УДК 626.02.007.5.001.5

Б.М. ПОЛИТЫКИН, доктор технических наук, профессор, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Е.В. ЛЯЩЕНКО, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДВОДНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрены экологические проблемы подводных сооружений и магистралей. Проанализированы методы и средства решения проблемы экологической безопасности морских акваторий. Особенное внимание уделяется методам и средствам контроля, в которых основная роль отводится человеку, а именно водолазу. Для изучения процессов теплообмена и моделирования теплового состояния водолаза разработана математическая модель процесса теплообмена человека в гиперболических условиях. Результаты моделирования могут быть использованы при проектировании системы автоматического регулирования температуры теплоносителя в гидрокостюме.

The ecological problems of underwater facilities and mains are reviewed. Methods and means for the solution of our problem of ecological safety of marine water areas are analyzed. The especial attention is given to methods and monitoring facilities, in which one the main role is allocated to the person, namely diver. For analysis of processes of thermoexchange and simulation of a thermal condition of the diver the mathematical model of process of thermoexchange of the person in hyperbolic conditions is designed. The outcomes of simulation can be utilized at designing of an automatic control system of temperature of heat carrier in a recovery suit.

Актуальность проблемы

Мировой океан обладает богатейшими запасами полезных ископаемых в шельфовой зоне, на морском дне и растворенных в воде. Большинство развитых стран мира проводят интенсивные исследования и промышленную добычу нефти, газа, минеральных ресурсов и др [1,2, 3, 4].

По данным [3,4] затраты на изучение и освоение ресурсов океанов и морей к концу XX столетия составили более 500 млрд. долларов. В настоящее время около 40% нефти и 40% газа добываются на шельфе.

Транспортировка нефти и газа (сжиженного) осуществляется с применением специальных судов и подводных трубопроводов, причем количество подводных магистралей постоянно увеличивается. Это связано с высокой экономической эффективностью такого транспорта, а также независимостью от климатических и других условий, например, несанкционированного отбора.

В настоящее время в мире эксплуатируется более 100 тыс. скважин и более 10 тыс. км. подводных магистралей нефтепроводов [1, литература интернет].

Однако как надводный, так и подводный способ транспортировки нефти и газа не исключают экологического загрязнения водной и прибрежной среды.

Катастрофы танкеров и других судов приводят к разливу нефти и топлива на поверхности и поражению фауны и флоры на больших площадях, а в прибрежных зонах к загрязнению пляжей и мест отдыха. При разрывах подводных магистралей, а также из затонувших судов нефть поднимается на поверхность и в течении длительного периода является источником экологического загрязнения подводной среды и поверхности океанов и морей /5/.

Ликвидация последствий подобных аварий требует значительных финансовых и материальных

затрат. По данным /3,5/ ежегодных обобщений финансовый ущерб на ликвидацию таких катастроф составляет свыше 1 млрд. долларов.

Таким образом, проблема предотвращения или, по крайней мере, снижения вероятности загрязнения морской среды, является актуальной и важной.

Анализ методов и средств решения проблемы экологической безопасности морских акваторий. В данной статье рассматриваются методы и средства контроля экологического состояния подводных сооружений и магистральных нефте- и газопроводов.

В настоящее время для оценки состояния подводных сооружений и магистралей используют методы и средства дистанционного и непосредственного контроля.

К методам и средствам дистанционного контроля относятся следующие:

- космические аппараты, оснащенные системами глобального мониторинга поверхности океанов и морей;
- авиационные, предназначенные для детальной оценки экологического состояния акваторий на основе данных космического мониторинга;
- специализированные суда, оснащенные буксируемыми необитаемыми аппаратами и телероботами, предназначенные для локального контроля по данным авиационных обследований;
- подводные обитаемые аппараты, обеспечивающие визуальный контроль через иллюминаторы. Состояния нефтепроводов через иллюминаторы, а также отбор проб воды и грунта вдоль их расположения с помощью манипуляторов /6/.

К методам и средствам непосредственного контроля относятся такие, в некоторых основная роль отводится человеку, т.е. водолазу глубоководнику.

В настоящее время применяются три метода использования водолазов:

- метод кратковременного пребывания (КП) в гипербарических условиях;
- метод длительного пребывания (ДП) в гипербарических условиях или метод

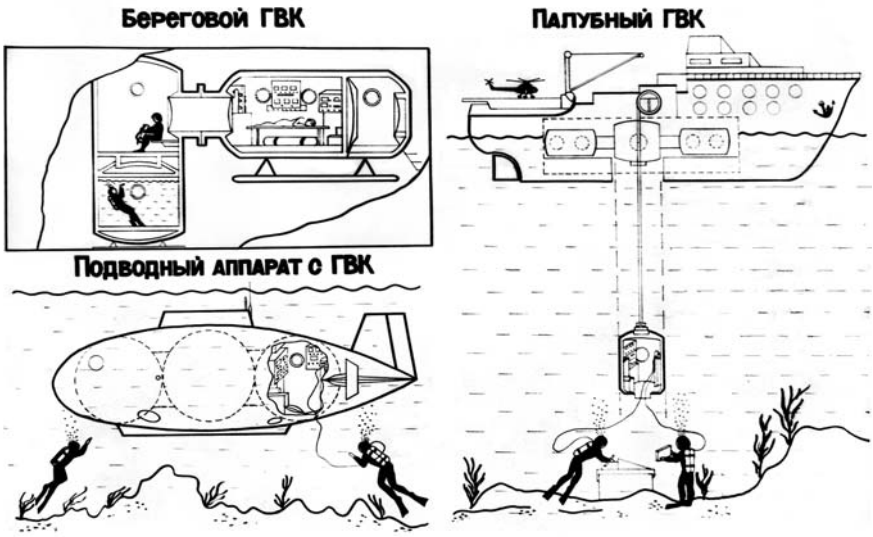


Рис. 1. Технологии водолазных погружений

Для контроля и диагностики состояния подводных сооружений и магистралей водолазы используют следующие методы:

- метод визуального осмотра;
- метод ультразвуковой дефектоскопии;
- метод магнитодефектоскопии;
- отбор проб грунта, воды и элементов объектов;
- метод оперативного химического и физического анализа объектов;
- и др.

Водолазный труд используется компаниями добывающими нефть и газ на шельфе от начала строительства и установки буровых платформ и до прокладки магистральных трубопроводов на протяжении всего периода их эксплуатации до ликвидации.

Поэтому каждая компания выделяет значительные средства на обеспечение водолазных служб.

Постановка задачи

Т.к. работа водолаза глубоководника связана с непосредственным пребыванием в водной среде на больших глубинах, то его организм подвергается

воздействию ряда экстремальных факторов (Рис. 2).

Среди множества этих факторов, отрицательно влияющих на жизнедеятельность организма и длительность пребывания водолаза в водной среде, следует выделить наиболее опасные, такие как состав и температура дыхательной газовой смеси (ДГС), температура воды и перепады давления. Основным компонентом ДГС на глубинах более 50 метров является гелий. Теплоемкость и теплопроводность гелия в 14 и 7 раз соответственно выше теплоемкости и теплопроводности азота, что приводит к увеличению тепловых потерь организма водолаза в 5-7 раз и как следствие к быстрому переохлаждению организма и гибели водолаза /7/. Поэтому задача теплообеспечения водолаза является важной и ее решение позволит значительно повысить безопасность труда водолазов на больших глубинах и снизить

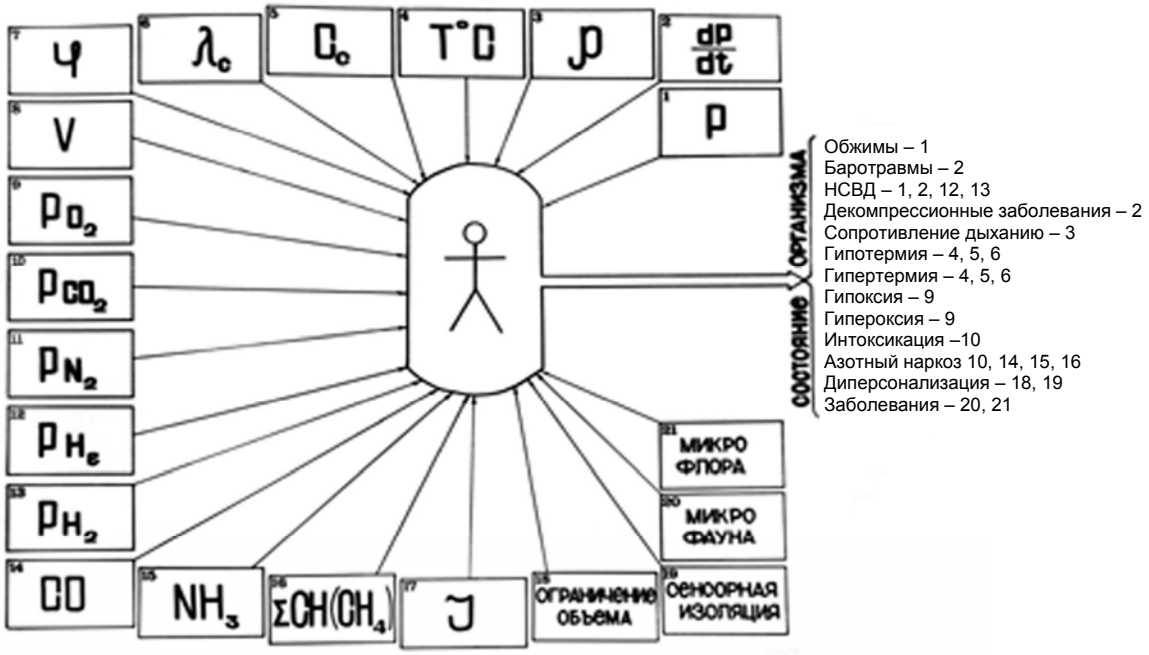


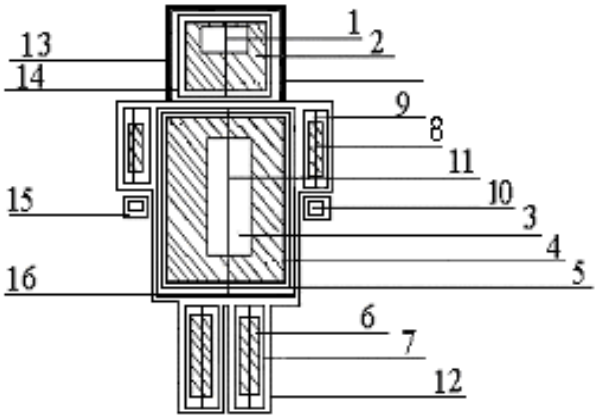
Рис. 2. Экстремальные факторы гипербарической среды и их воздействие на организм человека

Изложение материала исследования

Для изучения процессов теплообмена и моделирования теплового состояния водолаза была разработана математическая модель процессов теплообмена человека в гипербарических условиях. При ее разработке были приняты следующие допущения /10/:

1. Организм человека представляется в виде отдельных, но связанных участков с сосредоточенными параметрами (Рис. 3);

2. Ткань каждого участка гомогенна и обладает изотропными свойствами;



1 – мозг; 2 – кожа головы; 3 – внутренние органы; 4 – мышцы туловища; 5 – кожа туловища; 6 – мышцы ног; 7 – кожа ног; 8 – мышцы рук; 9 – кожа рук; 10 – кожа кистей; 11 – артериальная кровь; 12 – оболочка скафандра, 13 – шлем, 14 – подшлемник, 15 – перчатки, 16 – одежда;

Рис. 3. Структура модели организма человека

Перемещение тепла в организме человека осуществляется главным образом за счет конвекции, т.е. истинного переноса тепла кровью.

Количество тепла, доставляемого артериальной кровью:

$$Q_{Ai} = \rho_A \cdot C_A \cdot K_{Ai} \cdot F_{Ai} \cdot T_A \quad , \qquad (1)$$

где ρ_A – плотность крови (кг/см^3); C_A – теплоемкость крови (ккал/кг ^{o}C); K_{Ai} – коэффициент использования тепла, переносимого артериальной кровью; F_{Ai} – объемная скорость артериальной крови(л/ч); T_A – температура окружающей среды (^{o}C);

Количество тепла, уносимого венозной кровью у *i*-го участка:

$$Q_{Vi} = \rho_A \cdot C_A \cdot K_{Vi} \cdot F_{Vi} \cdot T_i \quad , \qquad (2)$$

где C_A – теплоемкость крови (ккал/кг ^{o}C); K_{vi} – коэффициент использования тепла, переносимого венозной кровью; F_{vi} – объемная скорость венозной крови (л/ч); T_i – температура участка (^{o}C).

Количество тепла, передаваемое кондукцией за единицу времени между участками *i* – (*i* – 1) и *i* – (*i* + 1):

$$Q_{i,\,i\pm1} = K_{i,i\pm1}(T_i - T_{i\pm1}),\ K_{i,i\pm1} = \lambda \cdot A_i / в_{i,i\pm1}, \qquad (3)$$

где $K_{i,i\pm1}$ – проводимость смежных участков (ккал/^{o}C ч); λ_i – удельная теплоемкость ткани (ккал/^{o}C кг); A_i – площадь поверхности *i*-го участка (м^2); $в_{i,i\pm1}$ – толщина слоя (м).

Теплообмен между поверхностью i-го участка и окружающей средой (излучение):

$$R_i = H_k \cdot A_i (T_i - T_A),$$

На основании рассмотренных выше тепловых потоков составным уравнением теплового баланса для *i*-го участка:

$$c_i m_i \frac{dT_i}{d_t} = \mu_i + \rho_A C_A K_{Ai} F_{Ai} T_B - \rho_A C_A K_{Vi} F_{Vi} T_i +$$

$$+ K_{i,j-1}(T_i - T_{i-1}) + K_{i,i+1}(T_i - T_{i+1}) + \qquad (6)$$

$$+ H_k A_i (T_i - T_A) + H_c A_i (T_i - T_A) - E_i \quad ,$$

где m_i – скорость образования тепла (ккал/ч); E_i – скорость теплоотдачи испарением (ккал/ч).

Уравнение смешивания тепловых потоков в резервуаре крови:

где V_c – объем резервуара (см^3); Q – количество крови, перекачиваемое сердцем за 1 час (см^3); E_r – отдача тепла испарением с верхних дыхательных путей (ккал/ч); n – число участков; c – теплоемкость ткани (ккал/ч); m – масса участка (кг).

Для создания модели системы теплорегуляции организм человека разделен на участки.

Математическое описание модели представляет систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{dT_1}{dt_2} = \left[M_1 + \rho_{кр} c_{кр} F_1 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_1 \cdot T_1 + K_{1.2}(T_1 - T_2)\right] / m_1 c_1;$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \left[M_3 + \rho_{кр} c_{кр} F_3 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_3 \cdot T_3 + K_{3.4}(T_3 - T_4)\right] / m_3 c_3;$$

$$\frac{dT_4}{dt} = \left[M_4 + \rho_{кр} c_{кр} F_4 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_4 \cdot T_4 + K_{3.4}(T_3 - T_4) + K_{4.5}(T_4 - T_5)\right] / m_4 c_4;$$

$$\frac{dT_5}{dt} = \left[M_5 + \rho_{кр} c_{кр} F_5 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_5 \cdot T_5 + K_{4.5}(T_4 - T_5) + K_{4.5}(T_4 - T_5)\right] / m_5 c_5 - (H_R \cdot S_5 \cdot (T_5 - T_{ср}) +$$
$$+ H_C \cdot S_5 \cdot (T_5 - T_{ср}) - E_5) - \left(\lambda_м \cdot \frac{T_5 - T_{ск}}{l_м} \cdot S_м\right) - \left(\lambda_{ск} \cdot \frac{T_{ск} - T_B}{l_{ск}} \cdot S_{ск}\right);$$

$$\frac{dT_6}{dt} = \left[M_6 + \rho_{кр} c_{кр} F_6 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_6 \cdot T_6 + K_{7.8}(T_6 - T_7)\right] / m_6 c_6;$$

$$\frac{dT_7}{dt} = \left[M_7 + \rho_{кр} c_{кр} F_7 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_7 \cdot T_7 + K_{7.8}(T_6 - T_7)\right] / m_7 c_7 - (H_R \cdot S_7 \cdot (T_7 - T_{ср}) +$$
$$+ H_C \cdot S_7 \cdot (T_7 - T_{ср}) - E_7) - \left(\lambda_м \cdot \frac{T_7 - T_{ск}}{l_м} \cdot S_м\right) - \left(\lambda_{ск} \cdot \frac{T_{ск} - T_B}{l_{ск}} \cdot S_{ск}\right);$$

$$\frac{dT_8}{dt} = \left[M_8 + \rho_{кр} c_{кр} F_8 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_8 \cdot T_8 + K_{7.8}(T_8 - T_9)\right] / m_8 c_8;$$

$$\frac{dT_9}{dt} = \left[M_9 + \rho_{кр} c_{кр} F_9 \cdot T_{кр} - \rho_{кр} c_{кр} F_9 \cdot T_9 + K_{7.8}(T_8 - T_9)\right] / m_9 c_9 - (H_R \cdot S_9 \cdot (T_9 - T_{ср}) +$$
$$+ H_C \cdot S_9 \cdot (T_9 - T_{ср}) - E_9) - \left(\lambda_м \cdot \frac{T_9 - T_{ск}}{l_м} \cdot S_м\right) - \left(\lambda_{ск} \cdot \frac{T_{ск} - T_B}{l_{ск}} \cdot S_{ск}\right);$$

Система состоит из тепловых уравнений соответственно мозга, кожи головы, внутренних органов, мышц туловища и кожи туловища, мышц ног, кожи ног, мышц рук, кожи рук, кожи кистей рук.

Величины и коэффициенты необходимые для решения системы дифференциальных уравнений: M_1 – M_{10} – метаболизм; F_1 – F_{10} – объемный кровоток участков; T_1 – T_{10} – температуры участков; $K_{1,2}$, $K_{3,4}$, $K_{4,5}$, $K_{7,8}$ – теплопроводимости участков; $T_{ср}$ – температура среды; T_B – температура морской воды; $T_{кр}$ – температура артериальной крови; $C_{кр}$ – теплоемкость крови; H_C – теплопотери конвекцией; H_R – теплопотери излучением; m_1 – m_{10} – массы участков; c_1 – c_{10} – теплоемкости участков; E_3, E_5, E_7, E_9 – дополнительное испарение с участков; $\lambda_м$, $\lambda_{ск}$, $\lambda_{ДГС}$, $\lambda_{шл}$ – теплоемкости материала одежды, скафандра, дыхательной смеси, шлема; $S_м$, $S_{ск}$, $S_{ДГС}$, $S_{шл}$ – площади материала одежды, скафандра, дыхательной смеси, шлема; $l_м$, $l_{ск}$, $l_{ДГС}$, $l_{шл}$ – толщины материала одежды, скафандра, дыхательной смеси, шлема; S_2, S_5, S_7, S_9, S_{10} – площади поверхностей участков организма.

Решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось с помощью метода

Исходные данные для моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Постоянные величины и коэффициенты модели теплообмена организма человека с гипербарической средой

№ п/п	Наименование величин и коэффициентов	1 группа (кожа)			2 группа (мышцы)		3 группа		
		головы	туловища	конечностей	туловища	конечностей	мозг	внутр. органы	арт. кровь
1	Теплообразования – M (ккал/ч)	0,12	0,51	1,22	5,0	20	11,1	69,43	-
2	Объемная скорость крови – F (л/ч)	$1,6 * 10^{-3}$	$1,0 * 10^{-3}$	$6,42 * 10^{-3}$	$13,6 * 10^{-3}$	$20,0 * 10^{-3}$	$48,0 * 10^{-3}$	$230,0 * 10^{-3}$	-
3	Температура – T (°C)	35,56	34,62	34,50	35,95	35,83	36,76	36,82	36,66
4	Масса – m (кг)	0,065	0,40	0,155	1,47	1,85	0,475	2,42	-
5	Поверхность S ($м^2$)	0,104	0,514	1,1	-	-	-	-	-
6	Теплоотдача – C (ккал/ч)	0,8	3	4,9	-	-	-	-	-
7	Коэффициенты теплоотдачи	-	-	-	-	-	-	-	-
	$K_{1.2}$ (ккал/ч * °C)	2,63	-	-	-	-	2,63	-	-
	$K_{3.4}$ (ккал/ч * °C)	-	-	-	4,85	-	-	4,85	-
	$K_{4.5}$ (ккал/ч * °C)	-	23	-	23	-	-	-	-
	$K_{7.8}$ (ккал/ч * °C)	-	-	17,7	-	17,7	-	-	-

Рунге-Кутта четвертого порядка, что обеспечивает необходимую точность получаемых результатов.

Результаты и выводы

Для моделирования системы на ЭВМ был разработан алгоритм и программа на языке C++. Результаты моделирования процессов теплообмена организма водолаза показали, что при единичном скачкообразном изменении температуры от комфортной (32 °C) до температуры среды (2 °C) без системы теплообеспечения через 20 минут наступает глубокое охлаждение организма. При этом, как показано на Рис. 4, наиболее подверженными охлаждению участками оказались поверхности конечностей. Полученные результаты хорошо согласуются с данными литературных источников

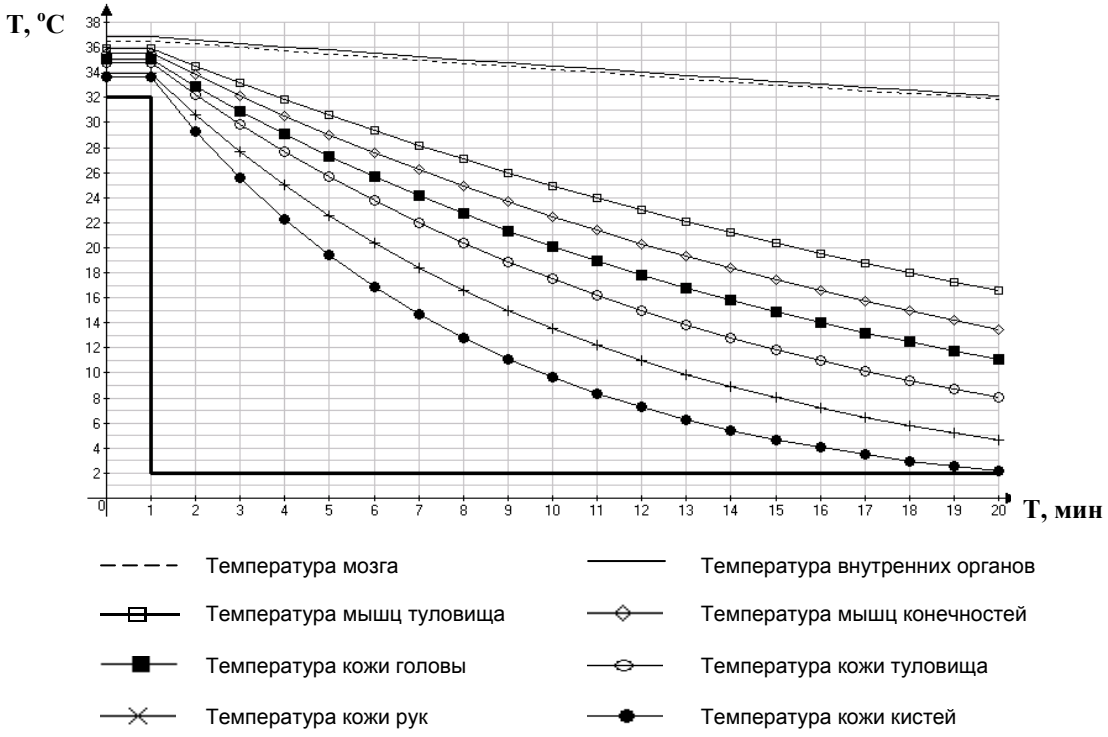


Рис. 4. Результаты моделирования теплового состояния водолаза в гипербарической среде

Література

1. Геодекян А.А., Забанбарк А.П. Геология и размещение нефтегазовых ресурсов в Мировом океане. – М.: Наука, 1985. – 192 с.
2. Слевич С.Б. Шельф: освоение и использование. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 240 с.
3. Клод Риффо. Будущее – Океан. – Л: Гидрометеоиздат, 1978. – 272 с.
4. Истошин С.Ю. Морской горный промысел. – М.: Наука, 1981. – 168 с.
5. http://100top.ru
6. Океанологические телеуправляемые аппараты о роботы. / Отв. Ред. Проф. Ястребов В.С. – Л.: Судостроение, 1976. – 176 с.
7. Жаворонков А.И. Исследование динамических и теплозащитных свойств электрообогреваемой одежды для водолазов. М.: МТИЛП, 1971 г. – 240 с.
8. Тетеревинков В.Н. Разработка и исследование теплофизических моделей теплообмена человека с окружающей средой. Л.: ВНИИ охраны труда. 1980. – 216 с.
9. Теоретические исследования физиологических систем. Математическое моделирование. Под ред. Н.М. Амосова. – К.: Наукова думка, 1977. – 246 с.
10. Зальцман Г.Л., Кучук Г.А., Гургенидзе А.Г. Основы гипербарической физиологии. – Л.: Медицина, 1979. – 320 с.
11. Куренков Г.И., Яхонтов Б.О., Сыровегин А.В. Проблемы космической биологии, т. 39. Действие гипербарической среды на организм человека и животных. – М.: Наука, 1980 г. – 259 с.

/10,11/ и могут быть использованы при проектировании системы автоматического регулирования температуры теплоносителя в гидрокостюме водолаза.