



**Serhii O. Grinchak**  
Сергей Олегович  
Гринчак

УДК 629.5.067.8  
Г85

## **SPECIFIC FEATURES OF THE THERMOGASDYNAMIC PROCESSES IN THE OPERATION OF THE WATER-GAS JET APPARATUS IN SEMIBOUNDED VOLUME**

**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ СТРУЙНОГО ВОДОГАЗОВОГО АППАРАТА В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЁМЕ**

DOI 10.15589/SMI. 2015.02.11

Serhii O. Grinchak

С. О. Гринчак, магистрант, капитан 2 ранга  
grinserg69@gmail.com  
ORC ID: 0000-0001-6627-7780

*Shipbuilding Department of the Ukrainian Naval Forces*

*Управление кораблестроения ВМС ВС Украины*

**Abstract.** The application of the water-gas jet apparatus (WGJA) in front of an opening (doors, hatches) into the room with an emergency as a means of fume and combustion products localization has been discussed. The aim of the study is to consider the specific features of the processes of gas exchange through the opening in enclosing structures under the condition of the WGJA operation in it in case of fire and substantiate the methodological basis for physical and mathematical modelling of the above-noted processes. The mechanism of the gas-air environment propagation after its treatment in the WGJA within the volume of a ship room in case of fire is determined. The specific features of the gas exchange in the opening equipped with the WGJA are theoretically based. The conditions of the WGJA operation efficiency in the openings in a vertical enclosing structure and a horizontal enclosure are determined. For practical realization of the theoretical studies, the overpressure devices are suggested for operation both in the vertical (doors) and horizontal openings (emergency hatches). The results of the studies enable developing a methodology for experimental modelling of the above-noted processes and proving the conducted theoretical studies in the works to follow.

**Keywords:** water-gas jet apparatus; thermodynamic properties; combustion products; gas-air environment; flow motion.

**Анотация.** Рассмотрены особенности газообменных процессов через открытый проем в ограждающих конструкциях при условии работы в нем струйного водогазового аппарата (СВГА) при пожаре. Уточнен механизм распределения полей скоростей газозвуковой среды на срезе открытой стороны, установлена его зависимость от параметров и рабочих характеристик СВГА. Предложены устройства подпора воздуха как для случая работы в вертикальных проемах (дверях), так и для работы в горизонтальных перекрытиях (аварийных люках).

**Ключевые слова:** струйный водогазовый аппарат; термодинамические характеристики; продукты горения; газозвуковая среда; движение потока.

**Анотація.** Розглянуто особливості газообмінних процесів через відкритий отвір у захисних конструкціях за умови роботи в них струминного водогазового апарату (СВГА) при пожежі. Уточнено механізм розподілу полів швидкостей газоповітряного середовища на зрізі відкритої сторони, встановлено його залежність від параметрів і робочих характеристик СВГА. Запропоновано пристрої підпору повітря як для випадку роботи у вертикальний отворах (дверях), так і для роботи в горизонтальних перекриттях (аварійних люках).

**Ключові слова:** струминний водогазовий апарат; термодинамічні характеристики; продукти горіння; газоповітряне середовище; рух потоку.

### **References**

- [1] Astapenko V.M., Koshmarov Yu.A., Molchadskiy I.S., Shevlyakov A.N. *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyakh* [Room fire thermogasdynamics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 448 p.
- [2] Batcher Ye., Partnell A. *Opasnost dyma i dymozashchita* [Fume danger and fume protection]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 152 p.

- [3] Volchkov E.P. *Pristennyye gazovyye zavesy* [Wall-adjacent gas screens]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983.
- [4] Hrynychak S.O. *Osoblyvosti funktsionuvannya strumynnoho vodohazovoho aparatu v otvori avariinoho prymishchennia, rozstashovanomu v horyzontalnomu perekrytti* [Characteristics of functioning of the water-gas jet apparatus in the opening of the emergency room located in a horizontal enclosure]. *Zbirnyk naukovykh prats* [Collection of scientific publications], 2013, no. 4, issue 16, pp. 144–154.
- [5] Diskin M.Ye. *K voprosu o raschete vozdushnykh zaves* [On the issue of the air screens calculation]. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika, ABOK — Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)*, 2003, no. 7, pp. 58–64.
- [6] Zatsarinnaya T.G. *Lokalizatsiya gazovozdushnogo potoka (dyma) vodyanoy zavesoy reguliruemoy tolshchiny orosheniya* [Localization of the air-gas flow (fume) with the water screen of adjustable irrigation thickness]. *Zbirnyk naukovykh prats SVMI im. P.S. Nakhimova* [Collection of scientific publications of the Pavel Nakhimov Sevastopol Higher Naval Institute], 2004, no. 1, issue 4, pp. 238–243.
- [7] Idelchik I.Ye. *Gidravlicheskie soprotivleniya (fiziko-mekhanicheskie osnovy)* [Hydraulic resistances (physical and mechanical basics)]. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1954. 316 p.
- [8] Moseychuk Yu.P., Hrynychak S.O. *Issledovaniya protsessov funktsionirovaniya struynogo vodogazovogo aparata v poluogranichennom obeme* [Study of the processes of functioning of the water-gas jet apparatus in the semi-bounded volume]. *Zbirnyk naukovykh prats* [Collection of scientific publications], 2011, no. 4, issue 8, pp. 165–174.
- [9] Radzievskiy S.I., Khnychkin V.M. *Pozharobezopasnost i protivopozharnaya zashchita korably* [Ship fire safety and protection]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987. 200 p.
- [10] Sukhov A.K., Rodin I.A. *Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy koeffitsienta ezheksii pryamotochno-raspylitelnogo teploobmennika pri nalichii teplomassoobmena* [Results of the experimental studies of the ejection coefficient of the direct-flow spray-type heat exchanger at the presence of the heat and mass transfer]. *Zbirnyk naukovykh prats SVMI* [Collection of scientific publications of the Pavel Nakhimov Sevastopol Higher Naval Institute], 1995, pp. 182–186.
- [11] Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974.
- [12] *Eksperimentalnye issledovaniya protsessov goreniya pri pozharakh v zhilykh i sluzhebnykh pomeshcheniyakh sudov* [Experimental studies of the combustion processes during fires in the ship accommodation and working spaces]. Leningrad, Spetsializirovannaya nauchno-issledovatel'skaya laboratoriya Vsyerossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta protivopozharnoy oborony Publ., 1979. 97 p.

**Problem statement.** When fighting fire in a ship, the priority problem is to localize the accident to avoid the spread of its hazards beyond the room in which it originated. It is necessary to localize the fire source by sealing the emergency room, i.e. closing the doors and hatches and isolating the ventilation. The practice (the analysis of the alarm events) shows that such localization method does not adequately solve the problem, namely:

during the time from the start of the fire to the time of sealing the emergency room, the high-temperature fume gases spread to adjoining rooms and hinder the fire-fighting;

it is often necessary to unclosethe emergency room for determining the fire properties or evacuating. When unclosethe room in which the fire develops, the combustion gases break out, the air with normal oxygen content inflows through the disclosed doorways and promotes the fire fanning and increase in the combustion intensity.

**Latest research and publications analysis.** There is a number of studies [3, 5, 6, 10] which have the purpose to estimate the effectiveness of the WGJA as the technical means for localization and liquidation of the accidents involving fire in ship's rooms. In [3, 5, 10] the physical

**Постановка проблемы.** ТПри ведении борьбы с пожарами в условиях корабля первоочередным заданием является локализация аварии для исключения распространения ее опасных факторов за пределы помещения, в котором она возникла. Необходимо локализовать очаг возгорания путем герметизации аварийного помещения (закрытие дверей, люков и отключение вентиляции). Как показывает практика (анализ аварийных событий), такой способ локализации не в достаточной мере решает поставленное задание, а именно:

с момента начала пожара к моменту герметизации аварийного помещения проходит некоторое время, за которое высокотемпературные дымовые газы распространяются в смежные помещения и затрудняют борьбу с пожаром;

часто возникает необходимость раскрытия аварийного помещения для установления характеристик пожара или эвакуации людей. При раскрытии помещения, в котором развивается пожар, из него вырываются газообразные продукты горения, при этом в раскрытые дверные проемы поступает воздух с нормальным содержанием кислорода, который способствует раздуванию пожара и увеличению интенсивности горения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известен ряд исследований [3, 5, 6, 10], целью которых является оценка эффективности СВГА как

processes of reducing the average volume temperature in a room, increasing the optical transparency of the environment, creating the conditions sufficient for volume fire extinguishing are generally described. The processes of equilibrium establishment in the “dispersed liquid – gas environment” system are studied. The dependences characterizing the efficiency of wet scrubbing of the gas-air environment from toxic gases that form in a fire are determined.

In the conducted studies [3, 6, 10] the use of WGJA as a means of fume and combustion products localization in front of the unclosed openings (doors, hatches) into the emergency room is not considered. Thus, the study of the propagation of the cooled steam-gas-air environment with increased moisture content obtained by treating the toxic gases in the WGJA placed in front of the unclosed opening into a ship's room is important.

The theoretical substantiation and experimental verification of the methods of the gas exchange control during a fire will allow creating a basis for the development of technical equipment and improvement of fire-fighting tactics on ships.

**THE ARTICLE AIM** is to analyse the specific features of the gas exchange processes through the unclosed opening in enclosing structures under the condition of the water-gas jet apparatus operation during a fire and create a basis for the physical and mathematical modeling of an object at the time of the fire.

**Basic material.** In general, the process of the fire development in a room with an opening can be represented as an adiabatic irreversible process.

The free expansion of the gas is not quasi-static. It has a short flow time and is a typical example of such adiabatic irreversible process. For example, two constant-volume vessels are connected by a pipe in which there is a closed valve. At the initial moment the gas is concentrated in the first vessel and vacuum – in the second. After quickly opening the valve, the free expansion of gas into the free space starts. After some time, the gas density and pressure in these vessels equalize.

In the process of fire development if there is a difference in the thermodynamic characteristics of the gas phase in the room and outside, the gas moves toward the equilibrium establishment. Thus, as it was shown in the previous studies [1, p. 16-27], the opening works both on the outlet of combustion products from the room and on the air inlet into the room in which the fire develops (Fig. 1).

In accordance with [1, p. 10–12], the gas exchange is mathematically described by the equation of material balance of the gas phase for a room with an opening:

технических средств локализации и ликвидации аварий, связанных с пожарами, в корабельных помещениях. В работах [3, 5, 10] в общем виде описаны физические процессы снижения среднеемкной температуры в помещении, повышения оптической прозрачности среды, формирования условий, достаточных для объемного тушения пожара. Исследованы процессы установления равновесия в системе «диспергированная жидкость — газозвдушная среда», определенные зависимости, характеризующие эффективность мокрой очистки газозвдушной среды от токсичных газов, которые образуются при пожаре.

В проведенных исследованиях [3, 6, 10] не рассматривалось применение СВГА в качестве средства локализации дыма и продуктов горения перед открытыми проемами (дверями, люками) в аварийное помещение. Таким образом, исследование процессов распространения охлажденной с увеличенным влагосодержанием парогазозвдушной среды, полученной путем обработки токсичных газов в СВГА, установленном перед открытым проемом в корабельное помещение, является актуальным.

Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение методов управления газообменом при пожаре позволит создать основу для разработки технических средств и усовершенствования тактики ведения борьбы с пожарами на кораблях.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — выполнить анализ особенностей газообменных процессов через открытый проем в ограждающих конструкциях при условии работы в нем струйного водогазового аппарата при пожаре и на базе этого создать основу для физического и математического моделирования объекта во время пожара.

**Изложение основного материала.** В общем виде процесс развития пожара в помещении с проемом может быть представлен как адиабатический необратимый процесс.

Свободное расширение газа в пустоту не является квазистатическим, характеризуется малым временем протекания и является характерным примером такого адиабатического необратимого процесса. Например, два сосуда постоянного объема соединены трубкой, в которой имеется закрытая заслонка и в начальный момент газ сосредоточен в первом сосуде, а во втором сосуде — вакуум, то после резкого открытия заслонки начинается свободное расширение газа в пустоту. Через некоторое время плотность и давление газа в этих сосудах выравниваются.

Так же в процессе развития пожара при разнице термодинамических характеристик газовой фазы в помещении и за его пределами происходит движение газа в сторону установления равновесия. При этом, как доказано в предыдущих исследованиях [1, с. 16–27] при пожаре проем работает как на вывод продуктов сгорания из помещения, так и на ввод воздуха в помещение, в котором развивается пожар (рис. 1).

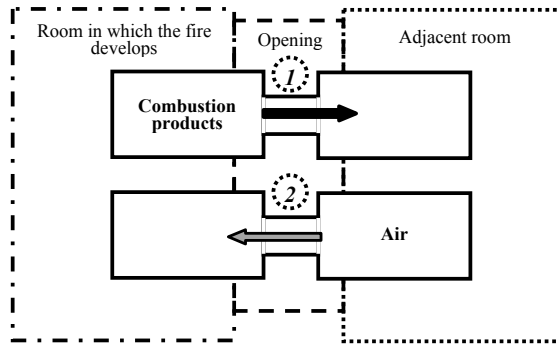


Fig. 1. Diagram of gas exchange through an opening during the fire:

Рис. 1. Схема газообмена через проем при пожаре:

1 — the first system of communicating vessels / первая система сообщающихся сосудов; 2 — the second system of communicating vessels / вторая система сообщающихся сосудов; Room in which the fire develops — Помещение, в котором развивается пожар; Adjacent room — Смежное помещение; Combustion products — Продукты сгорания; Air — Воздух.

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = G_A + \psi - G_G, \quad (1)$$

where  $V \frac{d\rho_m}{d\tau}$  is the change in mass of gas during the time interval  $d\tau$ , kg/s;

$G_A$ ,  $G_G$  is the mass flow rate of air and gas combustion products through the opening, kg/s;

$\psi$  is the mass material burnout velocity, kg/s.

The reduce in the gas exchange through the unclosed opening during a fire at the first approximation depends on the conditions under which the first and third terms of equation (1) will tend to zero. In this case, equation (1) will be:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi, \quad (2)$$

that meets the conditions of the fire development in the absence of gas exchange with the environment (of the sealed room).

One of the most common and standardized ways to reduce the gas exchange through the unclosed opening during a fire is the method of creating an air overpressure [2, p. 102–121]. In this method, a decrease in the gas exchange through the unclosed opening is achieved by pumping air into the adjacent room to create overpressure in it. Theoretically this process is described by the equation:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = (G_A + \psi - G_G) + G_{AP}, \quad (3)$$

where  $G_{AP}$  is the mass flow rate of air from the adjacent room, kg/s.

Since the mass flow depends on the pressure difference between the “communicating vessels”, the smaller the difference, the less the flow rate. In the considered case (3) when  $G_G$  approximately equals  $G_{AP}$ ,  $G_G$  characteristic tends to zero, but the air inlet into the room increases, leading to the fire source fanning.

В соответствии с [1, с. 10–12] газообмен математически описан уравнением материального баланса газовой фазы для помещения с проемом:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = G_B + \psi - G_\Gamma, \quad (1)$$

где  $V \frac{d\rho_m}{d\tau}$  — изменение массы газа за интервал времени  $d\tau$ , кг/с;

$G_B$ ,  $G_\Gamma$  — массовый расход воздуха и газообразных продуктов сгорания через проем, кг/с;

$\psi$  — массовая скорость выгорания материала, кг/с.

Снижение газообмена через открытый проем при пожаре в первом приближении зависит от таких условий, при которых первый и третий члены уравнения (1) будут стремиться к нулю. В таком случае уравнение (1) будет иметь вид:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = \psi, \quad (2)$$

что соответствует условиям развития пожара при отсутствии газообмена с окружающей средой (герметичного помещения).

Одним из самых распространенных и стандартизированных способов снижения газообмена через открытый проем при пожаре является способ создания воздушного подпора [2, с. 102–121]. При этом способе снижение газообмена через открытый проем достигается путем нагнетания в смежное помещение воздуха с целью создания в нем избыточного давления. Теоретически этот процесс описывается уравнением:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = (G_B + \psi - G_\Gamma) + G_{ВД}, \quad (3)$$

где  $G_{ВД}$  — массовый расход воздуха из смежного помещения, кг/с.

Так как массовый расход зависит от разницы давлений между «сообщающимися сосудами», то чем меньше эта разница, тем меньше расход. В рассматриваемом случае (3) при возникновении примерного равенства  $G_\Gamma \approx G_{ВД}$  характеристика  $G_\Gamma \rightarrow 0$ , но при этом увеличивается приток воздуха в помещение, что ведет к раздуванию очага пожара.

Another way to reduce the gas exchange through the unclosed opening during a fire is to change the direction of the gas-air flow velocity vector. An example of such method can be the air or water curtains. When using the air curtain [5], a high velocity air-gas flow is forcedly formed in the opening perpendicular to the direction of the velocity vector of the gas flow from the emergency room. This leads to the fact that the high-temperature combustion products are taken by the air-gas flow to the lower part of the opening. Thus,  $G_A$  characteristic is supplemented with a component, and not with the normal oxygen content air, but with the gas-air mixture considerably diluted with combustion products. A significant disadvantage of this method is the necessity of using large-sized technical equipment having sufficient power to create a high-velocity flow.

To increase the efficiency and reduce the effects of the disadvantage of using the air curtain, the method of water curtain formed by the flow of finely dispersed liquid [6] is used. In this case, the heat and mass transfer component is added to the properties of air curtains. In spite of all the advantages of this method, a significant technical disadvantage of water curtains is the water supply to the rooms, which is not acceptable to the ship's rooms.

An effective way of reducing the intensity of the spread of fire hazards in the rooms is to use the sparkless flow boosters based on the WGJA. Currently, the WGJA properties when working inside the sealed room are thoroughly studied [10], however, the problem of the WGJA operation in the opening of an emergency room was not investigated before.

One of the WGJA applications for localizing the spread of fire hazards in rooms is to use it in the opening of the vertical, i.e. in the doorway. In the previous work [8], the workflows implemented in the WGJA in a vertical enclosing structure were considered.

At the WGJA operation in a vertical semi-bounded volume during the flow of fume gases through the opening in the vertical enclosing structure, two thirds of the opening work on the outlet of fume gases to the adjacent space. In the upper part of the opening which is equipped with a suction slotted outlet, the flow moves to the WGJA suction nozzle. Consequently, the flow separation process occurs at the WGJA operation (Fig. 2).

The motion of the main flow is caused by the local static pressure difference  $P_{i2}$  in the ceiling layer zone where the fume gases accumulate because of their high temperature.

The flow velocity of the fume gas can be described by the equation [9]:

Еще одним способом снижения газообмена через открытый проем при пожаре является изменение направления вектора скорости газозвдушного потока. Примером такого способа могут быть воздушные или водяные завесы. В случаях применения воздушной завесы [5] в проеме принудительно формируют скоростной газозвдушный поток, перпендикулярный направлению вектора скорости газового потока из аварийного помещения. Это приводит к тому, что высокотемпературные продукты сгорания увлекаются газозвдушным потоком в нижнюю часть проема. При этом, характеристика  $G_B$  дополняется слагаемым, но не воздухом с нормальным содержанием кислорода, а газозвдушной смесью, в значительной степени разбавленной продуктами сгорания. Существенным недостатком такого способа является необходимость использования габаритомехких технических средств, обладающих достаточной мощностью для создания высокоскоростного потока.

Для увеличения эффективности и снижения последствий недостатка в случаях применения воздушной завесы применяют способ водяной завесы, образуемой потоком мелкодиспергированной жидкости [6]. Дополнительно к свойствам воздушных завес в данном случае добавляется тепломассообменная составляющая. Несмотря на все достоинства такого способа, существенным техническим недостатком водяных завес является подача воды в помещения, что является неприемлемым для корабельных помещений.

Эффективным средством снижения интенсивности распространения опасных факторов пожара в помещениях являются безискровые побудители расхода на базе СВГА. В настоящее время достаточно широко исследованы свойства СВГА при его работе внутри герметичного помещения [10], однако, прежде не исследовались вопросы функционирования СВГА в проеме аварийного помещения.

Одним из вариантов применения СВГА для локализации распространения опасных факторов пожара в помещениях является использование его в проеме вертикальной ограждающей конструкции, то есть в дверях. В предыдущей работе [8] были рассмотрены рабочие процессы, реализуемые в СВГА в вертикальной ограждающей конструкции.

При работе СВГА в вертикальном полуограниченном объеме во время движения потока дымовых газов через проем в вертикальной ограждающей конструкции, две трети проема работают на выход дымовых газов в смежное помещение. При этом в верхней части проема, который оснащен всасывающим щелевым отверстием, происходит движение потока в сторону всасывающего патрубка СВГА. Следовательно, при работе СВГА происходит процесс разделения потоков (рис. 2).

Движение основного потока обусловлено перепадом локального статического давления  $P_{i2}$  в зоне припотолочного слоя, в котором скапливаются дымовые газы из-за их высокой температуры.

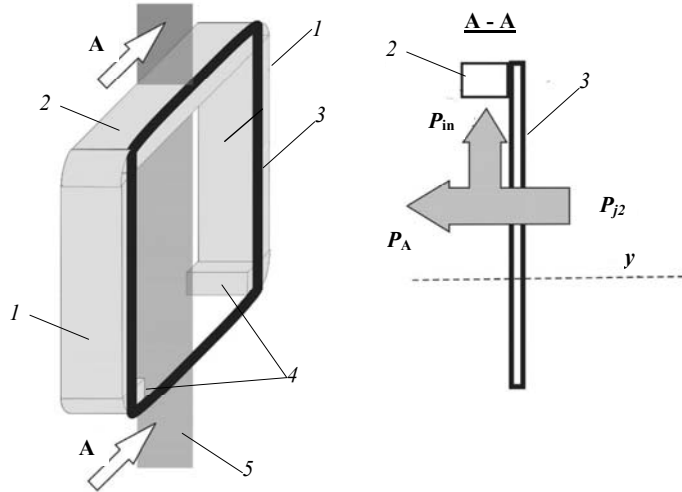


Fig. 2. Conventional diagram of flow separation in the opening of the vertical enclosing structure:

Рис. 2. Условная схема разделения потоков в проеме в вертикальной ограждающей конструкции:

1 — WGJA body / корпус СВГА; 2 — inlet header / входной коллектор; 3 — opening / проем; 4 — outlet nozzles / выходные патрубки; 5 — cutting plane A-A / секущая площадь A-A;  $P_A$  — atmosphere pressure in the adjacent room / атмосферное давление в смежном помещении;  $P_{j2}$  — local static pressure in the ceiling layer zone / локальное статическое давление в зоне припотолочного слоя;  $P_{in}$  — discharge pressure in the WGJA inlet / давление разряжения во входной части СВГА.

$$v = \sqrt{2gh \frac{\rho_a - \rho_{i2}}{\rho_a}}, \quad (4)$$

where  $\rho_a$  is the air density at a height of  $h$ ,  $\text{kg/m}^3$ .

According to the Mendeleev-Clapeyron law

$$P_{i2} = \rho_{i2} T_{i2} R,$$

where  $T_{i2}$  is the average volume temperature, K;  $R$  is the absolute gas constant,  $R_m \approx 300 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ .

Then the equation (4) takes the form:

$$v = \sqrt{2gh \frac{T_{i2} P_a - T_a P_{i2}}{T_{i2} P_a}}. \quad (5)$$

Consequently, the volume flow rate of the fume gases through two thirds of the opening will be described by the equation:

$$Q_g = 2/3 h_{op} b_{op} v = 2/3 h_{op} b_{op} \sqrt{2gh_{op} \frac{T_{i2} P_a - T_a P_{i2}}{T_{i2} P_a}}, \quad (6)$$

where  $h_{op}$ ,  $b_{op}$  are the height and width of the opening correspondingly, m.

Considering the flow separation at the WGJA operation, then  $Q_g$  is the total volume of fume gases flowing through two thirds of the opening per time unit. Then the second version of the equation (6) will take the form:

$$Q_g = Q_{i2 \rightarrow i4} + Q_{in}, \quad (7)$$

where  $Q_{i2 \rightarrow i4}$  is the volume flow rate of the fume gases entering the adjacent room volume,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

$Q_{in}$  value depends only on the constructive SVGA performance and it is constant in equation (7), and  $Q_g$  value will depend on the intensity of the fire development in the emergency room. At this, equation (6) holds

Скорость потока дымовых газов может быть описана уравнением [9]:

$$v = \sqrt{2gh \frac{\rho_a - \rho_{i2}}{\rho_a}}, \quad (4)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха на высоте  $h$ ,  $\text{kg/m}^3$ .

В соответствии с законом Менделеева-Клапейрона

$$P_{i2} = \rho_{i2} T_{i2} R,$$

где  $T_{i2}$  — средняя по объему температура, K;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $R_m \approx 300 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

Тогда выражение (4) будет иметь вид:

$$v = \sqrt{2gh \frac{T_{i2} P_a - T_a P_{i2}}{T_{i2} P_a}}. \quad (5)$$

Следовательно, объемный расход дымовых газов через две трети проема будет описываться выражением:

$$Q_g = 2/3 h_{пр} b_{пр} v = 2/3 h_{пр} b_{пр} \sqrt{2gh_{пр} \frac{T_{i2} P_a - T_a P_{i2}}{T_{i2} P_a}}, \quad (6)$$

где  $h_{пр}$ ,  $b_{пр}$  — высота и ширина проема соответственно, м.

Если учесть разделение потоков при работе СВГА, тогда  $Q_g$  — это общий объем дымовых газов, проходящих в единицу времени через две трети проема. Тогда второй вариант выражения (6) будет иметь вид:

$$Q_g = Q_{i2 \rightarrow i4} + Q_{вх}, \quad (7)$$

где  $Q_{i2 \rightarrow i4}$  — объемный расход дымовых газов, поступающих в объем смежного помещения,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Величина  $Q_{вх}$  зависит только от конструктивной производительности СВГА и в выражении (7) она будет постоянной, а величина  $Q_g$  будет зависеть от интенсивности развития пожара в аварийном поме-

for time point  $\tau = 0$  when  $Q_g$  will have its maximum value. Then, as the fume gases enter the adjacent room, the intensity of gas exchange will decrease with increasing the temperature in the room.

Having assumed  $Q_g = \max$ , and  $Q_{in} = \text{const}$ , the condition for the end of calculations was considered:

$$Q_g = Q_{i2 \rightarrow i4} - Q_{in} \approx 0,$$

That is

$$Q_{i2 \rightarrow i4} \approx Q_{in}. \quad (8)$$

Fig. 2 shows that the purified and cooled fume gases, which separated from the liquid stream by reaction with the gas-liquid flare with a barrier, move towards the emergency room. From [3] it is known that the interaction area of the jet running perpendicular to the flat barrier can be conventionally divided into two zones: the area of the critical point and the zone of self-similar flow. Consequently, the flow of inert mixture from the WGJA output nozzles is an area of the flow, which is formed after the turn of the gas jet along the barrier.

Then the profile of the gas jet velocity in the self-similar zone is the same as in a semi-bounded submerged jet and consists of sections of the profiles of the jet boundary layer and the boundary layer on the surface of the barrier (the wall), and the pairing of these profiles is performed on the edge of the wall boundary layer  $y = \delta_1$  (Fig. 3).

From [3] it is known that the boundary layer on the wall is turbulent and the velocity distribution in it follows the “one-seventh” law:

$$\frac{v}{v_0} = \left( \frac{y}{\delta_2} \right)^{\frac{1}{7}} = \bar{y}^{\frac{1}{7}}, \quad (9)$$

where  $v_0$  is the velocity at the outer edge of the wall boundary layer (at  $y = \delta_1$ ), m/s.

При этом, выражение (6) справедливо для момента времени  $\tau = 0$ , когда  $Q_g$  будет иметь максимальное значение. Затем, по мере поступления дымовых газов в смежное помещение, интенсивность газообмена будет снижаться по мере увеличения температуры в этом помещении.

Принимая допущение  $Q_g = \max$ , а  $Q_{вх} = \text{const}$ , условием окончания расчетов считалось:

$$Q_g = Q_{i2 \rightarrow i4} - Q_{вх} \approx 0,$$

То есть

$$Q_{i2 \rightarrow i4} \approx Q_{вх}. \quad (8)$$

Из рис. 2 видно, что очищенные и охлажденные дымовые газы, отделившиеся от жидкостного потока в результате взаимодействия газожидкостного факела с преградой, движутся в направлении аварийного помещения. Из [3] известно, что область взаимодействия струи, набегающей перпендикулярно на плоскую преграду, можно условно разбить на две зоны: область критической точки и зона автомодельного течения. Следовательно, поток инертной смеси из выходных патрубков СВГА представляет собой область автомодельного течения, который формируется после разворота газовой струи вдоль преграды.

Тогда профиль скорости газовой струи в автомодельной зоне является таким же, как и в полуограниченной затопленной струе и состоит из отрезков профилей струйного пограничного слоя и пограничного слоя на поверхности преграды (далее стенка), причем сопряжение этих профилей осуществляется на границе пристеночного пограничного слоя при  $y = \delta_1$  (рис. 3).

Из [3] известно, что пограничный слой на стенке является турбулентным и распределение скоростей в нем подчиняется закону «одной седьмой»:

$$\frac{v}{v_0} = \left( \frac{y}{\delta_2} \right)^{\frac{1}{7}} = \bar{y}^{\frac{1}{7}}, \quad (9)$$

где  $v_0$  — скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя (при  $y = \delta_1$ ), м/с.

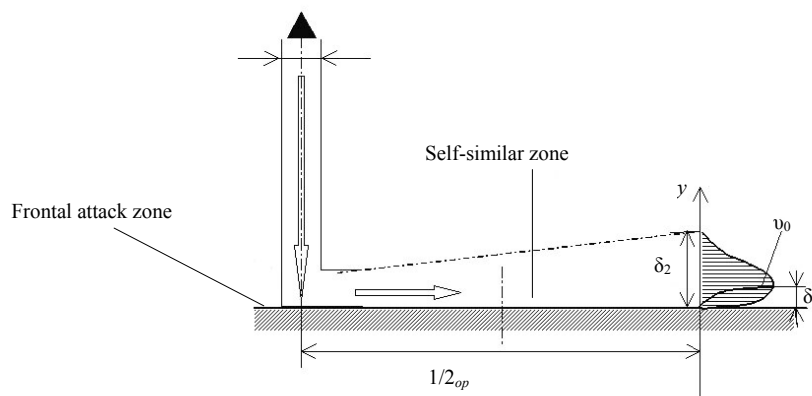


Fig. 3. Diagram of the interaction of the gas jet from the WGJA outlet with the barrier

Рис. 3. Схема взаимодействия газовой струи из выходной части СВГА с преградой  
Frontal attack zone — Зона лобовой атаки; Self-similar zone — Автомодельная зона.

As shown in [3, 11], the velocity profile in the outer part of the wall boundary jets is described by the equation:

$$\frac{v_{out}}{v_0} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta_2} \right)^{1,5} \right]^2 \quad (10)$$

Jet boundary is defined as [3]

$$\delta_2 = 0,22\bar{r}, \quad (11)$$

where  $\bar{r} = \frac{1/2 b_{op}}{d_{out}}$ . (distance  $r$  and diameter  $d$  of the spray device are indicated in Fig. 5); 0,22 is a numerical coefficient.

The velocity at the outer edge of the wall boundary layer

$$v_0 = \frac{1,34}{\bar{r}} v_{out} \quad (12)$$

Thus, to analyse the hydrodynamics in the self-similar area, the theoretical positions on the semi-bounded submerged jet are used. They allow calculating the velocity of the gas flow at the lower part of the opening.

Consequently, the volume flow rate of air through one third of the opening can be expressed as follows:

$$Q_a = 1/3 h_{op} b_{op} v = 1/3 h_{op} b_{op} \sqrt{2gh_{op} \frac{T_a P_{i4}}{T_a P_{i4}} \frac{T_{i4} P_a}{T_a P_{i4}}} \quad (13)$$

As in the previous case, taking into account the flow separation at the WGJA operation, the  $Q_a$  value is the total volume of air flowing through one third of the opening per time unit.

Then

$$Q_a = Q_{ai4 \rightarrow i3} + Q_{out}, \quad (14)$$

where  $Q_{ai4 \rightarrow i3}$  is the volume flow rate of air entering the emergency room volume ( $i_3$  zone),  $m^3/s$ .

$Q_{out}$  value in equation (14) is constant and depends only on the constructive WGJA performance.  $Q_a$  value will depend on the intensity of the fire development in the emergency room.

Considering that the SVGA outlet is designed to create air overpressure to decrease the intensity of the air inflow from the adjacent room to the emergency one, the condition for the end of calculations is:

$$Q_{ai4 \rightarrow i3} \approx Q_{out} \quad (15)$$

For practical realization of the theoretical research, it is suggested to use the local air overpressure device in front of the opening to the emergency room based on WGJA. The device designed for use on the openings in vertical enclosing structures, consists of two WGJA (Fig. 4) which are located on both sides of the opening.

Each WGJA can have a cylindrical or rectangular body made of sheet metal coated with anticorrosive or

Как показано в работах [3, 11] профиль скоростей во внешней части пристенных пограничных струй описывается выражением:

$$\frac{v_{вых}}{v_0} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{\delta_2} \right)^{1,5} \right]^2 \quad (10)$$

Граница струи определяется как [3]

$$\delta_2 = 0,22\bar{r}, \quad (11)$$

где  $\bar{r} = \frac{1/2 b_{пр}}{d_{вых}}$  (расстояние  $r$  и диаметр распылительного устройства  $d$  обозначены на рис. 5); 0,22 — числовой коэффициент.

Скорость на внешней границе пристенного пограничного слоя

$$v_0 = \frac{1,34}{\bar{r}} v_{вых}, \quad (12)$$

Таким образом, для анализа гидродинамики в автономной области применяются теоретические положения о полуграниченной затопленной струе, позволяющие рассчитать скорость газового потока в нижней части проема.

Следовательно, объемный расход воздуха через одну треть проема можно выразить следующим образом:

$$Q_a = 1/3 h_{пр} b_{пр} v = 1/3 h_{пр} b_{пр} \sqrt{2gh_{пр} \frac{T_a P_{i4}}{T_a P_{i4}} \frac{T_{i4} P_a}{T_a P_{i4}}} \quad (13)$$

Как и в предыдущем случае, учитывая разделение потоков при работе СВГА, величина  $Q_b$  — это общий объем воздуха, проходящего в единицу времени через одну треть проема.

Тогда

$$Q_b = Q_{bi4 \rightarrow i3} + Q_{вых}, \quad (14)$$

где  $Q_{bi4 \rightarrow i3}$  — объемный расход воздуха, поступающего в объем аварийного помещения (зону  $i_3$ ),  $m^3/s$ .

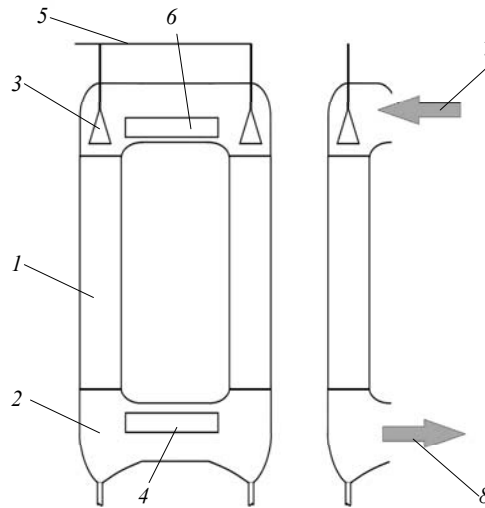
Величина  $Q_{вых}$  в выражении (14) является постоянной и зависит только от конструктивной производительности СВГА. Величина  $Q_b$  будет зависеть от интенсивности развития пожара в аварийном помещении.

Учитывая, что выходная часть СВГА предназначена для создания воздушного подпора с целью снижения интенсивности поступления воздуха из смежного помещения в аварийное, условием окончания расчетов считается:

$$Q_{bi4 \rightarrow i3} \approx Q_{вых} \quad (15)$$

Для практической реализации теоретических исследований предлагается использовать устройство местного подпора воздуха перед проемом в аварийное помещение на базе СВГА. Устройство, предназначенное для использования на проемах в вертикальных ограждающих конструкциях, состоит из двух СВГА (рис. 4), расположенных по обе стороны проема.





**Fig. 4.** Device that is designed for use on openings in the vertical enclosures based on WGJA.

**Рис. 4.** Устройство, предназначенное для использования на проемах в вертикальных ограждениях на базе СВГА.

1 — WGJA body / корпус СВГА; 2 — separator consisting of a system for outlet of the environment from the body and a system for removal of the spent working fluid / разделитель, состоящий из системы вывода парогазовоздушной среды из корпуса и системы отвода отработанной рабочей жидкости; 3 — multi-jet spray nozzle / многоструйная форсунка; 4 — slotted channel for outlet of the inert steam-gas-air environment / щелевой канал для вывода инертной парогазовоздушной среды; 5 — working fluid conduit / трубопровод рабочей жидкости; 6 — slotted channel of the air inlet / щелевой канал воздухозаборника; 7 — ejected gas-air environment / эжектируемая газозвдушная среда; 8 — inert steam-gas-air mixture removed from the WGJA / инертная парогазовоздушная смесь, выводимая из СВГА.

polymeric material. There is the WGJA spraying device in the upper part of the body. It is a multi-jet spray nozzle having on the disk at least 14 nozzles with a cross-section of 0.7 mm. The WGJA spraying device is connected to the fixed fire main. The spent working fluid is gathered in the drainage system of the ship. The collector of the WGJA inlet with a slotted outlet is located above the upper door section, so that it does not obstruct closing or opening, and the outlet nozzles are placed under the lower door section.

A specific feature of the gas exchange through the emergency hatch (opening in a horizontal enclosure) is that at the initial stage of fire there occurs only the output of fume gases and the air inflow is negligibly small [12]. The workflows implemented in the WGJA in a horizontal enclosure are considered in [4].

In the case of being used in a horizontal opening, WGJA is considered as a system of local overpressure, i.e. the system for creating exceeding pressure in the opening, fostering the fulfilment of the condition:

$$Q_{i2 \rightarrow i4} \leq Q_{\text{out}} \quad (16)$$

For the practical realization of theoretical studies, the use of WGJA in an emergency hatch is based on the fact that the inert mixture from the WGJA outlet flows to the opening from the periphery toward the centre (Fig. 5). At this, the axis of the flow is inclined toward the emergency room. To determine the inclination angle, the flow

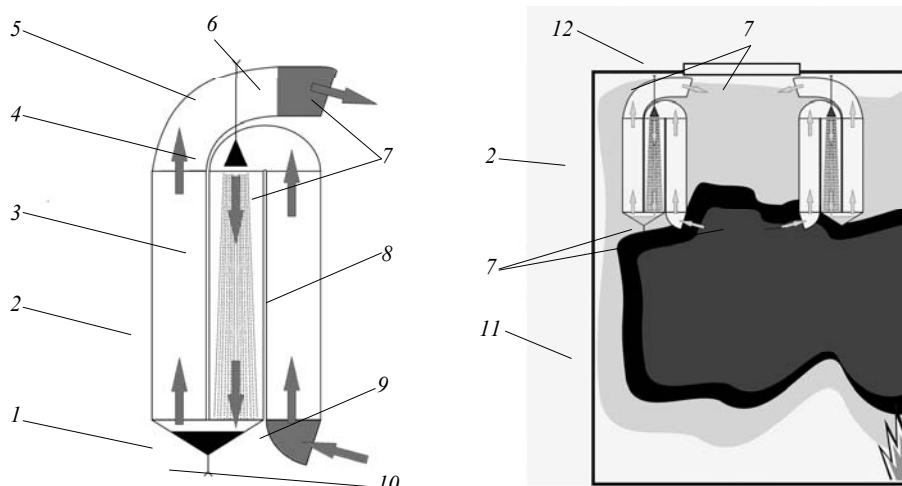
Каждый СВГА может иметь цилиндрический или прямоугольный корпус, выполненный из листового металла с покрытием из антикоррозийных или из полимерных материалов. В верхней части корпуса находится распыляющее устройство СВГА, которое представляет собой многоструйную форсунку, имеющую на диске не менее 14 форсунок сечением 0,7 мм. Распыляющее устройство СВГА подключается к стационарной пожарной магистрали. Сбор отработанной рабочей жидкости производится в дренажной системе корабля. Коллектор входной части СВГА с щелевым отверстием размещают над верхним срезом дверей, так, чтобы он не создавал препятствий при их закрытии или открытии, а исходные патрубки — под нижним срезом дверей.

Особенностью газообмена через аварийный люк (проем в горизонтальном перекрытии) является то, что на начальном этапе пожара через него осуществляется только вывод дымовых газов, а подсос воздуха ничтожно мал [12]. В работе [4] были рассмотрены рабочие процессы, реализуемые в СВГА в горизонтальном перекрытии.

В случае использования в горизонтальном проеме СВГА рассматривается как система местного подпора, то есть система создания в проеме избыточного давления, способствующая выполнению условия:

$$Q_{i2 \rightarrow i4} \leq Q_{\text{вых}} \quad (16)$$

Для практической реализации теоретических исследований вариант использования СВГА в аварийном люке основан на том, что поток инертной смеси из выходной части СВГА подается в проем от периферии к центру (рис. 5). При этом ось пото-



**Fig. 5.** Device that is designed to create an air overpressure in the emergency hatch:

**Рис. 5.** Устройство, предназначенное для создания подпора воздуха в аварийном люке:

1 — separator / разделитель; 2 — directing nozzle / направляющий патрубок; 3 — WGJA body / корпус СВГА; 4 — multi-jet spray nozzle / многоструйная форсунка; 5 — working fluid conduit / трубопровод рабочей жидкости; 6 — outlet collector / выходной коллектор; 7 — directions of movement of the gas phase in the WGJA body / направления движения газовой фазы в корпусе СВГА; 8 — directing nozzle of the inlet / направляющий патрубок входной части; 9 — inlet collector / входной коллектор; 10 — working fluid removal conduit / трубопровод отвода отработанной рабочей жидкости; 11 — fume gases / дымовые газы; 12 — emergency hatch / аварийный люк.

of inert mixture from the SVGA outlet should be considered as a free submerged jet.

A jet is called free if it is not limited by solid walls, and it is considered to be submerged, if it propagates in the environment with the same physical properties as the jet itself [7]. In accordance with the same results of studies [7], the circular jet turbulence factor for the conditions of the WGJA outlet can be taken as 0.08 and hence the opening angle of the jet is  $15^\circ$ . Thus, the inclination angle of the jet should be not less than  $15^\circ$ .

The air overpressure device in the emergency hatch, as well as in the vertical openings, consists of two WGJA (Fig. 5). Each SVGA consists of a body 3, which is in the form of a hollow tube with a round, square or rectangular cross-section. There is the multi-jet spray nozzle 4, which is connected to the working fluid conduit 5 of the ship fire main, in the upper part of the body. The directing nozzle of the inlet 8, connected to the inlet collector 9, is attached to the upper body part section. The separator 1 and the conduit 10 for removal of the spent working fluid are placed in the lower part of the body. The directing nozzle 2, connected to the outlet collector 6, is attached to the separator. The outlet collector 6 is fitted with nozzles inclined at  $15\text{...}20^\circ$  from the deck. In Fig. 5 digit 7 indicates the arrows of the movement direction of the gas phase in the body of the water-gas jet ejector.

The air overpressure device in the emergency hatch is disposed in such a way that the WGJA outlet collec-

ка наклонена в сторону аварийного помещения. Для определения угла наклона поток инертной смеси из выходной части СВГА должен рассматриваться как свободная затопленная струя.

Струю называют свободной, если она не ограничена твердыми стенками, при этом она считается затопленной, если распространяется в среде тех же физических свойств, что и сама струя [7]. В соответствии с теми же результатами исследований [7] коэффициент турбулентности круглой струи для условий выходной части СВГА можно принять равным 0,08 и, следовательно, угол раскрытия такой струи —  $15^\circ$ . Таким образом, угол наклона струи должен составлять не менее  $15^\circ$ .

Устройство подпора воздуха в аварийном люке, как и для подпора в вертикальных проемах, состоит из двух СВГА (рис. 5). Каждый СВГА состоит из корпуса 3, который выполняют в виде полый трубы круглого, квадратного или прямоугольного сечения. В верхней части соответственно корпусу располагают многоструйную форсунку 4, которую подключают к трубопроводу рабочей жидкости 5 корабельной пожарной магистрали. К срезу верхней части корпуса присоединяют направляющий патрубок входной части 8, соединенный с входным коллектором 9. В нижней части корпуса размещают разделитель 1 с трубопроводом 10 отвода отработанной рабочей жидкости. К разделителю присоединяют направляющий патрубок 2, соединенный с выходным коллектором 6. Выходной коллектор 6 оснащают патрубками, наклоненными на  $15\text{...}20^\circ$  от палубы. На рис. 5 цифрой 7 обозначены стрелки направления движения газовой фазы в корпусе струйного водогазового эжектора.

tors are located directly under the emergency hatch at the outer part of its perimeter.

**CONCLUSIONS.** To achieve the stated aim, the following specific problems have been resolved in the article:

1. The thermogasdynamic processes, taking place in the room during the fire development and the water-gas jet apparatus operation in front of the opening, are formalized. Namely, the distribution mechanism of the gas-air environment after its treatment in the WGJA in the volume of a ship room in case of fire is determined.

2. The specifics of the gas exchange in the opening equipped with a water-gas jet apparatus are identified, and the conditions of its efficient operation in the opening both for a vertical enclosing structure and horizontal enclosure are determined.

3. On the basis of theoretical studies, the possibility of providing the condition for the fire development in the absence of gas exchange with the environment (sealed room) is represented.

4. On the basis of the analysis of processes of gas exchange in the opening equipped with a water-gas jet apparatus, the air overpressure devices are suggested for operating both in vertical doorways and in emergency hatches of horizontal enclosures, which allow localizing toxic combustion waste in an emergency room during a fire.

Устройство подпора воздуха в аварийном люке располагают таким образом, чтобы выходные коллекторы СВГА размещались непосредственно под аварийным люком с наружной части его периметра.

**ВЫВОДЫ.** Для достижения поставленной цели в статье были решены следующие частные задачи:

1. Формализованы термогазодинамические процессы, происходящие в помещении при развитии пожара и работе струйного водогазового аппарата перед проемом, а именно, определен механизм распространения газовой среды, после ее обработки в СВГА, в объеме корабельного помещения при пожаре.

2. Выявлены особенности газообмена в проеме, оснащенный струйным водогазовым аппаратом, и определены условия эффективности его работы в проеме, как для случая вертикальной ограждающей конструкции, так и для горизонтального перекрытия.

3. На базе теоретических исследований показана возможность обеспечения условия развития пожара при отсутствии газообмена с окружающей средой (герметичного помещения).

4. На базе анализа процессов газообмена в проеме, оснащенный струйным водогазовым аппаратом, предложены устройства подпора воздуха как для случая работы в вертикальных проемах дверей, так и для работы в аварийных люках горизонтальных перекрытий, позволяющие локализовать токсичные отходы горения в аварийном помещении во время пожара.

## Список литературы

- [1] Астапенко, В.М. Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / В.М. Астапенко, Ю.А. Кошмаров, И.С. Молчадский, А.Н. Шевляков / под ред. Ю.А. Кошмарова. — М.: Стройиздат, 1988. — 448 с.
- [2] Батчер, Е. Опасность дыма и дымозащита [Текст] : [пер. с англ. Е. Ш. Фельдмана / под ред. В.М. Есина.] / Е. Батчер, А. Партнэлл. — М.: Стройиздат, 1983. — 152 с.
- [3] Волчков, Э.П. Пристенные газовые завесы [Текст] / Э.П. Волчков — Новосибирск : Наука, 1983.
- [4] Гринчак, С.О. Особливості функціонування струйного водогазового апарату в отворі аварійного приміщення, розташованому в горизонтальному перекритті [Текст] / С.О. Гринчак // Збірник наукових праць. — Севастополь : СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2013. — Вип. 4 (16) — С. 144–154.
- [5] Дискин, М.Е. К вопросу о расчете воздушных завес [Текст] / М.Е. Дискин // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика, АВОК. — 2003, № 7 — С. 58–64.
- [6] Зацаринная, Т.Г. Локализация газовой среды (дыма) водяной завесой регулируемой толщины орошения [Текст] / Т.Г. Зацаринная // Збірник наукових праць. — Севастополь: СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2004. — Вип. 1 (4) — С. 238–243.
- [7] Идельчик, И.Е. Гидравлические сопротивления (физико-механические основы) [Текст] / И.Е. Идельчик. — М.–Л.: Госэнергоиздат, 1954. — 316 с.
- [8] Мосейчук, Ю.П. Исследования процессов функционирования струйного водогазового аппарата в полуограниченном объеме [Текст] / Ю.П. Мосейчук, С.О. Гринчак // Збірник наукових праць. — Севастополь : СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2011. — Вип. 4 (8) — С.165–174.
- [9] Радзиевский, С.И. Пожаробезопасность и противопожарная защита кораблей [Текст] / С.И. Радзиевский, В.М. Хнычкин. — Л.: Судостроение, 1987. — 200 с.
- [10] Сухов, А.К. Результаты экспериментальных исследований коэффициента эжекции прямооточно-распылительного теплообменника при наличии теплообмена [Текст] / А.К. Сухов, И.А. Родин // Збірник наукових праць. — Севастополь : СВМІ, 1995. — С. 182–186.

- [11] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг / под ред. Л. Г. Лойцянского. — М. : Наука, 1974.
- [12] Экспериментальные исследования процессов горения при пожарах в жилых и служебных помещениях судов: Отчет о НИР (заключительный) [Текст] / СНИЛ ВНИИПО. — № ГР 70007459; Инв. № Б 153331. — Л., 1979. — 97 с.

© С. О. Гринчак

Статью рекомендует в печать  
д-р техн. наук, проф. М. Р. Ткач

## НА ПРАВАХ РЕКЛАМЫ

### Одесса

ул. Тенистая, 15  
г. Одесса, Украина, 65009  
тел.: +380 (482) 34-79-28  
факс: +380 (482) 35-60-05  
e-mail: office@meb.com.ua  
www.meb.com.ua



### Санкт-Петербург

ул. Мира, 15/1, офис 76Н  
г. Санкт-Петербург, Россия, 197101  
тел.: +7 (812) 233-64-03 / 232-85-38  
факс: +7 (812) 309-59-39  
e-mail: meb@peterlink.ru

### ПРОЕКТ MPSV07

Многофункциональное аварийно-спасательное судно ледового плавания мощностью 4 МВт типа «Спасатель Карев»  
Завод-строитель — Невский Судостроительно-Судоремонтный завод  
(построено 3, в постройке 1 судно)



Назначение:

- патрулирование, аварийно-спасательное дежурство в районах судоходства, рыбного промысла, морских нефтяных и газовых промыслов;
- оказание технической поддержки и помощи в районах опасных для мореплавания, добычи морепродуктов, обслуживания транспортных операций в портах;
- поиск и оказание помощи терпящим бедствие судам;
- поиск, спасение, эвакуация и размещение людей, оказание им медицинской помощи;
- снятие с мели и рифов аварийных судов, откачка воды из затопленных отсеков;
- оказание помощи судам и выполнение спасательных работ в ледовых условиях и на чистой воде;

- буксировка аварийных судов и объектов к месту убежищ, а также выполнение морских буксировок судов, плавучих объектов и сооружений во льдах и на чистой воде;
- оказание помощи в тушении пожаров на плавучих и береговых объектах, доступных для подхода с моря;
- тыловое и техническое обеспечение, в том числе выполнение подводно-технических работ водолазов на глубинах до 60 метров;
- тушение горящего на воде топлива, ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов;
- освидетельствование и очистка подводной части корпуса судов, плавучих и береговых объектов;
- обследование морского дна и поврежденных объектов на глубинах до 1000 м.

