

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ ПО СПАСЕНИЮ ЛЮДЕЙ В МОРСКОЙ ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ УКРАИНЫ

**Годованюк С. П.**, старший преподаватель Херсонской государственной морской академии, e-mail: godovaniuk1969@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0382-2440;

**Селиванов С. Е.**, д.т.н., профессор Херсонской государственной морской академии, e-mail: godovaniuk1969@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8813-6276

*К морской зоне ответственности Украины относится определенная зона Черного и Азовского морей. При моделировании поисково-спасательной операции по спасению людей в море составлены математические модели: изменения температуры тел в воде, колебания температуры по месяцам для Черного и Азовского морей. Для построения математической модели изменения температуры тела человека в воде использовался закон Ньютона-Рихмана. Построены графики зависимости изменения температуры тела человека в воде для разных температур воды при значениях коэффициента теплоотдачи как функции различия температур. Проведен помесичный анализ колебаний температуры воды в Черном и Азовском морях. Построен график колебаний температуры воды в Азовском море и приведен соответствующий аппроксимирующий полином. Проведенный анализ работы спасательных операций показал, что повышение эффективности спасательных операций предлагается достичь за счет увеличения процента перекрытия береговой линии путем создания дополнительных пунктов базирования средств спасания и увеличение количества скоростных катеров. Получены абсолютные и процентные количественные значения, на которые может быть повышен уровень эффективности казенного предприятия (КП) «Морская поисково-спасательная служба».*

**Ключевые слова:** зона ответственности, моделирование, математические модели, спасательные операции, колебания температуры, эффективность предприятия.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.012-019**

**Введение.** Бурное развитие научно-технического прогресса, а именно развитие новейших нанобиоинформационно-когнитивных технологий (NBIC) положительно повлиял на ситуацию и вызвал потребность в разработке новой концепции и создания во всемирном масштабе эффективной системы поиска и спасания (САР от английского SAR *search and rescue*) [1]. На выполнение требований IAMSAR относительно улучшения координации управления поиском и спасанием людей на море Украина создала единую систему поиска и спасания людей на море (ЕСПСМ) [2]. Поисково-спасательные силы Украины согласно международным обязательствам государства должны обеспечить поиск и спасание людей, судов и др. в определенной морской зоне ответственности Украины [3]. Организационно-техническое обеспечение деятельности Комитета осуществляет Мининфраструктуры при участии казенного предприятия «Морская поисково-спасательная служба» (КП «МПСС») [4].

В системе поиска и спасания – SAR выделяют 3 вида спасания: спасание людей, спасание имущества, спасание от загрязнения [1, 5]. Основные правовые документы, регламентирующие спасание на море: Конвенция по поиску и спасанию на море 1979 г. [1] и Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 (СОЛАС-74) [6]. Основной нормативный акт – Кодекс торгового мореплавания (КТМ), в котором изложены права и обязанности капитана и экипажа судна при оказании помощи в море судну или лицу, которым угрожает гибель [7].

**Постановка задачи.** Жесткие ограничения на имеющееся время спасения людей в море накладывают временные условия выживания человека в воде. Эти условия зависят от поры года, погодных условий, состояния поверхности моря, подводных и ветровых течений и т.п. Поэтому при моделировании поисково-спасательной операции необходимо, в первую очередь, составить математические модели: изменения температуры тела человека в воде, а также колебание температуры по месяцам для Черного и Азовского морей.

**Цель работы.** Построить математические модели изменения температуры тела человека в воде, модель колебания температуры воды в Черном и Азовском морях, провести исследования условий для повышения эффективности спасательных операций.

**Результаты исследований.** Для построения математической модели изменения температуры тела человека в воде использовался закон Ньютона-Рихмана, который запишем в виде дифференциального уравнения первого порядка [1]:

$$\frac{dT_b}{dT} = k(T_v - T_b), \quad (1)$$

где  $T_b$  – внутренняя температура тела человека;  $T_v$  – температура окружающей воды в море/океане;  $k$  – коэффициент пропорциональности, который может быть не всегда постоянным для определенных диапазонов температур.

Коэффициент может быть определен как:

$$k = \frac{\alpha S}{C}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, который большей частью определяется экспериментально, а также не всегда является постоянной величиной;  $S$  – эффективная поверхность тела;  $C$  – теплоемкость тела.

Решение дифференциального уравнения изменения температуры тела человека в воде (1) запишем так:

$$T_b(t) = T_v + (T_{ob} - T_v)e^{-kt}, \quad (3)$$

где  $T_{ob}$  – начальная внутренняя температура тела человека.

Учитывая формулу (2), получим:

$$T_b(t) = T_v + (T_{ob} - T_v)e^{-\frac{\alpha S}{C}t}. \quad (4)$$

Для тела человека возьмем значение эффективной поверхности тела человека  $S = 1,8 \text{ м}^2$ , удельная теплоемкость тела  $C_{\text{чт}} = 3,47 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , средняя масса человека – 80 кг, начальная внутренняя температура тела человека  $T_{ob} = 36,8 \text{ }^\circ\text{C}$  [2].

Используя эти данные, а также принимая во внимание, что при температуре тела  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  теряется сознание, снижение температуры тела до  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  – опасно для жизни, а ниже  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  – наступает смерть, найдем коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  для значений, приведенных в табл. 1.

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  возьмем среднее значение температурных и временных интервалов (табл. 1).

Таблица 1 – Средние значения температурных интервалов

Температура воды, $^\circ\text{C}$	Время до наступления, ч		Допустимое время, мин
	потеря сознания	возможной смерти	
10	0,25 – 0,5	0,25 – 1,5	3 – 5
10 – 12	0,5 – 1	1 – 2	10
13 – 15	2 – 4	4 – 6	20
16 – 18	3 – 5	6 – 8	30
19 – 21	4 – 7	8 – 10	40
26	12	Опасно для жизни	

Построим графики зависимости изменения температуры тела человека в воде для разных температур воды при значениях коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  как функции температур (рис. 1).

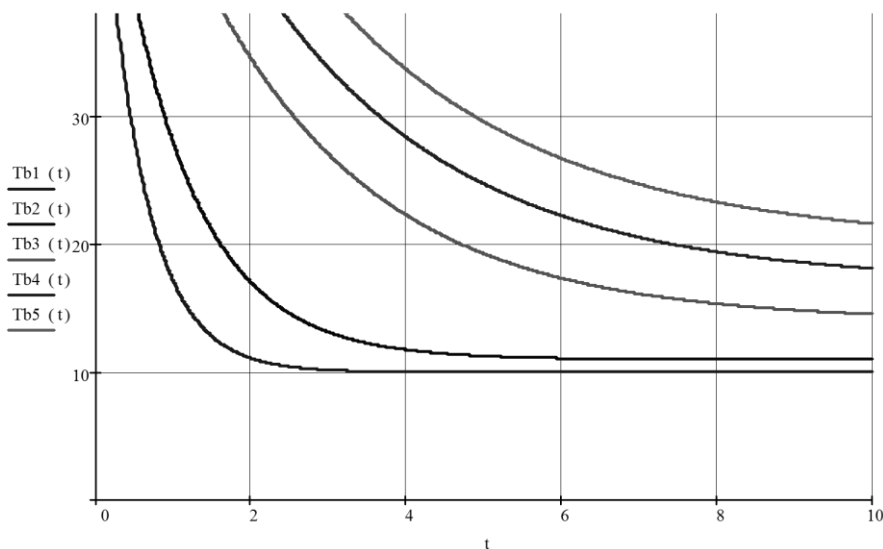


Рисунок 1 – Графики изменения температуры тела человека в воде в зависимости от температуры воды:

$T_{b1}(t)$  – для температуры воды 10 °С,  $T_{b2}(t)$  – для температуры воды 11 °С,  $T_{b3}(t)$  – для температуры воды 14 °С,  $T_{b4}(t)$  – для температуры воды 17 °С,  $T_{b5}(t)$  – для температуры воды 20 °С

Приведем помесичный анализ колебаний температуры воды в Черном и Азовском морях (табл. 2) [3].

Таблица 2 – Колебание температуры воды в Черном и Азовском морях

Номер n/n	Месяц	Температура морской воды $T_w$ °С	
		Черное	Азовское
1	Январь	+8,9	+3,5
2	Февраль	+7,8	+3,7
3	Март	+8	+4,1
4	Апрель	+10,4	+9,5
5	Май	+16,7	+18,4
6	Июнь	+22	+23,6
7	Июль	+24,9	+25,7
8	Август	+25,9	+25,3
9	Сентябрь	+23,1	+19,9
10	Октябрь	+18,5	+14
11	Ноябрь	+14,4	+8,5
12	Декабрь	+11,2	+4,5

Анализ данных табл. 2 свидетельствует, что температура воды в Черном море в течение года колеблется в диапазоне от +7,8 °С до +25,9 °С, а в Азовском – от +3,5 °С до +25,7 °С. При этом колебание температуры имеет сезонный характер, так минимальная температура воды в Черном море наблюдается в феврале, в Азовском – в январе. Максимальная температура воды в Черном море обычно в августе, тогда как в Азовском – в июле.

На основании выполненного анализа построим математическую модель колебаний температуры воды в Черном и Азовском морях, применяя программный пакет MS Excel 365. Как временной интервал возьмем интервал один месяц. Каждому месяцу предоставляем порядковый номер согласно номеру в календарном году.

По результатам исследования установлено, что наилучшую степень соответствию статистическим данным, согласно методу наименьших квадратов, для колебаний температуры воды в Черном море имеет полином 5-го порядка (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9936$ ), а для колебаний температуры воды в Азовском море – полином 6-го порядка (коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9968$ ).

Полученную математическую модель колебаний температуры воды в Черном море представим в такой форме:

$$T_{vB}(t_n) = 0,0029 \cdot t_n^5 - 0,074 \cdot t_n^4 + 0,4893 \cdot t_n^3 + 0,1167 \cdot t_n^2 - 4,7918 \cdot t_n + 13,414, \quad (5)$$

а математическая модель колебаний температуры воды в Азовском море:

$$T_{vA}(t_n) = -0 \cdot t_n^6 + 0,0463 \cdot t_n^5 - 0,6995 \cdot t_n^4 + 4,7354 \cdot t_n^3 - 13,842 \cdot t_n^2 + 17,105 \cdot t_n - 3,7265 \quad (6)$$

По результатам моделирования построен график колебаний температуры воды в Черном море, и соответствующий аппроксимирующий полином приведен на рис. 2; график колебаний температуры воды в Азовском море соответствующий аппроксимирующий полином на рис. 3.

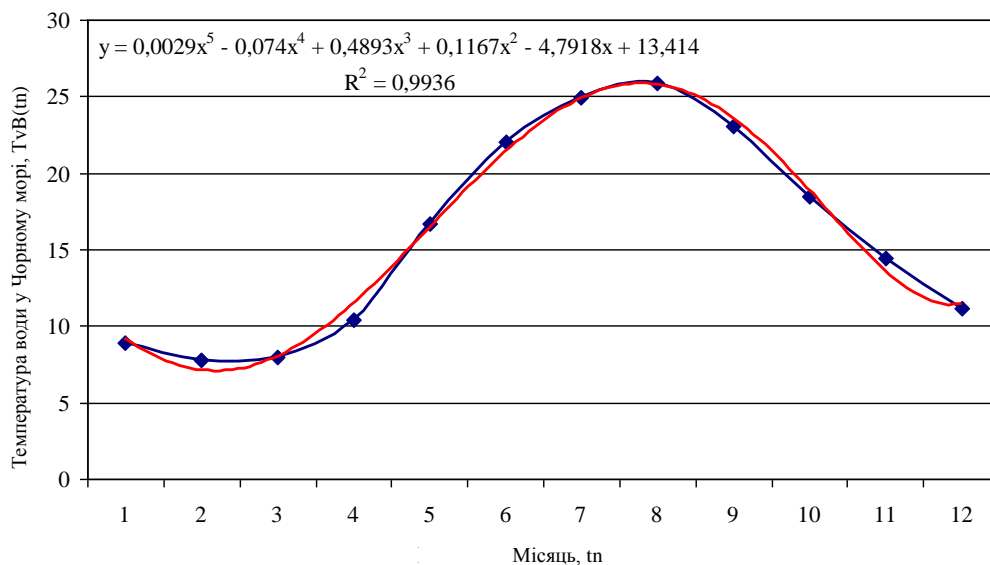


Рисунок 2 – График колебаний температуры воды в Черном море и соответствующий аппроксимирующий полином

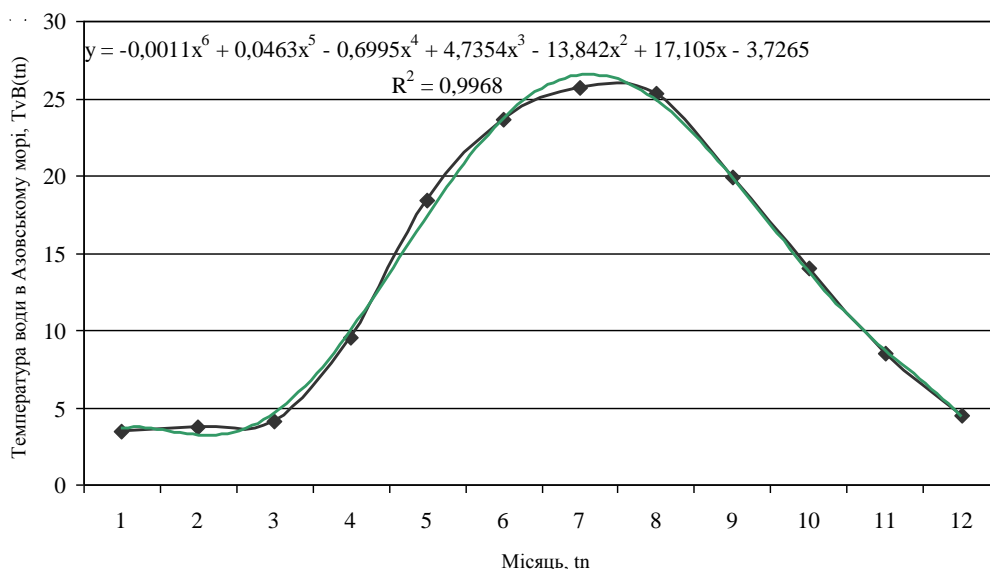


Рисунок 3 – График колебаний температуры воде в Азовском море и соответствующий аппроксимирующий полином

Зависимости (5) и (6) могут быть подставлены в формулу (4) с учетом коэффициента  $\alpha$  как функции различия температур. Из уравнения (3) получена зависимость для времени пребывания человека в воде:

$$t = - \frac{\ln \left( - \frac{T_v - T_b}{T_{ob} + T_v} \right)}{k} \tag{7}$$

Полученные ежемесячные значения допустимого времени пребывания человека в воде  $t_{доп}$  для температуры тела  $T_b = 20^\circ\text{C}$  (наступление смерти) для Черного и Азовского морей сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значение максимально допустимого времени пребывания человека в водах Черного и Азовского морей

Номер n/n	Месяц	Максимально допустимое время пребывания человека в воде (для $T_b = 20^\circ\text{C}$ ), ч	
		Черное	Азовское
1	Январь	0,75	0,475
2	Февраль	0,68	0,484
3	Март	0,7	0,502
4	Апрель	0,85	0,789
5	Май	7,16	9,1
6	Июнь	–	–
7	Июль	–	–
8	Август	–	–
9	Сентябрь	–	17,8
10	Октябрь	9,27	2,059
11	Ноябрь	4,8	0,729
12	Декабрь	0,9	0,521

Согласно данным официального сайта казенного предприятия (КП) «Морская поисково-спасательная служба» ([www.sar.gov.ua/tu/](http://www.sar.gov.ua/tu/)) сегодня на службе находятся шесть катеров: тяжелые аварийно-спасательные катера ПСК-01 и ПСК-02 проекта Patrol 150 с максимальной скоростью 35 узлов, легкие аварийно-спасательные катера ПСК-03, ПСК-04 и ПСК-05 проекта Boomeranger C-1100 SAR RIB с максимальной скоростью 32 узла, а также катер ПСК-06, данные за техническими характеристиками которого отсутствуют.

Определим эффективную площадь (радиус действия) для катеров проекта Patrol 150 и Boomeranger C-1100 SAR RIB, учитывая полученные данные выживания человека в водах Черного и Азовского морей, максимальных нужных скоростей, в случае отсутствия задержек обработки информации и изготовления команд на выполнение необходимых спасательных операций, а также при условиях точного знания местоположения людей.

Максимальная эффективная площадь ограничена кругом радиуса  $r$  с центром в точке нахождения спасательного судна (место базирования).

Радиус определим из условия:

$$r = V \cdot t_{доп} , \tag{8}$$

$$t_{доп} \geq t_{зустр}$$

Предварительный расчет прямой расстояния протяжностью береговой линии Украины (не учитывая временно оккупированной АР Крым) на основании картографического сервиса Google Maps получены такие результаты: для Черного моря прямая береговая линия имеет протяженность около 420 км, а для Азовского – около 290 км.

Всего КП «МПСС» имеет пять быстроходных спасательных катеров. Учитывая эти данные, а также предположив, что их пункты базирования расположены на равномерном отдалении друг от друга, выполним расчеты изменения максимального плеча (удвоенного радиуса  $r$ ) для катеров каждого из проектов в зависимости от  $t_{\text{доп}}$ , учитывая колебание температуры воды в Черном и Азовском морях (табл. 4).

Таблица 4 – Расчеты изменения максимального плеча

Номер n/n	Месяц	Максимальное плечо (2 r), км			
		Катера проекта Patrol 150		Катера проекта Boomeranger C-1100	
		Черное море	Азовское море	Черное море	Азовское море
1	Январь	97,5	61,75	90	57
2	Февраль	88,4	62,92	81,6	58,08
3	Март	91	65,26	84	60,24
4	Апрель	110,5	102,57	102	94,68
5	Май	930,8	1183	859,2	1092
6	Июнь	–	–	–	–
7	Июль	–	–	–	–
8	Август	–	–	–	–
9	Сентябрь		2314		2136
10	Октябрь	1205,1	267,67	1112,4	247,08
11	Ноябрь	624	94,77	576	87,48
12	Декабрь	117	67,73	108	62,52

Анализ данных свидетельствует, что в зимние месяцы береговая линия не полностью перекрывается для Черного и Азовского морей,

Учитывая наличие пяти быстроходных катеров и принятое допущение специфики их базирования, перекрытие береговой линии представлено в табл. 5.

Таблица 5 – Перекрытие береговой линии Черного и Азовского морей

Номер n/n	Месяц	Неперекрытая береговая линия			
		Черное море		Азовское море	
		в км	в %	в км	в %
1	Январь	285	32,14	114	60,69
2	Февраль	258,4	38,48	116,16	59,94
3	Март	266	36,67	120,48	58,46
4	Апрель	323	23,10	189,36	34,70
5	Май	2720,8	Полностью	2184	Полностью
6	Июнь		Полностью		Полностью
7	Июль		Полностью		Полностью
8	Август		Полностью		Полностью
9	Сентябрь		Полностью	4272	Полностью
10	Октябрь	3522,6	Полностью	494,16	Полностью
11	Ноябрь	1824	Полностью	174,96	39,67
12	Декабрь	342	18,57	125,04	56,88

Если взять за критерий эффективности функционирования КП «МПСС» величину перекрытия береговой линии, то в зимние месяцы существенным образом снижается вероятность удачного проведения поисково-спасательных операций.

**Выводы.** Во время организации поисково-спасательных операций, кроме сокращения времени на сбор заявок, их обработки, принятия решения на проведение операции, а также сокращение времени, израсходованного судном-спасателем на

преодоление расстояния между ним и аварийным судном, необходимо прежде всего учесть имеющееся время на спасение людей. Повышения эффективности спасательных операций предлагается достичь за счет увеличения процента перекрытия береговой линии путем создания дополнительных пунктов базирования средств спасания и увеличения количества скоростных катеров. Абсолютные и процентные количественные значения, на которые может быть повышен уровень эффективности КП «МПСС», приведены в табл. 5.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по поиску и спасанию на море 1979 года с поправками САР-79. (Текст на рус. и англ. языках). Санкт-Петербург : ЦНИИМФ. 2005. 555 с.
2. Про відновлення єдиної системи пошуку та рятування на морі: від 24 лютого 2016 р. *Постанова № 158. Кабінет Міністрів України*. Київ, 2016.
3. Про затвердження нормативних актів з пошуку та рятування на морі: від 10 вересня 2002 р. *Наказ № 643. Міністерство транспорту України*. Київ, 2002.
4. Про утворення координаційного комітету з пошуку і рятування на морі: від 16 листопада 2016 р. *Постанова № 830. Кабінет Міністрів України*. Київ, 2016.
5. Ситник И. А., Степанов Э. А. *Анализ состояния, структуры и возможностей национальной морской системы поиска и спасания в зоне ответственности Украины*. Севастополь: Академия военно-морских сил Украины им. П. С. Нахимова, 2012. 7 с.
6. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года СОЛАС (текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). Текст на рус. и англ. Санкт-Петербург : ЦНИИМФ. 2010. 992 с.
7. Кодекс торговельного мореплавства України: станом на 5 січня 2017 р. Верховна Рада України. Київ, 2017.
8. Давидзон М. И. Закон охлаждения Ньютона-Рихмана и конвективный теплообмен. *Вестник Ивановского гос. универ. Серия: естест., общест. науки*. Иваново, 2012. № 2. С. 73–79.
9. Физиология человека / под ред. Г. И. Косицкого. Москва: ООО «Изд. дом Альянс», 2009. 544 с.
10. Ходаков В. Е., Соколова Н. А., Чёрный С. Г. Влияние природно-климатических факторов на социально-экономические и производственные системы. Херсон : ХНТУ, 2012. 331 с.

### REFERENCES

1. The 1979 International Convention on Search and Rescue at Sea, as amended by the SAR-79. (Text in Russian and English. Languages). (2005). St. Petersburg : TSNIIMF.
2. About the unified system of the hunt for the sea: from 24 February 2016 p. (2016). *Postanova number 158. Kabinet Ministriv Ukraine*. Kyiv.
3. About the hardening of regulatory acts in the sea and in the sea: in 10 September 2002. (2002). *Mandate number 643. Ministry of Transport of Ukraine*. Kyiv.
4. About the approval of the coordinating committee to the companion and imitation of the sea: from 16 leaf fall 2016 p. (2016). *Postanova No. 830. Kabinet Ministriv Ukraine*. Kyiv.
5. Sitnik, I. A. & Stepanov, E. A. (2012). Analysis of the state, structure and capabilities of the national maritime search and rescue system in the area of responsibility of Ukraine. Sevastopol : Academy of Naval Forces of Ukraine. P. S. Nakhimov.
6. The 1974 International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS (text amended by the 1988 Protocol to it, as amended). (2010). Text in Russian. and eng. St. Petersburg : TsNIIMF.
7. Merchant Shipping Code of Ukraine: Behind the camp for 5 September 2017 p. Kyiv : Verkhovna Rada of Ukraine.

8. Davidzon M. I. (2012). Newton-Richman cooling law and convective heat transfer. *Bulletin of the Ivanovo State. Univer. Series: estest., Obschest. science.* Ivanovo, 2012. № 2. 73–79.
9. Human physiology / ed. G.I. Kositsky. (2009). Moskov : LLC Ed. Home Alliance.
10. Khodakov, V. Ye., Sokolova, N. A. & Cherny S. G. (2012). *Influence of climatic factors on socio-economic and production systems.* Kherson : KNTU.

**Годованюк С. П., Селиванов С. Є. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ З ПОРЯТКУНКУ ЛЮДЕЙ У МОРСЬКІЙ ЗОНІ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ УКРАЇНИ**

*До морської зони відповідальності України відноситься певна зона Чорного й Азовського морів. При моделюванні пошуково-рятувальної операції по порятунку людей у морі представлені математичні моделі: зміни температури тіл у воді, коливання температури по місяцях для Чорного й Азовського морів. Для побудови математичної моделі зміни температури тіла людини у воді використовувався закон Ньютона-Ріхмана. Побудовані графіки залежності зміни температури тіла людини у воді для різних температур води при значеннях коефіцієнта тепловіддачі як функції різниці температур. Наведений помісячний аналіз коливань температури води в Чорному й Азовському морях. Побудований графік коливань температури води в Азовському морі й наведений відповідний апроксимувальний поліном. Проведений аналіз роботи рятувальних операцій, показав, що підвищення ефективності рятувальних операцій пропонується досягти завдяки збільшенню відсотка перекриття берегової лінії шляхом створення додаткових пунктів базування засобів рятування і збільшення кількості швидкісних катерів. Отримані абсолютні й процентні кількісні значення, на які може бути підвищений рівень ефективності казенного підприємства (КП) «Морська пошуково-рятувальна служба».*

**Ключові слова:** зона відповідальності, моделювання, математичні моделі, рятувальні операції, коливання температури, ефективність підприємства.

**Godovanuk S.P., Selivanov S. E. MATHEMATICAL MODEL OF SEARCH AND RESCUE OPERATION TO SAVE PEOPLE IN THE SEA AREA OF RESPONSIBILITY OF UKRAINE**

*The sea area of responsibility of Ukraine includes a certain zone of the Black Sea and the Azov Sea. When modeling search and rescue operation to save people at sea, the mathematical models have been compiled: changes of the temperature of bodies in water, monthly temperature fluctuation for the Black Sea and the Azov Sea. Newton-Richmann's law was used to compose a mathematical model of changing human body temperature in water. The graphs of the dependence of change in temperature of human body in water for different water temperatures for the values of heat emission coefficient as a function of difference of temperatures have been composed. The monthly analysis of water temperature fluctuations in the Black Sea and in the Azov Sea has been conducted. A graph of water temperature fluctuations in the Azov Sea is constructed and a corresponding approximating polynomial is given. The values of maximum possible time of human stay are certain in the Azov Sea and in the Black Sea (monthly) that substantially depend on a season. The mathematical model of water temperature fluctuations in the Black Sea and the mathematical model of water temperature fluctuations in the Azov Sea are given. The analysis of work of rescue operations has shown that increasing of efficiency of rescue operations is proposed to be obtained by increasing the percentage of coastline closure by creating additional rescue facilities-based stations and by increasing the number of speed boats. During the organization of search and rescue operations, in addition to reducing the time for collecting applications, processing them, making a decision to conduct the operation, as well as reducing the time spent by the rescue vessel to cover the distance between it and the emergency vessel, it is necessary first to take into account the available time for rescue people. It is proposed to increase the efficiency of rescue operations by increasing the percentage of coastline closure by creating additional rescue facilities based outposts and increasing the number of speed boats. The absolute and percentage quantitative values have been received by which the level of efficiency of the state-owned enterprise «Marine Search and Rescue Service» can be increased.*

**Keywords:** area of responsibility, modeling, mathematical models, rescue operations, temperature fluctuations, efficiency of enterprise.

© Годованюк С. П., Селиванов С. Є.

Статтю прийнято  
до редакції 1.04.19