженерных задач, направленных на развитие производства и оказывающих серьезное влияние на биосферу. Количественное определение этого влияния является важнейшей составляющей принятия этих проектов с целью установления возможности эксплуатации такого рода производственных комплексов. Интенсивная хозяйственная деятельность, имеющая место в бассейне Азовского моря, подтверждает актуальность решения данной проблемы.

Изучение сгонно-нагонных явлений и течений в этом море с использованием переменного ветра и атмосферного давления без учета стационарных течений выполнены в статьях [1, 2]. Данная работа посвящена исследованию влияния стационарных течений на амплитуды колебаний уровня и изменения течений, вызываемых действием прогностического ветра в акватории Азовского моря. При этом использована трехмерная нелинейная σ -координатная модель [3, 4] и выполнено сравнение результатов математического моделирования колебаний уровня с данными натурных наблюдений на гидрологических станциях Геничеськ и Мариуполь.

1. В качестве исходных принимаются нелинейные уравнения движения однородной вязкой несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды [5]. 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 [3]. На твердых боковых границах выполняются условия прилипания. В начальный момент времени движение жидкости отсутствует, свободная поверхность горизонтальна.

Условие выхода на стационарный режим определяется тем, что на смежных шагах интегрирования по времени не происходит заметных изменений отклонений уровня и скоростей течений. Исходя из этого, находим время установления движения жидкости ($t = t_1$).

Для численной реализации в исходных уравнениях, граничных и начальных условиях выполняется переход от координаты z к координате σ [3, 4]. При этом алгоритм решения базируется на применении двухслойных разностных схем. Выбор шагов интегрирования по временным и пространственным координатам осуществляется в соответствии с критерием

устойчивости для баротропных волн [6]. Топография дна расчетной области на модельную сетку интерполирована из массива глубин, снятого с навигационных карт. Отклонения уровня Азовского моря анализируются на девяти станциях, расположенных вблизи крупных населенных пунктов.

2. В серии численных экспериментов исследуется влияние совместного действия стационарного и прогностического ($\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$ соответственно) ветров на максимальные скорости течений и экстремальные значения сгонов и нагонов. Полученные результаты сравниваются с расчетами, выполненными при моделировании волновых процессов в Азовском море, вызванных постоянным ветром или только действием прогностического ветра. В численных расчетах выход течений на установившийся режим осуществляется постоянным западным ветром, скорость которого равна 5 м/с ($\mathbf{W}_{st} = 5$ м/с). В качестве переменного по времени и неоднородного по пространству ветра используются поля приводного ветра модели *Skiron* [7] за период с 8 по 18 сентября 2007 г. (\mathbf{W}_{Skiron}). Действие прогностического ветра при наличии стационарных течений в Азовском море происходит в течение десяти суток.

В табл. 1 приведены максимальные значения скоростей стационарных течений, вызванных ветром \mathbf{W}_{st} , максимальные величины скоростей течений, генерируемых ветром \mathbf{W}_{Skiron} и их совместным действием: $\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$. Здесь же даны горизонты, координаты наибольших значений скорости и время их достижения. Из анализа этих данных следует, что при наличии стационарных течений максимумы скоростей нестационарных течений увеличиваются по сравнению со скоростями течений, вызванных действием только прогностического ветра. Сравнение величин U_{max} на различных горизонтах, в случае решения задачи при наличии ($\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$) и отсутствии (\mathbf{W}_{Skiron}) стационарного ветра, показывает, что различия максимумов скоростей на различных горизонтах составляют: 43% (1 м), 45% (3 м), 46% (5 м); 44% (10 м).

В табл. 2 даны расчетные значения максимумов нагонов и сгонов на береговых станциях Азовского моря, вызванных действием ветров \mathbf{W}_{st} , \mathbf{W}_{Skiron} и их совместным действием: $\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$. Здесь же указано время их достижения. В верхней части приведены величины нагонов, в нижней — сгонов. Из анализа представленных данных следует, что наибольшие нагоны, генерируемые системой стационарного и прогностического ветров имеют место на станции Приморско-Ахтарск. Так, в стационарном режиме нагоны здесь состав-

Таблица 1

Скорость ветра	Горизонт, м	U_{max} , м/с	x_{max} , км	y_{max} , км	t_{max} , ч
\mathbf{W}_{st}^*	1	0,16	236,90	174,08	8,00
	3	0,13	236,39	173,44	8,02
	5	0,12	237,01	173,31	8,22
	10	0,08	235,34	173,05	9,44
\mathbf{W}_{Skiron}	1	0,48	206,25	189,27	128
	3	0,46	241,75	188,88	130
	5	0,43	263,30	199,05	137
	10	0,31	238,20	175,76	145
$\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$	1	0,73	224,98	188,34	128
	3	0,69	241,41	186,61	130
	5	0,61	257,95	191,86	137
	10	0,45	235,34	174,61	145

* $\mathbf{W}_{st} = 5$ м/с.

ляют 8,1 см (\mathbf{W}_{st}); под действием ветра 57,1 см (\mathbf{W}_{Skiron}) и 80,4 см при $\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$. Отсюда видно, что максимум нагона в третьем случае в 1,41 раза больше, чем во втором. В результате совместного воздействия переменного и постоянного ветров максимальные сгоны становятся больше, чем в установившемся режиме и при отсутствии стационарных течений. Для Таганрога при $\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$ имеет место увеличение сгона в 1,6 раза по сравнению со случаем \mathbf{W}_{Skiron} .

Выполним анализ протяженности территорий возможных осушений и затоплений, возникающих под действием прогностического ветра. Зная максимальную величину сгона (нагона) и угол α подъема (опускания) береговой поверхности, определяем размер максимально возможной области затопления в данном береговом районе. Придавая α ряд значений, находим размеры областей затопления и осушения, вызванные действием ветра в различных береговых районах. Для Азовского моря характерными являются величины углов наклона и подъема побережья от $1,5^\circ$ до 4° .

В табл. 3 даны размеры участков затопления (верхняя часть таблицы) и осушения (нижняя часть таблицы), вызванных действием ветра \mathbf{W}_{Skiron} в прибрежных районах Азовского моря. Из анализа приведенных данных следует, что под действием этого ветра наибольшему затоплению (21,8 м) подвергается район Приморско-Ахтарска. Протяженность участка осушения в районе Геническа (16,2 м) превосходит значения, полученные для других прибрежных территорий. Сравнивая величины областей затоплений и осушений для различных углов наклона береговой зоны, отметим, что при увеличении указанных углов районы затоплений и осушений уменьшаются.

Таким образом, в ходе исследований выполнено сравнение результатов моделирования и натурных измерений уровня моря, приведенных Государственной метеорологической

Таблица 2

Береговые станции	Скорость ветра					
	\mathbf{W}_{st}		\mathbf{W}_{Skiron}		$\mathbf{W}_{st} + \mathbf{W}_{Skiron}$	
	ζ_{max} , см	время, ч	ζ_{max} , см	время, ч	ζ_{max} , см	время, ч
Геническ	—	—	25,4	34	32,2	34,6
Бердянск	—	—	9,1	161,5	16,9	162,0
Мариуполь	9,8	19,0	29,3	129,2	46,4	130
Таганрог	20,7	12,1	50,6	162,4	63,1	162,6
Ейск	13,8	14,5	38,1	142,1	76,0	143
Приморско-Ахтарск	8,1	14,6	57,1	142,3	80,4	142,8
Темрюк	10,2	15,0	24,5	140,5	29,7	141
Опасное	—	—	9,4	122,5	16,1	122,1
Мысовое	7,5	24,0	12,1	34,6	19,6	36
Геническ	12,2	13,6	42,5	132,2	76,5	132
Бердянск	4,0	13,3	17,3	131,5	30,9	132
Мариуполь	—	—	18,2	29,4	26,0	30
Таганрог	—	—	29,0	40,0	42,4	39,6
Ейск	—	—	18,9	42,1	41,1	43
Приморско-Ахтарск	—	—	14,1	32,2	23,8	33,0
Темрюк	—	—	8,7	166,2	11,2	166
Опасное	6,3	16,5	10,6	162,6	20,5	162,8
Мысовое	—	—	22,3	161,8	39,4	162,2

Таблица 3

Береговые станции	W_{Skiron}		
	$\alpha = 3^\circ$	$\alpha = 2^\circ$	$\alpha = 1,5^\circ$
Геническ	4,9	7,3	9,7
Бердянск	1,7	2,6	3,5
Мариуполь	5,6	8,4	11,2
Таганрог	9,7	14,5	19,3
Ейск	7,3	10,9	14,6
Приморско-Ахтарск	10,9	16,4	21,8
Темрюк	4,7	7,0	9,4
Опасное	1,8	2,7	3,6
Мысовое	2,3	3,5	4,6
Геническ	8,1	12,2	16,2
Бердянск	3,3	5,0	6,3
Мариуполь	3,5	5,2	7,0
Таганрог	5,5	8,3	11,1
Ейск	3,6	5,4	7,2
Приморско-Ахтарск	2,7	4,0	5,4
Темрюк	1,7	2,5	3,3
Опасное	2,0	3,5	4,2
Мысовое	4,3	6,4	8,5

службой Украины за период с 8 по 18 сентября 2007 г. в таблицах ежечасных данных высот уровня. Оценено отклонения его экстремальных значений, рассчитанных методом математического моделирования для полей прогностического ветра и полученных из указанных ежечасных таблиц. В Геническе величина расчетного максимума составляет 25,4 см, что на 4,7 см (16%) меньше, чем по данным наблюдений. В Мариуполе найденный в результате расчетов максимальный нагон (29,3 см) на 4,0 см (12%) меньше измеренного. Из приведенного анализа следует, что амплитуды колебаний уровня, полученные по натурным данным и путем численных расчетов, достаточно хорошо совпадают. Некоторые отличия величин максимумов сгонов и нагонов могут быть объяснены определенными погрешностями при измерениях и вычислениях.

1. Иванов В. А., Фомин В. В., Черкесов Л. В., Шульга Т. Я. Исследование сгонно-нагонных явлений в Азовском море, вызванных атмосферными возмущениями // Доп. НАН України. – 2006. – № 11. – С. 109–113.
2. Фомин В. В., Шульга Т. Я. Исследование волн и течений, возникающих под действием ветра в Азовском море // Там же. – 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 // Coast. Estuar. Sci. – 1987. – 4. – P. 1–16.
4. Фомин В. В. Численная модель циркуляции вод Азовского моря // Научные труды УкрНИГМИ. – 2002. – Вып. 249. – С. 246–255.
5. Черкесов Л. В., Иванов В. А., Хартиев С. М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. – 264 с.
6. Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM J. – 1967. – 3. – P. 215–234.
7. Weather, Wave Forecast for Greece, Europe – Mediterranean Sea. – <http://forecast.uoa.gr>.

Морской гидрофизический институт
НАН Украины, Севастополь

Поступило в редакцию 14.11.2011

Т. Я. Шульга

**Динамічні процеси, що виникають в Азовському морі під дією
прогностичного вітру за наявності стаціонарних течій**

З використанням прогностичних полів приводного вітру та атмосферного тиску на основі тривимірної нелінійної моделі проведено аналіз згінно-нагінних явищ в Азовському морі. Виконано порівняння результатів чисельних розрахунків з даними прямих вимірів рівня моря на ряді берегових станцій. Досліджено вплив зміни інтенсивності атмосферних дій на максимальні значення відхилень рівня та швидкостей течій.

T. Ya. Shul'ga

**Dynamic processes arising in the Sea of Azov under the action of
forecast fields of wind in the presence of stationary flows**

With the use of the forecast fields of wind and atmospheric pressure on the basis of a three-dimensional nonlinear model, the analysis of the surge phenomena in the Sea of Azov is conducted. Comparing the results of numeral calculations with the data of direct measurements of the sea level on the row of waterside stations is executed. Influence of a change of the intensity of atmospheric effects on the maximal values of deviations of the level and the speeds of flows is investigated.