

DOI 10.15589/jnn20170302  
 УДК 629.5.067.8  
 Б69

## THEORETICAL SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR DESIGNING SHIP APERTURES WITH THE USE OF THE AIR SUPPRESSION SYSTEM BASED ON THE JET WATER-GAS APPARATUS

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОРАБЕЛЬНЫХ ПРОЕМОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПОДПОРА ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ СТРУЙНОГО ВОДОГАЗОВОГО АППАРАТА

**Volodymyr S. Blintsov**  
 volodymyr.blintsov@nuos.edu.ua  
 ORCID: 0000-0002-3912-2174

**Serhii O. Hrynychak**  
 grinserg69@gmail.com  
 ORCID 0000-0001-6627-7780

**В. С. Блінцов,**  
 д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>

**С. О. Гринчак,**  
 капитан 2 ранга<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

<sup>2</sup>*Shipbuilding Department of the Ukrainian Naval Forces*

<sup>1</sup>*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

<sup>2</sup>*Управление кораблестроения ВМС ВС Украины*

**Abstract.** To theoretically substantiate the method of designing ship apertures with the use of a local air suppression system, the paper considers the solution of a planar two-dimensional hydrodynamic problem of operation of a jet water-gas apparatus (JWGA) in a semi-bounded volume during a fire. The mechanism of distribution of the velocity fields of the air-gas medium at the open side cutoff is elaborated. Its dependence on the parameters and operating characteristics of the JWGA, as well as on the initial characteristics of the ejected gas-air medium are established.

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

**Аннотация.** Для теоретического обоснования метода проектирования корабельных проемов с применением системы местного подпора воздуха в статье рассмотрено решение плоской двумерной гидродинамической задачи работы струйных водогазовых аппаратов (СВГА) в полуограниченном объеме при пожаре. Уточнен механизм распределения полей скоростей газовой среды на срезе открытой стороны, установлена его зависимость от параметров и рабочих характеристик СВГА, начальных характеристик эжектируемой газовой среды.

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

**Анотація.** Для теоретичного обґрунтування методу проектування корабельних отворів із застосуванням системи місцевого підпорю повітря в статті розглянуто рішення плоскої двовимірної гідродинамічної задачі роботи струминних водогазових апаратів (СВГА) в напівобмеженому об'ємі при пожежі. Уточнено механізм розподілу полів швидкостей газоповітряного середовища на зрізі відкритої сторони, встановлено його залежність від параметрів і робочих характеристик СВГА, початкових характеристик ежектованого газоповітряного середовища.

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

## REFERENCES

- [1] Azarenko O. V., Popov V. P., Krastelov M. M. *Sposib ochyshchennia HVS promyslovoho prymishchennia vid oksydu vuhletsii* [A method for cleaning the gas-air medium of production premises from carbon monoxide]. *Zbirnyk naukovykh prats SIIaEtaP — Collection of scientific publications of the Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry*, Sevastopol, SIIaEtaP Publ., 2001, no 5, pp. 162–166.

- [2] Aleksashenko A. A., Koshmarov Yu. A., Molchadskiy I. S. *Teplomassooperenos pri pozhare* [Heat and mass transfer during a fire]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 175 p.
- [3] Astapenko V. M., Koshmarov Yu. A., Molchadskiy I. S., Shevlyakov A. N. *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyakh* [Thermogasdynamics of indoor fires]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 448 p.
- [4] Astapenko V. M., Koshmarov Yu. A., Pozdnyakov V. I. *Mezhzonnyy gazoobmen pri pozhare v pomeshchenii* [Interzone gas exchange in case of an indoor fire]. *Sistemnye issledovaniya problem pozharnoy bezopasnosti: Sb. nauch. tr.* [System Research of Fire Safety Problems: Collection of scientific papers]. Moscow, VNIPO MVD SSSR Publ., 1990, pp. 46–60.
- [5] Batcher Ye., Partnell A. *Opasnost dyma i dymozashchita* [Danger of smoke and smoke protection]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 152 p.
- [6] Galustov V. S. *Pryamotochnye raspylitelnye apparaty v teploenergetike* [Direct-flow sprayers in heat power engineering]. Moscow, Energoizdat Publ., 1989. 240 p.
- [7] Gaykovaya O. N., Kuripko O. V., Nikitin Ye. V. *Modelirovanie nachalnoy stadii pozhara pri rabote pereborki aktivnogo tipa* [Simulation of the initial stage of a fire during the operation of a bulkhead of the active type]. *Zbirnyk naukovykh prats — Collection of scientific publications*. Sevastopol, SVMi im. P. S. Nakhimova Publ., 2003, no. 2, pp. 129–133.
- [8] Diskin M. Ye. *K voprosu o raschete vozdushnykh zaves* [On the calculation of air curtains]. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika, AVOK — Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics (ABOK)*, 2003, no. 7, pp. 58–64.
- [9] Zatsarinnaya T. G. *Lokalizatsiya gazovozdushnogo potoka (dyma) vodyanoy zavesoy reguliruemoy tolshchiny orosheniya* [Localization of the gas-air flow (smoke) with a water curtain of an adjustable irrigation thickness]. *Zbirnyk naukovykh prats — Collection of scientific publications*. Sevastopol, SVMi im. P. S. Nakhimova Publ., 2004, no. 1 (4), pp. 238–243.
- [10] Kuripko O. V., Nikitin Ye. V., Anokhin G. A. *Povyshenie ognestoykosti korabelnykh ograzhdayushchikh konstruksiy: puti i metody issledovaniy* [Increase of fire resistance of shipboard enclosing structures: ways and methods of research]. *Zbirnyk naukovykh prats — Collection of scientific publications*. Sevastopol, SVMi im. P. S. Nakhimova Publ., 2002, no. 1, pp. 164–169.
- [11] Miroshnichenko V. N., Sokolov V. V., Sheverev Ye. Yu. *Issledovanie dymoosazhdayushchey i okhlazhdayushchey effektivnosti ustroystv UDP GIBK. 065289.001* [Study of the smoke suppression and cooling efficiency of the devices UIB GIBC. 065289.001]. *Naukoviy visnik UkrNDIPB — Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, Kyiv, UkrNDIPB Publ., 2002, no. 1 (5), pp. 76–82.
- [12] Sukhov A. K., Rodin I. A. *Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy koeffitsienta ezhekszii pryamotochno-raspylitel'nogo teploobmennika pri nalichii teplomassoobmena* [Results of the experimental studies of the ejection coefficient of a direct-flow spray heat exchanger in the presence of heat and mass transfer]. *Zbirnyk naukovykh prats — Collection of scientific publications*. Sevastopol, SVMi im. P. S. Nakhimova Publ., 1995, pp. 182–186.
- [13] Radzievskiy S. I., Khnychkin V. M. *Pozharobezopasnost i protivopozharnaya zashchita korably* [Fire safety and fire protection of ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987. 200 p.
- [14] *Trebovaniya tekhniki bezopasnosti k morskim sudam* [Safety requirements for seagoing vessels]. RD 31.81.01-87.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проемы на судне предназначены для сообщения между отдельными смежными помещениями или для выхода на открытое пространство палубы. Закрытие проемов обеспечивают двери и люки, которые устанавливаются в судовых защитных ограждениях (переборках, палубах). Специфика использования судовых проемов обуславливает ряд предъявляемых к ним требований, касающихся подбора материалов для их изготовления, их надежности, прочности, качества.

В настоящее время проектирование проемов внутри судна выполняется с применением методик конструирования, которые являются неотъемлемой

частью проектирования общей противопожарной системы судна [14].

Одно из важнейших требований к судовым проемам (их закрытиям), — их огнестойкость и способность реагирования на аварийные ситуации, а именно скорость закрытия и качество локализации последствий возгораний.

Применительно к судовым пожарам это сводится к герметизации аварийного помещения или отсека. Однако накопленный опыт борьбы с судовыми пожарами показывает, что за промежуток времени между началом пожара (возгоранием и началом образования продуктов сгорания) и моментом герметизации

значительная часть высокотемпературных дымовых газов через проемы выходит за пределы аварийного помещения [13]. Это, в свою очередь, затрудняет ведение борьбы с пожаром. Кроме того, энергонасыщенность корабельных помещений, а также наличие членов экипажа на рабочих местах требует разгерметизации помещений. Существенным недостатком способа герметизации аварийного помещения есть еще то, что судовые отсеки не газонепроницаемыми.

Из выше изложенного следует, что среди комплекса задач обеспечения судовой противопожарной защиты одной из важных будет необходимость снижения газообмена через открытые проемы. Поиск путей решения этой задачи, теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение методов управления газообменом при пожаре позволит создать теоретическую основу для усовершенствования проектирования системы противопожарной безопасности судна и поставит вопрос об обновлении тактики ведения борьбы с судовыми пожарами.

В общем виде процесс развития пожара в помещении с проемом может быть показан как адиабатический необратимый процесс.

Свободное расширение газа в пустоту не является квазистатическим, характеризуется малым временем протекания и представляет собой характерный пример такого адиабатического необратимого процесса. Например, если 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. При этом, как доказано в предыдущих исследованиях [3, 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).

В соответствии с [3, с. 10–12] газообмен математически описан уравнением материального баланса газовой фазы для помещения с проемом.

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

где  $V \frac{d\rho_m}{d\tau}$  — изменение массы газа за интервал времени  $d\tau$ , кг/с;  $G_B$ ,  $G_T$  — массовый расход воздуха и газообразных продуктов сгорания через проем, кг/с;  $\psi$  — массовая скорость выгорания материала, кг/с.

Суть задачи снижения газообмена через открытый проем при пожаре в первом приближении сводится к нахождению таких условий, при которых первый и третий члены уравнения (1) будут стремиться к нулю, то есть уравнение (1) может быть представлено в виде:

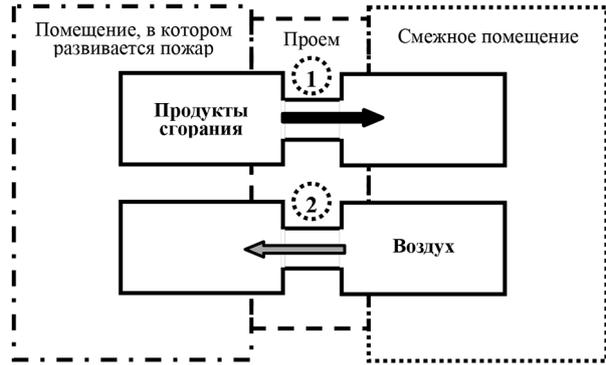


Рис. 1. Схема газообмена через проем при пожаре: 1 — первая система сообщающихся сосудов; 2 — вторая система сообщающихся сосудов

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

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

Одним из самых общепринятых и стандартизированных способов снижения газообмена через открытый проем при пожаре является создание воздушного подпора [5, с. 102–121], суть которого заключается в нагнетании в смежное помещение воздуха с целью возникновения в нем избыточного давления. Теоретически это процесс описывается уравнением:

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

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 разница, тем меньше расход. В рассматриваемом случае (3) при примерном равенстве  $G_T \approx G_{ВД}$  характеристика  $G_T \rightarrow 0$ , но при этом увеличивается приток воздуха в помещение, а это ведет к развитию очага пожара.

Еще одним способом снижения газообмена через открытый проем при пожаре является изменение направления вектора скорости газозвушного потока. Примером тут могут быть воздушные или водяные завесы. В случаях применения воздушной завесы [8] в проеме принудительно формируют скоростной газозвушной поток, перпендикулярный направлению вектора скорости газового потока из аварийного помещения. Это приводит к тому, что высокотемпературные продукты сгорания увлекаются газозвушным потоком в нижнюю часть проема. При этом описание  $G_B$  дополняется слагаемым, но не воздухом с нормальным содержанием кислорода, а газозвушной смесью, в значительной степени разбавленной про-

дуктами сгорания. Существенным недостатком такого способа есть необходимость применения технических средств, обладающих достаточной мощностью для создания высокоскоростного потока.

Несколько иначе обстоят дела при использовании водяных завес, образуемых потоком мелкодиспергированной жидкости [9]. Дополнительно к свойствам воздушных завес в данном случае следует учитывать еще и тепломассообменную составляющую. Несмотря на все достоинства такого способа, существенным техническим недостатком водяных завес будет подача воды в помещения, что неприемлемо для корабельных отсеков.

Наиболее действенное средство снижения интенсивности распространения опасных факторов пожара в помещениях – безискровые побудители расхода на базе СВГА. В настоящее время достаточно широко исследованы свойства СВГА при его работе внутри герметичного помещения [1, 7, 10–12]. Однако в этих и других работах не рассматривались вопросы функционирования СВГА в проеме аварийного помещения.

В работе [6] при изучении эффективности работы СВГА в помещении постоянного объема при развитии пожара применялись интегральная модель процесса развития пожара. Однако она описывает картину процессов больше качественно, чем количественно. Тем более для случая, когда пожар развивается в одном помещении с проемом (открытой дверью), а высокотемпературные дымовые газы выходят за пределы помещения — по эвакуационному коридору, интегральная модель может быть использована для относительно небольшого объема.

Зонная модель более достоверно показывает процессы распространения дыма и инертной смеси по объекту защиты [7]. Однако при определенных условиях эта модель (с большим количеством уравнений) не оправдана. Под такими условиями понимается работа СВГА в помещении небольшого объема, когда он способен воздействовать на весь объем, а не только на его часть.

Таким образом, представляется актуальным провести анализ методов моделирования процессов распространения токсичных веществ (например, дымовых газов) и парогазовоздушной среды, полученной путем их обработки в СВГА, функционирующих в проеме аварийного помещения и обосновать методическую основу к физическому и математическому моделированию указанных процессов.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** — теоретически обосновать метод проектирования корабельных проемов с применением системы местного подпора воздуха, который образуется потоком парогазовоздушной смеси, направленной в аварийный судово́й отсек при использовании СВГА. Для этого необходимо:

– решить плоскую двумерную гидродинамическую задачу работы СВГА в полуограниченном объеме;

– уточнить механизм распределения полей скоростей газовой среды на срезе открытой стороны проема и установить его зависимость от параметров и рабочих характеристик СВГА, начальных характеристик эжектируемой газовой среды;

– усовершенствовать уравнения зонной модели развития пожара при условии использования перед проемом устройства, представляющего собой полуограниченный объем с работающим внутри СВГА.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Используя результаты [4], рассмотрим процесс развития пожара в корабельном помещении (для примера возьмем самый сложный вариант для развития пожара — энергетический отсек), которое изолированное от смежного помещения вертикальной металлической конструкцией с проемом (дверями), с неравномерным распределением пожарной нагрузки и ограниченным тепло- и газообменом с окружающей средой. Проем площадью  $S_{\text{п}}$  ( $\text{м}^2$ ) расположен в верхней части вертикальной конструкции (от которого в отсек ведет наклонный трап) соединяет аварийное помещение со смежным (расчетная схема отдельного случая зонной модели на рис. 2). В районе проема установлен СВГА с целью обеспечения экранирования:

– дымовых газов за счет их локализации в объеме аварийного помещения с одновременным осаждением;

– тепловой энергии за счет процессов теплообмена между газовой фазой, которая эжектируется, и капельным потоком.

В начальный период времени зона очага пожара имеет небольшие размеры, и процесс развития осуществляется за счет воздуха, который находится в объеме аварийного помещения. Продукты сгорания, которые выделились, заполняют отсек и распространяются за его пределы через открытый проем, откуда начинается приток свежего воздуха. Таким образом, устанавливается газообмен со средой смежного помещения, что способствует усилению пожара и росту его параметров.

Известно [3], что при неоднородном температурном поле в газовой среде, которая заполняет помещение при пожаре, наблюдается линейное распределение статических давлений. При этом в верхней части помещения, как правило, наблюдается максимальное избыточное давление, в нижней — максимальная разрядка. Такое распределение статических (равных) давлений является причиной газообмена через проемы и неплотности. Следовательно, пока существует разрежение, в помещение будет поступать свежий воздух, что, в свою очередь, будет способствовать более интенсивному горению.

Как было показано в [3, с. 10], координата плоскости равных давлений  $y^*$  определяется зависимостью:

$$y^* = 1 - \frac{P_a}{g \rho_a h} \left[ \frac{P_m - P_a}{P_a \left( 1 - \frac{\rho_m}{\rho_a} \right)} \right], \quad (4)$$

где  $P_a, \rho_a$  — наружное давление и плотность среды на уровне половины высоты помещения, Н/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>3</sup>;  $P_m, \rho_m$  — средние по объему давление и плотность, Н/м<sup>2</sup>, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  — половина высоты помещения.

Выражение (4) свидетельствует о том, что положение плоскости равных давлений формирует процессы газообмена через открытый проем.

Для начала моделирования следует учесть, что в качестве расчетной схемы будет использоваться рис. 2 и рассматриваться процесс развития пожара в помещении с проемом, перед которым работает струйный водогазовый эжектор. В помещении объемом  $V_n + V_t$  (где  $V_n, V_t$  — соответственно геометрический объем помещения и объем пожарного тамбура) находятся два побудителя расхода, а именно — очаг пожара и СВГА. Побудители влияют друг на друга посредством процессов тепломассообмена и газодинамического взаимодействия потоков. Также при пожаре входная часть устройства рассматривается как дополнительное отверстие, которое работает только на вывод газообразных продуктов горения из помещения (рис. 2), а выходная часть СВГА как дополнительное отверстие, которое предназначено только на введение инертной смеси в помещение.

Непосредственно моделирование формирования процесса газообмена через открытый проем при

включенных СВГА в проеме аварийного помещения следует рассматривать в следующей последовательности:

1. Ведение борьбы с пожаром эффективно в начальный период его развития. При этом известны место расположения пожара (координата по длине помещения, очаг находится на полу), вид сгораемого материала и площадь очага. Проемы в помещение закрыты, за исключением одного, перед которым установлен СВГА.

2. Для начальной стадии пожара характерно наличие зон с примерно одинаковыми характеристиками среды, а именно:

**Зона 1** — зона конвективной колонки от очага пожара. Ее размеры определяются площадью очага горения и высотой помещения, то есть

$$V_1 = 2h \cdot S_{\text{горения}}.$$

**Зона 2** — припотолочный слой, в котором скапливаются дымовые газы. Ее размеры зависят от положения плоскости равных давлений (ее координаты  $y_{\text{прд}}$ ):

$$V_2 = (2h - y_{\text{прд}}) \cdot (S_{\text{потолок}} - S_{\text{горения}}).$$

**Зона 3-1** и **Зона 3-2** — зоны, в которых параметры газовой среды соответствуют начальным значениям. При этом характеристики газовой среды **зоны 3-1**, расположенной между осью очага пожара и ограждающей конструкцией, в которой имеется проем (перед которым работает СВГА), обусловлены характеристиками инертной смеси, выходящей из СВГА. Размеры **зоны 3-1** определяются положением плоскости равных давлений:

$$V_{3-1} = y_{\text{прд}} \cdot [B_{\text{п}} \cdot a_{\text{ог}} - 0,5 \cdot S_{\text{горения}}].$$

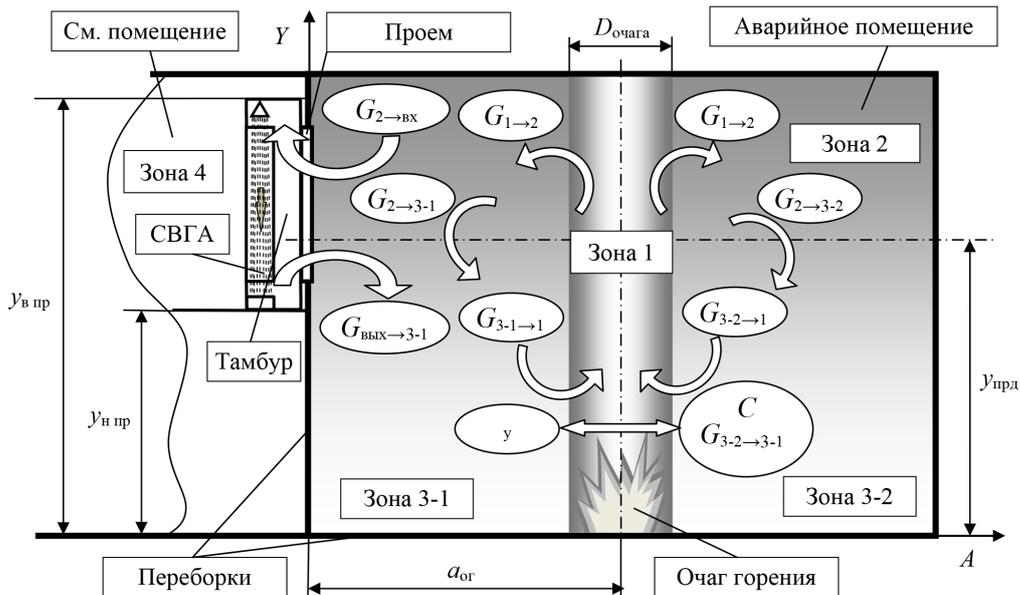


Рис. 2. Расчетная схема модели функционирования СВГА в проеме аварийного помещения

**Зона 3-2** расположена в противоположной от проема стороне. Ее размеры также находятся координатой очага и плоскости равных давлений, то есть

$$V_{3-2} = y_{\text{прд}} \cdot [B_{\text{П}} \cdot (A_{\text{П}} - a_{\text{ог}}) - 0,5 \cdot S_{\text{горения}}].$$

Также следует учесть, что, кроме указанных зон с примерно одинаковыми характеристиками среды, на начальном этапе пожара в общем газообмене также принимает участие **Зона 4** (зона смежного помещения).

3. В связи с тем, что объем пожарного тамбура много меньше объема аварийного помещения принимается допущение, что СВГА расположен непосредственно в проеме. Это означает, что проем помещения условно разбивается на два. Координаты первого — это координата верхней части верхнего проема, которая соответствует координате верхней части проема помещения; координата нижней части верхнего проема — это координата верхней части верхнего проема минус толщина корпуса СВГА. Координата нижней части нижнего проема совпадает с координатой нижней части проема в помещении, а координата верхней части нижнего проема — координата нижней части проема в помещении плюс толщина корпуса СВГА. Остальная часть проема в помещении герметична и через нее не происходит газообмен со смежным помещением.

4. Высоты условных верхнего и нижнего проемов пренебрежительно малы, следовательно, необходимо рассматривать три вероятных случая положения плоскости равных давлений:

$y_{\text{прд}} < y_{\text{н.пр}}$ , при  $y_{\text{н.пр}} \approx 0,5(y_{\text{в.вых}} + y_{\text{н.вых}})$ , то есть находится ниже нижнего края проема в помещении, в этом случае из **зоны 2** отбираются дымовые газы, охлаждаются и вводятся обратно в **зону 2**;

$y_{\text{в.пр}} < y_{\text{прд}}$ , при  $y_{\text{в.пр}} \approx 0,5(y_{\text{в.вых}} + y_{\text{н.вых}})$ , то есть расположена выше верхнего края проема в помещении, в этом случае из **зоны 3-1** выводится газозвдушенная среда и возвращается обратно в **зону 3-1**;

$y_{\text{н.пр}} < y_{\text{прд}} < y_{\text{в.пр}}$ , то есть размещена между верхним и нижним краем проема в помещении, в этом случае из **зоны 2** убираются дымовые газы, охлаждаются и переносятся в **зону 3-1**.

5. Задание исходных данных для моделирования.

а) Параметры помещения:

$B_{\text{П}}$  — ширина помещения, м;  $A_{\text{П}}$  — длина помещения, м;  $h$  — половина высоты помещения, м ( $2h$  — высота);  $P_{\text{пол}}$  — периметр пола, м;  $S_{\text{пол}}$  — площадь пола, м<sup>2</sup>;  $S_{\text{потолок}}$  — площадь потолка, м<sup>2</sup>;  $b$  — ширина проема, м;  $S_{\text{проем}}$  — площадь проема, м<sup>2</sup>;  $\xi_{\text{пр}} = 0,8$  — коэффициент аэродинамического сопротивления проема;  $y_{\text{н.пр}}$  — координата нижнего края проема, м;  $y_{\text{в.пр}}$  — координата верхнего края проема, м;  $dt$  — шаг интегрирования, с;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения;

б) Начальные характеристики газозвдушной среды:

$p_a = 10^5$  Па — атмосферное давление;  $\rho_a = 1,22$  кг/м<sup>3</sup> — плотность воздуха;

$T_a = 293$  К — температура воздуха;  $x_o = 0,23$  — концентрация кислорода в воздухе;  $x_{co} = 0$  — концентрация углекислого газа в воздухе;  $x_N = 0,77$  — концентрация азота в воздухе;  $n_{co} = n_N = 1,36$ ;

в) Характеристики очага пожара:

$\Psi_m^*$  — удельная скорость выгорания (табличное значение) кг/м<sup>2</sup>·с;

$k_n = 1,4$  — показатель адиабаты;  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания (табличное значение), Дж/кг;  $I_n = 5 \cdot 10^5$  Дж/кг — энтальпия продуктов пиролиза;

$L_1$  — теоретическое количество кислорода, необходимое для сгорания 1 кг топлива (табличное значение);  $L_2$  — теоретическое количество углекислого газа, образующегося при сгорании 1 кг топлива (табличное значение);  $S_{\text{горения}}$  — площадь горения, м<sup>2</sup>;  $a_{\text{ог}}$  — координата очага горения, м;

При этом удельная теплоемкость воздуха  $c_{p, \text{воз}}$  (Дж/кг · К) определялась как  $c_{p, \text{воз}} = 956 (1 + 0,000156 T_{\text{П}})$ .

г) Параметры СВГА:

$z_a, z_b$  — ширина и толщина СВГА, м;  $\Delta P_{\text{рж}}$  — давление рабочей жидкости, Па;  $\rho_{\text{рж}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup> — плотность рабочей жидкости;  $\xi_3 = 0,8$  — коэффициент гидравлического сопротивления СВГА;

При этом эквивалентный диаметр  $D_e$  (м) проходного сечения корпуса СВГА находился как:

$$D_e = \frac{2z_a z_b}{z_a + z_b}.$$

5. Определение газо- и термодинамических характеристик струйного водогазового эжектора.

В общем виде расходные характеристики входной и исходной части корпуса СВГА имеют вид:

$$G_{\text{вх}} = Q_e \rho_{\text{д}}, \quad G_{\text{вых}} = Q_e \rho_{\text{ис}},$$

где  $G_{\text{вх}}, G_{\text{вых}}$  — массовые расходы входной и исходной части корпуса СВГА, кг/с;  $Q_e$  — производительность СВГА, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_{\text{д}}, \rho_{\text{ис}}$  — плотность дымовых газов и инертной смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Параметр  $Q_e$  может быть рассчитан по формуле [12]:

$$Q_e = MD_c^2 \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{рж}}}{P_{\text{рж}}}}, \quad \text{при } M = 0,7\xi^{-1/2}$$

$\Delta P_{\text{рж}}, \rho_{\text{рж}}$  — давление и плотность рабочей жидкости, Па, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi_e$  — коэффициент местного сопротивления корпуса теплообменника; 0,7 — коэффициент, который учитывает тепломассообменные процессы в корпусе и несоответствие скорости движения газовой и жидкостной фаз [12].

Наличие в инертной смеси влаги и ее относительно низкая температура, без сомнения, будут влиять

на зону конвективной колонки, т. е. на очаг пожара, уменьшая интенсивность выделения тепла.

Процессы тепломассообмена на струях и каплях в корпусе СВГА достаточно изучены и описаны в [6]. Напор рабочей жидкости и ее характеристики (плотность и температура) постоянны и соответствуют начальным (заданным) значениям.

Согласно [4] плотность инертной смеси может быть задана как

$$\rho_{ис} = \frac{\rho_{дг} T_{дг}}{T_{ис}} \quad \text{при} \quad T_{ис} = T_{рж} + T_{дг} e^{\frac{T_{дг}}{T_{рж}}}$$

где  $T_{дг}$ ,  $T_{ис}$ ,  $T_{рж}$  — температуры дымовых газов, инертной смеси и рабочей жидкости соответственно, К.

6. Формирование модели межзонного газообмена при пожаре в корабельном помещении с проемом, расположенном в вертикальной защитной конструкции.

Основываясь на материалах исследований [4], для разработанной схемы (рис. 2) составим уравнения для зон.

Уравнение материального баланса для зоны  $i$ :

$$V_1 \frac{d\rho_1}{d\tau} = G_{в1\leftarrow 3-1} + G_{в1\leftarrow 3-2} + G_{в1\leftarrow 2} + \psi_M - G_{г1\rightarrow 2} - G_{г1\rightarrow 3-1} - G_{г1\rightarrow 3-2}, \quad (5)$$

где  $V_1$  — объем зоны 1, ( $m^3$ );  $\rho_1$  — масса газовой смеси, которая находится в момент времени  $\tau$  в объеме  $V_1$  ( $кг/с$ ); индексы  $1\rightarrow 3-1$ ,  $1\rightarrow 2$  — направление газообмена из зоны в зону;  $G_{в}$ ,  $G_{г}$  — массовая затрата воздуха и газа ( $кг/с$ );  $\psi_M$  — удельная массовая скорость выгорания ( $кг/с \cdot м^2$ ).

Уравнение кислородного баланса для зоны 1:

$$V_1 \rho_1 \frac{dz_{11}}{d\tau} = G_{в\leftarrow 3-1} z_{13-1} + G_{в\leftarrow 3-2} z_{13-2} + G_{в\leftarrow 2} z_{12} + G_{в\leftarrow 4} z_{14} - z_{11} (G_{г1\rightarrow 2} + G_{г1\rightarrow 3-1} + G_{г1\rightarrow 3-2}) \cdot (1 - n_{11}) - \psi_M (z_{11} + \eta L_1) \quad (6)$$

где  $z_{11}$ ,  $z_{12}$ ,  $z_{13-1}$ ,  $z_{13-2}$  — концентрации кислорода в соответствующих зонах;  $n_{11} = z_{11r}/z_{11}$ ;  $z_{11r}$  — концентрация кислорода отходных газов (из [2]  $n_{11} \leq 1$ );  $h$  — коэффициент полноты горения;  $L_1$  — количество кислорода, необходимое для горения единицы массы топлива ( $кг/кг$ ).

Уравнение энергии для зоны  $i$ :

$$\frac{1}{k_1 - 1} V_1 \frac{dp_{11}}{d\tau} = \psi_M (\eta Q_H^p + I_{П1}) + G_{в1\leftarrow 3-1} c_{рв3-1} T_{в3-1} + G_{в1\leftarrow 3-2} c_{рв3-2} T_{в3-2} + G_{в1\leftarrow 2} c_{рв2} T_{в2} - G_{г1\leftarrow 3-1} c_{рв1} T_{в1} - G_{г1\leftarrow 3-2} c_{рв1} T_{в1} - G_{г1\rightarrow 2-1} c_{рв2} T_{в2} - Q_{W1} \quad (7)$$

где  $k_1$  — показатель адиабаты зоны 1;  $V_1 \frac{dp_1}{d\tau}$  — изменение внутренней энергии в объеме первой зоны ( $Дж/с$ );  $Q_{H}^p$  — низшая теплота горения топлива ( $Дж/кг$ );  $I_{П1}$  — энтальпия газифицируемого горючего вещества ( $Дж/кг$ );  $T_{в1}$ ,  $\rho_{в1}$ ,  $c_{рв1}$ ,  $T_{в2}$ ,  $\rho_{в2}$ ,  $c_{рв2}$ ,  $T_{в3-1}$ ,  $\rho_{в3-1}$ ,  $c_{рв3-1}$ ,  $T_{в3-2}$ ,  $\rho_{в3-2}$ ,  $c_{рв3-2}$  — температура, плотность и удельная теплоемкость воздуха в четырех зонах соответственно ( $К$ ,  $кг/м^3$ ,  $Дж/(кг \cdot К)$ );  $T_{г1}$ ,  $\rho_{г1}$ ,  $c_{рг1}$ ,  $T_{г2}$ ,  $\rho_{г2}$ ,  $c_{рг2}$ ,  $T_{г3-1}$ ,  $\rho_{г3-1}$ ,  $c_{рг3-1}$ ,  $T_{г3-2}$ ,  $\rho_{г3-2}$ ,  $c_{рг3-2}$  — температура, плотность и удельная теплоемкость дымовых газов в данных зонах соответственно ( $К$ ,  $кг/м^3$ ,  $Дж/(кг \cdot К)$ );  $Q_{W1}$  — суммарный тепловой поток из первой зоны ( $Вт$ ).

Уравнение материального баланса для зоны 2:

$$V_2 \frac{d\rho_2}{d\tau} = G_{в2\leftarrow 1} + G_{в2\leftarrow 3-1} + G_{в2\leftarrow 3-2} + G_{вх} - G_{г2\rightarrow 1} - G_{г2\rightarrow 3-1} - G_{г2\rightarrow 3-2} - G_{г2\rightarrow 4} \quad (8)$$

где  $V_2$  — объем зоны 2 ( $m^3$ );  $\rho_2$  — масса газовой смеси, которая находится в момент времени  $\tau$  в объеме  $V_2$  ( $кг/с$ );

Уравнение кислородного баланса для зоны 4:

$$V_2 \rho_2 \frac{dz_{12}}{d\tau} = G_{в2\leftarrow 3} z_{13-1} + G_{в2\leftarrow 3-2} z_{13-2} + G_{в2\leftarrow 4} z_{14} - z_{12} (G_{г2\rightarrow 1} + G_{г2\rightarrow 1} + G_{г2\rightarrow 4} + G_{г2\rightarrow 3-1} + G_{г2\rightarrow 3-2}) \cdot (1 - n_{12}) \quad (9)$$

где  $n_{12} = z_{12r}/z_{12}$ ;  $z_{12r}$  — концентрация кислорода дымовых газов.

Уравнение энергии для зоны 2:

$$\frac{1}{k_2 - 1} V_2 \frac{dp_{12}}{d\tau} = \psi_M (\eta Q_H^p + I_{П2}) + Q_{\omega 2} + G_{в2\leftarrow 1} c_{рв1} T_{в1} + G_{в2\leftarrow 3-1} c_{рв3-1} T_{в3-1} + G_{в2\leftarrow 3-2} c_{рв3-2} T_{в3-2} + G_{в2\leftarrow 4} c_{рв4} T_{в4} - G_{г2\rightarrow 4} c_{рг4} T_{г4} - G_{г2\rightarrow 3-1} c_{рг3-1} T_{г3-1} - G_{г2\rightarrow 3-2} c_{рг3-2} T_{г3-2} - G_{г2\rightarrow 1} c_{рг1} T_{г1} - Q_{W2} \quad (10)$$

где  $k_2$  — показатель адиабаты зоны 2;  $V_2 \frac{dp_{12}}{d\tau}$  — изменение внутренней энергии в объеме второй зоны ( $Дж/с$ );  $Q_{\omega 2}$  — тепловой поток от защищающих конструкций защищают, в зону 2 ( $Дж/кг$ );  $Q_{W2}$  — суммарный тепловой поток из второй зоны ( $Вт$ ).

Уравнение материального баланса для зоны 3-1:

$$V_{3-1} \frac{d\rho_{3-1}}{d\tau} = G_{в3-1\leftarrow 2} + G_{в3-1\leftarrow 1} + G_{в3-1\leftarrow 3-2} + G_{в3-1\leftarrow 4} + G_{вых} - G_{г3-1\rightarrow 1} - G_{г3-1\rightarrow 2} - G_{г3\rightarrow 3-2} \quad (11)$$

где  $V_{3-1}$  — объем зоны 3-1, ( $m^3$ );  $\rho_{3-1}$  — масса газовой смеси, которая находится в момент времени  $\tau$  в объеме  $V_{3-1}$  ( $кг/с$ ).

Уравнение кислородного баланса для зоны 3-1:

$$V_{3-1} \rho_{3-1} \frac{dz_{13-1}}{d\tau} = G_{B3-1 \leftarrow 2} z_{12} + G_{B3-1 \leftarrow 4} z_{13-2} - z_{13-1} (G_{r3-1 \rightarrow 1} + G_{r3-1 \rightarrow 2} + G_{r3-1 \rightarrow 4} + G_{r3 \rightarrow 3-2}) \cdot (1 - n_{13-1}) \quad (12)$$

где  $n_{13-1} = z_{13-1r} / z_{13-1}$ ;  $z_{13-1r}$  — концентрация кислорода выходных газов.

Уравнение энергии для зоны 3-1:

$$\frac{1}{k_{3-1} - 1} V_{3-1} \frac{dp_{13-1}}{d\tau} = \psi_M (\eta Q_H^p + I_{\Pi}) + Q_{\omega 3-1} + G_{B3-1 \leftarrow 1} c_{pB1} T_{B1} + G_{B3-1 \leftarrow 3-1} c_{pB2} T_{B2} + G_{B3-1 \leftarrow 3-2} c_{pB3-2} T_{B3-2} + G_{B3-1 \leftarrow 4} c_{pB4} T_{B4} - c_{pB3-1} T_{B3-1} (G_{r3-1 \rightarrow 4} - G_{r3-1 \rightarrow 3-2} - G_{r3-1 \rightarrow 2} - G_{r3 \rightarrow 1}) - Q_{W3} \quad (13)$$

где  $k_{3-1}$  — показатель адиабаты зоны 3-1;  $V_{3-1} \frac{dp_{13-1}}{d\tau}$  —

изменение внутренней энергии в объеме третьей зоны (Дж/с);  $Q_{\omega 3-1}$  — тепловой поток от защищающих конструкций в зону 3-1 (Дж/кг);  $Q_{W3-1}$  — суммарный тепловой поток из третьей зоны (Вт).

Уравнение материального баланса для зоны 3-2:

$$V_{3-2} \frac{d\rho_{3-2}}{d\tau} = G_{B3-2 \leftarrow 2} + G_{B3-2 \leftarrow 1} + G_{B3-2 \leftarrow 3-1} - G_{r3-2 \rightarrow 1} - G_{r3-2 \rightarrow 2} - G_{r3-2 \rightarrow 3-1} \quad (14)$$

где  $V_{3-2}$  — объем зоны 3-2, (м<sup>3</sup>);  $\rho_{3-2}$  — масса газовой смеси, которая находится в момент времени  $\tau$  в объеме  $V_{3-2}$ , (кг/с).

Уравнение кислородного баланса для зоны 3-2:

$$V_{3-2} \rho_{3-2} \frac{dz_{13-2}}{d\tau} = G_{B3-2 \leftarrow 2} z_{12} + G_{B3-2 \leftarrow 3-1} z_{13-2} - z_{13-2} (G_{r3-2 \rightarrow 1} + G_{r3-2 \rightarrow 2} + G_{r3-2 \rightarrow 3-1}) \cdot (1 - n_{13-2}) \quad (15)$$

где  $n_{13-2} = z_{13-2r} / z_{13-2}$ ;  $z_{13-2r}$  — концентрация кислорода выходных газов.

Уравнение энергии для зоны 3-2:

$$\frac{1}{k_{3-2} - 1} V_{3-2} \frac{dp_{13-2}}{d\tau} = \psi_M (\eta Q_H^p + I_{\Pi}) + Q_{\omega 3-2} + G_{B3-2 \leftarrow 1} c_{pB1} T_{B1} + G_{B3-2 \leftarrow 2} c_{pB2} T_{B2} + G_{B3-2 \leftarrow 3-1} c_{pB3-1} T_{B3-1} - G_{r3-2 \rightarrow 3-1} c_{pB3-1} T_{B3-1} - G_{r3-2 \rightarrow 2} c_{pB2} T_{B2} - G_{r3-2 \rightarrow 1} c_{pB1} T_{B1} - Q_{W3-2} \quad (16)$$

где  $k_{3-2}$  — показатель адиабаты зоны 3-2;  $V_{3-2} \frac{dp_{13-2}}{d\tau}$  — изменение внутренней энергии в объеме третьей зоны (Дж/с);  $Q_{\omega 3-2}$  — тепловой по-

ток от защищающих конструкций в зону  $i_{3-2}$  (Дж/кг);  $Q_{W3-2}$  — суммарный тепловой поток из зоны (Вт).

Уравнение материального баланса для зоны 4:

$$V_4 \frac{d\rho_4}{d\tau} = G_{B4 \leftarrow 2} - G_{r4 \rightarrow 3-1} \quad (17)$$

где  $V_4$  — объем зоны 4 (м<sup>3</sup>);  $\rho_4$  — масса газовой смеси, которая находится в момент времени  $\tau$  в объеме  $V_4$  (кг/с).

Уравнение кислородного баланса для зоны 4:

$$V_4 \rho_4 \frac{dz_{14}}{d\tau} = G_{B4 \leftarrow 2} z_{12} - G_{r4 \rightarrow 3-1} z_{14} (1 - n_{14}) \quad (18)$$

где  $n_{14} = z_{14r} / z_{14}$ ;  $z_{14r}$  — концентрация кислорода выходных газов.

Уравнение энергии для зоны 4:

$$\frac{1}{k_4 - 1} V_4 \frac{dp_{14}}{d\tau} = Q_{\omega 4} + G_{B4 \leftarrow 2} c_{pB2} T_{B2} - G_{r4 \rightarrow 3-1} c_{pB3-1} T_{B3-1} \quad (19)$$

где  $k_4$  — показатель адиабаты зоны 4;  $V_4 \frac{dp_{14}}{d\tau}$  — изменение внутренней энергии в объеме третьей зоны (Дж/с);  $Q_{\omega 4}$  — тепловой поток от защищающих конструкций в зону 4 (Дж/кг).

Уравнения (5)–(19) в общем виде описывают двумерную модель процесса развития пожара в корабельном энергетическом отсеке с проемом, оснащенном СВГА в вертикальном ограждении и.

7. Уточнение механизма распределения полей скоростей газовой смеси на срезе открытой стороны проема и выявление его зависимости от параметров и рабочих характеристик СВГА, начальных характеристик эжектируемой газовой смеси.

В работе [4] установлено, что во время движения потока дымовых газов через проем в вертикальной ограждающей конструкции, две трети проема работают на выход дымовых газов в смежное помещение, а одна треть на вход свежего воздуха.

Скорость потока дымовых газов описана уравнением [3, 4]:

$$v = \sqrt{2gh \frac{\rho_a - \rho_2}{\rho_a}}, \quad (20)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха на высоте  $h$ , кг/м<sup>3</sup>.

В соответствии с законом Менделеева–Клапейрона

$$p_2 = \rho_2 T_2 R,$$

где  $T_2$  — средняя по объему температура, °K;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $R_m \approx 300$  Дж/(кг·°K).

Тогда выражение (20) будет иметь вид:

$$v = \sqrt{2gh \frac{T_2 P_a - T_a P_2}{T_2 P_a}}. \quad (21)$$

Объемный расход дымовых газов и приток воздуха через проем характеризуется выражениями [3, 4]:

$$Q_{\Gamma} = 2/3 h_{\text{пр}} b_{\text{пр}} v = \\ = 2/3 h_{\text{пр}} b_{\text{пр}} \sqrt{2gh_{\text{пр}} \frac{T_2 P_a - T_a P_2}{T_2 P_a}}, \quad (22)$$

$$Q_{\text{в}} = 1/3 h_{\text{пр}} b_{\text{пр}} v = \\ = 1/3 h_{\text{пр}} b_{\text{пр}} \sqrt{2gh_{\text{пр}} \frac{T_a P_4 - T_4 P_a}{T_a P_4}}, \quad (23)$$

где  $Q_{\Gamma}$ ,  $Q_{\text{в}}$  — объемный расход дымовых газов и притока воздуха через проем, ( $\text{м}^3$ );  $h_{\text{пр}}$ ,  $b_{\text{пр}}$  — высота и ширина проема соответственно, м.

При установке в проеме работающего СВГА будет происходить процесс разделения потоков дымовых газов из аварийного помещения и воздуха из смежного. В верхней части проема, который оснащен всасывающим щелевым отверстием СВГА, поток будет двигаться в сторону всасывающего патрубка СВГА, а в нижней части из выходного отверстия СВГА в аварийное помещение будет входить вместо воздуха обогащенная влагой инертная смесь (на рисунке 2).

Следовательно, при работе СВГА второй вариант выражений (22) и (23) будет следующим:

$$Q_{\Gamma} = Q_{2 \rightarrow 4} + Q_{\text{вх}}, \quad (24)$$

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{в4} \rightarrow 3} + Q_{\text{вых}}, \quad (25)$$

где  $Q_{2 \rightarrow 4}$  — объемный расход дымовых газов, поступающих в объем смежного помещения,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{\text{в4} \rightarrow 3}$  — объемный расход воздуха, поступающего в объем аварийного помещения (зону 3),  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $Q_{\text{вх}}$ ,  $Q_{\text{вых}}$  — объемные расходы входной и исходной части корпуса СВГА,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Величины  $Q_{\text{вх}}$  и  $Q_{\text{вых}}$  зависят только от конструктивной производительности СВГА и в выражениях (24) и (25) они будут постоянными, а величина  $Q_{\Gamma}$  и  $Q_{\text{в}}$  будет обусловлена интенсивностью развития пожара в аварийном помещении. При этом выражения (24) и (25) справедливы для момента времени  $\tau = 0$ , когда  $Q_{\Gamma}$  и  $Q_{\text{в}}$  будут иметь максимальное значение. Затем в ходе поступления дымовых газов в смежное помещение интенсивность газообмена будет снижаться по мере увеличения температуры в этом помещении.

Принимая допущение  $Q_{\Gamma} = \text{max}$ , а  $Q_{\text{вх}} = \text{const}$  условиями окончания моделирования экранирования дымовых газов межзонного газообмена между аварийным и смежным помещениями с действующим в проеме СВГА, считается, что:

$$Q_{\Gamma} = Q_{2 \rightarrow 4} - Q_{\text{вх}} \approx 0,$$

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{в4} \rightarrow 3} + Q_{\text{вых}}, \quad (26)$$

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{в4} \rightarrow 3} + Q_{\text{вых}}, \quad (27)$$

то есть

$$Q_{2 \rightarrow 4} \approx Q_{\text{вх}}, \quad (28)$$

$$Q_{\text{в4} \rightarrow 3} \approx Q_{\text{вых}}, \quad (29)$$

Разработанное имитационное моделирование процессов работы СВГА в аварийном помещении (рис. 2) позволяет методом последовательных приближений, то есть задавая различные начальные значения, исследовать условия влияния теплообменника на газодинамику пожара, определить необходимую производительность применяемых СВГА для получения эффекта «естественной герметизации» аварийного помещения и перейти непосредственно к проектированию судовых проемов для заданного судна.

В соответствии с классической методикой проектирования, которая регламентирована требованиями Регистра Украины, проектант при разработке противопожарной и противовзрывной защиты судна обязан обеспечить:

- предупреждение возможности возникновения пожара и взрыва;

- своевременное выявление начала пожара;

- гашение пожара, который возник;

- предотвращение распространения очага и продуктов горения из аварийного помещения в смежные.

Для этого в общей системе противопожарной защиты корабля должны быть предусмотрены:

- мероприятия относительно предупреждения загораний, пожаров и взрывов;

- действия по ограничению распространения очага и дыма из аварийного помещения, а также предотвращению тяги и газового обмена со смежными помещениями;

- обеспечение путей эвакуации личного состава из аварийного помещения.

На практике при проектировании судов мероприятия относительно ограничения распространения очага и дыма из аварийного помещения, а также предотвращения тяги и газового обмена со смежными помещениями практически не реализуются по причине недостатка технических средств для этого, а те, которые применяются, громоздки по своим габаритам.

Проектирование судовых проемов с установкой системы воздушного подпора на срезе проема на базе СВГА позволит существенно усовершенствовать противопожарную систему проектируемого судна в целом и реализовать на практике требования Регистра Украины.

В итоге, практическая реализация этого метода даст возможность вести борьбу с пожаром в отсеке при открытых переборочных дверях.

**ВЫВОДЫ.** Путем решения плоской двумерной гидродинамической задачи работы струйного водогазового эжектора в полуограниченном объеме уточнен механизм распределения полей скоростей газовой

душной среды на срезе открытой стороны корабельного проема, установлена его зависимость от параметров и рабочих характеристик струйных водогазовых эжекторов, начальных характеристик газовой среды, которая эжектируется. Это позволит разработать требования к конструктивным параметрам установки на базе струйного водогазового эжектора и рассчитать ее рабочие характеристики для прогнозирования эффективности работы при проектировании общей системы противопожарной безопасности заданного судна.

Выявлены закономерности формирования воздушной завесы в дверях проектируемого судна путем управления газовой средой на участке потока. Формализованы процессы формирования воздушной завесы, полученной путем отбора части

высокотемпературных дымовых газов в корпус теплообменника (струйного эжектора), их тепломассообменной обработки и вывода назад в поток. Это, в свою очередь, позволит создать условия для проектирования судовых проемов в вертикальных ограждениях, при которых снизится выход высокотемпературных дымовых газов из аварийного помещения судна при открытых дверях.

Результаты, полученные в статье, теоретически обосновывают разработку метода проектирования корабельных проемов с применением системы местного подпора воздуха, который образуется потоком парогазовоздушной смеси, направленной в аварийный судовой отсек с помощью использования системы безискровых побудителей расхода на базе СВГА.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Азаренко О. В.** Спосіб очищення ГВС промислового приміщення від оксиду вуглецю [Текст] / О. В. Азаренко, В. П. Попов, М. М. Крастельов // Збірник наукових праць СІАЕтаП. — Севастополь : СІАЕтаП, 2001. — № 5. — С. 162–166.
- [2] **Алексашенко А. А.** Тепломассообмен при пожаре [Текст] / А. А. Алексашенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский. — М. : Стройиздат, 1982. — 175 с.
- [3] **Астапенко В. М.** Термогазодинамика пожаров в помещениях [Текст] / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков : под ред. Кошмарова Ю. А. — М. : Стройиздат, 1988. — 448 с.
- [4] **Астапенко В. М.** Межзонный газообмен при пожаре в помещении [Текст] / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, В. И. Поздняков // Системные исследования проблем пожарной безопасности : Сб. науч. тр. — М. : ВНИИПО МВД СССР, 1990. — С. 46–60.
- [5] **Батчер Е.** Опасность дыма и дымозащита [Текст] / Е. Батчер, А. Партнэлл : пер. с англ. Е. Ш. Фельдмана : под ред. В. М. Есина. — М. : Стройиздат, 1983. — 152 с.
- [6] **Галустов В. С.** Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике [Текст] / В. С. Галустов. — М. : Энергоиздат, 1989. — 240 с.
- [7] **Гайковская О. Н.** Моделирование начальной стадии пожара при работе переборки активного типа [Текст] / О. Н. Гайковская, О. В. Курипко, Е. В. Никитин // Збірник наукових праць. — Севастополь : СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2003. — № 2. — С. 129–133.
- [8] **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.
- [9] **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. — № 1 (4). — С. 238–243.
- [10] **Курипко О. В.** Повышение огнестойкости корабельных ограждающих конструкций: пути и методы исследований [Текст] / О. В. Курипко, Е. В. Никитин, Г. А. Анохин // Збірник наукових праць. — Севастополь : СВМІ ім. П.С. Нахімова, 2002. — № 1. — С. 164–169.
- [11] **Мирошниченко В. Н.** Исследование дымоограждающей и охлаждающей эффективности устройств УДП ГИБК. 065289.001 [Текст] / В. Н. Мирошниченко, В. В. Соколов, Е. Ю. Северев та ін. // Науковий вісник УкрНДІПБ. — К. : УкрНДІПБ, 2002. — № 1(5). — С. 76–82.
- [12] **Сухов А. К.** Результаты экспериментальных исследований коэффициента эжекции прямооточно-распылительного теплообменника при наличии тепломассообмена [Текст] / А. К. Сухов, И. А. Родин // Збірник наукових праць. — Севастополь : СВМІ, 1995. — С. 182–186.
- [13] **Радзиевский С. И.** Пожаробезопасность и противопожарная защита кораблей [Текст] / С. И. Радзиевский, В. М. Хнычкин. — Л. : Судостроение, 1987. — 200 с.
- [13] Требования техники безопасности к морским судам [Текст] // РД 31.81.01-87.

© В. С. Блінцов, С. О. Гринчак

Надійшла до редколегії 07.06.17

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. В. О. Некрасов