

ся Правительством РФ в качестве стратегических запасов нефти и газа. Объединение усилий «Газпрома» и Минтранса России по Соглашению от 24 июня 2002 г. должно ускорить добычу Ямальского газа на период до 2010 г. объемом 530 млрд. м<sup>3</sup> в год и организацию морского вывоза сжиженного газа из порта Харасавэй до 5 млн. т.

Начавшийся в 2000 г. морской экспорт Тимано-Печорской нефти в 2002 г. превысит 250 тыс. т и в 2020 г. достигнет 10 млн. т в год.

Круглогодичные морские перевозки грузов для Норильского ГМК могут увеличиться с 1 до 3 млн. т в год; экс-

порт лесной продукции из портов Игарка и Тикси восстановится на уровне 1 млн. т; объемы «северного завоза» возрастут в 2 раза; транзит по СМП возобновится в объеме до 500 тыс. т. Грузооборот Архангельского морского торгового порта в 2004 г. увеличился на 22% и составил 1,27 млн. т.

К 2015 г. по СМП должно быть перевезено как минимум 8 млн. т жидких углеводородов (ЖУВ), 1 млн. т леса из Тикси и Игарки, 3 млн. т генерального груза для Норильска, не считая более 1 млн. т продукции.

Таким образом, к указанному сроку объемы перевозок по СМП несколь-

ко превысят максимум, достигнутый в СССР.

Имеются данные геологоразведки, что добыча ЖУВ в рассматриваемом районе в 20-30-е гг. XXI в. могут составить 35-40 млн. т условного топлива.

Рассмотрим технические средства, наиболее рациональные, по мнению авторов, для проведения транспортных операций в рассматриваемом регионе.

**Морские перевозки.** Читатель, видимо, уже догадался, что авторы в качестве альтернативы надводному транспорту предлагают подводный. Действительно, почти по всей трассе

Таблица 2

**Основные характеристики подводных транспортных судов (концептуальные проработки)**

| Характеристика                           | Танкеры |          | Рудовоз | Лихтеровоз | Сухогрузное судно | Контейнеровоз | Газовоз   |
|--|---------|----------|---------|------------|-------------------|---------------|-----------|
|  | 50 000  | 150 000  |         |            |                   |               |           |
| Дедвейт, т                               | 50 000  | 150 000  | 90 000  | 28 000     | 20 000            | 15 800        | 66 000    |
| Водоизмещение, т:                        |         |          |         |            |                   |               |           |
| - нормальное                             | 70 680  | 355 000  | 130 000 | 124 000    | 66 000            | 105 000       | 269 900   |
| - полное подводное                       | 77 600  | 390 000  | 143 800 | 124 000    | 73 000            | 115 000       | 370 000   |
| Длина, м                                 | 216,0   | 390,0    | 264,0   | 270        | 208,0             | 233,0         | 365       |
| Ширина, м                                | 40,0    | 63,0     | 46,0    | 48,0       | 38,6              | 47,0          | 42,0      |
| Высота корпуса, м                        | 14,1    | 19,5     | 16,5    | 14,4       | 13,5              | 15,8          | 24,1      |
| Осадка в надводном положении, м          | 12,5    | 17,0     | 14,5    | 12,8       | 10,7              | 10,5          | 18,0      |
| Коэффициент общей полноты                | 0,64    | 0,80     | 0,7     | 0,72       | 0,70              | 0,65          |           |
| Объем грузовых помещений, м <sup>3</sup> | 63 150  | 157 500  | 78 000  |            | 43 000            |               |           |
| Мощность установки, кВт                  | 32 800  | 2x60 000 | 28 600  | 2 x15 000  | 21 800            | 30 000        | 2x 37 000 |
| Скорость хода в подводном положении, уз  | 20,0    | 22,0     | 17,0    | 19         | 18                | 19            | 19,0      |

Таблица 3

**Основные направления перевозок в Арктическом бассейне в круглогодичной навигации**

| Тип судна                                      | Подводные                                    |                    | Надводные          |                                   |
|--|--|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
|  | Сухогрузные                                  | Танкеры            | Сухогрузные        | Танкеры                           |
| Направление перевозок                          | Мурманск-Таймыр, Северо-восток. Снабж. рейсы | Карское море-запад | Все виды перевозок | Печорское море, Обская губа-запад |
| Объем перевозок в год, тыс. т                  | 3000-5000                                    | 10000-20000        | 3000-5000          | 10000-20000                       |
| Кол-во судов в караване                        | 1  | 1                  | 2-3                | 2-3                               |
| Суммарная средняя мощность судов каравана, кВт | 20000 - 30000                                | 32000-120000       | 100000-180000      | 70000 - 110000                    |
| Средняя скорость хода каравана, уз             | 17   | 19                 | 6-8                | 8-10                              |



# ОАО "ЦНИИ "Курс"

- оптимизация совместного функционирования корабельных средств
- оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств кораблей
- системы управления движением судов
- авторулевые на основе спутниковых навигационных систем
- программные комплексы полунатурного и имитационного моделирования корабельного вооружения
- тренажерные комплексы
- средства наглядного представления информации на объемном картографическом фоне
- электронные трехмерные макеты технических систем, объектов, зданий, сооружений
- компьютерная графика в видеофильмах, презентациях, полиграфической продукции



ЦНИИ "КУРС"

Москва, ул. Кирпичная, д. 34А  
т. (495)365-1153  
факс (495) 365-4314  
[www.kyrs.ru](http://www.kyrs.ru) [mail@kyrs.ru](mailto:mail@kyrs.ru)



# ОАО «СУДПРОМКОМПЛЕКТ»

123242, Россия, г. Москва, кл. Садовая-Кудринская, д. 11, стр. 1  
тел. (495) 252-23-75, факс (495) 255-59-36, e-mail: spk-k@spk-k.ru

Открытое акционерное общество «Судпромкомплект» (ОАО «Судпромкомплект») является одной из ведущих в России компаний, специализирующихся в сфере комплектации строящихся и последующего технического обеспечения ремонтируемых военных кораблей и судов гражданского назначения всех классов для морского и речного использования.

ОАО «Судпромкомплект» образовано в 1992 г. по инициативе крупнейших в стране судостроительных предприятий в ходе реорганизации Министерства судостроительной промышленности СССР. Базой для создания ОАО «Судпромкомплект» явилось бывшее Главное управление комплектации Минсудпрома, что позволило сохранить и в дальнейшем развить накопленный десятилетиями опыт и партнерские связи в судостроительной, атомной, химической, авиационной, нефтегазодобывающей и других отраслях промышленности.

В настоящее время ОАО «Судпромкомплект» располагает штатом высококвалифицированных специалистов, работающих по таким направлениям, как: логистика, консультативные услуги по вопросам комплектации оборудования, взаимодействие с отечественными предприятиями-изготовителями специального оборудования и материалов, работа с зарубежными партнерами.

Деловая репутация ОАО «Судпромкомплект» подтверждена имеющимися лицензиями на право распространения и ремонта специального судового оборудования.

Деятельность ОАО «Судпромкомплект» осуществляется на основе прямых договорных связей с предприятиями, что исключает посреднические услуги и способствует выработке оптимальной и устойчивой ценовой политики, привлекающей действующих и потенциальных партнеров.

ОАО «Судпромкомплект» успешно осуществляет поставки оборудования и материалов следующего назначения:

- электрооборудование (в том числе специальные морские двигатели и преобразователи различных типоразмеров);
- насосное оборудование (в том числе специальные морские насосы). ОАО «Судпромкомплект» входит в состав Российской Ассоциации производителей насосов (РАПН), которая является членом Европейской Ассоциации производителей насосов;
- холодильное оборудование (морские специальные холодильные установки производительностью свыше 2500 ккал/ч, компрессорные и конденсаторные агрегаты и запасные части к ним);
- аппаратура связи;
- противопожарное оборудование;
- компания также поставляет широкий ассортимент другого морского оборудования.

ОАО «Судпромкомплект» работает с более чем 100 предприятиями, расположенными в разных регионах России. К числу его давних партнеров относятся: ФГУП «Адмиралтейские верфи», ФГУП «ПО «Севмаш», ОАО «Северная верфь», ФГУП «ПО «Баррикады», ОАО АК «Тулмашзавод» и другие известные предприятия. По межправительственным соглашениям осуществляет поставки в страны СНГ – Казахстан, Киргизия, Украина, а также в страны дальнего зарубежья – Индия, Китай, Алжир, Финляндия, Швеция и другие.



**ОАО «Судпромкомплект» приглашает к долговременному и надежному сотрудничеству новых российских и зарубежных партнеров.**

подводные суда могут идти, не соприкасаясь со льдом, на оптимальной скорости с относительно низкой мощностью ЭУ. В табл. 2, 3 приведены основные характеристики некоторых подводных транспортных судов (ПТС) по проработкам авторов, а также основные направления перевозок в Арктическом бассейне и их объемы при круглосуточной навигации. Расчеты выполнены применительно к указанным выше прогнозам по грузопотоку. Из таблицы видно, что сухогрузов требуется примерно в 10 раз меньше подводных судов, чем надводных, подводных танкеров необходимо в 2–4 раза меньше, чем надводных. Разница в соотношениях определяется протяженно-

стью линии перевозок. Сопоставительные экономические показатели надводной и подводной транспортировки нефти на линии западное побережье Ямала–порт в районе Мурманска приведены в табл.4. При этом учитывалось, что надводные танкеры ледового плавания целесообразно применять лишь на арктическом участке линии перевозки с перевалкой в порту в районе Мурманска на обыкновенные большегрузные танкеры, так как такая, смешанная, система перевозок обходится дешевле, чем прямая перевозка тяжелыми и мощными ледовыми танкерами в Европу.

Наземный транспорт, конечно, имеет для развития экономик Крайнего Севера и Сибири не меньшее значе-

ние, чем морской. Он должен участвовать во внутренних перевозках грузов на берег и складировании их для обеспечения работы геологоразведки и добычного бурения. Об объемах этих грузов можно судить по опыту освоения запасов природного сырья в советское время. Как показывает опыт освоения месторождений в Западной Сибири, на каждую тонну добываемой продукции необходимо завезти 100 кг различных грузов. Можно подсчитать, что в рассматриваемые районы должно завозиться, по крайней мере, несколько миллионов тонн грузов в год.

Выбор методов проведения указанных работ, техники и технологии применительно к рассматриваемому райо-

Таблица 4

*Расчет эксплуатационно-экономических показателей по линии Мурманск – Ямал*

| Эксплуатационно-экономические показатели                                     | Подводный танкер | Надводный танкер |
|--|------------------|------------------|
| Годовая провозоспособность, млн. т   | 10               | 10               |
| Дедвейт, т   | 150 000          | 150 000          |
| Протяженность линии эксплуатации, мили                                       |                  |                  |
| -общая   | 830              | 830              |
| - на чистой воле   | 300              | 300              |
| - во льдах в среднем за год  | 530              | 530              |
| Эксплуатационная скорость, уз  |                  |                  |
| - на чистой воде   | 20               | 13,5             |
| - во льдах в среднем за зимний период  | 17               | 9                |
| Круговой рейс, сут.  | 5,85             | 9,4              |
| - ход на чистой воде   | 1,25             | 1,9              |
| - ход во льдах   | 2,6              | 5                |
| - грузовые операции  | 2                | 2,5              |
| Эксплуатационный период, сут.  | 300              | 325              |
| Количество рейсов в год,   | 51,3             | 34,6             |
| Годовая провозоспособность, млн. т   | 7,7              | 5,2              |
| Количество судов   | 1,3              | 1,9              |
| Строительная стоимость судна, млн. долл.                                     | 190              | 90               |
| Строительная стоимость судов для перевозки 10 млн. т нефти в год, млн. долл. | 247              | 171              |
| Аренда танкеров, тыс. долл. в сутки  | 85 500           | 40 000           |
| Годовая аренда, млн. долл.   |                  |                  |
| - на один танкер   | 31 207,5         | 14 600           |
| - на все танкеры   | 40 570           | 27 740           |
| Аренда ледоколов, тыс. долл.   |                  |                  |
| - суточная   | -                | 112 500          |
| - годовая (7 мес.)   | -                | 41 060           |
| Годовая аренда, млн. долл.   | 40 750           | 68 800           |

ну будет особенно трудным. Сложным является и выбор периода года, когда грузовые и транспортные операции могут проводиться с минимальным вредом для природной среды. Рассмотрим его на примере Ямало-Ненецкого округа, достаточно типичном по климатическим условиям и условиям залегания месторождений в Сибири и на Севере. Казалось бы, наиболее благоприятным по ледовым и климатическим условиям является летний период. Почти полное отсутствие льда на трассе плавания и в губе с июля по середину сентября, полярный день, малое количество осадков – все это создает хорошие условия для круглосуточной работы с использованием судов с минимальными ледовыми подкреплениями и без ледокольного сопровождения. Однако такая возможность не может быть рассмотрена без учета особенностей природной среды округа.

Территория расположена между 66 и 73° с. ш., 65 и 84° в. д. (рис.1) [1]. Это один из наиболее труднодоступных и малонаселенных районов Западной Сибири. Рельеф территории области довольно однообразный: это плоская, открытая к северу равнина с небольшими абсолютными отметками. Наименьшие высоты отмечаются по периферии полуостровов и на внутренних заозеренных, отчасти заболоченных участках равнины [2]. На фоне господствующих низких участков с довольно густой речной сетью, выделяются возвышенные участки. Они обычно располагаются во внутренних районах и являются водоразделами рек.



Рис.1. Обзорная карта Ямало-Гыданской области с ее физико-географической границей

Поимой крупных рек, низкие заболоченные и труднодоступные для освоения участки равнины, практически не имеющие уклонов, отмечаются во многих районах области. Поверхности с заметными уклонами наблюдаются лишь на возвышенных участках. Более крутые склоны приурочены главным образом к речным долинам и побережью, где они протягиваются сравнительно узкими полосами.

На отдельных участках равнины относительные высоты достигают 50–100 м. Участки с высотами до 10 м занимают сравнительно небольшие площади. Расчлененность логами и оврагами приурочена к наиболее возвышенным частям высокой поймы и первой надпойменной террасе, где развиты полигонально-жилые льды. Поверхность суши характеризуется развитой сетью оврагов. Важнейшими факторами для проведения транспортных работ являются сплошное распространение многолетней мерзлоты с включением подземных льдов, маломощный почвенный покров и отсутствие древесной растительности.

В долинах рек обычно выделяют, кроме поймы, две надпойменные террасы. Надпойменные террасы, хотя и прослеживаются по обоим берегам рек, но чаще всего представлены в виде отдельных сохранившихся участков – останцов. Однако в долинах реки Мессояхи, а также Таза и Пура, вторая надпойменная терраса высотой 23–37 м на отдельных участках



Рис.2. Такие «шрамы» оставляет гусеничный транспорт на поверхности тундры

достигает ширины 20–30 км. Это обстоятельство очень усложняет прокладку транспортных магистралей.

На склонах водоразделов, речных долин, озерных котловин в местах развития тонкодисперсных льдистых отложений происходят оползни и срывы оттаивающих почво-грунтов, которые охватывают значительные по площади участки. Обычно оползни и срывы отмечаются в конце лета, когда мощность сезонноталого слоя достигает максимума. Оползневые процессы особенно заметно проявляются на береговых склонах, лишенных растительного покрова и подмываемых морскими, речными, озерными водами.

При вытаивании обнажающихся инъекционных льдов на склонах долин, озерных котловин и морских берегов возникают цирки до 200–300 м в поперечнике. Они постепенно заполняются жидкой массой, которая затем сползает в реки, озера и заливы.

Ямало-Гыданская область входит в зону развития сплошной многолетней мерзлоты. Мощность многолетне-мерзлых пород изменяется в широком диапазоне: от 2–5 до 300–400 м, а местами и более.

Строительство нефте-газопроводов, дорог, населенных пунктов, портов, связанное с освоением месторождений нефти и газа, требует тщательного и всестороннего изучения гео-криологических условий.

Большой вред почвенно-растительному покрову наносит в летнее время гусеничный транспорт (рис. 2). В случае нарушения его вездеходом или трактором со временем на склонах возника-

ют термокарстово-эрозионные овраги, а на ровных участках, сложенных льдистыми осадками, – термокарстовые западины, заполненные водой. Нарушение естественных условий почвенно-растительного покрова, строительство отапливаемых сооружений без проветриваемых подвалов и домов на участках с близким залеганием льдистых суглинков, вызывающих заметное изменение условий теплообмена и увеличение глубины сезонного протаивания, приводит к просадкам и деформациям почво-грунтов.

При хозяйственном освоении территории наибольшую опасность представляют тепловая осадка сооружений, возводимых на льдистых грунтах, а также бурение скважин в мерзлых толщах, содержащих пластовые льды, когда породы вокруг ствола скважины протаивают, а возникающие осадки приводят к деформации буровых вышек и других сооружений.

Приведенные выше материалы показывают, что использование летнего, наиболее благоприятного для проведения грузовых и транспортных работ периода будет сопровождаться большими трудностями. Доставка на берег грузов связана с необходимостью преодоления крутых оползневых склонов на побережье и в поймах рек, что практически исключает использование широко применяемых волокуш. Реки и овраги весьма многочисленны и представляют большое препятствие для транспортных операций. Кроме того, как показывает опыт разгрузки на необорудованный берег (именно таковым является побережье рассматриваемого района), интенсивность грузовых работ здесь в летнее время крайне мала – от 50 до 130 т в сутки. Наличие в составе доставляемого оборудования грузов массой до 30 т на одно место, создает крупную проблему для их разгрузки. В целом основная масса грузов, доставленных летом, не может быть доставлена к месту их использования из-за указанных выше особенностей местности до наступления устойчивых холодов и начала работы зимних дорог («зимников»). Кроме того, необходимо обустроить место их хранения теплоизолирующими настилами во избежание протаивания вечной мерзлоты под влиянием аккумулялирующей способности нагреваемого солнцем оборудования. Поэтому для проведения грузовых и транспортных работ в летнее время необходимо строительство грунтовых дорог, для надежного функционирования которых требуется применения сложной комплексной технологии и разнообразной техники.

Более целесообразным является использовать для этих целей зимнего периода. Именно с учетом сказанного освоение месторождений на п-ове

Ямал на первых этапах происходило с использованием разгрузки грузов в районе мыса Харасавэй через припай, несмотря на то, что здесь имелись причалы, через которые можно было работать летом. Большим достоинством такого способа является:

- высокая интенсивность грузовых работ – в среднем около 1000 т в сутки, на отдельных видах грузов (строительные блоки, контейнеры, техника и т.д.) – до 2000 т в сутки;
- возможность начала транспортных работ по доставке оборудования на месторождение сразу по окончании его разгрузки на берег;
- облегчение разгрузки крупногабаритного и тяжелого оборудования за счет твердой поверхности.

Один из авторов статьи участвовал в подготовке и организации выгрузки через припай оборудования для проведения бурения на острове Белом (Карское море) в 1982 г. [3] Необходимо было выгрузить 5000 т груза, в состав которого входит дорожная и буровая техника, жилые балки. Особую трудность составила доставка на берег бурильного станка массой 30 т, вместе с санями и трактором масса поезда составила почти 50 т.

В работе были задействованы, кроме самой Арктической нефтегазо-разведочной экспедиции глубокого бурения, Мурманский филиал ЦНИИМФ, Амдерминское управление Госкомгидромета и находящаяся на острове полярная станция. Работа производилась с участием гидрологов, обеспечивающих безопасностью работ путем трассирования дорог по льду необходимой толщины и наблюдения за их состоянием. Словом требовалось проведение большого объема предварительных работ, что подсказывалось опытом предшествующих операций по доставке грузов на Ямал в зимнее время.

Это позволило без особых происшествий и в короткое время произвести работу на конечном этапе – оборудование было выгружено и доставлено на берег в течение пяти суток.

В настоящее время, по мнению авторов, для доставки грузов с судов на берег, а также проведения транспортных операций по северным районам как в летнее, так и в зимнее время, целесообразно использовать вертолеты, платформы на воздушной подушке (ПВП) амфибийного типа и автомобили. Но аренда первых обходится дорого, а что касается вторых, то к настоящему времени ПВП необходимой грузоподъемности (около 50 т) в мире не существует. Между тем их использование может оказаться оправданным в связи со способностью работать в условиях бездорожья и преодолевать водные препятствия в виде ручьев и болот. Использование автомобильного транс-

порта в летнее время требует прокладки дорог.

Среди нетрадиционных средств являются дирижабли. Применительно к Арктике они могут стать самым экологически приемлемым и дешевым видом транспорта. Существует множество транспортных и технических задач, которые могут быть решены этими средствами в условиях Арктики и всей Сибири: перевозка грузов и людей на большие расстояния в условиях бездорожья и отсутствия аэродромов для воздушных перевозок, патрулирование морского побережья, оперативный экологический мониторинг больших пространств, дальняя радиолокационная разведка и т.д. Среди доступных им грузов находятся сверхтяжелые и крупногабаритные грузы. Разработан отечественный проект транспортного дирижабля ДЦН.

#### Основные характеристики ДЦН

|  |        |
|--|--------|
| Грузоподъемность, т .....                            | 200    |
| Наружный объем, тыс. м <sup>3</sup> .....            | 400    |
| Длина, м .....                                       | 270    |
| Высота оболочки, м .....                             | 55     |
| Скорость полета, км/ч...170/100 (макс./крейсер.)     |        |
| Дальность полета на экономической скорости, км ..... | 15 000 |

Скорость полета обеспечивают девять двигателей, расположенных в носу и корме по бортам оболочки

В последние три года на базе АО «Авиастар» создан масштабный образец дирижабля «Термоплан». Внутри оболочки располагаются сферические баллоны, заполненные гелием под давлением. Для старта и крейсерского полета оболочка заполняется горячим воздухом от силовой установки для создания дополнительной подъемной силы для посадки горячий воздух стравливается, чтобы не расходовать гелий.

Возрождение дирижаблей в настоящее время происходит на фоне научно-технического прогресса во многих областях. Наиболее существенным для качества и безопасности дирижаблей нового поколения является:

- использование гелия для наполнения оболочки;
  - создание легких и прочных, в том числе композитных, материалов;
  - разработка методов и средств наиболее точного расчета прочности и скорости движения дирижаблей;
  - разработка новейшего аэронавигационного оборудования.
- Достоинствами дирижаблей служат следующие обстоятельства:
- наличие транспортной ниши, отличающейся сочетанием «скорость – полезная нагрузка» в трехмерном пространстве;

## Провозоспособность транспортных средств

| Характеристика                           | Железная дорога  | Автомобиль | Вертолет «Ка-32»         | ПВП  | Дирижабль   |
|--|--|------------|--------------------------|--|---|
| Грузоподъемность, т                      | 2000   | 20         | 5                        | 60   | 200   |
| Эксплуатационная скорость движения, км/ч | 50   | 40         | 200                      | 20   | 100   |
| Объем грузоперевозок, т/год              | 875000   | 6900       | 8640                     | 10800  | 175000  |
| Примечание:                              | Прокладка дорог в условиях тайги, тундры и вечной мерзлоты |            | Высокая стоимость аренды | Необходимость строительства самого средства, рационального для данной работы | Необходимость строительства самого средства и создание специальной инфраструктуры |

- низкий удельный расход топлива на тонна-милю;
- способность зависать в воздухе для производства погрузочно-разгрузочных и технических работ;
- отсутствие необходимости в сверхдорогой в условиях тундры и тайги взлетно-посадочной полосы;
- практически неограниченная дальность полетов с возможностью в наибольшей степени использования попутного ветра, в том числе в случае останова двигателя;
- всепогодность.

Авторы сознают, что некоторые из перечисленных качеств не являются абсолютными. Так, термин «всепогодность» означает, что дирижабли могут летать при скоростях ветра более высоких, чем допустимые для вертолета. Для причаливания и сохранения их от непогоды необходимы причальные мачты и достаточно габаритные ангары, что до некоторой степени характеризует технические возможности дирижаблей.

Демонстрацией их достоинства в натуральных показателях могут служить относительные расходы топлива на транспортный момент, выражаемый через тонна-милю: морской транспорт – 1, железнодорожный – 0,8, автомобильный – 2, дирижабельный – 4, авиационный – 30, вертолетный – 150.

Другими показателями возможностей сравниваемых транспортных средств может служить их транспортная производительность при условии круглогодичной работе на плече 500 км (табл. 5).

Направлениями, на которых целесообразно и технически возможно ис-

пользование рассматриваемых здесь перспективных для Арктики средств, могут быть следующие: вывоз ЖУВ с Ямала, из Обской и Тазовской губы, а также с побережья и шельфа Печорского моря. Последний район может быть обеспечен традиционными средствами, так как ледовые условия здесь относительно легкие, за исключением отдельных лет, а ледовая трасса – короткая, но, главное – море мелководное и использование подводных танкеров здесь не возможно.

Зато Карское море имеет все данные для использования подводных танкеров. Прибрежная зона Ямал – наиболее целесообразная площадка, куда можно стянуть нефтепроводы с большинства месторождений региона. Вместе с тем побережье Ямала примечательное, грунт в море подвижный, а сложности для наземного транспорта описаны выше. Поэтому устройство берегового отгрузочного терминала экономически нецелесообразно. Можно организовать береговую базу с помощью вертолетов или дирижаблей. Подводные танкеры могут грузиться с подводного терминала заглубленного под лед, а для надводного транспорта необходимы ледостойкие платформы, строительство которых на прибрежных слабых грунтах, свойственных для Ямала, встретит непреодолимые трудности, побольше, чем при строительстве Северомуйского тоннеля на БАМе.

Современная морская техника позволяет создать подводный терминал на глубине 40–60 м, достаточной для подхода подводного танкера без контакта со льдом. Таким образом, причем не только в данном случае, использовани-

ем подводных танкеров можно достичь двойной выгоды – экономия на судах и терминале.

Приведенные в статье материалы приводят, как минимум, к выводу, что для выбора транспортно-технологической схемы доставки большего объема груза для освоения месторождений нефти и газа в заполярных районах необходимо выполнить комплексное технико-экономическое обоснование, учитывающее особенности места доставки, дальность перевозок, объем и характеристики доставляемых грузов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пасецкий В.М. Звездные мгновения Арктики. – СПб.: Судостроение, 1995, 464 с.
2. Головин Н., Намятов А., Окко О., Wilkman G. Современные работы по освоению Обской губы. – Тр. 4-й Международной конференции «Освоение шельфа арктических морей России», СПб., 1990, с.147–154.
3. Ямало-Ненецкий национальный округ (экономико-географическое описание). – М.: Наука, 1965.
4. Климашевский С.Н. На остров через припай // Морской флот. – 1983. – № 10. – С.32–33.
5. Мат-лы конфер. в Дни Совета Федерации Федеративного собрания ЗФ в Республике Саха (Якутия), www.kami.ru/cosmopolis, 23.01.2005.
6. Суворов Г.К. Дирижабль как альтернатива Севморпути // Судостроение. – 2001. – № 6–7. ■

Исходное уравнение динамики ротора турбокомпрессора (ТК) имеет вид

$$I_P \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_K - M_{TP}, \quad (1)$$

где  $I_P$  – момент инерции ротора ТК относительно оси вращения, кгм<sup>2</sup>;  $\omega$  – угловая скорость ротора ТК, рад/с;  $t$  – время, с;  $M_T$  – крутящий момент, развиваемый газом на рабочих лопатках турбины, Н·м;  $M_K$  – реактивный момент, действующий со стороны рабочих лопаток компрессора на газ в каналах его рабочего колеса, Н·м;  $(-M_K)$  – момент сопротивления компрессора (внутренний), создаваемый в каналах его рабочего колеса нагнетаемым воздухом, Н·м;  $M_{TP}$  – момент сопротивления, создаваемый силами трения в подшипниках ротора ТК и другими видами механических потерь, включая трение дисков и вала о газ, а также затратами мощности на привод навешенного масляного насоса.

Уравнение (1) можно представить в относительных величинах как

$$T_P \frac{d\Omega}{dt} = \bar{M}_T - (1-b)\bar{M}_K - b\bar{M}_{TP}, \quad (2)$$

где  $T_P$  – постоянная времени ротора ТК, с, равная

$$T_P = \frac{I_P \omega_0}{M_{T0}}; \quad (3)$$

$\Omega = \omega/\omega_0$  – относительная угловая скорость ТК;  $b$  – постоянный коэффициент, учитывающий долю мощности турбины  $N_T$ , затраченную на преодоление механических потерь (потерь трения) ТК  $N_{TP}$  на исходном режиме,  $-b = N_{TP0}/N_{T0}$ .

Здесь и далее индексом “0” (нуль) помечены параметры и величины на исходном установившемся режиме, а чертой сверху – значения величин, отнесенные к исходному установившемуся режиму, например:

$$\begin{aligned} \bar{M}_T &= M_T / M_{T0}; \quad \bar{M}_K = M_K / M_{K0}; \\ \bar{M}_{TP} &= M_{TP} / M_{TP0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение динамики ротора ТК (1) в абсолютных величинах можно представить в развернутом виде путем подстановки значений моментов турбины  $M_T$  и компрессора  $M_K$  из работы [1]

$$\begin{aligned} I_P \frac{d\omega}{dt} &= G_T (r_{1T} C_{1UT} - r_{2T} C_{2UT}) - \\ &- I_{WT} (\bar{\rho}_T \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{d\bar{\rho}_T}{dt}) - F_{VT} \frac{dG_T}{dt} - \\ &- G_K (r_{2K} C_{2UK} - r_{1K} C_{1UK}) - \\ &- I_{WK} (\bar{\rho}_K \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{d\bar{\rho}_K}{dt}) - F_{VK} \frac{dG_K}{dt} - M_{TP}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь и далее индексами Т и К обозначены параметры и величины, относящиеся соответственно к турбине и ком-

# УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ РОТОРА ТУРБОКОМПРЕССОРА СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОГО НАДДУВА СУДОВОГО ДВС

**Г.М. Басальгин,**

*д-р техн. наук, проф. ФГОУ “ГМА им. адмирала С.О. Макарова”*

рессору ТК. При этом приняты следующие обозначения величин и параметров:

$G$  – расход газа (воздуха) через рабочее колесо, кг/с;  $r_1, r_2$  – радиусы входного и выходного сечений рабочего колеса, м;  $C_{1U}, C_{2U}$  – окружные составляющие абсолютных скоростей потока на входе и выходе рабочего колеса, м/с;  $I_W$  – момент инерции массы газа, заполняющего каналы рабочего колеса, относительно оси вращения ротора, кг/м<sup>2</sup>;  $\bar{\rho}$  – относительная плотность газа в каналах рабочего колеса;  $F_V$  – конфигурационный фактор (формфактор) каналов рабочего колеса, м<sup>2</sup>. Значения  $F_{VT}$  и  $F_{VK}$  определяются по зависимости, представленной в работе [1].

Сгруппировав в левой части уравнения (5) члены, содержащие  $d\omega/dt$ , можно представить его в виде

$$\begin{aligned} I_{TK} \frac{d\omega}{dt} &= G_T (r_{1T} C_{1UT} - r_{2T} C_{2UT}) - \\ &- I_{WT} \omega \frac{d\bar{\rho}_T}{dt} - F_{VT} \frac{dG_T}{dt} - G_K (r_{2K} C_{2UK} - r_{1K} C_{2UK}) - \\ &- I_{WK} \omega \frac{d\bar{\rho}_K}{dt} - F_{VK} \frac{dG_K}{dt} - M_{TP}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $I_{TK}$  – момент инерции ротора турбокомпрессора вместе с заполняющей каналы рабочих колес турбины и компрессора массой газа, кг/м<sup>2</sup>; в отличие от  $I_P$  является переменной величиной и определяется по зависимости

$$I_{TK} = I_P + I_{WT} + I_{WK} = I_P + I_{WT0} \bar{\rho}_T + I_{WK0} \bar{\rho}_K, \quad (7)$$

где значения  $I_{WT0}$  и  $I_{WK0}$  вычисляются по формуле, представленной в работе [1].

Пренебрегая незначительным влиянием переменной плотности газа в каналах рабочих колес на величину момента инерции  $I_{TK}$ , допустимо заменить точное его значение приближенной постоянной величиной

$$I_{TK} \approx I_{TK0} = I_P + I_{WT0} + I_{WK0}. \quad (8)$$



Такая замена заметно упрощает решение уравнения (6) без внесения ощутимой погрешности.

Уравнение (6) можно представить в относительных величинах:

$$T_{TK} \frac{d\Omega}{dt} = \bar{M}_{T1} - (1-b)\bar{M}_{K1} - b\bar{M}_{TP}, \quad (9)$$

где  $T_{TK}$  – слабо изменяющийся инерционный коэффициент, с, равный

$$T_{TK} = \frac{I_{TK}\omega_0}{M_{T0}} = T_P + T_{WT} + T_{WK}; \quad (10)$$

$T_{WT}$ ,  $T_{WK}$  – переменные инерционные коэффициенты, с, равные

$$T_{WT} = I_{WT}\omega_0/M_{T0}, T_{WK} = I_{WK}\omega_0/M_{T0}; \quad (11)$$

$\bar{M}_{T1}$ ,  $\bar{M}_{K1}$  – относительные значения моментов на рабочих лопатках турбины и компрессора, в соответствии с уравнением (6), равные

$$\bar{M}_{T1} = \frac{M_{T1}}{M_{T0}} = \bar{M}_{TS} - T_{WT}\Omega \frac{d\bar{\rho}_T}{dt} - T_{FT} \frac{d\bar{G}_T}{dt}; \quad (12)$$

$$\bar{M}_{K1} = \frac{M_{K1}}{M_{K0}} = \bar{M}_{KS} + T_{WK1}\Omega \frac{d\bar{\rho}_K}{dt} + T_{FK1} \frac{d\bar{G}_K}{dt}. \quad (13)$$

Здесь  $\bar{M}_{TS}$ ,  $\bar{M}_{KS}$  статические (квазистатические) составляющие относительных моментов турбины и компрессора, согласно уравнениям (6), (12) и (13), равные

$$\bar{M}_{TS} = \frac{M_{TS}}{M_{T0}} = A_T \bar{G}_T (C_{1UT} - \chi_T C_{2UT}); \quad (14)$$

$$\bar{M}_{KS} = \frac{M_{KS}}{M_{K0}} = A_K \bar{G}_K (C_{2UK} - \chi_K C_{1UK}); \quad (15)$$

$T_{WK1}$  – переменный инерционный коэффициент рабочего колеса компрессора, с, равный

$$T_{WK1} = \frac{I_{WK}\omega_0}{M_{K0}} = \frac{T_{WK}}{1-b}; \quad (16)$$

$T_{FT}$ ,  $T_{FK1}$  – постоянные времени проточных частей рабочих колес турбины и компрессора, с, равные

$$T_{FT} = F_{VT}G_{T0}/M_{T0}; T_{FK1} = F_{VK}G_{K0}/M_{K0}; \quad (17)$$

$A_T$ ,  $A_K$  – постоянные размерные коэффициенты, с/м, равные

$$A_T = G_{T0}r_{1T}/M_{T0}, A_K = G_{K0}r_{2K}/M_{K0}; \quad (18)$$

$\chi_T$ ,  $\chi_K$  – степень радиальности турбинного и компрессорного колес ( $\chi_T = r_{2T}/r_{1T}$ ;  $\chi_K = r_{1K}/r_{2K}$ ).

Значения моментов на рабочих лопатках турбины и компрессора на исходном установившемся режиме вычисляются по зависимостям

$$M_{T0} = G_{T0}r_{1T}(C_{1UT0} - \chi_T C_{2UT0}); \\ M_{K0} = G_{K0}r_{2K}(C_{2UK0} - \chi_K C_{1UK0}). \quad (19)$$

Уравнение динамики ротора ТК (9) с учетом значений и, определяемых по зависимостям (12) и (13), принимая во внимание величины инерционных коэффициентов (16) и (17), можно представить в виде

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{T_{TK}} [\bar{M}_{TS} - (1-b)\bar{M}_{KS} - \\ - \Omega(T_{WT} \frac{d\bar{\rho}_T}{dt} + T_{WK} \frac{d\bar{\rho}_K}{dt}) - \\ - T_{FT} \frac{d\bar{G}_T}{dt} - T_{FK} \frac{d\bar{G}_K}{dt} - b\bar{M}_{TP}], \quad (20)$$

где  $T_{FK}$  – постоянная времени проточной части рабочего колеса компрессора, с, равная

$$T_{FK} = \frac{F_{VK}G_{K0}}{M_{T0}} = (1+b)T_{FK1}. \quad (21)$$

Значения  $\bar{M}_{TS}$  и  $\bar{M}_{KS}$ , входящие в уравнение (20), определяются по формулам (14) и (15), в которых окружные составляющие абсолютных скоростей потока на выходе из рабочих колес компрессора  $C_{2UK}$  и турбины  $C_{2UT}$  определяются по зависимости, имеющей общую структуру как для компрессора, так и для турбины

$$C_{2U} = r_2\omega + W_{2m} \operatorname{ctg} \beta_2 = U_{20}\Omega + W_{2m0} \frac{\bar{G}}{\rho} \operatorname{ctg} \beta_2. \quad (22)$$

Все величины в формуле (22) указаны для выходного сечения рабочего колеса (помечаемого индексами 2Т и 2К соответственно для турбины и компрессора) и обозначают:  $U_{20} = \omega_0 r_2$  – окружная (переносная) скорость в выходном сечении рабочего колеса на исходном режиме, м/с;  $W_{2m}$  – меридиональная составляющая относительной скорости потока в выходном сечении рабочего колеса, м/с;  $\beta_2$  – угол между векторами переносной  $U_2$  и относительной  $W_2$  скоростей потока.

Представленные в статье уравнения и аналитические зависимости справедливы для ТК систем наддува ДВС, оснащенных одноступенчатыми радиальными и осерадиальными центробежными лопаточными компрессорами и одноступенчатыми радиальными, радиально-осевыми и осевыми турбинами, при любом направлении движения потока в турбинах – от периферии к центру либо от центра к периферии.

Представленное уравнение динамики ротора ТК входит составной частью в единую математическую модель динамики ТК системы наддува ДВС, включающую также динамические варианты уравнений энергии и количества движения массы газа в рабочих и направляющих каналах радиальных, осерадиальных и осевых турбомашин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Басалыгин Г.М.* Моделирование динамики рабочих колес радиальных турбомашин турбокомпрессоров наддува ДВС. – Эксплуатация морского транспорта: Сб. науч. трудов ГМА им. адмирала С.О. Макарова. – СПб.: Наука. – 2003. ■



# ОАО «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИБОРЫ»

## **Системы автоматического управления техническими средствами для судов всех типов**

Централизованное управление, контроль и сигнализация:

- Пропульсивным комплексом главный двигатель – винт регулируемого (фиксированного) шага
- Электроэнергетической установкой (ЭЭУ)
- Общесудовыми системами (ОСС)
- Вспомогательными механизмами (ВМ)
- Грузовыми операциями (ГО) танкеров



## **Системы автоматического управления, контроля и диспетчеризации технологических процессов перегрузки и хранения различных видов сыпучих и наливных грузов в портовых терминалах**

- Централизованное управление и контроль оборудованием портовых терминалов сыпучих грузов, в т.ч. транспортерами, питателями, пылеподавителями, вентиляторами, шиберами, разделителями потоков и т.д.



- Централизованное управление, контроль и коммерческий учет различных видов наливных грузов портовых терминалов в режимах:
  - прием в резервуарные парки с наливных судов, ж/д и автоцистерн;
  - отгрузка из резервуаров в наливные суда, ж/д и автоцистерны;
  - хранение в резервуарах с измерением физических параметров (температура, давление, уровень, объем, масса, плотность).

Разработка, производство, испытания, пуско-наладочные работы, обучение персонала, гарантийное и сервисное обслуживание систем управления и контроля различных классов и назначений – от локальных систем управления отдельными агрегатами (сепараторами, компрессорами, дизель-генераторами и т.п.) до комплексных автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) сложных объектов.

## **Системы автоматического управления техническими средствами для судов всех типов**



## **Системы автоматического управления, контроля и диспетчеризации технологических процессов перегрузки и хранения различных видов сыпучих и наливных грузов в портовых терминалах**



**Методический кабинет  
с программно-аппаратным  
комплексом тренажера  
ТГОС-2006  
по грузовым операциям  
на сухогрузных судах  
различного назначения**



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**ПРОЛЕТАРСКИЙ**  
ЗАВОД

ОАО "Пролетарский завод"  
192029, Санкт-Петербург, ул. Дудко, 3  
тел.: (812) 567-17-56, факс: (812) 567-37-33  
www.proletarsky.ru  
E-mail: proletarskyzavod@peterlink.ru



Открытое акционерное общество «Пролетарский завод» (в прошлом Александровский завод, основан по приказу императора Александра I) одно из старейших машиностроительных предприятий Санкт-Петербурга. С момента пуска в 1826 г. как литейного заведения его профиль неоднократно менялся от декоративно-монументального литья и чеканки до парового судостроения и специализированного станкостроения. Неслучайно завод вошел в историю «живителем российских мануфактур». Начав с выпуска первого отечественного паровоза в 1845 г., завод более века выпускал подвижной состав для развивающейся сети российских железных дорог.

Последние 40 лет предприятие, преобразованное в 70-е гг. в научно-производственное объединение с включением в него ЦНИИ судового машиностроения и завода «Экономайзер», специализируется в основном на судовом и энергетическом машиностроении. На нем созданы многочисленные образцы корабельных механизмов, систем и комплексов, в ряде случаев не имеющие аналогов в отечественной практике. Можно без преувеличения сказать, что нет практически ни одного военного корабля или гражданского судна от тяжелого авианесущего крейсера, атомного подводного ракетносца и супертанкера до ракетного и прогулочного катера, где бы не эксплуатировалась продукция объединения. Значителен вклад предприятия в развитие большой энергетики.

Фирма обеспечивает монтаж, наладку, сервисное обслуживание и необходимый ремонт наиболее сложных изделий поставляемой техники.

Основными проектами выпускаемых изделий являются СКБ ЭМ, входящие в состав завода, и ЗАО «ЦНИИ СМ», что способствует успешному выполнения всего цикла создания новой техники от НИКОР до производства и обеспечения эксплуатации.

Внешнеэкономическую деятельность ОАО «Пролетарский завод» обеспечивает ЗАО ВТФ «Судмаш».

Деловое научно-техническое сотрудничество связывает предприятие со многими зарубежными фирмами, оно является неприменным участником российских и зарубежных выставок (в т.ч. МВМС-2003 в Санкт-Петербурге).

Придавая большое значение качеству экспортной продукции, для ее сертификации привлечены зарубежные инспекционные общества, в результате большинство экспортных изделий получили одобрение и сертифицированы Английским и Германским Ллойдом и норвежским Дет Норске Веритас. В 2002 г. фирмой получен сертификат соответствия системы управления качеством предприятия требованиям стандартов серии ИСО 9000, а также необходимые лицензии на производство различных видов техники.



# РАЗВИТИЕ НАУКОЕМКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В СУДОВОМ МАШИНОСТРОЕНИИ - ОСНОВА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОАО «ПРОЛЕТАРСКИЙ ЗАВОД» (К 180-ЛЕТИЮ ЗАВОДА)

*В. Ф. Суслов, д-р техн. наук,  
генеральный директор ОАО «Пролетарский завод»*

**Н**аучно-технические технологии производства таких сложных технических изделий, как современные, подчас многофункциональные, судовые устройства и механизмы, рождаются не сразу в один миг, это – длительный процесс. Интеллектуальная и производственная составляющие технологии базируются на той промышленной идеологии, которая определяется при создании предприятия, определения его специализации на долгие времена в соответствии с «полезностью» для развития той отрасли экономики, ради чего оно и создается.

В сентябре 1826 г. в Санкт-Петербурге был основан Александровский чугунолитейный завод, в дальнейшем переименованный в «Пролетарский». Завод изначально специализировался на производстве изделий судового, общего машиностроения, парового судостроения, строительного и художественного литья. В первые десятилетия с момента основания на нем были построены 17 пароходов, первая цельнометаллическая подводная лодка и создан целый ряд высокохудожественных изделий для дворцово-архитектурных ансамблей Санкт-Петербурга. Более века бывший Александровский, а ныне «Пролетарский завод» был основным поставщиком локомотивов для российских железных дорог.

В 1963 г. он был перепрофилирован на создание и поставку судового машиностроительного оборудования для кораблей и судов военно-морского и гражданского флотов страны.

Для обеспечения требуемого технического уровня создаваемого судового машиностроительного оборудования при заводе создается специальное конструкторское бюро, которое впоследствии преобразуется в Центральное конструкторское бюро.

В кратчайшие сроки было разработано и освоено производство палубных электрогидравлических кранов, рулевых машин, успокоителей качки, подъемно-опускных устройств, водоопреснительных установок, средств водоподготовки и целого ряда другого машиностроительного оборудования.

Основополагающим моментом в развитии предприятия явилось создание в 1970 г. Научно-производственного объединения в составе ЦНИИ судового машиностроения и «Пролетарского завода», включившего в свой состав в 1974 г. и завод «Экономайзер». Таким образом было образовано комплексное научно-производственное

многономенклатурное предприятие судового машиностроения, которое благодаря своему научно-техническому и производственному потенциалу разработало и изготовило в кратчайшие сроки целый ряд судового машиностроительного оборудования, в том числе:

- палубные электрогидравлические краны грузоподъемностью 12,5 т (выпущено свыше 2000 ед.);
- типовой ряд аксиально-поршневых гидромоторов и насосов высокого давления;
- винты регулируемого шага для супертанкеров и других крупнотоннажных судов;
- комплексы передачи сухих и жидких грузов между кораблями и судами в море на ходу;
- успокоители качки для оснащения всех надводных кораблей 2-го и последующих поколений;
- рулевые машины и приводы для крупных подводных и надводных кораблей;
- взлетно-посадочный комплекс авианесущих крейсеров;
- ряд газотурбогенераторов, электро- и турбонасосных агрегатов;
- подводные манипуляторные устройства с дистанционным управлением и многое другое.

Особо следует отметить, что в результате творческой деятельности ученых и конструкторов ЦНИИ судового машиностроения совместно с «Пролетарским заводом» был создан и освоен в серийном производстве целый ряд сложнейших наукоемких изделий судового машиностроения, к которым прежде всего можно отнести подводные манипуляторные устройства, комплексы передачи сухих и жидких грузов между кораблями и судами в море на ходу и взлетно-посадочный комплекс авианесущих крейсеров. Первые две указанные работы были отмечены Государственными премиями.

## ПОДВОДНЫЕ МАНИПУЛЯТОРНЫЕ УСТРОЙСТВА

Создание глубоководных манипуляторов для нужд ВМФ было поручено в 1969 г. НПО «Пролетарский завод». В то время отечественного опыта создания таких манипуляторов практически не было. В кратчайшие сроки был сформирован научно-исследовательский и конструкторский коллектив, который совместно с экспериментально-опытным производством провел серию экспериментально-исследовательских работ по решению

Основные параметры манипуляторных устройств

| Параметр  | 1<br>мод.            | 2<br>мод. | 3<br>мод. |
|---|----------------------|-----------|-----------|
| Усилие захвата, кгс   | 150                  | 150       | 150       |
| Скорость захвата, м/с   | 0,2                  | 0,1       | 0,1       |
| Давление рабочей жидкости, кг/см <sup>2</sup>                           | 100                  | 100       | 100       |
| Расход рабочей жидкости, л/мин  | 20                   | 15        | 10        |
| Мощность управления, Вт:<br>постоянный ток, 27В<br>переменный ток, 220В | 70<br>520            | 100<br>—  | 100<br>—  |
| Количество манипуляторов, шт.   | 2                    | 2         | 1         |
| Число степеней свободы<br>манипулятора                                  | 8                    | 7         | 7         |
| Тип устройства управления   | Задающий<br>механизм | Рукоятка  |           |
| Количество единиц сменного<br>инструмента                               | 6                    | 2         | 5         |
| Масс, кг:   | 690                  | 357       | 210       |
| манипулятора  | 205                  | 160       | 148       |
| устройства управления   | 15                   | 4         | 4         |
| пульты управления   | —                    | 18        | 10        |
| блока управления  | 50                   | —         | —         |
| инструмента   | 130                  | 9         | 48        |

и отработке практических проблем: построению кинематики исполнительных органов манипуляторов, схем и конструкции приводов задающего и исполнительного органов, погружных датчиков различного назначения для контроля статических и динамических параметров манипуляторов, специальных уплотнений, прочностных характеристик, алгоритмов управления и их оптимизации и целый ряд других проблем, связанных не только с конструированием, но и испытаниями этих сложнейших устройств.

В результате в 1976 г. был создан первый отечественный экспериментальный образец глубоководного манипулятора, который успешно прошел все виды испытаний, тем самым подтвердив правильность разработанных технических решений.

За три десятилетия непростого пути развития этой уникальной наукоемкой технологии был создан и получил практическое применение целый ряд погружных манипуляторов различного назначения, которыми оснащены отечественные глубоководные аппараты (ГА). Например, для подводного аппарата-спасателя «Бестер» разработано манипуляторное устройство УМУ-1, оснащенное кассетами со сменным инструментом для подводных работ (рис.1), что значительно расширило функциональные возможности и эффективность ГА.



а



б

в

г

Рис.1. Манипуляторное устройство для подводных работ: а – манипуляторное устройство на стенде; б – ковш для сбора с грунта образцов и сыпучих грузов; в – исполнительный орган манипуляторного устройства; г – перерезание кабелей и тросов

В последнее время предприятием завершены работы по созданию для заказа ВМФ манипуляционного комплекса, оснащенного специальными средствами механизации, которые позволяют расширить рабочую зону манипулятора и доставлять в нее различные объекты для выполнения требуемых операций. Система управления манипуляторным комплексом построена на современной микропроцессорной технике, что расширило его функциональные возможности.

Новые горизонты использования манипуляторных устройств для нужд геологии открывает специальный манипуляционный комплекс СМК1, созданный ОАО «Пролетарский завод» совместно с ЗАО «ЦНИИ судового машиностроения» (табл. 1).

### КОМПЛЕКСЫ ПЕРЕДАЧИ СУХИХ И ЖИДКИХ ГРУЗОВ МЕЖДУ КОРАБЛЯМИ И СУДАМИ В МОРЕ НА ХОДУ

Решение проблемы создания новых технических средств для обеспечения снабжения кораблей ВМФ в районах несения боевой службы была возложена в июле 1969 г. на «Пролетарский завод» совместно с ЦКБ (ныне ЗАО «ЦНИИ СМ»). Актуальность решения этой проблемы для ВМФ была очевидна, так как они должны были повысить боеспособность и эффективность несения боевой службы кораблями вдали от своих берегов.

Решение этой задачи имело большое экономическое значение и для рыбопромыслового флота. Для проведения перегрузочных операций между кораблями (судами) в море на ходу наиболее прогрессивным считается траверзный способ с использованием судовых канатных дорог (СКД), который характеризуется высокой эффективностью, позволяющей одновременно обеспечивать снабжение сухими и жидкими грузами несколько кораблей при качке судов на морском волнении до 5 баллов включительно. При передаче грузов в море траверзным способом судно снабжения и принимающие корабли следуют параллельными курсами с одинаковой скоростью хода, соблюдая при этом заданный интервал, исключающий контакт кораблей.

Внедрение траверзного способа передачи грузов в море открывает большие перспективы для дальнейшего роста производительности при грузовых операциях.

Кроме того, данный способ позволяет осуществлять передачу людей с корабля на корабль в открытом море, что приобретает исключительное значение при смене экипажей боевых кораблей в отдаленных районах несения боевого дежурства. Отличительной особенностью устройства СКД является подвижность его точек подвеса, обусловленная качкой судов на морском волнении. В процессе качки взаимодействующих судов (передающее и принимающее) точки подвеса СКД совершают сложные колебательные движения, носящие случайный характер. В этих условиях необходимо создавать и поддерживать постоянное натяжение в несущих канатах СКД и обеспечивать заданное движение грузовой тележки (для устройств передачи сухих грузов) относительно передающего и принимающего устройств.



Рис. 2. Устройство передачи сухих и жидких грузов в море на ходу

Таблица 2

**Параметры устройств передачи грузов и людей в море**

| Параметр  | Устройства для передачи    |                              |  |
|---|----------------------------|------------------------------|--|
|   | сухих грузов и людей       | жидких грузов                |  |
| Индекс устройства   | B1-1,0                     | B1-4,0                       | B2-400   |
| Грузоподъемность, т   | 1                          | 4                            | —  |
| Цикличность передачи, цикл./ч   | 9-14                       | 9-14                         | —  |
| Пропускная способность шланговой линии при скорости перекачиваемой жидкости до 5 м/с, т/ч   | —                          | —                            | ок. 400  |
| Виды перекачиваемой жидкости  | —                          | —                            | дизтопливо<br>керосин<br>бензин<br>масла мазут<br>пресная вода |
| Длина канатной дороги (расстояние между точками подвеса канатной дороги на передающем и принимающем судах), м                         | От 30 до 70                |                              |  |
| Количество канатов в канатной дороге  | 2                          | 3                            | 1 несущий и 4 оттяжки  |
| Рабочее натяжение в канатной дороге в режиме слежения за качкой, кН (тс):<br>минимальная (при выборе)<br>максимальная (при травлении) | 35<br>(3,5)<br>45<br>(4,5) | 135<br>(13,5)<br>180<br>(18) | 50 (5)<br>90 (9)   |
| Максимальная скорость травления – выбирания канатной дороги (при волнении моря до 5 баллов включительно), м/с (м/мин)                 | 3,66 (220)                 |                              |  |
| Потребляемая мощность, средняя, кВт   | 80                         | 130                          | 40   |
| Масса устройства, кг  | 23 000                     | 69 000                       | 27 000   |

Особенность устройств передачи жидких грузов траверсным способом заключается в передаче их по шланговым линиям, подвешенным к установленной между судами канатной дороге.

Указанная сложность процесса передачи грузов между судами в море на ходу определила и сложность устройств для технического обеспечения этого процесса.

Только разработка и реализация наукоемкой технологии, включающей в себя создание специального испытательного стенда, физически имитирующего процесс траверсной передачи грузов, на котором был проведен комплекс научно-исследовательских и экспериментальных работ, включающий исследования динамических явлений в трощланговых системах траверсных устройств с разработкой методов оптимизации оценок их качества, позволило разработать и освоить серийное производство универсального устройства для передачи-приема сухих (массой до 4 т) и жидких грузов производительностью до 1000 т/ч (табл. 2 и рис. 2).

Изготовленные «Пролетарским заводом» комплекты устройств передачи-приема сухих и жидких грузов между судами в море на ходу типа «Струна» установлены на ряде кораблей ВМФ, а также поставлены по контрактам для оснащения кораблей ВМФ с КНР и Индии.

**ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНЫЕ КОМПЛЕКСЫ АВИАНЕСУЩИХ КРЕЙСЕРОВ**

Специализация «Взлетно-посадочные устройства палубной авиации» получила свое развитие в ОАО «Пролетарский завод» совместно с ЦНИИ СМ 33 года назад. Главной задачей этого нового технического направления стало создание корабельного оборудования для обеспечения взлета и посадки на палубу корабля самолетов классической аэродинамики.

В сжатые сроки был сформирован коллектив разработчиков и экспериментаторов, способных решать сложнейшие научно-исследовательские, проектные и экспериментально-производственные проблемы, совокупность которых и определила наукоемкую технологию в этом сложнейшем техническом направлении.

Совместно с проектированием указанного оборудования было проведено более 20 госбюджетных НИОКР по решению возникающих при проектировании научно-технических проблем. Одно только перечисление наименований этих тем определяет грандиозность решаемой задачи.

Были изготовлены действующие масштабные модели паровой катапульты, полиспадно-гидравлического аэрофинишера, аварийного барьера и многочисленные стенды с натурными и масштабными моделями узлов и механизмов комплекса и последующих их испытаний для получения необходимых экспериментальных данных для уточнения проектных разработок.

Решались такие сложные задачи, как заполнение водой горизонтального, открытого с одного торца цилиндра, с обеспечением удаления из цилиндра остаточного воздуха. В специальных стендовых условиях «отстреливался» плунжерный гидротормоз челночно-поршневой группы катапульты, развивающей скорость до 90 м/с, которую надо было затормозить на пути 2 м. Исследовались пары трения при скоростях до 90 м/с и механизм «бегущего» уплотнения парового цилиндра длиной 90 м, при помощи стальной ленты сечением 12×32 мм. Для аэрофинишера были созданы стенды испытания уплотнений гидроцилиндров на давление 1000 атм, спецподшипников, антифрикционных материалов.

На специально созданном полигоне «Нитка» был проведен натурно-масштабный комплекс экспериментальных исследований по отработке опытных образцов созданного оборудования для авианесущих кораблей.

Созданный образец взлетно-посадочного комплекса был установлен на первом отечественном авианесущем крейсере с самолетами горизонтальной посадки (рис. 3, 4).



Рис. 3. Взлетно-посадочный комплекс для авианесущих кораблей

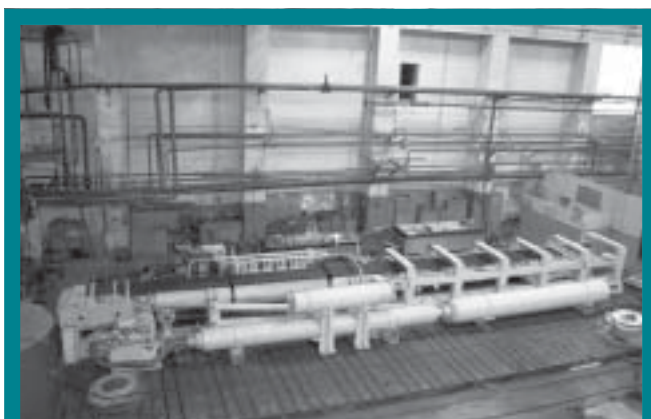


Рис. 4. Тормозная машина аэрофинишера

Разработка и освоение приведенных в качестве примера наукоемких технологий позволили накопить богатый научно-исследовательский, конструкторский и производственный опыт, который затем был использован при создании ряда других новых изделий судового машиностроения.

Научно-технические разработки в рамках рассмотренных технологий выполнены на уровне изобретений – получены десятки авторских свидетельств и патентов, что свидетельствует о высоком техническом уровне разработок. Целый ряд научно-технических проблем решены благодаря исследованиям, выполненным в рамках кандидатских диссертаций, которые были успешно защищены их авторами, что способствовало и повышению профессиональной квалификации коллектива разработчиков.

Освоение в опытном и серийном производстве рассмотренных наукоемких изделий судового машиностроения и неизбежно повлекло за собой необходимость освоения новых эффективных производственных технологий и соответствующего обновления производственных мощностей.

Если сформулировать критерий конкурентоспособности предприятия в аналитической форме, то его можно выразить следующим образом:

$$Q = \frac{\kappa_1 \cdot \kappa_1' \cdot \lambda_1 + \dots + \kappa_n \cdot \kappa_n' \cdot \lambda_n}{l_1 \cdot l_1' \cdot S_1 + \dots + l_n \cdot l_n' \cdot S_n} > 1,$$

где  $\kappa_1, \dots, \kappa_n$  – весовые коэффициенты к показателям конкурентоспособности предприятия;  $\kappa_1', \dots, \kappa_n'$  – коэффициенты динамического роста показателей конкурентоспо-

собности;  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  – показатели конкурентоспособности предприятия;  $l_1, \dots, l_n$  – весовые коэффициенты к затратам по освоению соответствующего показателя конкурентоспособности;  $l_1', \dots, l_n'$  – коэффициенты динамического роста затрат по освоению соответствующих показателей конкурентоспособности;  $S_1, \dots, S_n$  – затратные показатели по освоению соответствующего показателя конкурентоспособности.

К показателям конкурентоспособности предприятия можно отнести следующие показатели:

- уровень профессиональности персонала;
- уровень оснащения современными эффективными производственными технологиями, в том числе обеспечение их современным производственным оборудованием;
- наличие учебно-производственного центра для подготовки, переподготовки, повышения квалификации персонала предприятия и решения сложных научно-технических проблем.
- системное проведение НИОКР по развитию основных актуальных направлений судового машиностроения;
- системное обновление производственных мощностей и освоение современных производственных технологий;
- широкое освоение Cals-технологий при проектировании и производстве новых изделий судового машиностроения и т.д.

Все эти и другие неназванные показатели конкурентоспособности выявляются в процессе создания наукоемких технологий.

Вопрос стоимостных затрат при реализации этих факторов в настоящее время является весьма острым. Когда рождались рассмотренные в качестве примера наукоемкие технологии, то все затраты на их создание покрывались из госбюджета. В настоящее время развитие наукоемких технологий из Госбюджета не финансируется. Приходится за счет собственных средств обеспечивать точечное финансирование НИОКР по решению наиболее актуальных научно-технических проблем при создании востребованных на рынке видов продукции судового машиностроения. Безусловно, чтобы процесс развития наукоемких технологий в судовом машиностроении не угас, но вести его необходимо было бы в рамках государственной программы развития судового машиностроения, которая, однако, до настоящего времени еще не разработана.

Тем более, что наукоемкие технологии как законченный цикл от начала разработки нового изделия до его серийного освоения в производстве стимулируют качественное развитие всех сторон научно-технической и производственной деятельности предприятия, создавая главные интеллектуально-материальные предпосылки для повышения его конкурентоспособности.

Основные направления развития наукоемких технологий по созданию перспективного оборудования судового машиностроения подробно рассмотрены в работах [1–4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сулов В.Ф. Основные направления совершенствования судового машиностроительного оборудования. // Морской вестник, – 2004. – № 1.
2. Он же. Основные направления технического совершенствования комплексов корабельных устройств и механизмов // Морской вестник, – 2004. – № 4.
3. Сулов В.Ф., Даниловский А.Г., Ефимов О.И., Исаев И.И., Шаманов Н.П. Оптимизация судового машиностроительного оборудования, – Т.1. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2004.
4. Сулов В.Ф., Даниловский А.Г., Шаманов Н.П. Оптимизация судового машиностроительного оборудования. – Т.2. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2004. ■





В.А. Солонько

# КОНТРОЛЬ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ В КОРАБЕЛЬНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ КАК ЗАДАЧА РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

**В.А. Солонько,**  
 генеральный директор НПО «Севзапспецавтоматика»,  
**В.Н. Круглеевский,**  
 д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник 1 ЦНИИ МО РФ,  
**В.А. Колесник,**  
 д-р техн. наук, зам. генерального директора НПО «Севзапспецавтоматика»

Системы пожарной сигнализации заменяют труд экипажа по контролю пожарной опасности в корабельных помещениях. Контроль пожароопасной обстановки осуществляется членами экипажа путем обхода помещений корабля, оценки окружающей обстановки и выдачи заключения о наличии или отсутствии возгораний или признаков пожароопасных ситуаций. Это так называемый процесс распознавания образов: объектов, сигналов, ситуаций, явлений и т. п. Распознавание образов – самая распространенная задача, которую человеку приходится решать практически ежесекундно от первого до последнего дня своего существования [1].

Понятие «распознавание образов» включает в себя совокупность методов и средств, предназначенных для того, чтобы достигнуть, а если возможно, то и превзойти естественные средства восприятия и анализа окружающего мира живыми существами. Под *восприятием* понимается процесс познания путем умозаключений или с помощью органов чувств. Эта операция является первичной и предшествует процедуре распознавания образов. Способность познавать лежит в основе процедуры классификации, выполняемой человеком автоматичес-

ки, после чего следует процесс идентификации. Следует подчеркнуть, что идентифицировать можно лишь то, что уже известно.

Процесс эволюционного преобразования систем пожарной сигнализации (СПС), представлявших собой набор отдельных сигнализаторов, выдававших на центральный прибор сигналы о своем срабатывании в системы контроля пожарной опасности, которые должны воспринимать и анализировать изменение пожароопасной обстановки, а затем вырабатывать решения о наличии или отсутствии пожароопасной ситуации, позволяет увидеть, что СПС являются системами распознавания образов.

Если воспользоваться схемой, представленной на рис. 1, отображающей один из вариантов возможной классификации систем распознавания, то большинство известных корабельных систем пожарной сигнализации можно отнести к простым детерминированным системам распознавания без обучения [2]. Забегая несколько вперед, отметим, что системы контроля пожарной опасности на четвертом этапе их развития в соответствии с предложенной классификацией можно назвать сложными комбинированными системами распознавания, использующими детерминированные, вероятностные и логические алгоритмы распознавания, с возможностью обучения и (или) самообучения.

Подход к созданию систем контроля пожарной опасности как к системе распознавания позволяет использовать довольно богатый опыт, полученный при разработке систем, предназначенных для распознавания сложных объектов и явлений в медицине, робототехнике и т. п. [1–7]. Однако каждая система приспособлена для распознавания только данного вида объектов или явлений (т.е. система, предназначенная для диагностики заболеваний, не умеет диагностировать отказы аппаратуры). Поэтому для распознавания пожароопасных ситуаций требуется построение специализированной системы.

Специфика процесса проектирования и построения систем распознавания такова, что требует построения математической или физико-математической модели системы. Только наличие подобной модели позволяет реализовать итеративный процесс построения преобразованной системы распознавания, все более и более приближающихся по своим характеристикам к задаваемым требованиям.

АВИГАТЕЛИ, ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

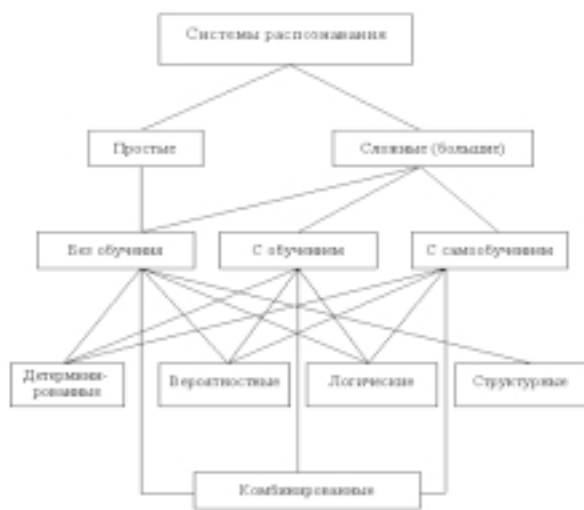


Рис. 1. Классификация систем распознавания объектов и явлений



## НОВОЕ КАЧЕСТВО • НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ • НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

ГЛАВНЫЕ И АВАРИЙНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ЩИТЫ  
КОМПЛЕКТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
КОМПЛЕКТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ  
НИЗКОВОЛЬТНАЯ КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ЭЛЕКТРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
МОНТАЖНЫЕ РАБОТЫ

### Проекты 2005

ОАО «Новая Эра» участвует в переоснащении тяжелого авианесущего крейсера. Предприятие поставляет на авианосец «Адмирал Горшков» 50 преобразовательных агрегатов и несколько видов электрощитовой продукции. Кроме того, компания «Новая Эра» примет участие в ремонте части щитов, имеющих на крейсере и не подлежащих замене.

- Буровая платформа Д-6
- Буровая платформа «Приразломная»
- Атомный ледокол «50 лет Победы»
- Танкера проекта 05-55
- Корвет проекта 20380
- **Авианосец «Адмирал Горшков»**
- Малый ракетный артиллерийский корабль
- Скоростные катера проекта А-45
- Скоростные пассажирские суда проекта А-125





Таким образом, на первом этапе должна быть создана модель корабельного помещения как объекта диагностики пожарной опасности.

Под *образом* понимается структурированное приближенное (частичное) описание изучаемого объекта или явления, причем частичная определенность описания является принципиальным свойством образа. Образ допускает рекурсивное определение: символ – это образ, список символов и есть образ. Списочная запись позволяет использовать одно и то же представление для описания образа произвольного типа независимо от его «содержания», а также один и тот же алгоритм для работы с образами с различным содержанием. Образ состоит из двух групп символов, представляющих соответственно переменные и постоянные характеристики объекта описания. Описание служит для установления соответствия образов, т.е. доказательства их идентичности, аналогичности, подобия, сходства и т. п., осуществляемого сопоставлением. Сопоставление образов представляет собой основную задачу распознавания.

Распознавание образов как научное направление включает в себя большое число различных дисциплин и использует методы, характерные для каждой из них. Наряду с информатикой среди них можно особо выделить прикладную физику, необходимую при разработке эффективных датчиков, а также различные разделы математики, лежащие в основе методов обработки данных.

Для того чтобы определить роль датчика в системе распознавания, следует разграничить два принципиально различных класса образов, для которых данная система предназначена: конкретные и абстрактные. К *конкретным* образам относятся все реальные объекты окружающего мира, а также их изображения или словесные описания. *Абстрактные образы* связаны с механизмами формирования понятий. Сюда входят такие категории, как мнения, оценки, являющиеся результатами опроса, анкетирования и т.п. Абстрактными являются также такие образы, которые возникают в результате наблюдений, оценок и измерений. Введение понятий о конкретных и абстрактных образах определяет и два варианта распознавания – перцептивный и концептуальный.

В технической системе перцептивного распознавания входным элементом служит датчик, задача которого заключается в преобразовании физической величины, характеризующей наблюдаемый объект реального мира, в другую величину, предназначенную для восприятия обрабатывающей системой. Следовательно, датчик можно рассматривать как согласованный фильтр, т.е. его характеристика должна быть согласована с физической величиной, поступающей на его вход. С точки зрения теории информации датчик является элементом, предназначенным для согласования устройства обработки с наблюдаемым внешним миром, а его выходные сигналы дают «априорное» описание наблюдаемого объекта.

Если рассматривать задачу распознавания в самом общем виде, то ее можно сформулировать как задачу разработки процедуры, позволяющей разбивать множество объектов на классы. При этом подразумевается, что такое разбиение существует. Решение подобной задачи представляется сомнительным, особенно если иметь в виду концептуальные образы. Задача распознавания в самом общем виде представляется в принципе неразрешимой. Каждый из нас на собственном опыте может убедиться в том, что мы воспринимаем не сам объект, а лишь некоторое понятие, связанное с его признаками.

Очевидно, что число различных проявлений, характеризующих один и тот же объект, может быть бесконечно большим. На практике выбирают некоторое ограниченное

количество признаков, связанных с объектом. Иначе говоря, рассматривают только проекцию множества признаков на пространство выбранных характеристик.

В общем виде решение задачи распознавания пожарной опасности и пожара в корабельном помещении можно представить в следующей трактовке. Должна быть определена некоторая совокупность ситуаций, способных произойти в корабельном помещении. В соответствии с выбранным принципом классификации она подразделяется на ряд классов, например, пожароопасная ситуация (ПОС) или пожар и отсутствие ПОС и пожара, т.е. составляется алфавит классов. Затем разрабатывается словарь признаков, на языке которого описывается каждый класс ситуаций. Создаются (или выбираются из уже имеемых) технические средства, обеспечивающие определение признаков, а на вычислительных средствах системы распознавания реализуются алгоритмы распознавания, позволяющие сопоставлять априорные данные о неизвестной ситуации с априорной информацией и на основе сопоставления определять, к какому классу она может быть отнесена. Когда ситуация в помещении изменяется, технические средства наблюдения определяют ее признаки. Данные о признаках неизвестной ситуации поступают на вход алгоритма распознавания, который, используя априорные описания классов, определяет, к какому классу может быть отнесена ситуация.

Механизм классификации образов можно выразить на языке разбиения пространства признаков или отображения пространства признаков в пространство решений. Если у каждого входного образа измеряется  $N$  признаков, то каждое множество из  $N$  признаков можно рассматривать как вектор  $X$ , называемый вектором признаков, или как точку в  $N$ -мерном пространстве признаков  $\Omega_X$ . Задача классификации заключается в распределении всех возможных векторов или точек в пространстве признаков по соответствующим классам образов. Это можно трактовать как разбиение пространства признаков на взаимно непересекающиеся области, каждая из которых соответствует некоторому классу образов.

Математически задача классификации может быть сформулирована с помощью разделяющей функции. Пусть  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$  обозначают  $m$  возможных классов образов, подлежащих распознаванию, и пусть

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

есть вектор замеров признаков, где  $x_i$  представляет собой  $i$ -й замер. Тогда разделяющая функция  $D_j(X)$ , относящаяся к классу образов  $\omega_j, j = 1, \dots, m$ , такова, что если входной образ, представленный вектором признаков  $X$ , принадлежит классу  $\omega_j$ , то величина  $D_j(X)$  должна быть наибольшей. Пусть  $X \sim \omega_i$  обозначает, что вектор признаков  $X$  входного образа принадлежит классу  $\omega_i$ . Тогда можно записать, что для всех  $X \sim \omega_i$

$$D_i(X) > D_j(X), i, j = 1, \dots, m, i \neq j. \quad (2)$$

Таким образом, в пространстве признаков  $\Omega_X$  граница разбиений, называемая решающей границей, между областями, относящимися соответственно к классу  $\omega_i$  и классу  $\omega_j$ , выражается уравнением

$$D_i(X) - D_j(X) = 0. \quad (3)$$

Процесс построения системы контроля пожарной опасности (СКПО) как системы распознавания образов можно разбить на несколько этапов. Первый этап заключается в определении полного перечня признаков (параметров), характеризующих ПОС. В соответствии со способами, которыми они могут быть определены, признаки могут быть подразделены на группы: детерминированные, вероятностные и логические. Детерминированными признаками, принимающими конкретные числовые значения, являются координаты местонахождения источников загорания (ИЗ) и горючих материалов и веществ (ГМВ) и температуры нагретых поверхностей, измеряемые техническими средствами. При рассмотрении детерминированных признаков ошибками измерений пренебрегают. Вероятностными признаками являются результаты прогноза разрушений и отказов оборудования, приводящие к разгерметизации трубопроводов и емкостей с жидкими и газообразными горючими веществами, с последующим определением координат их возможного распространения. Результаты прогноза изменений координат ИЗ и ГМВ в результате так называемого человеческого фактора, также относятся к вероятностным признакам. Логическими признаками распознаваемых ситуаций можно рассматривать как элементарные высказывания, принимающие два значения истинности («да», «нет») с полной определенностью. Логические признаки не имеют количественного выражения. К логическим признакам относятся такие, у которых важна не величина признака у распознаваемой ситуации, а лишь факт попадания или непадания ее в заданный интервал. Логическими признаками являются: разрушения конструкций, теплоизоляции и электроизоляции, появление открытого пламени, электрической дуги или искр. Изменение технологического режима работы оборудования, связанное с изменением местоположения или параметров ГМВ и ИЗ, также относится к логическим признакам, характеризующим пожароопасную ситуацию в помещении.

Второй этап заключается в определении множества ситуаций, связанных с изменением местоположения ГМВ и ИЗ, их параметров и состояний, которые могут произойти в корабельном помещении и привести к возникновению пожара, а также сценариев развития этих ситуаций. Данная процедура может выполняться как с использованием математического моделирования, так и экспертным путем. Полученное множество ситуаций разбивается на классы «ПОС» и «отсутствие ПОС».

На третьем этапе для полученного множества ситуаций разрабатывается априорный словарь признаков. При этом в него включаются только те, относительно которых может быть получена априорная информация, необходимая для описания классов на языке этих признаков.

Четвертый этап состоит в описании классов ситуаций на языке признаков, включенных в априорный словарь признаков. Подобная задача не имеет однозначного решения, и в зависимости от объема исходной информации для ее решения могут быть использованы методы непосредственной обработки исходных данных, обучения и самообучения.

Если признаки распознаваемых ситуаций детерминированные, то описанием каждого класса ситуаций на языке этих признаков является его эталон, т.е. точка, сумма расстояний которой от точек описывающих объекты, принадлежащие данному классу, минимальна.

Если признаки распознаваемых ситуаций логические и имеют количественные выражения, то для описания классов ситуаций на языке признаков необходимо определить диапазоны значений признаков  $\Delta x_j^i$ ,  $j=1, \dots, N$ , соот-

ветствующие классам  $\Omega_i$ ,  $i=1, \dots, m$ . При этом каждый из отрезков может рассматриваться как элементарное логическое высказывание  $A, B, C, \dots$ . Если признаки распознаваемых ситуаций есть суждения качественного характера, то каждый из них также рассматривается как элементарное логическое высказывание  $A', B', C', \dots$ . Для описания классов на языке этих признаков определяют, какими из них характеризуется каждый класс, после чего устанавливают зависимость в форме булевых отношений между признаками  $A, B, C, \dots; A', B', C', \dots$  и классами  $\Omega_1, \dots, \Omega_m$ .

Если распределение ситуаций по областям  $D_i$   $N$ -мерного пространства признаков для всех значений  $i=1, \dots, m$  вероятностное, то для описания классов необходимо определить характеристики этих распределений: функции плотности вероятности  $f_i(x_1, \dots, x_N)$  значений параметров  $x_1, \dots, x_N$  при условии, что ситуации принадлежат классу  $\Omega_i$ , априорные вероятности  $P(\Omega_i)$  того, что ситуация, случайным образом произошедшая, окажется принадлежащей к классу  $\Omega_i$ .

Пятый этап заключается в разбиении априорного пространства признаков на области, соответствующие классам априорного алфавита классов («ПОС» и «отсутствие ПОС»). Подобное разбиение должно быть выполнено в некотором смысле оптимальным образом, например, так, чтобы при этом обеспечивалось минимальное значение ошибок.

Требуется построить разделяющие функции  $F_i(x_1, \dots, x_N)$ ,  $i=1, \dots, m$  обладающие следующим свойством: если ситуация, имеющая признаки  $x_1^0, \dots, x_N^0$ , относится к

классу  $\Omega_i$ , то величина  $F_i(x_1^0, \dots, x_N^0)$  должна быть наибольшей. Такой же она должна быть и для всех других значений признаков ситуаций, относящихся к классу  $\Omega_i$ . Если  $\mathbf{x}_q$  – вектор признаков ситуации, принадлежащей к  $\Omega_g$ -му классу, то для всех значений вектора  $\mathbf{x}_q$   $F_i(\mathbf{x}_q) > F_g(\mathbf{x}_q)$ ,  $q, g=1, \dots, m$ ,  $q \neq g$ .

Шестой этап состоит в выборе алгоритмов распознавания, обеспечивающих отнесение распознаваемой ситуации к одному из классов. Алгоритмы распознавания основываются на сравнении меры близости или меры сходства распознаваемой ситуации с каждым классом. При этом если выбранная мера близости  $L$  данной ситуации  $\omega$  с каким-либо классом  $\Omega_g$ ,  $g=1, \dots, m$ , превышает меру ее близости с другими классами, то принимается решение о принадлежности этой ситуации к классу  $\Omega_g$ , т.е.  $\omega \in \Omega_g$ , если  $L(\omega, \Omega_g) = \text{extr} L(\omega, \Omega_i)$ ,  $i=1, \dots, m$ ,  $i \neq g$ .

В алгоритмах распознавания, базирующихся на использовании детерминированных признаков, в качестве меры близости удобно использовать среднеквадратичное расстояние между данной ситуацией  $\omega$  и совокупностью ситуаций  $\{\omega_{g1}, \dots, \omega_{gk}\}$ , представляющих собой класс  $\Omega_g$ :

$$L(\omega, \Omega_g) = \sqrt{k_g^{-1} \sum_{s=1}^{k_g} d^2(\omega, \omega_{gs})}. \quad (4)$$

В алгоритмах распознавания, базирующихся на использовании вероятностных признаков, в качестве меры близости может использоваться риск, связанный с решением о принадлежности распознаваемой ситуации к классу  $\Omega_i$ ,  $i=1, \dots, m$ . Необходимо иметь описание классов  $\{f_i(x), P(\Omega_i)\}$ ,  $x = \{x_1, \dots, x_N\}$  и риски правильных и ошибочных решений, представляющие собой элементы платежной матрицы вида

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mm} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

По главной диагонали матрицы расположены потери при правильных решениях, а по обеим сторонам от нее – потери при ошибочных решениях. Если  $c_{ii} < 0$ ,  $i = 1, \dots, m$ , то такие отрицательные потери можно рассматривать как выигрыш при правильных решениях.

Имея значения признаков

$$x_1 = x_1^0, \quad x_2 = x_2^0, \quad \dots, \quad x_N = x_N^0,$$

распознаваемой ситуации  $\omega$  и обозначив это событие как  $a_N$ , можно определить риск, связанный с решением вида

$\omega \in \Omega_g$ :

$$R(\omega \in \Omega_g | a_N) = R(\Omega_g | a_N) = \sum_{i=1}^m c_{ig} P(\Omega_i | a_N), \quad (6)$$

где условная апостериорная вероятность того, что  $\omega \in \Omega_i$ , в соответствии с формулой Байеса равна

$$P(\Omega_i | a_N) = P(\Omega_i) f_i(x_1^0, \dots, x_N^0) / \sum_{i=1}^m P(\Omega_i) f_i(x_1^0, \dots, x_N^0). \quad (7)$$

В общем случае решение вида  $\omega \in \Omega_g$  принимается в случае, если

$$R(\Omega_g | a_N) = \min_i R(\Omega_i | a_N) \quad (8)$$

В алгоритмах распознавания, базирующихся на использовании логических признаков, не используется понятие «мера близости». Если построено описание классов на языке логических признаков в виде соответствующих булевых соотношений (эквивалентности или импликаций), то при подстановке в эти соотношения значений признаков, характеризующих распознаваемую ситуацию, автоматически возникает ответ, к какому классу эта ситуация может быть отнесена и к каким она не относится.

Седьмой этап заключается в оптимизации разработанных алфавита классов ситуаций и словаря признаков с учетом ограничений на построение системы распознавания пожарной опасности. При этом следует учитывать как наличие или возможность создания конкретных средств наблюдения, так и ограниченность ресурсов (финансовых, материальных, временных, массо-габаритных, энергетических и т.п.) при проектировании и постройке корабля, составной частью которого является рассматриваемая система.

В контурах контроля и управления кораблем циркулирует достаточно информации, которая может быть прямо или косвенно использована для определения пожарной опасности. Источники информации (ИИ) о пожарной опасности могут быть разделены на следующие группы:

- технические средства контроля параметров технологических процессов, используемые в системах управления и контроля энергетическими установками, общекорабельными системами, электроэнергетической системой корабля;
- датчики СПС, систем автоматического включения средств пожаротушения (АВСП) и температурно-тревожной сигнализации (ТТС), датчики наличия паров топлива, газоанализаторы и т. п.;
- информация от систем теле- и тепловизионного контро-

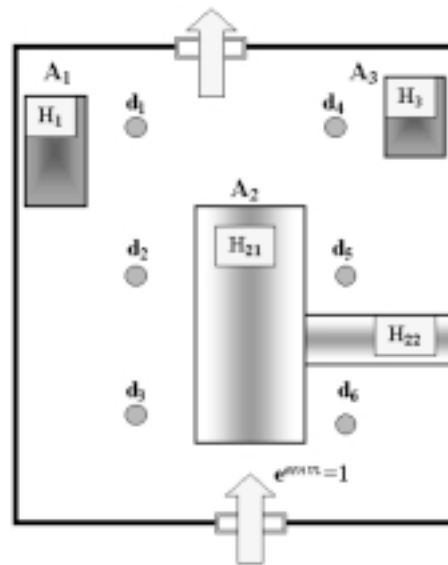


Рис. 2. Схема корабельного помещения

ля (наличие разрушений, появление течи, пара, дыма, контроль температурного поля помещения/зоны/оборудования);

- данные о надежности ТС и оборудования;
- результаты диагностирования и прогнозирования состояния технических средств (ТС), оборудования, кабельных трасс и т. п.;
- данные о проводимых и предстоящих ремонтах и профилактических работах (время, помещение, перечень ТС и оборудования, характер работ: сварка, демонтаж оборудования, покраска и т. п.);
- данные о приеме/выгрузке запасов, грузов, боезапаса;
- данные учета перемещаемых и расходуемых грузов;
- информация, получаемая непосредственно от членов экипажа (например: пожар, дым, запах горячей изоляции, разрушение трубопроводов с ГМВ и т.д.);
- данные о местонахождении, уровне знаний и практических навыков, психическом и физиологическом состоянии членов экипажа;
- информация о возможных пожароопасных ситуациях, полученная экспертным путем или с помощью моделирования.

Исследования показали, что выбор того или иного вида алгоритма определяется в первую очередь характером используемых в процессе распознавания ИИ. Так, при использовании информации, получаемой от датчиков систем контроля, могут применяться детерминированные и логические алгоритмы. При использовании информации о надежности оборудования или об уровне подготовки членов экипажа могут применяться вероятностные алгоритмы распознавания. Наилучшие результаты по распознаванию ПОС можно получить, используя комбинированные алгоритмы распознавания, т.е. одновременно вероятностные, логические и детерминированные.

На рис. 2 представлена схема идеализированного корабельного помещения  $\Delta$ , содержащее технические средства  $A_1, A_2, A_3$ . Каждое техническое средство имеет режимы работы  $e_j^{Ai}$  и тепловыделяющую поверхность:  $A_1 - H_1, A_2 - H_{21} \text{ и } H_{22}, A_3 - H_3$ . В помещении установлено шесть температурных адресных аналоговых датчиков СКПО  $d_1, d_2, \dots, d_6$ . В помещении предусмотрена вентиляция, работающая в двух режимах  $e_j^{\text{вент}}$  – включена/выключена. В формальном виде отобразить помещение и выразить динамику процессов, связанных с выделением тепла  $Q$ , можно следующим образом:

$$\Delta = \{A_1, A_2, A_3, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, e^{вент.}, Z\};$$

$$A_1 = \{H_1, e_1^{A_1}, e_2^{A_1}, Q^{H_1}, \tau\};$$

$$A_2 = \{H_{21}, H_{22}, e_1^{A_2}, e_2^{A_2}, e_3^{A_2}, Q^{H_{21}}, Q^{H_{22}}, \tau\};$$

$$A_3 = \{H_3, e_1^{A_3}, e_2^{A_3}, Q^{H_3}, \tau\};$$

$$e_j^{A_i} = \{1, 0\}; \quad e^{вент.} = \{1, 0\}; \quad Z = \{1, 0\};$$

$$d_k = \{h_k, t_k, \tau\}; \quad k = 1, 2, \dots, 6; \quad \tau = 1, 2, \dots, g.$$

Режимы работы технического средства  $A_1$ :

$$(e_1^{A_1} = 1, e_2^{A_1} = 0)_\tau \rightarrow (Q^{H_1} = 0)_\tau;$$

$$(e_1^{A_1} = 0, e_2^{A_1} = 1)_\tau \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} ((Q^{H_1})_{\tau+n} < (Q^{H_1})_{\tau+n+1}, n = 1, 2, \dots, p) \\ ((Q^{H_1})_{\tau+n} = (Q^{H_1})_{\tau+n+1} = \text{const.}, n > p) \end{array} \right\}$$

Режимы работы технического средства  $A_2$ :

$$(e_1^{A_2} = 1, e_2^{A_2} = 0, e_3^{A_2} = 0)_\tau \rightarrow (Q^{H_{21}} = 0, Q^{H_{22}} = 0)_\tau;$$

$$(e_1^{A_2} = 0, e_2^{A_2} = 1, e_3^{A_2} = 0)_\tau \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} ((Q^{H_{21}})_{\tau+n-1} < (Q^{H_{21}})_{\tau+n}, n = 1, 2, \dots, c) \\ ((Q^{H_{21}})_{\tau+n} = \text{const.}, n > c) \\ (Q^{H_{22}})_{\tau+n} = 0 \end{array} \right\}$$

$$(e_1^{A_2} = 0, e_2^{A_2} = 0, e_3^{A_2} = 1)_\tau \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} ((Q^{H_{21}})_{\tau+n-1} < (Q^{H_{21}})_{\tau+n}, n = 1, 2, \dots, c) \\ ((Q^{H_{22}})_{\tau+n-1} < (Q^{H_{22}})_{\tau+n}, n = 1, 2, \dots, b) \\ ((Q^{H_{21}})_{\tau+n} = \text{const.}, n > c) \\ ((Q^{H_{22}})_{\tau+n} = \text{const.}, n > b) \end{array} \right\}$$

Режимы работы технического средства  $A_3$ :

$$(e_1^{A_3} = 1, e_2^{A_3} = 0)_\tau \rightarrow (Q^{H_3} = 0)_\tau;$$

$$(e_1^{A_3} = 0, e_2^{A_3} = 1)_\tau \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (Q^{H_3})_{\tau+n-1} < (Q^{H_3})_{\tau+n}, n = 1, 2, \dots, l; \\ (Q^{H_3})_{\tau+n-1} = (Q^{H_3})_{\tau+n} = \text{const.}, n > l. \end{array} \right\}$$

Алгоритмы распознавания пожароопасных ситуаций для рассмотренного помещения, построенные по принципу распознавания аномального повышения температуры, будут иметь вид, аналогичный выражениям (13) и (14) для датчиков  $d_1$  и  $d_5$  соответственно:

$$(((t^{d_1})_{\tau+n} - (t^{d_1})_{\tau+n-1}) > 0) \wedge \left( \begin{array}{l} e_1^{A_1} = 0, e_2^{A_1} = 1, e_1^{A_2} = 1 \\ e_1^{A_3} = 1, e^{вент.} = 0 \end{array} \right)_{\tau+n} \rightarrow (Z = 0);$$

$$(((t^{d_1})_{\tau+n} - (t^{d_1})_{\tau+n-1}) > 0) \wedge \left( \begin{array}{l} e_1^{A_1} = 1, e_2^{A_1} = 0, e_1^{A_2} = 1 \\ e_1^{A_3} = 1, e^{вент.} = 0 \end{array} \right)_{\tau+n} \rightarrow (Z = 1).$$

$$(((t^{d_5})_{\tau+n} - (t^{d_5})_{\tau+n-1}) > 0) \wedge \left( \begin{array}{l} e_1^{A_2} = 0, ((e_2^{A_2} = 1) \vee (e_3^{A_2} = 1)) \\ e_1^{A_3} = 1, e^{вент.} = 0 \end{array} \right)_{\tau+n-1} \rightarrow (Z = 0);$$

$$(((t^{d_5})_{\tau+n} - (t^{d_5})_{\tau+n-1}) > 0) \wedge \left( \begin{array}{l} e_1^{A_1} = 1, e_1^{A_2} = 1 \\ e_1^{A_3} = 1, e^{вент.} = 0 \end{array} \right)_{\tau+n-1} \rightarrow (Z = 1).$$

$$(((t^{d_2})_{\tau+n} - (t^{d_3})_{\tau+n} > a_1) \wedge \left( \begin{array}{l} ((e_2^{A_2} = 1) \vee (e_3^{A_2} = 1)) \\ e^{вент.} = 0 \end{array} \right)_{\tau+n} \rightarrow (Z = 1);$$

$$(((t^{d_2})_{\tau+n} - (t^{d_3})_{\tau+n} > a_2) \wedge \left( \begin{array}{l} ((e_2^{A_2} = 1) \vee (e_3^{A_2} = 1)) \\ e^{вент.} = 1 \end{array} \right)_{\tau+n} \rightarrow (Z = 1).$$

$$a_2 > a_1.$$

Алгоритм (15) предназначен для распознавания возникновения пожароопасной ситуации при разрушении теплоизоляции поверхности  $H_{21}$ .

Алгоритм распознавания, основанный на контроле динамики изменения температурного поля представлен выражениями (16) – (18):

$$\{e_1^{A_1}, e_2^{A_1}, e_1^{A_2}, e_2^{A_2}, e_3^{A_2}, e_1^{A_3}, e_2^{A_3}, e^{вент.}\}_j \rightarrow \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2k} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{61} & a_{61} & \dots & a_{6k} \end{vmatrix},$$

$$a_{in} = (t^{d_i})_{\tau=n}, \quad \tau = 1, 2, \dots, k.$$

$$\begin{vmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ \vdots \\ a_{6n} \end{vmatrix} \rightarrow \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{26} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{61} & c_{61} & \dots & c_{66} \end{vmatrix} = \mathbf{C}_n, \quad c_{im} = \begin{cases} 1, & \text{если } a_{in} R a_m, (a_{1n}, \dots, a_{6n}) \in R; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (C_n = C_n^0) \rightarrow Z = 0; \\ (C_n \neq C_n^0) \rightarrow Z = 1. \end{array} \right.$$

Здесь  $C_n$  – квадратичная матрица попарного сравнения значений температур  $a_{in}$ , измеренных шестью датчиками для  $n$ -го шага времени, которая сравнивается с заданным заранее или сформированным в процессе обучения системы эталонным образом, представленным матрицей  $C_n^0$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- Фор А. Восприятие и распознавание образов. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
- Горелик А.Л., Скрипкин В.А. Методы распознавания. – М.: Высшая школа, 1989. – 232 с.
- Фу К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин. – М.: Наука, 1971. – 256 с.
- Он же. Структурные методы в распознавании образов. – М.: Наука, 1977.
- Дмитриев А.К. Распознавание отказов в системах электроавтоматики. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 104 с.
- Гренандер У. Лекции по теории образов. – Т. 1: Синтез образов. – М.: Мир, 1979. – 384 с.
- Он же. Лекции по теории образов. – Т. 3: Регулярные структуры. – М.: Мир, 1983. – 430 с. ■

Газопровод «Голубой поток» из России в Турцию через Черное море – уникальное техническое сооружение, при проектировании которого были решены вопросы прочности и надежности, а также выполнены оценки воздействия на окружающую среду строительства и эксплуатации газопровода [1, 2]. Вместе с тем Черное море является специфической по многим характеристикам акваторией, экологическое состояние которой неблагоприятно [3], и поэтому применение к нему обычных подходов и методов экологических прогнозов последствий создания и эксплуатации технических сооружений недостаточно. В первую очередь, это относится к проблеме выноса на поверхность моря при аварийных ситуациях насыщающего глубинные водные массы ядовитого газа – сероводорода. Действительно, в восточной части Черного моря верхняя граница анаэробной, лишенной жизни сероводородной зоны находится чрезвычайно близко от поверхности моря: на глубинах от 100 до 150 м [4].

В процессе эксплуатации магистральных нефте- и газопроводов на трубах образуются вследствие скрытых дефектов производства или сварки свищи, проявляющиеся благодаря коррозии. Имеющаяся статистика показывает [5], что на каждую 1000 км сухопутных трубопроводов ежегодно появляются шесть свищей. По статистике РАО «Газпром», интенсивность аварий на трубопроводах составляет 0.22 на 1000 км в год [6]. Как показывает опыт эксплуатации трубопроводов в Северном море, эта статистика справедлива и для морских донных трубопроводов [6, 7].

Основная часть трубопровода «Голубой поток» (рис.1) прокладывается в водной массе, насыщенной сероводородом, который интенсифицирует коррозионные процессы. Поэтому имеются достаточные основания ожидать со временем появления свищей на трубопроводе. В отличие от сухопутных газопроводов свищи на больших глубинах трудно обнаружить, и они могут длительное время существовать, следствием чего становятся утечки газа. Полное разрушение газопровода может произойти в результате развития коррозионных процессов, а также вполне вероятно из-за действия тектонических процессов, лавинных смещений донных осадков, удара затонувшего судна и т.п. В результате в Черном море может произойти залповый выброс метана – основного компонента природного газа.

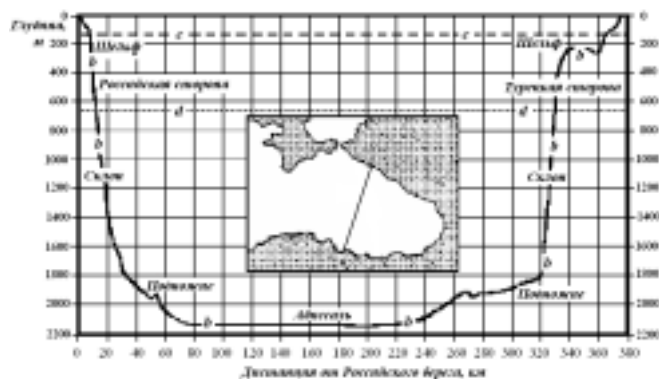


Рис. 1. Схема прокладки черноморского газопровода «Голубой поток» из России в Турцию (а) [26], диаграмма изменения глубины прокладки газопровода (б – б – б) [23], среднее положение границы анаэробной зоны (с – с) [11] и среднее расположение горизонта существования гидрата метана (d – d) по [15]

# ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ УТЕЧЕК И ВЫБРОСОВ ГАЗА ИЗ ЧЕРНОМОРСКОГО ГАЗОПРОВОДА «ГОЛУБОЙ ПОТОК»

**В.К. Гончаров**, д-р техн. наук, проф., СПбГМТУ

Утечки или выбросы метана приведут к появлению скопленных всплывающих к поверхности моря пузырьков. Вследствие происходящего на границе пузырьков газообмена с водной средой наполняющий их метан будет растворяться, а из водной среды в пузырек должны диффундировать отсутствующие в нем в начальный момент газы, чтобы обеспечить идентичность газового состава в пузырьке соотношению концентраций растворенных в морской воде газов [8]. Таким образом, пузырек в процессе всплытия кроме потери – растворения метана – будет собирать и переносить в вышележащие водные массы азот и сероводород с анаэробных глубин. При всплытии пузырьков в приповерхностный слой и далее на поверхность моря захваченный на больших глубинах ядовитый сероводород может оказаться в верхнем деятельном слое моря и даже в атмосфере. Последствия в этом случае – подобны последствиям периодически происходящего у южного берега Крыма апвеллинга глубинных вод, который приводит к заморам рыбы и неприятному запаху, ухудшающему условия обитания на берегу.

Хотя основная часть газопровода «Голубой поток» прокладывается на больших глубинах, это не дает оснований надеяться на то, что образовавшиеся при повреждении трубопровода пузырьки полностью растворятся на глубине, не достигнув поверхности моря, и поэтому выноса сероводорода с анаэробных глубин не произойдет. Принято считать, что газовые пузырьки быстро растворяются на больших глубинах, поскольку при гидроакустических исследованиях пузырьки регистрируются только в приповерхностном слое моря [9]. Однако известны наблюдения факелов газовых пузырьков, поднимающихся примерно на 1000 м с глубин около 2 км в районе нефтегазового месторождения в Калифорнийском заливе [10], и именно это дает основание ожидать подобных феноменов в Черном море, которые могут сопровождаться неблагоприятными экологическими эффектами.

Поэтому при постановке исследований по рассматриваемой проблеме представлялось необходимым, во-первых, объяснить существование протяженных факелов газовых пузырьков на больших глубинах, и на этой основе оценить возможности образования подобных пузырьковых факелов в Черном море. Во-вторых, следовало, основываясь на сведениях [4, 11] о гидрологических характеристиках и содержании сероводорода в водных массах по трассе трубопровода, оценить возможные потоки сероводорода в верхний слой моря и их воздействие на существующие там экологические системы. Обоснование изложенного подхода к решению проблемы и доказательство практической реальности выноса сероводорода из анаэробных глубин к поверхности моря содержится в опубликованных ранее работах [12–14].



## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЛУБОКОВОДНЫХ ФАКЕЛОВ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ И ЕЕ ВЕРИФИКАЦИЯ

Наблюдавшиеся в Калифорнийском заливе [10] факелы газовых пузырьков возникали на глубинах 1619 и 2028 м и имели вертикальную протяженность до 659 и 974 м соответственно. Для регистрации использовался гидролокатор бокового обзора, буксировавшийся вблизи дна. Исходя из частотных характеристик гидролокатора (23,5 кГц) и из условий резонансного рассеяния звука наполненными метаном пузырьками, были оценены диаметр составляющих факелы пузырьков ( $d_b = 6$  мм) и средняя скорость их всплытия ( $w_b = 12-18$  см/с). Для объяснения необычно длительного (1,5–2 часа) существования пузырьков было высказано предположение о том, что природный газ в пузырьках находится в жидкой фазе, или в виде гидрата.

Известно [15, 16], что при высоком давлении и низкой температуре на границе раздела: вода–газ, молекулы газов встраиваются в квазикристаллическую структуру воды, образуя твердые кристаллы гидратов. В Калифорнийском заливе такие условия для газа метана существуют глубже 420 м. Поэтому на поверхности пузырьков на больших глубинах должна формироваться твердая оболочка из гидрата метана, и обычный пузырек через некоторое время превратится в кристаллическое образование – глобулу с газовым ядром некоторых конечных размеров. Газовые гидраты легче воды, и глобулы будут всплывать до горизонта, где из-за снижения гидростатического давления гидрат метана разрушится и восстановится обычный газовый пузырек, который продолжит всплытие к поверхности. Кинетика процессов формирования, растворения и разрушения гидрата метана в морской среде интенсивно исследуется в последние годы [16, 17], но еще не достаточно изучена ввиду исключительной сложности экспериментальных работ на больших глубинах. Поэтому применительно к рассматриваемой проблеме – вертикальному транспорту метана и сероводорода при утечках или выбросах из донного газопровода – рационально построить и использовать упрощенную модель, в которой основное внимание уделяется не динамике оболочки из гидратов газов, а процессам газообмена через эту оболочку. Принятая модель последовательной трансформации пузырьков в глобулы и обратно в пузырьки показана на рис. 2.

В качестве основы для описания газообмена через образованную гидратом метана оболочку глобулы использована математическая модель всплытия с больших глубин газовых пузырьков, покрытых пленкой поверхностно-активных ве-

ществ, замедляющих растворение пузырьков [8, 18]. В этой модели эффекты, связанные с пленкой ПАВ, были параметризованы одним коэффициентом – поправкой к коэффициенту диффузии газа, который подбирался при верификации модели на экспериментальных результатах. Для глобул, содержащих внутри газовое ядро, вводится аналогичный параметр  $k_{hs}$ , характеризующий интегрально интенсивность диффузии молекул газов и воды через оболочку из гидрата метана и динамику этой оболочки: наращивание и растворение.

Подробное обоснование модели содержится в работах [12–14]. Основными допущениями о влиянии оболочки из гидратов газов на динамику газового пузырька, превращающегося в твердую кристаллическую глобулу с газовым ядром, являются следующие:

- глобула сохраняет форму пузырька, и закономерности сопротивления движению у нее такие же, как и у обыкновенного пузырька;
  - механизм переноса молекул воды и газов через оболочку из гидратов газов одинаков – диффузия, и подобен он переносу этих молекул через пленку ПАВ;
  - содержащиеся в пузырьке газы образуют гидраты пропорционально их молярным долям;
  - газы, связанные в оболочке из гидрата, после ее разрушения остаются внутри восстанавливающегося пузырька.
- В соответствии с принятыми допущениями модель включает следующие уравнения:

$$dz/dt = w; \\ dw/dt = 2g \left[ 1 - \frac{\gamma_h}{\gamma_w} \left( 1 - \frac{r^3}{R^3} \right) - \frac{p_a + \gamma_w(h-z)}{p_a} \cdot \frac{r^3}{R^3} \sum_j \chi_j \frac{\gamma_{aj}}{\gamma_w} \right] - 3\zeta_b w^2 / 4r; \quad (1)$$

- дифференциальное уравнение для радиуса газового ядра внутри кристаллической оболочки:

$$dr/dt = \left[ \frac{\rho g r w}{3 p_a} - \left\{ \frac{r}{3} \cdot \frac{p_a + \rho g(H-z)}{p_a} \cdot \sum_j \gamma_{aj} \frac{d\chi_j}{dt} - 0.462 \sqrt{k_{hs} \frac{w}{r}} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sum_j \left[ \sqrt{D_j} \gamma_{aj} \alpha_{aj} \varepsilon_j \left( \frac{\alpha_{wj}}{\alpha_{aj}} - \chi_j \frac{p_a + \rho g(H-z)}{p_a} \right) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \lambda_j \frac{G_{aj}}{G_{aw}} \sqrt{D_w} \chi_j \varepsilon_w c_w \right] \left( \sum_j \gamma_{aj} \chi_j \right)^{-1} \right] \cdot \left( \frac{p_a + \rho g(H-z)}{p_a} \right)^{-1} \right]; \quad (2)$$

- дифференциальные уравнения для молярных долей  $\chi_j$  газов внутри ядра, включая метан и другие газы, растворенные в воде:

$$d\chi_j/dt = 1.385 \sqrt{k_{hs} \frac{w}{r^3}} \cdot \left[ \sqrt{D_j} \varepsilon_j \alpha_{aj} \left( \frac{\alpha_{wj}}{\alpha_{aj}} - \chi_j \frac{p_a + \rho g(H-z)}{p_a} \right) - \sqrt{D_w} \lambda_j \gamma_w \chi_j \varepsilon_w c_w \right] - \\ - \chi_j \sum_j \left[ \sqrt{D_j} \varepsilon_j \alpha_{aj} \left( \frac{\alpha_{wj}}{\alpha_{aj}} - \chi_j \frac{p_a + \rho g(H-z)}{p_a} \right) - \sqrt{D_w} \lambda_j \gamma_w \chi_j \varepsilon_w c_w \right] \cdot \left( \frac{p_a + \rho g(H-z)}{p_a} \right) \quad (3)$$

- уравнения для коэффициентов  $\varepsilon$ , характеризующих распределение поверхности газового ядра между потоками диффундирующих молекул газов и воды, которые пропорциональны абсолютным величинам этих потоков:

$$\varepsilon_j = \frac{\sqrt{D_j} \rho_{aj} [\alpha_{wj} p_a - (p_a + \rho g(h-z) + 2\sigma/r) \chi_j \alpha_{aj}]}{\sum_j \sqrt{D_j} \rho_{aj} [\alpha_{wj} p_a - (p_a + \rho g(h-z) + 2\sigma/r) \chi_j \alpha_{aj}] + \sqrt{D_w} \rho g p_a}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_w = \frac{\sqrt{D_w} \rho g p_a}{\sum_j \sqrt{D_j} \rho_{aj} [\alpha_{wj} p_a - (p_a + \rho g(h-z) + 2\sigma/r) \chi_j \alpha_{aj}]}; \quad (5)$$

- уравнение для количества воды в оболочке из гидратов газов:

$$\omega_w = 5.78 \delta_h \sqrt{k_{hs} D_w} \int_0^t \sqrt{w r^3} dt. \quad (6)$$

В этих формулах  $D_j$  – коэффициент диффузии  $j$ -газа через поверхность пузырька в чистой воде;  $D_w$  – коэффициент самодиффузии воды;  $G_j$  – грамм-молекулярный вес  $j$ -газа;  $G_w$  – грамм-молекулярный вес воды;  $g$  – ускорение тяжести;  $h$  – глубина моря;  $p_a$  – атмосферное давление;  $r$  – радиус газового ядра;  $t$  – время;  $w$  – скорость всплытия глобулы;  $z$  – вертикальная

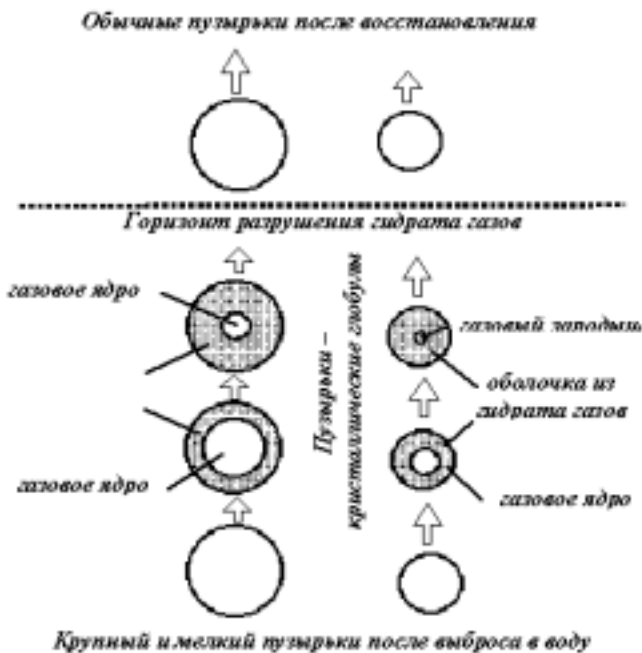


Рис. 2. Схема превращения пузырьков в кристаллические глобулы из гидратов содержащихся в пузырьках газов и восстановления обычных пузырьков из глобул в верхних слоях моря

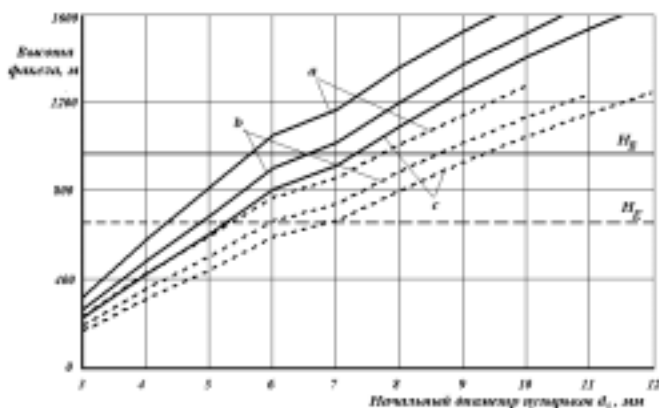


Рис. 3. Сравнение высот пузырьковых факелов В и Е с величинами, определяемыми моделированием при вариации начальных размеров газовых пузырьков  $d_0$  для трёх значений коэффициента замедления диффузии молекул воды и газов оболочкой из гидрата газов  $k_{hs}$

— факел В; --- факел Е.  
 $H_B = 974$  м – высота пузырькового факела В;  $H_E = 659$  м – высота пузырькового факела Е; а – коэффициент  $k_{hs} = 1.0 \cdot 10^{-4}$ ; б –  $k_{hs} = 1.5 \cdot 10^{-4}$ ; с –  $k_{hs} = 2.0 \cdot 10^{-4}$

координата с началом на дне моря;  $\alpha_{sj}$  – насыщающая объемная концентрация  $j$ -газа в морской воде;  $\alpha_{wj}$  – объемная концентрация  $j$ -газа в морской воде;  $\epsilon_j, \epsilon_w$  – относительные доли поверхности газового ядра, через которые происходит диффузия молекул  $j$ -газа и воды;  $\beta_j$  – относительная доля молекул  $j$ -газа в гидрате;  $\rho_{aj}$  – плотность  $j$ -газа при атмосферном давлении;  $\rho_w$  – массовая плотность морской воды;  $\zeta_j$  – коэффициент сопротивления движению глобулы, зависящий от ее размера и формы;  $\omega_w$  – объем связанной воды в оболочке из гидрата.

Математическая модель является замкнутой, т. е. расчеты с ее использованием позволяют проследить изменение всех характеристик движения глобулы: размеры газового ядра и оболочки, содержание газов в ядре, вертикальную координату и скорость всплытия. Для использования модели необходимо определить величину коэффициента  $k_{hs}$ . Это было сделано на основе сопоставления экспериментально найденных характеристик двух пузырьковых факелов, обозначенных В и Е в [10], с результатами моделирования всплытия пузырьков при изменении их начальных размеров и при вариации величины  $k_{hs}$ . В качестве критерия высоты факела при моделировании было принято условие уменьшения радиуса газового ядра в глобуле до 1,0 мм, при котором уровень рассеиваемой газовым ядром акустической энергии уменьшался на 40 дБ, и глобулы становились не заметными для гидролокации. Результаты сопоставления показаны на рис. 3. Эти материалы позволяют заключить, что наибольшее соответствие в высотах факелов для указанных в [10] начальных размеров пузырьков наблюдается при величине коэффициента  $k_{hs}$  в диапазоне от  $1.3 \cdot 10^{-4}$  до  $1.5 \cdot 10^{-4}$ . При этих величинах  $k_{hs}$  наблюдается также хорошее соответствие расчетных и измеренных средних скоростей всплытия глобул.

Результаты верификации модели, показавшие ее адекватность, дают возможность использовать модель для практических оценок. Если исключить из модели уравнения (5) и (6), в остальных уравнениях опустить члены, относящиеся к молекулам воды, и заменить коэффициент  $k_{hs}$  на  $k_f$ , характеризующий замедление диффузии газов пленкой ПАВ, то модель может применяться для обычных пузырьков. Это позволило построить сравнительно простое программное обеспечение для последующего применения в систематических расчетах.

### ОЦЕНКА ПОТОКОВ СЕРОВОДОРОДА ИЗ АНАЭРОБНЫХ ГЛУБИН ЧЕРНОГО МОРЯ, СОЗДАВАЕМЫХ ВСПЛЫВАЮЩИМИ ГАЗОВАМИ ПУЗЫРЬКАМИ

Превращение газовых пузырьков в твердые, медленно всплывающие глобулы из гидрата метана и других газов пре-

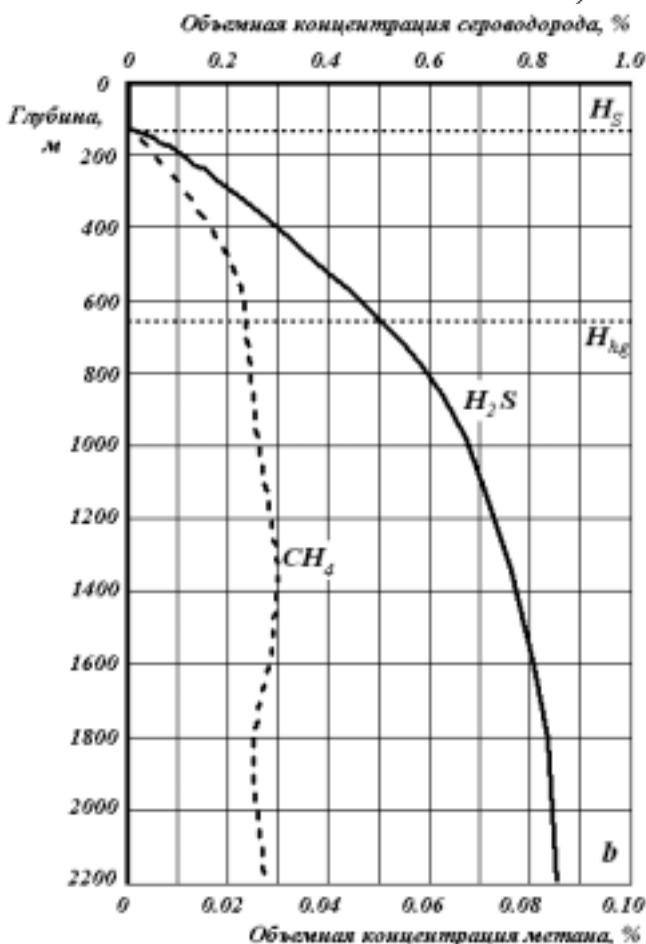
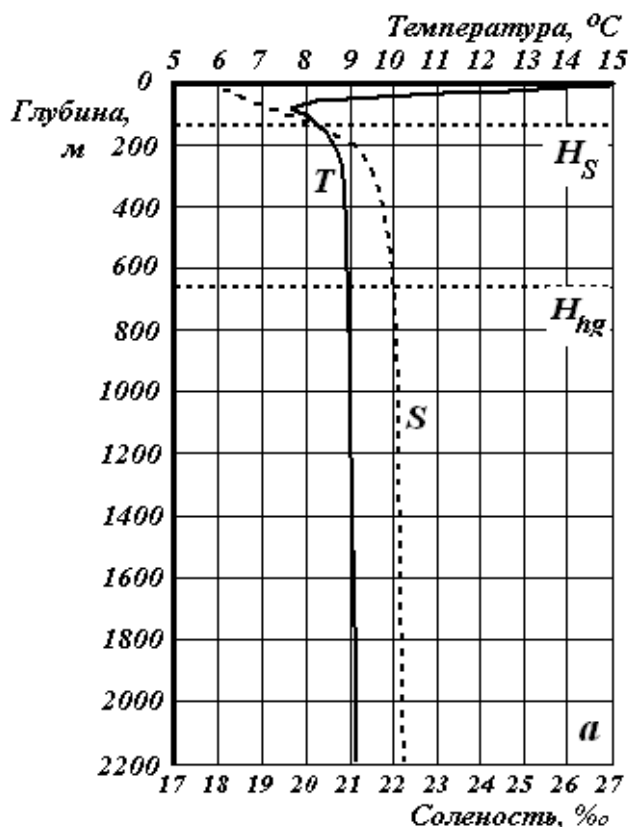


Рис. 4. Вертикальные профили средних значений температуры воды и солёности в Черном море (а) и изменение объемной концентрации сероводорода и метана в зависимости от глубины в северо-восточной части Черного моря (б). Т – профиль температуры; S – профиль солёности;  $H_S$  – объемная концентрация сероводорода;  $CH_4$  – объемная концентрация метана;  $H_E$  – граница анаэробной зоны;  $H_{hg}$  – горизонт разрушения гидрата метана

дотвращает их растворение на больших глубинах и позволяет им всплыть до горизонта, где гидратная оболочка разрушается, и из глобул восстанавливаются обычные пузырьки. В этих пузырьках уже содержится некоторое количество сероводорода, и в последующем всплытии к верхней границе анаэробной зоны, пузырьки должны продолжать накапливать сероводород. Если пузырьки не растворяются до выхода из анаэробной зоны, то накопленный сероводород они вынесут в верхний слой моря, и далее – в атмосферу.

Необходимые для моделирования характеристики морской среды, а именно, распределение по вертикали средней температуры и средней солености в Черном море заимствованы из [19], концентрации в воде сероводорода и метана заимствованы из [11]. Эти материалы показаны на рис. 4. Анализируя их можно заключить, что верхней границей сероводородной зоны является глубина 120 м, максимальное количество растворенного сероводорода существует глубже 1500 м (относительная объемная концентрация  $\alpha_w = 0.008$  Об). Метан регистрируется в воде на глубинах более 100 м, глубже 800 м его содержание меняется мало и  $\alpha_w = 0.000246$ . Содержание азота, который слабо проявляется в гидрохимических процессах, принято средней величиной  $\alpha_w = 0.012$ , заимствованной из [20]. Предполагалось, что весь содержащийся в воде сероводород ведет себя в процессах диффузии через границу пузырька как обычные газы, то есть предполагалось, что химическая связь с молекулами воды находящегося в воде газа не препятствует диффузии молекул сероводорода в пузырьки. При специфической стратификации Черного моря на глубинах более 100 м температура воды возрастает, и горизонт, где должно происходить разрушение гидрата метана, принят расположенным на  $H_{hg} \approx 650$  м. (Для температуры воды в диапазоне:  $8.8 \pm 9.0^\circ\text{C}$  по [15]).

В качестве исходного для последующих экологических оценок следовало определить накопление сероводорода пузырьками различных начальных размеров до их всплытия на горизонт разрушения оболочки из гидрата газов, варьируя начальную глубину и размеры пузырьков.

При выборе диапазона и шага вариации начальной глубины, с которой должно было начинаться всплытие пузырьков, приняты во внимание максимальная глубина расположения газопровода  $H_{gl} = 2150$  м (см. рис. 1) и горизонт разрушения гидрата метана  $H_{hg} = 650$  м. Этот диапазон разделен на четыре поддиапазона, то есть 2150, 1700, 1200 и 700 м. Начальные размеры – радиусы пузырьков варьировались в диапазоне от  $r_0 = 0.25$  до  $r_0 = 20.0$  мм, который охватывает возможный диапазон размеров пузырьков, образующихся при истечении газа в воду под напором из отверстий [21]. В начальный момент пузырьки содержат один газ – метан.

На рис. 5 приведены результаты расчета количества накопившегося в пузырьках сероводорода в виде зависимости мольной доли сероводорода от начальных размеров пузырьков

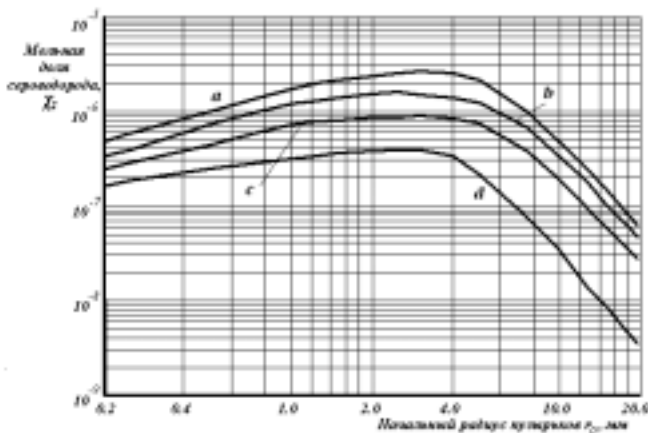


Рис. 5. Накопление сероводорода к моменту пересечения горизонта разрушения гидрата метана  $H_{hg} = 650$  м пузырьками различных начальных размеров  $r_0$  при всплытии с различных глубин  $H_0$ : a – начальная глубина  $H_0 = 2150$  м; b –  $H_0 = 1700$  м; c –  $H_0 = 1200$  м; d –  $H_0 = 700$  м

ков для четырех выбранных начальных глубин. Эти результаты показывают, что образующаяся на пузырьках оболочка из гидрата, снижая на четыре порядка интенсивность потоков газов через границу газовой полости, препятствует растворению пузырьков и, одновременно, затрудняет накопление пузырьками сероводорода. Даже при всплытии с максимальной глубины в пузырьках сохраняется около 90% первоначального количества метана, а количество сероводорода оказывается ничтожно малым: его мольная доля не превышает  $3 \cdot 10^{-6}$ , т. е. сероводород в пузырьках практически отсутствует. Этот результат делает излишним моделирование всплытия газовых пузырьков с глубин ниже горизонта существования гидрата метана  $H_{hg} = 650$  м.

Таким образом, для экологических оценок можно принять, что глубоководная часть газопровода располагается на этом горизонте.

Поэтому моделирование на втором этапе ограничивалось глубинами от  $H = 650$  м до горизонта существования в воде заметных концентраций растворенного сероводорода с шагом 100 м. Диапазон изменения начальных размеров пузырьков сохранялся тем же: от  $r_0 = 0.25$  мм до  $r_0 = 20.0$  мм. Предполагалось, что после разрушения оболочки из гидрата метана на поверхности восстанавливающихся пузырьков формируется пленка ПАВ, уменьшающая интенсивность диффузии газов через поверхность пузырька на один порядок [18].

На рис. 6 представлены результаты расчета количества сероводорода, который, будучи захваченным в анаэробной зоне, затем растворяется в слое воды между верхней границей анаэробной зоны и свободной поверхностью моря. Количество сероводорода определено как доля начального содержания метана в пузырьке и показано в виде зависимости от начальных размеров пузырьков и от глубины, где пузырьки возникают при утечках или разрыве газопровода. Анализ этих результатов показывает, что поток сероводорода зависит в сильной степени от размеров пузырьков и достигает максимальной величины у пузырьков с начальным радиусом от 1 мм до 4 мм при всплытии со всех глубин. Поток сероводорода оказывается зависящим и от начальной глубины: он максимален при всплытии пузырьков с глубин от 350 до 550 м. Наличие выраженных максимумов потока сероводорода в зависимости от размеров пузырьков и начальной глубины связано со скоростью всплытия пузырьков. Именно в этом диапазоне размеров она минимальна [22], поэтому пузырьки дольше находятся в анаэробной зоне и имеют возможность захватить большее количество сероводорода. Соответственно, большее количество сероводорода растворяется в верхнем слое моря. Меньшие пузырьки  $r_0 < 1$  мм полностью растворяются в пределах анаэробного слоя, а крупные пузыри быстро всплывают на поверхность моря, не захватывая значимых количеств сероводорода.

Оцениваемая величина потока сероводорода в верхний слой моря не превышает  $Q_{ul} = 6 \cdot 10^{-6}$  доли первоначального содержания метана в пузырьках, то есть на каждый кубометр вытекающего из газопровода метана появляется всего 6 мл сероводорода, растворяющегося в верхнем дециметровом слое моря. Относительно малую величину потока сероводорода можно объяснить его вступлением в химическую связь с молекулами воды, вследствие чего растворимость сероводорода в воде (предельное количество, способное раствориться) более чем в 100 раз превышает растворимость обычных газов: метана и азота.

На рис. 7 показаны результаты расчета относительного количества сероводорода, выносимого в атмосферу всплывающими на поверхность моря пузырьками. Характер зависимости потока сероводорода в атмосферу от размеров пузырьков подобен наблюдаемому на рис. 6, т. е. имеется отчетливо выраженный максимум потока сероводорода для пузырьков определенного начального размера. Пузырьки с начальным радиусом  $r_0 < 1.5$  мм растворяются, не достигнув поверхности моря. Поток сероводорода в атмосферу возрастает с увеличением начальной

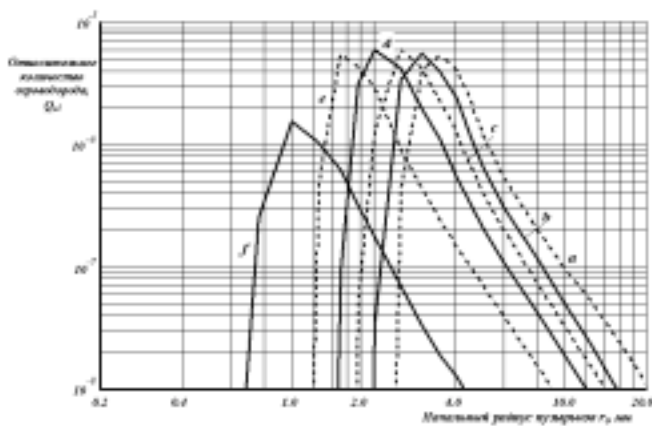


Рис. 6. Относительное количество сероводорода, выносимое всплывающими пузырьками в верхний деятельный слой Чёрного моря, в зависимости от начального радиуса  $r_0$  и глубины выброса в морскую среду  $H_0$  вследствие утечек через свищи или при разрушении газопровода в пределах анаэробной зоны: а – глубина выброса  $H_0 = 650$  м; б –  $H_0 = 550$  м; с –  $H_0 = 450$  м; д –  $H_0 = 350$  м; е –  $H_0 = 250$  м; ф –  $H_0 = 150$  м

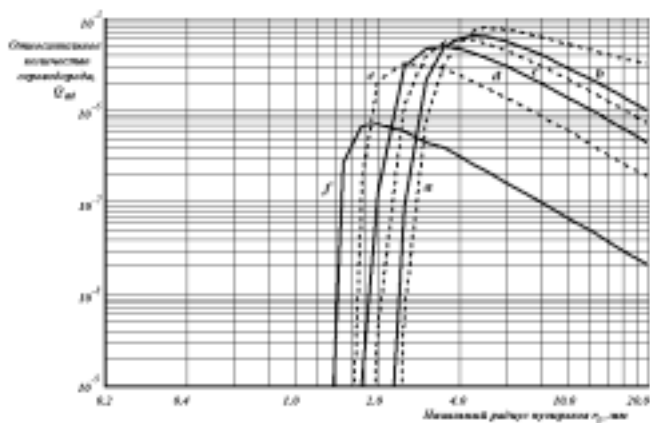


Рис. 7. Относительное количество сероводорода, выносимое всплывающими пузырьками в приводный слой атмосферы Чёрного моря в зависимости от начального радиуса  $r_0$  и глубины выброса в морскую среду  $H_0$  вследствие утечек через свищи или при разрушении газопровода в пределах анаэробной зоны: а – глубина выброса  $H_0 = 650$  м; б –  $H_0 = 550$  м; с –  $H_0 = 450$  м; д –  $H_0 = 350$  м; е –  $H_0 = 250$  м; ф –  $H_0 = 150$  м

глубины всплытия пузырьков, и при всплытии с горизонта  $H_{hg} = 600$  м достигает  $Q_{at} = 9 \cdot 10^{-6}$  доли первоначального содержания метана в пузырьках, то есть на каждый кубометр вытекающего из газопровода метана приходится 9 мл сероводорода, выносимого в атмосферу.

### АНАЛИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ДЛЯ ЧЕРНОГО МОРЯ УТЕЧЕК И ВЫБРОСОВ ГАЗА ИЗ ДОННОГО ГАЗОПРОВОДА «ГОЛУБОЙ ПОТОК»

Схема прокладки газопровода «Голубой поток», изменение глубины моря по его трассе и среднее положение границы сероводородной зоны показаны на рис. 1. Некоторые из основных характеристик газопровода, представляющие интерес для экологических оценок, следующие:

- протяженность газопровода в анаэробной, насыщенной сероводородом зоне – 360 км;
- протяженность газопровода в зоне глубин, где образуются гидраты газов – 315 км;
- поток газа по каждой из ветвей –  $125 \text{ м}^3/\text{с}$  (приведено к атмосферному давлению).

Приведенные выше результаты расчета показали, что потоки сероводорода сравнительно не велики. Это связано прежде всего с тем, что в том диапазоне глубин, где концентрация сероводорода наиболее велика, всплывающие пузырьки не способны его захватить, так как на этих глубинах они представляют собой

кристаллические глобулы. В то же время в верхнем 500 м слое воды, где сероводород диффундирует во всплывающие пузырьки, его концентрация быстро уменьшается (см. рис. 3,б). Учитывая относительно малую величину потока сероводорода, можно заключить, что утечки газа через коррозионные свищи не представляют опасности для экосистем в верхнем аэробном слое Черного моря. В то же время, образовавшиеся при утечках пузырьки (в форме глобул или в виде обычных пузырьков) образуют протяженные факелы, способные достичь поверхности моря. И этот феномен может быть использован для обнаружения свищей с помощью гидрооптических или гидроакустических средств.

Внимания заслуживают потоки сероводорода, которые могут появиться при разрушении газопровода. Если это случится далеко от берега, то аварию возможно обнаружить только по прекращению поступления газа на выходе из газопровода или по резкому падению давления на входе в него и после этого прекратить прокачку газа. В результате в морскую среду попадет газ, заполнявший трубопровод к моменту аварии, а также поданный в трубопровод газ до получения аварийного сигнала и до перекрытия прокачки. Материалы моделирования работы газопровода в этом режиме [23] показали, что при полном разрушении газопровода на глубинах более 200 м, откуда вынос сероводорода всплывающими пузырьками оказывается наиболее существенным, максимальный выброс метана может составлять от 536 т на участке до 200-го км - до 3500 тонн на участке от 200-го до 320-го км от российского берега. Процесс выхода газа из трубопровода займет около четырех часов. Следовательно, ориентируясь на максимальный выброс 3500 т метана, можно прогнозировать, что в верхний слой Черного моря будет вынесено всего около 21 кг сероводорода и в атмосферу – 32 кг.

Упрощая задачу и оценивая экологические эффекты «сверху», можно не рассматривать процесс диффузионного распространения сероводорода в верхнем слое моря, а вместо этого оценить размеры области, где при равномерном распределении сероводорода его концентрация окажется равной предельно допустимой (ПДК) и летальной для рыб. Принятая ПДК сероводорода в воде – 0,002 мг/л, рыбы же гибнут через 24 часа при концентрации сероводорода 1 мг/л [24]. Ориентируясь на эти величины, можно заключить, что максимальный диаметр области морской среды в верхнем аэробном слое моря (120 м), где ПДК сероводорода может быть превышена, составит всего 350 м, а диаметр области, где через сутки погибнут рыбы, не превысит 15 м. Можно ожидать, что за указанное время рыбы и дельфины смогут, почувствовав сероводород, покинуть загрязненный район без значительного ущерба для себя. Таким образом, для верхнего деятельного слоя Черного моря и существующих в нем экосистем вынос сероводорода всплывающими пузырьками, образовавшимися при утечках или разрушении газопровода, не будет представлять реальной опасности.

Аналогичный анализ проведен для приводного слоя атмосферы. В этом случае можно ожидать, что в течение четырех часов в атмосферу будет выноситься всплывающими пузырьками сероводород в количестве около 3 г/с. Сероводород будет интенсивно рассеиваться в атмосфере ветром и поглощаться поверхностью воды. Для оценки протяженности области – факела, где концентрация сероводорода превысит ПДК в воздухе –  $8 \cdot 10^{-6}$  мг/л [24], можно использовать известные методы прогнозирования загрязнения атмосферы [25]. Расчеты показывают, что при скорости ветра 7 м/с протяженность факела может достичь 15–20 км. То есть на расстоянии до 20 км от места разрыва трубопровода можно будет ощущать запах сероводорода. Однако эта область находится на расстоянии более 60 км от турецкого берега, и вероятность того, что запах сероводорода будет ощущаться на берегу Турции мала. С Российской стороны выброс метана при разрыве газопровода будет, примерно, в шесть раз меньше, как указано выше. Соответственно, протяженность факела с ощутимым запахом сероводорода будет также в шесть раз меньше. Область глубин моря, откуда возможен максимальный вынос сероводорода, находится на удалении около 10 км от российского побережья,

поэтому вероятность появления ощутимых концентраций сероводорода на побережье маловероятна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Черное море – географический объект, экологическое состояние которого продолжает ухудшаться. Логика экономического развития и технического прогресса привела к сооружению уникального по многим параметрам трансморского газопровода «Голубой поток». Естественные опасения экологической катастрофы в случае аварии газопровода потребовали развития нетрадиционного подхода к экологическому прогнозу, который должен был выявить ранее не рассматривавшиеся механизмы выноса насыщающего глубинные воды моря ядовитого газа сероводорода в верхний деятельный слой моря и в атмосферу.

Как показывает имитационное моделирование, в случае появления коррозионных свищей или при разрушении газопровода «Голубой поток»:

- потоки сероводорода из анаэробной зоны глубин Черного моря в верхний деятельный слой моря и в атмосферу могут достигать соответственно около 6 мл на 1 м<sup>3</sup> и около 9 мл на 1 м<sup>3</sup> выброшенного в море природного газа метана;
- пространственные масштабы областей, где концентрация сероводорода может превысить ПДК, составят около 350 м в водной среде и до 20 км в атмосфере.

Анализ экологических последствий показал, что утечки газа и даже разрушение газопровода «Голубой поток» не приведут к выносу из глубинных анаэробных водных масс к поверхности моря всплывающими пузырьками таких объемов ядовитого газа сероводорода, которые будут опасны для экосистем Черного моря, включая рыб и дельфинов. Неблагоприятные последствия выноса сероводорода в атмосферу будут иметь локальный характер и не нанесут ощутимого вреда побережью Черного моря.

Созданная модель и методология оценки воздействия на окружающую среду пригодны для морских донных газопроводов, проложенных или проектируемых для различных морей, причем в качестве потенциально опасного для экосистем может рассматриваться как сероводород, что наиболее актуально для Черного моря, так и метан, токсическое действие которого может быть существенно при растворении в относительно небольших объемах водных масс, т. е. в мелководных морях.

These investigations are supported by The Program on Global Security and Sustainability's Research and Writing Initiative of the John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, Grant № 00-62720-00ER.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Айбулатов Н.А., Фридрих Е.В. Влияние морского газопровода на экосистему Черного моря. – Мат-лы Международ. науч.-практ. конфер. «Сотрудничество между странами Черноморского региона как важный фактор экологически приемлемого энергоснабжения», Сочи, Россия, апрель 1999, с. 112 – 134.
2. Максимов В.М., Лымар Е.Ф. Количественная оценка последствий гипотетического разрыва подводного газопровода в акватории Черного моря. - Мат-лы Международ. науч.-практ. конфер. «Сотрудничество между странами Черноморского региона как важный фактор экологически приемлемого энергоснабжения», Сочи, Россия, апрель 1999, с. 154 – 158.
3. Осват И., Самш М., Карвальо Ф.П., Вильнев Ж.П. Море переменчивой судьбы. Поддержка устойчивого развития в районе Черного моря//Бюлл. МАГАТЭ. – 1998. – Т. 40. – № 3. – С. 31 – 36.
4. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М., Косьян Р.Д., Скурта А.Ю. Влияние циркуляции вод и вихревых образований на глубинное положение верхней границы сероводородной зоны Черного моря//Океанология. – 2000. – Т. 40. – № 6. – С. 816 – 825.
5. Мазур И.И. Экология строительства объектов нефтяной и газовой промышленности. - М.: Недра. 1991. 280 с.
6. Мансуров М.Н., Сурков Г.А., Журавель В.И., Маричев А.В.

- Ликвидация аварийных разливов нефти в ледовых морях. – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2004. – 422 с.
7. Гончаров В.К., Иванов И.В. Методы оценки воздействия на окружающую среду эксплуатации морских магистральных трубопроводов. – Сб. докл. 6-й Международн. конфер. и выставки по морским интеллектуальным технологиям «Моринтех-2005», СПб., Россия, сентябрь 2005, с. 427 – 430.
8. Гончаров В.К., Клементьева Н.Ю. Моделирование динамики и условий звукорассеяния газовых пузырьков, всплывающих с больших глубин в море в районах нефтегазовых месторождений//Акустический журнал. – 1996. – Т. 42. – № 3. – С. 371 – 377.
9. Thorp S.A. The effect of Langmuir circulation on the distribution of submerged bubbles caused by breaking wind waves//J. of Fluid Mechanics. – 1984. – Vol. 142. – P. 151 – 170.
10. Merewether R., Olsson M.S. Acoustically Detected Hydrocarbon Plumes Rising from 2-km Depths in Guaymes Basin, Gulf of California//J. of Geophysical Research. – 1985. – Vol. 90. – № B4. – P. 3075–3085.
11. Розанов А.Г., Демидова Т.П., Егоров А.В., Лукашов Ю.Ф., Степанов Н.М., Часовников В.К., Якушев Е.В. Гидрохимическая структура Черного моря на стандартном разрезе от Геленджика к центру моря (ноябрь 1997 г.)//Океанология. – 2000. – Т. 40. – № 1. – С. 30 – 36.
12. Goncharov V.K. Dynamics of Gas Bubbles at High Pressure in Application to a Problem of Remote Detection of Gas Leaks From Marine Pipelines. - Proceedings of the Seventh International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, CD-ROM. Miami, Florida, USA. 20 - 22 May 2002.
13. Goncharov V.K. Modelling of evolution of the bubble plumes arising under leaks of natural gas from deep-water pipeline. - Proceeding of the Twenty-fifth Arctic and Marine Oil Spill Program (AMOP). Technical Seminar. Calgary, Alberta, Canada, June 2002, Vol. I, p. 45 – 56.
14. Jing Wang, Goncharov Vadim K., Klementieva Natalia Yu., Zhijun Li. Study of the dynamics of gas bubbles in the abyssal plumes in the water areas of oil and gas fields//China Offshore Platform. – 2005. – No 5. – P. 1 – 5.
15. Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. - М.: Недра, 1985. – 428 с.
16. Beaucamp B. Natural gas hydrates: myths, facts and issues//Comptes Rendus Geoscience. – 2004. – Vol. –336. – P. 751 – 765.
17. Zhang Youxue, Xu Zhwenjiu. Kinetic of convective crystal dissolution and melting, with application to methane hydrate dissolution and dissociation in seawater//Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Vol. 213. – P. 133 – 148.
18. Гончаров В.К., Клементьева Н.Ю. Исследование влияния пленки поверхностно-активных веществ на растворение движущегося в морской воде пузырька//Изв. АН. – Сер.: Физика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 31. – № 5. – С. 705 – 712.
19. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. – Т. IV: Черное море. – Вып. 1: Гидрометеорологические условия. – СПб.: Гидрометеоиздат. 1991. – 430 с.
20. Хорн Р. Морская химия. – М.: Мир. 1972. – 310 с.
21. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия. 1978. – 296 с.
22. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. – Новосибирск: Изд-во Наука, СО, 1982. – Изд-во 280 с.
23. Зубов В.И., Котеров В.Н., Кривцов В.М., Шитилин А.В. Не-стационарные газодинамические процессы в газопроводе на подводном переходе через Черное море//Математическое моделирование. – 2001. – Т. 13. – № 4. – С. 58 – 70.
24. Вредные химические вещества. Справочник. - Л.: Химия, 1989. – 468 с.
25. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат. 1975. – 448 с.
26. Fleischman R. J-Lay reaches 2,150 m in Black Sea//Offshore. – 2002. – P. 86. ■

**В**ыбор безопасного места якорной стоянки – одна из важных задач судовождения, которая должна решаться с учетом турбулентных потоков и ветровых условий.

Турбулентная область ограничена с какой-нибудь стороны поверхностью обтекаемого жидкостью тела. Линия, ограничивающая эту часть поверхности тела, называется *линией отрыва*. Она отделяет поверхность раздела между областью турбулентности и остальным объемом жидкости. Само образование турбулентной области при обтекании тела называется *явлением отрыва*.

Форма турбулентной области определяется свойствами движения в основном объеме жидкости (т.е. не в непосредственной близости от поверхности тела). Действительное положение линии отрыва определяется свойствами движения в непосредственной близости от поверхности тела (в так называемом пограничном слое), где существенную роль играет вязкость жидкости.

Говоря о свободной границе турбулентной области, подразумевают, естественно, ее усредненное по времени положение. Мгновенное же положение границы представляет собой очень нерегулярную поверхность; эти нерегулярные искажения и их изменение со временем связаны в основном с крупномасштабными пульсациями и, соответственно, простираются в глубину на расстояния, сравнимые с основным масштабом турбулентности. Нерегулярное движение граничной поверхности приводит к тому, что фиксированная в пространстве точка потока (не слишком удаленная от среднего положения поверхности) будет оказываться попеременно по ту или другую сторону границы. При наблюдении картины движения в этой точке будут обнаруживаться попеременные периоды наличия или отсутствия мелкомасштабной турбулентности (об этом свойстве говорят как о *перемежаемости турбулентности*; его надо отличать от аналогичного свойства структуры движения в глубине турбулентной области, которые тоже называются перемежаемостью).

Форма, а также некоторые другие основные свойства турбулентных областей в ряде случаев могут быть установлены уже с помощью простых соображений подобия. К ним относятся прежде всего различного рода свободные турбулентные струи, распространяющиеся в заполненном жидкостью же пространстве.

В качестве первого примера рассмотрим турбулентную область, возникающую при отрыве потока с края угла, образованного двумя пересекающимися плоскостями (рис.1 и 2; на

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА ЯКОРНОЙ СТОЯНКИ СУДНА С УЧЕТОМ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ И ПОПЕРЕЧНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВЕТРОВОГО ПОЛЯ

*В.Е. Новиков, канд. техн. наук, ст. помощник капитана*

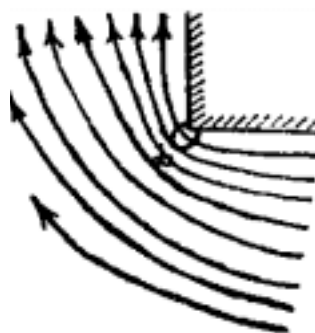


Рис.1

рис.1 изображен их поперечный разрез). При ламинарном обтекании (см. рис.1) поток жидкости, идущей вдоль одной из сторон угла, плавно поворачивался бы, переходя в поток, идущий вдоль второй плоскости в направлении от края угла.

При турбулентном обтекании картина движения оказывается совершенно иной. Поток жидкости, идущий вдоль одной из сторон угла, не поворачивается, дойдя до края угла, а продолжает распространяться в прежнем направлении. Вдоль другой стороны возникает поток жидкости, подтекающей в направлении к краю угла (от *В* к *О*). Смешивание обоих потоков происходит в турбулентной области (вне турбулентной области имеет место безвихревое турбулентное движение, постепенно переходящее в ламинарное по мере удаления от границ этой области; границы сечения этой области указаны на рис.2 штриховой линией). Образование такой области можно описать следующим образом. Представим себе такое течение жидкости, при котором равномерный по-

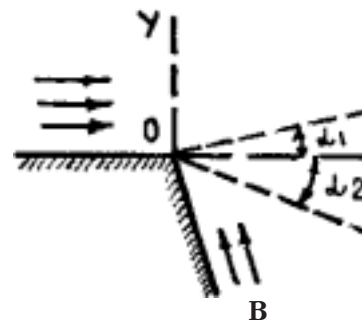


Рис.2

ток продолжал бы течь в том же направлении, заполняя все пространство сверху от основной плоскости и ее продолжения направо в глубь жидкости, а в пространстве под этой плоскостью жидкость вообще неподвижна. Другими словами, имелась бы при этом поверхность разрыва между жидкостью, текущей с постоянной скоростью, и жидкостью неподвижной. Но такая поверхность разрыва является неустойчивой и не может реально существовать. Эта неустойчивость приводит к ее «разбалтыванию» и образованию области турбулентного движения. Подтекающий от *В* к *О* поток возникает при этом в результате того, что в область турбулентности должно происходить втекание жидкости извне.

Определим форму области турбулентного движения. Ось *x* направлена вдоль основной плоскости от точки *О*, являющейся началом координат. Пусть *Y1* и *Y2* – расстояния от плоскости *xz* до верхней и нижней границ турбулентной области; необходимо определить зависимость *Y1* и *Y2* от *x*. Эту зависи-

мость легко установить непосредственно из соображений подобия.

Поскольку все размеры плоскостей бесконечны, то в нашем распоряжении нет никаких характерных для рассматриваемого движения постоянных параметров с размерностью длины. Отсюда следует, что единственно возможной зависимостью величин  $Y_1$ ,  $Y_2$  от расстояния  $x$  является их прямая пропорциональность:

$$Y_1 = \operatorname{tg}\alpha_1 \cdot x, \quad Y_2 = \operatorname{tg}\alpha_2 \cdot x. \quad (1)$$

Коэффициенты пропорциональности являются просто численными постоянными; запишем их в виде  $\operatorname{tg}\alpha_1$ ,  $\operatorname{tg}\alpha_2$ , так что  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы наклона обеих границ турбулентной области к оси  $x$ .

Таким образом, область турбулентного движения ограничена двумя плоскостями, пересекающимися вдоль линии края обтекаемого угла.

Значения углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  зависят только от величины обтекаемого угла и не зависят, например, от скорости набегающего потока жидкости. Они не могут быть вычислены теоретически; из экспериментальных данных следует, например, что при обтекании прямого угла  $\alpha_1 = 5^\circ$ ,  $\alpha_2 = 10^\circ$  (здесь и ниже имеются ввиду экспериментальные данные о распространении скоростей в поперечном сечении турбулентной струи, обработанные с помощью расчетов по полуэмпирическим теориям турбулентности).

Скорости потоков жидкости с обеих сторон угла неодинаковы; их отношение является определенным числом, зависящим опять-таки только от величины угла. При не слишком малых углах одна из скоростей оказывается значительно больше другой, а именно, большей является скорость «основного» потока, в направлении которого расположена турбулентная область (вдоль основной плоскости). Так, при обтекании прямого угла скорость потока вдоль основной плоскости в 30 раз больше скорости потока от  $B$  к  $O$ .

Отметим еще, что разность давлений жидкости по обе стороны турбулентной области очень мала. Так, при обтекании прямого угла

$$p_1 - p_2 = 0,003\rho U_1^2,$$

где  $U_1$  – скорость набегающего потока (вдоль основной плоскости),  $p_1$  – давление в верхнем (вдоль основной плоскости), а  $p_2$  – в нижнем (вдоль  $BO$ ) потоках жидкости.

В предельном случае, когда обтекаемый угол равен нулю, мы имеем дело просто с краем пластинки, вдоль обеих сторон которой течет жидкость. Угол раствора  $\alpha_1 + \alpha_2$  турбулентной области при этом тоже обращается в

нуль, т.е. турбулентная область исчезает; скорости потоков по обеим сторонам пластинки становятся одинаковыми. При увеличении угла между основной плоскостью и плоскостью  $BO$  наступает момент, когда плоскость  $BO$  касается нижней границы турбулентной области; угол между вышеуказанными плоскостями становится тупым. При дальнейшем увеличении угла между плоскостями область турбулентности будет оставаться ограниченной с одной стороны поверхностью твердой стенки. По существу, происходит явление отрыва (линией отрыва – вдоль края угла). Угол раствора турбулентной области остается все время конечным.

Из вышесказанного следует, что при выборе якорной стоянки необходимо учитывать, что положение судна на якоре может не соответствовать направлению основного потока течения, направленного вдоль побережья, а быть результирующим набегающего потока на мыс и потока, возникающего под действием подпора давления, направленным под углом к основному потоку.

К тому же, следует учитывать, что если у уреза воды расположены высокие горы, то возможно внезапное возникновение «сбегающих» шквалов, способных сорвать судно с якоря и привести к навигационной аварии (одно из наиболее известных подобных мест – Цемесская бухта, порт Новороссийск).

Есть еще одно обстоятельство, на которое нельзя не обращать внимания. Это поперечная неравномерность ветра над морем, вызывающая возникновение противотечений.

Учет ограниченности океанов по внешнему контуру вместе с динамическим эффектом поперечной неравномер-

ности (завихренности) ветра с широтным изменением параметра Кориолиса позволили правильно истолковать главные особенности горизонтальной циркуляции океанов: экваториальные, межпассатные противотечения, интенсификацию течений у западных берегов океанов, ярко выраженную такими быстрыми течениями, как Гольфстрим и Куросио и, наконец, глубинное экваториальное противотечение Кромвела. Учет нелинейных эффектов и горизонтального «бокового» трения позволил также объяснить многие детали горизонтальной океанической циркуляции. Однако океаны ограничены не только извне – контурами материков, но и изнутри – островами, так что контур береговой черты океанов представляет не односвязную, а многосвязную область.

Для дальнейших подтверждений предположения о характере динамического эффекта поперечной неравномерности ветра на циркуляцию в многосвязной области океана рассмотрим своеобразную циркуляцию вокруг Исландии, с поразительным постоянством наблюдаемую в течение всего года.

Как видно из рис.3, на котором изображена, согласно Брауну, схема циркуляции в Норвежском море, течение, огибающее Исландию по часовой стрелке (течение Ирмингера), направлено противоположно главным течениям этой области Атлантики – Восточно-Гренландскому и Норвежскому. Логично предположить, что многосвязность океанических областей (т.е. наличие островов) вместе с эффектом поперечной неравномерности ветра может служить причиной противоположных, аномальных, циркуляций около островов аналогично тому, как в замкнутой односвязной области тот же эффект поперечной неравномер-

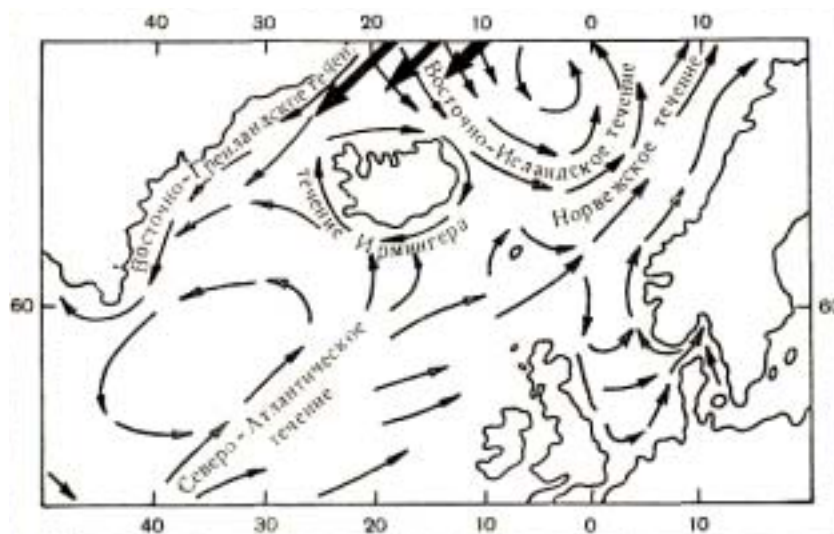


Рис.3. Схема циркуляции около о. Исландия

Тонкие стрелки – направление течения, черные жирные стрелки – относительные скорости и направление ветра

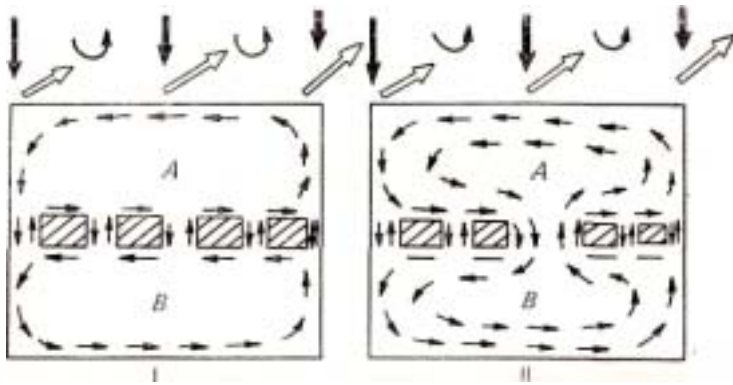


Рис.4. Схемы циркуляции, возбуждаемой цепью островов

Тонкие стрелки – направление течения. Черные жирные и светлые стрелки – относительные скорости и направление ветра. Искривленными стрелками в поле ветра указано направление вращения (завихренность) в ветровом потоке

ности ветра является причиной известных противотечений.

Действительно, циркуляция вблизи океанических островов в некоторых случаях обладает удивитель-

ной особенностью: ее направление противоположно общей циркуляции в области океана, включающей остров. В большинстве случаев такая аномальная – противоположная –

циркуляция вдоль острова носит в северном полушарии антициклонический характер, т.е. направлена по часовой стрелке.

Наконец, без труда можно наметить общие черты горизонтальной циркуляции, возбуждаемой циклонической поперечной неравномерностью ветра в некоторой замкнутой области (рис.4). Видно, что эти схемы характеризуются вытянутостью линий тока вдоль цепи островов и антициклонической циркуляции вокруг каждого острова. Очевидно, чем ближе острова расположены друг к другу (цепь островов), тем больше вероятность противоположной (антициклонической) циркуляции вокруг каждого из них; при наличии широких проливов между некоторыми островами будет иметь место и интенсивный водообмен (между частями А и В основной области – см. схему «б» на рис.4).

Таким образом, при выборе не только оптимальной якорной стоянки, но и при переходе судна необходимо учитывать вышеизложенные факты. ■

В настоящее время в основу проектирования линейных навигационных створов (ЛНС) положены методы создания навигационных запасов (НЗ). Навигационный запас – расстояние между положением визирной окружности в конечной точке пользования створом и опасностью (бловкой канала, кромкой фарватера). На рис.1 схематически показана величина НЗ, равная разности  $(B - P_K)$ , где  $B$  – полуширина канала (фарватера);  $P_K$  – боковое уклонение в конечной точке пользования створом.

В России применяются два метода. Первый метод – для морских путей [1] – с использованием допустимого бокового уклонения  $P_{доп}$ , которое

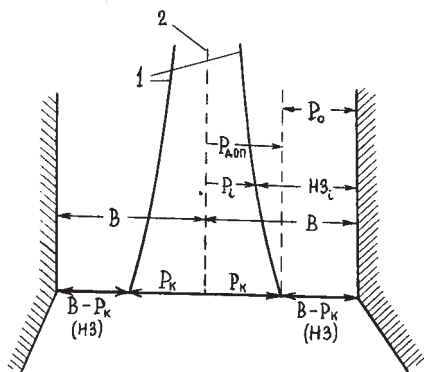


Рис.1. Схема линейного навигационного створа

1 – визирные окружности; 2 – ось створа

## НАВИГАЦИОННЫЕ ЗАПАСЫ ЛИНЕЙНЫХ СТВОРОВ

Н.И. Родичкин, капитан 1 ранга в отставке, канд. военно-морских наук, проф.

вычисляют при ширине канала (фарватера)  $2B \leq 200$  м как

$$P_{доп} = B - 2q, \quad (1)$$

при ширине  $2B \geq 200$  м по формуле

$$P_{2доп} = KB, \quad (2)$$

где  $2q$  – ширина самого широкого судна, использующего створ;  $K$  – коэффициент, зависящий от ширины фарватера [1].

До 2001 г. использовалась формула  $P_{3доп} = B - q$ .

Следовательно, действуют створы, спроектированные на ее основе.

При использовании этих формул НЗ считается не от положения визирной окружности  $P_K$ , а от  $P_{доп}$ . (Ниже будет доказано, каким бы способом ни было получено  $P_{доп}$ , оно всегда будет равно  $P_K$ ).

Из приведенных формул для  $P_{доп}$  выведем выражения для расчета НЗ:

$$\begin{aligned} \text{НЗ}_1 &= B - P_{1доп} = 2q; \\ \text{НЗ}_2 &= B - P_{2доп} = B(1 - K); \\ \text{НЗ}_3 &= B - P_{3доп} = q. \end{aligned}$$

Видно, что при одном и том же значении  $B$ , равном, например, 100 м, навигационные запасы будут иметь разные значения для одного и того же створа, что вносит неопределенность. Кроме того, навигационные запасы в виде  $q$ ,  $2q$ ,  $B(1 - K)$  не говорят о достаточности их или избыточности. По ним можно только судить о том, что один НЗ больше или меньше другого.

Строгого обоснования формул (1) и (2) нет. Вследствие малости НЗ, получаемого по формуле (1), каналы (фарватеры), оборудованные створами, дополнительно ограждаются еще плавающими предостерегательными знаками.



Второй метод – для внутренних водных путей – с использованием величины опасного уклонения  $P_{оп}$  судна от положения визирной окружности в конечной точке использования створом до опасности:  $P_{оп} = НЗ$ , где  $P_{оп}$  определяется по довольно сложной формуле, учитывающей маневренные элементы судов, т.е. является величиной, математически достаточно обоснованной [2, 8]. По данному методу определяется также допустимое боковое уклонение  $P_{доп} = B - P_{оп}$ .

Величину  $P_{доп}$  в обоих методах используют для вычисления муждустворного расстояния  $d$  (в километрах) по известной формуле

$$d = \frac{D_k^2}{\frac{3,44}{\varepsilon_k} P_{доп} - D_k}, \quad (3)$$

где  $D_k$  – дальность действия створа, км;  $\varepsilon_k$  – горизонтальный критический угол, угл. мин;  $P_{доп}$ , м.

Величина  $d$  и определяет безопасность плавания, обеспечиваемую НЗ, который в применяемых методах имеет постоянное значение по всей длине ходовой части створа, а это не соответствует действительности. При проектировании створа навигационный запас определяется величиной  $(B - P_k)$ , а в любой точке на ходовой части –  $(B - P_i)$ .

Таким образом, применяемые методы не позволяют определить величину безопасности плавания в различных точках ходовой части створа, в чем также может возникнуть необходимость [7]. Приведем и другие соображения в пользу вычисления  $P_k$ .

Величина навигационной безопасности, определяемая НЗ, характеризует безопасность плавания лишь на качественном уровне. Фактически можно только говорить, что обеспечиваемая безопасность плавания больше у одного створа и (или) меньше у другого. Иными словами, применяемые методы проектирования створов предлагают не лучшие критерии оценки безопасности плавания по створу.

Нормативные документы предписывают контроль правильности расчета створов определять условием

$$P_{доп} \geq P_k. \quad (4)$$

Докажем, что соотношение (4) некорректно. Напишем известную формулу [1]

$$P_k = 0,29\varepsilon_k D_k \left( \frac{D_k}{d} + 1 \right). \quad (5)$$

Преобразуем формулу (3), найдя из нее  $P_{доп}$ . Тогда новая формула будет иметь вид

$$P_{доп} = 0,29\varepsilon_k D_k \left( \frac{D_k}{d} + 1 \right). \quad (6)$$

Из сравнения формул (5) и (6) следует, что

$$P_{доп} = P_k. \quad (7)$$

Таким образом, независимо от того, каким способом получено  $P_{доп}$  – с применением  $q, 2q, P_{оп}$  и т.д., боковое уклонение  $P_k$  в конечной точке использования створом всегда равно  $P_{доп}$ .

Изложенное выше свидетельствует, что применение при проектировании ЛНС величины  $P_k$  вместо  $P_{доп}$  предпочтительнее:  $P_k$  – более универсальная величина, позволяющая переходить к  $P_i$  и определять безопасность плавания по всей ходовой части створа, а не только в конце ее. (Далее увидим, что применение  $P_k$  позволяет предложить новый метод проектирования ЛНС (и НЗ), обладающий рядом достоинств).

Исторически безопасность плавания определялась:

- расстоянием до видимой опасности (скалы, берега);
- средней квадратической погрешностью (СКП) определения места, что стало возможным благодаря появлению карт, развитию способов и оценки точности определения места судна. Допустимая величина СКП определялась условиями плавания. Этот критерий применялся при проектировании средств навигационного оборудования (СНО) до 2001 г. В отношении него документ [3] пишет: «Установление точности без определения уровня вероятности ведет к недоразумениям». То же самое положение подтверждено и в третьем издании этого Руководства (1998 г.);
- вероятностью навигационной безопасности плавания (НБП). Этот критерий стал использоваться при проектировании СНО, обеспечивающих заданную вероятность НБП, с 2001 г. [1].

Третий критерий – самый совершенный. Он включает в себя и расстояние – НЗ, и СКП, а оценка осуществляется не на качественном, а на количественном уровне, определяющем именно безопасность; критерий является математически обоснованным. Но его стали использовать для проектирования всех СНО, кроме створов. При расчете створов, как было сказано выше, применяется самый «древний» критерий – расстояние до опасности. Возникает задача – разработать математический аппарат для проектирования ЛНС, обеспечивающий любую задаваемую вероятность НБП. Это возможно, если НЗ будет получен иным способом, отличным от используемых в настоящее время.

В статье [4] предложена формула, называемая законом ЛНС:

$$B = P_k + kM_{P_k}, \quad (8)$$

где  $k$  – нормированный множитель интеграла вероятностей (нормированная случайная величина);  $M_{P_k}$  – СКП бокового уклонения  $P_k$  в конечной точке пользования створом, м,

$$M_{P_k} = \left( \frac{0,29D_k^2}{d} + 0,29D_k \right) m_{\varepsilon_k}, \quad (9)$$

$m_{\varepsilon_k} = 0,31'$ , получена на основе статистических испытаний, угл. мин;  $D_k, d$  – в км;  $B$  и  $P_k$  – указанные выше величины, м.

Формула (8) выведена, исходя из гипотезы: горизонтальный критический угол  $\varepsilon_k$  и боковое уклонение створа подчиняются закону нормального распределения, и двух аксиом: обеспечиваемая створом вероятность НБП  $P_{ств} = 0$ , если  $P_k \geq B$  (условие аварийной ситуации, НЗ = 0);  $P_{ств} = 1,0$  внутри створной зоны, где безопасность плавания обеспечена безусловно.

«Створ», не соответствующий этим аксиомам, не может называться створом, обеспечивающим безопасность плавания.

Гипотеза была неоднократно подтверждена экспериментами, проведенными разными исполнителями, в том числе и автором. В одной из своих статей д-р физ.-матем. наук И.Г. Воронцов пишет: «Система устойчива, если основана на аксиоматике». То есть система, определяемая уравнением (8), устойчива, и неслучайно она названа законом. Этот закон уже показал свою универсальность [5, 6, 7, 8], так как позволил:

- определять вероятность НБП, обеспечиваемую действующими ЛНС;
- оптимизировать СНО в зонах стесненного плавания;
- анализировать существующие методы проектирования ЛНС.

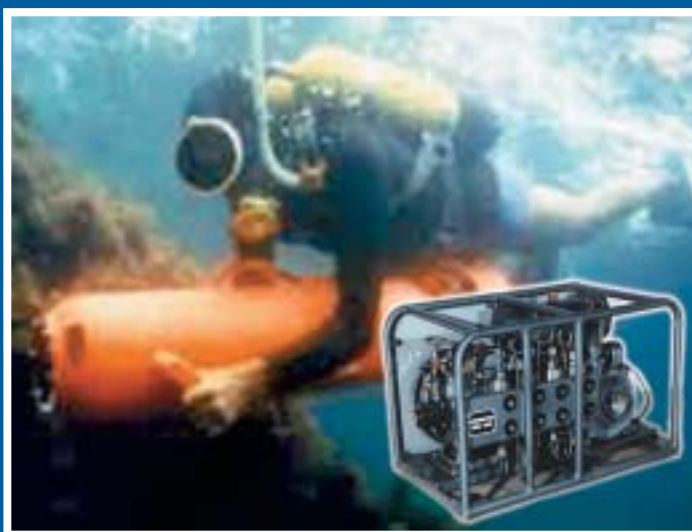
Формула закона ЛНС может быть применена и для определения его элементов, в частности НЗ, обеспечивающего задаваемую вероятность НБП ( $P_{ств}$ ). Иными словами, в соответствии с доказанным выше равенством  $P_k = P_{доп}$  величина  $kM_{P_k}$  в формуле (8) представляет собой НЗ, выраженный количеством  $k$  средних квадратических погрешностей  $P_k$ .

Величину  $k$  определяют по задаваемой вероятности НБП ( $P_{ств}$ ), используя таблицу интегралов вероятностей. Но при нахождении НЗ величину  $M_{P_k}$  по формуле (9) для проектируемого створа определить невозможно, так как известны только  $D_k$  и  $m_{\varepsilon_k}$ , но неизвестны  $M_{P_k}$  и  $d$ . Не решается формула (8), поскольку в ней две известные величины:  $B$  (с материалов съемки рельефа дна) и  $k$  и две неизвестные:  $P_k$  и  $M_{P_k}$ . Создается впечатление, что задача проектирования ЛНС, обеспечивающих задаваемую вероятность



О А О « К О М П Р Е С С О Р »

ОСНОВАНО В 1877 ГОДУ



*Приобретая продукцию нашего завода, вы способствуете  
развитию экономики России*

Адрес: 194044, С-Петербург, Б. Сампсониевский пр., 64. Телефакс (812) 596-33-97.  
Телефоны: (812) 295-50-90 – секретарь, (812) 295-51-27 – отдел маркетинга.  
E-mail: office@compressor.spb.ru, www.compressor.spb.ru