

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИ
ЭКСПЛУАТАЦИИ НА КОРОТКИХ МОРСКИХ ЛИНИЯХ

Прогнозирование режимов движения судна в заданных условиях рейсового задания является сложной и многокомпонентной задачей. Основными критериями эффективности при этом назначаются: безусловное обеспечение безопасности перехода и выдержка времени прибытия в порт назначения с максимальной экономичностью по путевым расходам. Исходными данными для постановки этой задачи являются следующие три основных блока данных.

1. По состоянию судну – его базовые характеристики статики и ходкости в состоянии после последнего докования и расширенной точистки главного двигателя (ГД), а также исходные перед рейсом: прежде всего, объемное водоизмещение на расчетную осадку V_0 , м³, скорость полного хода судна на тихой воде при отсутствии ветра v_0 , уз., при соответствующем значении мощности ГД – N_{e0} , кВт, и часовом расходе топлива $B_{ч0}$, кг/ч.

Соответственно, суммарная сила сопротивления движению судна в этом состоянии может быть определена по уточненной методике [1] или оценена по формуле $R_0 = V_0^{0,567} v_0^{2,6} / 800$, кН (погрешность в величине R_0 при вычислении по приведенной формуле составляет 3,5 – 3,8 %).

В качестве основного критерия эффективности принимается значение $(\Delta B_{ч} / \Delta v)_0$ или B_m , л/миля, кроме того оценивается величина пропульсивного КПД судна в исходном состоянии

$$\eta_{D_0} = \frac{(1 - t_s)}{(1 - w)} \eta_{p_0} \eta_{вп},$$

где t_s, w – коэффициенты засасывания и попутного потока, определенные по формулам, приведенным в [1], $\eta_{вп}$ – КПД валопровода; η_{p_0} – КПД винта,

$$\eta_{p_0} = \frac{K_{1_0}}{K_{2_0}} \frac{\lambda_{p_0}}{2\pi}; \quad \lambda_{p_0} = \frac{v_{A_0}}{n_0 D_p}; \quad v_{A_0} = v_0(1 - w);$$

K_{1_0}, K_{2_0} – коэффициенты упора и момента для точки режима относи-

тельной поступи λ_{p_0} ; D_p – диаметр винта; n_0 – частота вращения гребного вала.

Величину η_{D_0} в исходном состоянии (V_0, v_0, N_{e_0}) следует сравнивать с его значением для судна после докования, или вычисленным по выражению, предложенному Эмерсоном (Emerson):

$$\eta_D = 0,885 - 0,0012 \cdot n_0 \cdot L_{\perp\perp}^{0,5},$$

где n_0 , мин^{-1} ; $L_{\perp\perp}$ – длина между перпендикулярами, м.

2. По главному двигателю – величина построечной максимальной длительной мощности MCR, а также мощность, потребная для обеспечения скорости полного хода v_0 : $N_{e_0} = R_0 v_0 / \eta_{\text{вп}}$ с уточнением положения точки этого режима в системе $N_e - n$ и с приведением ограничительных характеристик двигателя.

3. По ветро-волновому режиму районов A_i , которые во время рейса предстоит пересечь судну в движении, оцениваемому статистическими характеристиками волнения: h_{w_i} – высота волны, м; ее период T_{w_i} , с; повторяемость p , % и обеспеченность f , % для режима условно регулярного волнения из Global Waves Statistics или из [3], или расчетный спектр волнения, например, по Пирсону-Московицу [10].

При наличии указанных исходных данных и задании в первом приближении скорости v_1 для перехода района A_i величина сопротивление движению судна

$$R = f_V f_T f_A f_{\text{вт}_i} f_{w_i} (v_1/v_0)^2 = f_R R_0 (v_1/v_0)^2,$$

где f_V , f_T , f_A , $f_{\text{вт}_i}$, f_{w_i} – фактор влияния соответственно загрузки, посадки (дифферента), состояния корпуса, ветрового сопротивления и волнения.

Фактор (коэффициент) влияния текущей загрузки судна V определяется по формуле Фелкера (Völker), [8]: $f_V = (V/V_0)^{0,567}$, и в течение рейса имеет постоянное значение.

Фактор влияния водоизмещения f_T зависит от дифферента при данной загрузке, при посадке на ровный киль $f_T = 1$.

Фактор влияния состояния корпуса f_A определяет изменение величины сопротивления трения ΔR_f и зависит от состояния покрытия наружной обшивки подводной части корпуса, а также от его технического состояния, величина ΔR_f в эксплуатации может быть оценена,

например, по формуле Аэртссена (Aertssen) [1]:

$$\frac{\Delta R_f}{R_{f_0}} = 0,01 \left(\frac{ad}{(b+d)} + \frac{d_0}{c} \right).$$

В приведенной формуле константы a, b, c определяют изменение состояния покрытия; d и d_0 – изменение состояния обшивки корпуса от момента последнего докования; тем самым, в приведенной формуле имеются две составляющие: первая оценивает состояние покрытия, вторая – наличие вмятин и износа корпуса.

"Весовая" величина f_A будет зависеть от отношения величины сопротивления трения R_{f_0} к R_0 и будет более значительной при больших значениях числа Фруда Fr_H .

Фактор $f_{вТ}$ определяется величиной ветрового сопротивления $R_{вТ_i}$:

$$f_{вТ_i} = R_{вТ_i} / R_0; R_{вТ_i} = C_{вТ_i} \rho_{вТ_i} / 2 \cdot (v_1 + v_{вТ_i} \cos \alpha_{вТ_i})^2 A_{вТ_i},$$

где $C_{вТ_i}$ – коэффициент ветрового сопротивления; $\rho_{вТ_i} = 1,215 \cdot 10^{-3}$ т/м³ при 18° С – плотность воздуха; $v_{вТ_i}$ – скорость ветра; $\alpha_{вТ_i}$ – курсовой угол ветра; $A_{вТ_i}$ – площадь проекции надводной части судна на плоскость мидель-шпангоута.

Наиболее важным, но и наиболее сложным в прогнозировании рейса является оценка влияния волнения, т.е. фактора f_{w_i} .

Общая (средняя) величина силы сопротивления от волнения для района A_i $R_{w_i} = C_{w_i} \rho g h_{3\%}^2 \cdot B/L$, где C_{w_i} – коэффициент сопротивления от волнения; ρ – плотность, т/м³; B – ширина, м; L – длина, м; $h_{3\%}$ – высота волны 3 %-ной обеспеченности, м.

Для наиболее тяжелого режима движения "вразрез волне и против ветра" величина коэффициента C_{w_i} может быть оценена по графику (рис. 1) из [4] в зависимости от отношения высоты волны 3 %-ной обеспеченности $h_{3\%}$ к длине судна L и от числа Фруда Fr .

Для судов ограниченного района плавания, работающих на коротких морских линиях (SSS) и имеющих число Фруда $Fr = 0,15 \dots 0,20$ при волнении с высотой волны 3 %-ной обеспеченности $h_{3\%} \approx 3,5$ м (начало штормования) и отношении $h_{3\%}/L < 3$ % величина теоретического коэффициента C_w из рис. 1 не превышает 0,15 – 0,18.

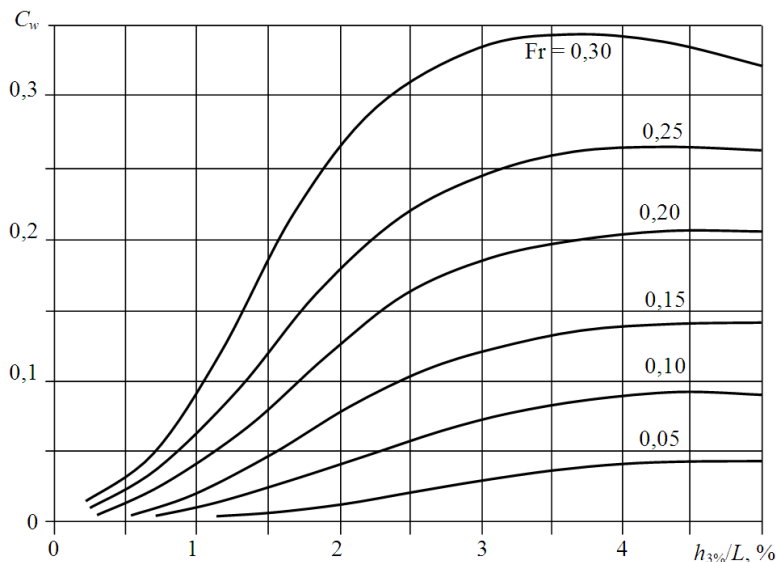


Рис. 1. Определение коэффициента дополнительного сопротивления при нерегулярном волнении, [4]

Соответственно $f_{w_i} = R_{w_i} / R_0$.

Таким образом, в первом приближении факторы влияния f_v, f_T, f_A , определяются на базе эмпирических формул или накопленных статистических данных, а факторы $f_{вт}$ и особенно f_w требуют уточнения непосредственно перед началом движения судна. При этом следует учесть, что величина f_A , вычисленная по формуле Аэртссена будет изменяться в зависимости от характеристики волнения $h_{3\%}$ (рис. 2).

Предварительно оценив величины факторов влияния, определим в первом приближении потребную величину средней мощности на валу N_p для обеспечения расчетной скорости v_1 :

$$N_p = R_t \frac{v_1}{(\eta_D f_p)} = f_R R_0 \frac{v_1}{(\eta_D f_p)},$$

где $f_p = \eta_p / \eta_{p0}$; $f_N = f_R / f_p$; η_p – КПД винта.

Соответственно, для режима работы судна при проходе района A_i в первом приближении скорости v_1 :

$$f_R = \frac{K_1/\lambda_p^2}{K_{1_0}/\lambda_{p_0}^2} = \frac{K_1}{K_{1_0}}; f_p = \frac{K_1}{K_{1_0}} \frac{K_2}{K_{2_0}} \frac{\lambda_p}{\lambda_{p_0}}; f_N = \frac{f_R}{f_p} = \frac{K_2}{K_{2_0}} \left(\lambda_p/\lambda_{p_0}\right)^3.$$

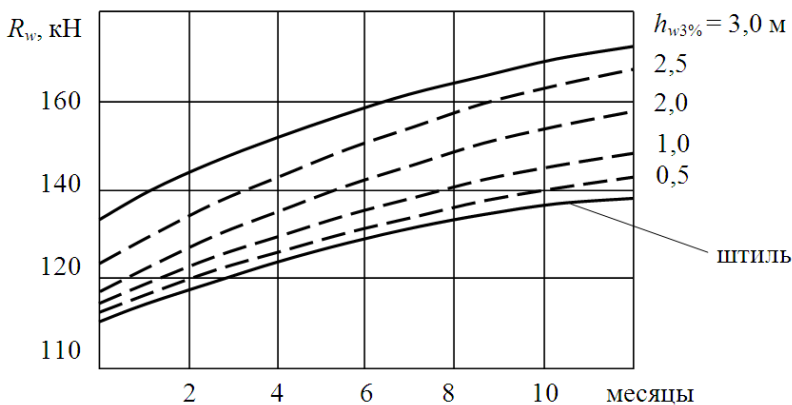


Рис. 2. Зависимость расчетной силы сопротивления морского судна ($D_w = 4000$ т) при волнении и изменении эксплуатационной шероховатости корпуса при скорости $v = 9$ уз. = const

Величины η_p, K_1, K_2 определяются по диаграммам гидродинамических характеристик свободно вращающегося винта $\eta_p = f(\lambda_p)$; $K_1 = f(\lambda_p)$; $K_2 = f(\lambda_p)$ при значении $\lambda_p = v_A/n_0 D_p$; $v_A = v(1 - w_i)$, т.е. для первого приближения полагаем $n = n_0$. Для гребных винтов также следует иметь прогнозные значения приращений $K_1 = K_{1_0} + \Delta K_{1_A}$, $K_2 = K_{2_0} + \Delta K_{2_A}$ и $\eta_p = \eta_{p_0} + \Delta \eta_{p_A}$ от износа и обрастания лопастей. Изменения значений t_{s_i} и w_i оцениваются по методике [1]. При наличии этих данных определяются значения η_D .

Величина мощности главного двигателя для обеспечения скорости v_1 и часовой расход топлива определяются из выражений:

$$N_e = \frac{N_p}{f_N} \text{ или } N_e = \frac{K_2}{K_{2_0}} \frac{\lambda_{p_0}}{\lambda_p} \frac{\eta_{D_0}}{\eta_D} N_{e0}; B_4 = b_e N_{e0}.$$

Данные расчеты в табличной форме (табл. 1) выполняются в судовой компании и носят характер первого приближения.

Таблица 1

Район перехода	Дистанция, км	Средняя скорость, узл.	Факторы					R_t , кН	N_e , кВт	$B_{\text{ч}}$, кг/ч
			f_v	f_T	f_A	$f_{\text{вт}}$	f_w			
A_i										

Второе приближение, т.е. уточнение величины скорости и соответственно R_t , N_e , $B_{\text{ч}}$ осуществляется на судне с учетом прогнозных данных ветра и волнения в районе A_i .

Исходя из превалирующего значения критерия безопасности, прежде всего в каждом районе A_i необходимо учитывать ограничения по мореходным качествам судна, а именно исключая возникновение опасных явлений, таких, как слеминг, заливание палубы, чрезмерная бортовая и килевая качка, рыскание и др. Оценка возникновения таких опасных явлений возможна, например, с помощью бортового пакета программ SafeSeamanShip Expert (ЦНИИМФ), в основу которых положены формулы поведения судна при качке Липиса В.Б. [5].

На диаграммах (рис. 3) показаны режимы движения судна на встречных курсовых углах (курсовой угол встречи волн $\varphi_w = 15^\circ$) в диапазоне состояния моря от легкого волнения (менее 1 балла) до шторма 5 баллов при заданной скорости судна $v = 10$ узлов. При этом при легком волнении (1 балл) наблюдаются удары волн (слеминг), который затихает при увеличении балльности от 1 до 3 баллов. Бортовой слеминг снова появляется при волнении 4 балла и выше. При движении на заданных курсовых углах другие опасные явления – заливание палубы, бортовая и килевая качка, днищевой слеминг, параметрический резонанс, рыскание – не наблюдаются. Их появление возможно на курсовых углах $\varphi_w > 80^\circ$ – параметрический резонанс и резонанс бортовой качки. На курсовых углах, близких к попутному волнению ($130^\circ < \varphi_w < 230^\circ$), опасных явлений не наблюдается.

Возникновение опасных явлений (вероятность их оценивается в годичном цикле эксплуатации в 10 – 20 %) определяется соотношением условий волнения, параметров судна (осадка носом T_n и кормой T_k , поперечная метацентрическая высота $h_{\text{м}}$, коэффициент общей полноты C_b , ускорения при качке) и их соотношениями: длины волны к длине судна λ_w/L , скорости v и курсового угла встречи волн φ_w .

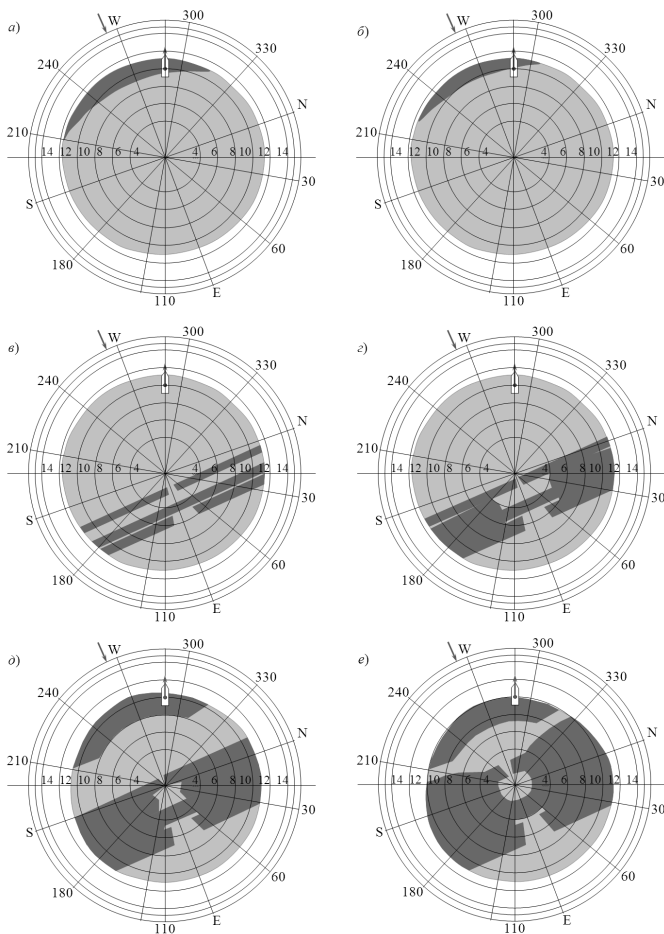


Рис. 3. Диаграммы опасных явлений (движение судна на встречном волнении, курсовой угол встречи волн $\varphi = 15^\circ$): *a* – волнение до 1 балла, при скорости судна выше 9,5 узлов на носовых курсовых углах наблюдаются удары бортового слеминга; *б* – волнение 1 – 2 балла, при скорости судна выше 10,2 узлов на носовых курсовых углах наблюдаются удары бортового слеминга; *в* – волнение 2 – 3 балла, на лаговых курсовых углах появляются зоны, опасные в отношении резонанса бортовой, килевой качки и параметрического резонанса; *г* – волнение 3 – 4 балла, зона резонанса бортовой качки стала заметно шире; *д* – 4 – 5 баллов, к еще более широкой зоне резонанса бортовой и килевой качки, параметрического резонанса добавилась зона бортового слеминга на носовых курсовых углах; *е* – шторм 5 баллов, движение судна возможно лишь на курсовых углах, близких к попутным

Для судов, совершающих рейсы в закрытых морях и на коротких морских линиях (SSS), в отличие от работы в океане и открытых морях, при назначении режима ГД исходят прежде всего из условия движения судна по рекомендованным курсам [6], при этом возникает дополнительное влияние курсового угла встречи волн φ_w , величина которого может быть оценена по величине потери скорости, например, по формуле Аэртссена:

$$100 \frac{\Delta v}{v_0} = \frac{k_s}{L_{\perp\perp}} + n_s,$$

где k_s , n_s – коэффициенты, зависящие от курсового угла встречи волн и интенсивности волнения моря.

Следовательно, второе приближение величины скорости v_2 и часового расхода топлива $B_{\text{ч}}$ и последующего поиска управлений, минимизирующего соотношение расхода топлива на милю пути B_m , будет определяться на базе несколько суженной области режимов и учитывать дополнительное влияние курсового угла встречи волны φ_w .

Проведенными специальными натурными испытаниями одной серии судов рассматриваемого класса [7, 8, 9] в различных условиях загрузки, волнения и курсовых углов встречи показали возможность получения устойчивой зависимости часового расхода топлива при стабильном в течение 4 – 6 часов спектре волнения и соблюдения условия исключения опасных явлений в виде

$$\Delta B_{\text{ч}} = K_1 (h_{3\%})^{\alpha_1} + K_2 (\varphi_w)^{\alpha_2}.$$

При строгом исполнении рекомендаций по уходу от режимов опасных явлений с выбором снижения скорости $v_2 = v_1 + \Delta v$ и курсовых углов, соблюдается примерная зависимость $B_{\text{ч}} \sim v^3$ (рис. 4).

Соответственно, поиск управлений, т.е. назначения скорости v_2 , обеспечивающий возможность минимизации $B_{\text{ч}}$, возможен при четком уяснении пределов управляемости судна, т.е. исключения опасных явлений в условиях волнения. Для рассматриваемого судна типа "Измаил" при скоростях $v = 9 \dots 8$ узлов можно определить:

зону устойчивого управления до максимальной высоты волны $h_{3\%} = 2,5$ м с периодом до 3,5 с при курсовых углах встречи волн $-15^\circ < \varphi_w < +15^\circ$;

зону перехода к штормованию – высота волны $h_{3\%} = 2,5 - 3$ м с периодом 3,5 – 5 с при носовых и лаговых курсовых углах встречи волн (рис. 3).

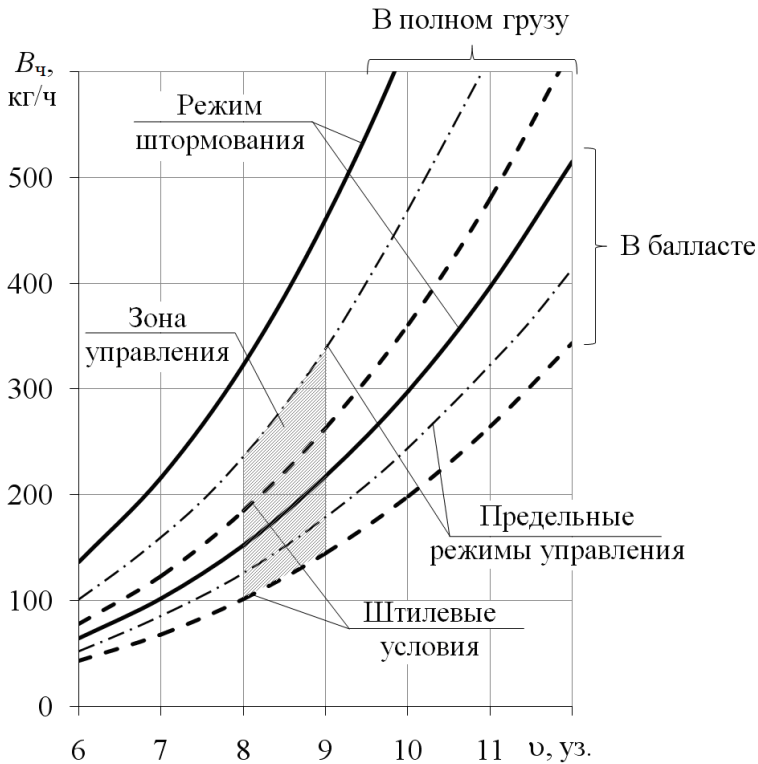


Рис. 4. Уточнение зоны режимов движения судна при курсовом угле встречи волн $-15^\circ < \varphi_w < +15^\circ$

Линия предельной управляемости $B_{\text{ч}} = f(v)$, т.е. при которой еще возможно направленно (намеренно) снижать скорость с сохранением требований критериев безопасности показана на рис. 4. Возможно уточнение значения v_2 , исходя из компромисса соотношения $\Delta B_{\text{ч}}/\Delta v$ и величины пропульсивного КПД η_D по отношению к η_{D_0} . В последнем случае следует учитывать, что естественное снижение η_D происходит при отношении $\lambda_w/L = 0,75 - 1,25$ [10].

После определения значения $v_2 = v_1 + \Delta v$ и $B_{\text{ч}}$ необходимо уточнение значений средней мощности двигателя и времени перехода участка A_i . Эти данные, а также новые условия волнения являются ис-

ходными для участка A_{i+1} (для коротких морских линий количество участков A_i не превышает трех).

При этом принимается, что волнение в районе A_i является также регулярным, и параметры волнения (h_{wi+1}, T_{wi+1}, f, p) принимаются постоянными. Кроме того, при переходе в район A_{i+1} предполагаются их скачкообразные изменения по отношению к A_i .

Таким образом, предложена оценка характеристик ходкости судна на основании разбивки маршрута следования на отдельные участки и учёта для каждого участка факторов влияния на величину сопротивления движения судну, а также ограничений по опасным явлениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Прогнозирование влияния нерегулярного волнения на ходкость одновинтового судна // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2005. – Вып. 10. – Одесса: ОНМА. – С. 76 – 92.
2. Handbuch Nautik II. Technische und betriebliche Shiffsführung. Hamburg: Seehafen Verlag, 2011. – 776 s.
3. Ветер и волны в океанах и морях: справочные данные. Регистр СССР. – Л.: Транспорт, 1974. – 359 с.
4. Справочник по теории корабля: в 3 т. /Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. Т.1: Гидромеханика, сопротивление движению судов, судовые движители. 764 с. Т.2: Статика судов, качка судов. 440 с. Т.3: Управляемость водоизмещающих судов, гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. – 540 с.
5. Липис В.Б. Гидродинамика гребного винта при качке судна. – Л.: Судостроение, 1975. – 264 с.
6. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Задача создания Short Sea Shipping – коротких морских сообщений для Дуная // International Black Sea Transport Forum. Транспортная стратегия Украины. 21 – 22 октября 2009 г. Официальный каталог – 2009. – Одесса: Mediacompass. – С. 40 – 41.
7. Суворов П.С., Тарасенко Т.В., Домбровский В.А. Оценка расхода топлива в судовых условиях // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2006. – Вып. 11. – Одесса: ОНМА. – С. 78 – 87.
8. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Оценка расхода топлива и потери скорости в условиях штормового волнения // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2007. – Вып. 12. – Одесса:

ОНМА. – С. 115 – 121.

9. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Экономичные режимы главных двигателей с ВРШ в условиях волнения // Автоматизация судовых технических средств: научн.-техн. сб. – 2009. – Вып. 15. – Одесса: ОНМА. – С. 83 – 98.

10. Суворов П.С., Тарасенко Т.В. Определение рационального шага ВРШ в условиях доштормового волнения на коротких морских линиях // Судовые энергетические установки: научн.-техн. сб. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С. 111 – 123.