УДК 551.463.2

Е.В. Азаренко, Ю.Ю. Гончаренко, М.М. Дивизинюк, А.С. Рыжкин

РЕШЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ ПОДПОРА ВОЗДУХА В ОГРАНИЧЕННОМ НЕГЕРМЕТИЧНОМ ОБЪЕМЕ

В работе на основе анализа основных положений газодинамики, особенностей свойств реальной упругой среды – атмосферного воздуха, решается теоретическая задача создания подпора воздуха в локальном объеме. Полученное решение используется для разработки технических заданий по созданию специальных защитных помещений в системе государственной гражданской защиты.

Ключевые слова: подпор воздуха, ограниченный объем, газодинамика, уравнение Бернулли, фильтровентиляционная установка.

Введение

Аварии с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу происходят с постоянной периодичностью по всему Миру. Это Три-Айленд, Чернобыль, Фокусима [1-3]. Проблема защиты мирного населения от подобных стихийных бедствий стоит на повестке дня инженеров, ученых, военных с момента появления ядерного оружия и знакомства с его поражающими факторами [4-5]. Однако, на сегодняшний день имеются новые подходы в гражданской защите населения и территорий от радиоактивного заражения. Их суть состоит в том, что не обязательно строить громоздкие и дорогостоящие защитные сооружения. Достаточно создать специальные защитные помещения, в которые будет обеспечено поступление чистого воздуха и создание в этих помещениях подпора [6]. Техническое развязывание подобной проблемы является актуальным для Украины. Это объясняется тем, что Украина ядерная держава. На ее территории четыре атомных электростанции с 15 ядерными реакторами, десятки предприятий где используются радиоактивные материалы и складируются тысячи тонн радиоактивных отходов различной интенсивности [7]. Но любое техническое решение должно основываться на теоретических умозаключениях, в данном случае на систематизации определенных знаний в области газо- и гидродинамики и ряда положений теории упругих сред [8-12].

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является решение теоретической задачи создания подпора воздуха в ограниченном негерметичном объеме.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во - первых, проанализировать ряд классических положений в области газо- и гидродинамики. Во - вторых, рассмотреть особенности реальных распределенных упругих сред. В третьих, решить теоретическую задачу создания подпора воздуха в ограниченном негерметичном объеме.

Формулировка общих положений

Газодинамика и гидродинамика – это разделы механики, где доминируют определенные положения и законы.

Основные законы механики – это первый, второй, третий законы Ньютона и законы всемирного тяготения. Гравитация искривляет пространство, однако на Земле она ничтожна. Это позволяет на практике использовать геометрию Евклида. В тоже время гравитационные силы, не смотря на свою малую величину, играют огромную роль в гидро- и газодинамике и, соответственно, в нашей жизни.

Молекулы газа расположены далеко друг от друга и молекулярное притяжение над ними не властно. Непрерывно сталкиваясь друг с другом, молекулы газа резкими зигзагами бросаются из стороны в сторону. Барабанная дробь бесчисленных молекул о стенки сосуда создает давление. Газы не обладают ни определенной формой, ни определенным объемом – они полностью заполняют сосуды, в которых находятся.

Состояние газа определяется тремя параметрами – абсолютным давлением *P*, плотностью ρ и абсолютной температурой, которые связаны уравнением состояния (уравнение Клапейрона)

$$PV = mRT \tag{1}$$

где *R* – газовая постоянная, равная 287 Дж/(кг·К); *V* – объем сосуда; *m* – масса газа.

Методика решения всех задач в гидро и газодинамике сводится к следующему линейному алгоритму. Во-первых, необходимо записать в общем виде уравнение, выражающее законы сохранения массы и энергии при движении жидкости или газа. Во-вторых, определить слагаемые этих уравнений, согласно исходным данным. В-третьих, решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины.

При решении гидро и аэродинамических задач широко используются закон сохранения массы и закон сохранения энергии.

Энергия – это запас работы, которую может совершить тело, изменяя свое состояние. Работа – скалярное произведение силы на перемещение под действием этой силы. На практике величина работы используется для характеристики механизма или технического устройства. Энергия – это не востребованная работа, математическая абстракция, формула по которой можно вычислить максимальную работу.

Энергия проявляется в множестве различных форм. Она может определяться из закона сохранения энергии так, что при любом превращении системы полная энергия сохраняется и остается неизменной. В тоже время, разговор о системе, которая не переходит их одного состояния в другое, которая не претерпевает никаких изменений, разговор об энергии беспредметен. Только при переходе из одной формы в другую или из позиции в другую представление об энергии становится очень полезным, как средство для решения практических задач.

Механическая энергия разделяется на кинетическую E_k и потенциальную $E_П$

$$E = E_К + E_П \tag{2}$$

Кинетическая энергия – это такая форма энергии, которая связана с механическим движением и численно равна работе, которая совершается при уменьшении скорости тела от *V* до нуля, то есть

$$E_К = \frac{1}{2} mU^2 \tag{3}$$

Потенциальными называют неподвижные формы энергии, которые потенциально можно превратить в энергию движения. Потенциальная энергия жидкости и газа разделяется на два вида. Первый – это потенциальная энергия положения. Второй – потенциальная энергия давления.

Потенциальная энергия положения иллюстрируется на рисунке 1.

Твердое, жидкое или газообразное тело массой *m* занимает определенное положение в поле силы тяжести. Горизонтальная плоскость отсчета $\Delta E_{Полож}$ выбирается произвольно. Это связано с тем, что нас интересует только изменение потенциальной энергии, а не ее абсолютная величина. При переходе тела из положения 1 в положение 2 изменение потенциальной энергии $\Delta E_{Полож}$ будет равна $\Delta E_{Полож} = mqZ_2\text{-}mqZ_1=mg(Z_2\text{-}Z_1)=mq\Delta Z$ – плоскость отсчета α – α'.

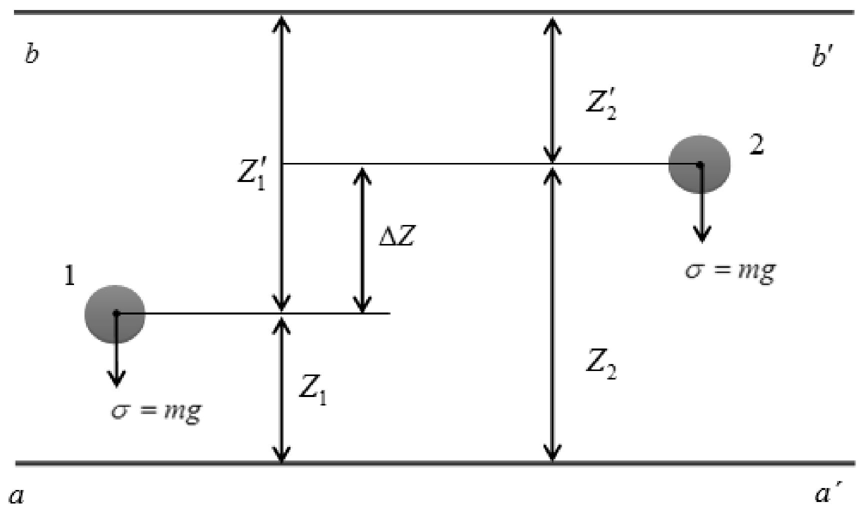

Рис.1. Схема-иллюстрация к выводу формулы потенциальной энергии

При плоскости отсчета $b - b'$ изменение потенциальной энергии составит

$$\Delta E_{Полож} = mq(-Z'_1)-mq(-Z'_2)=mg(Z'_1 - Z'_2)=mq\Delta Z$$

Другими словами, изменение потенциальной энергии не зависит от выбора плоскости отсчета. Потенциальная энергия положения численно равна работе, которую совершает сила тяжести при падении тела с высоты Z и численно равна

$$E_{Полож} = mqZ\,. \tag{4}$$

Потенциальная энергия давления и связана с сжатием жидкостей и газов. Под давлением в сжатом состоянии в газах появляется энергия упругой деформации. Состояние сжатия газа будет характеризовать избыточное давление ρ. При расширении газа он будет совершать работу, например, по перемещению поршня, как показано на рисунке 2. Сила, действующая на поршень со стороны сжатого газа будет определяться как $E=\rho S$, где ρ – давление сжатого газа;S – площадь сечения поршня ($S=1/4ПД^2$).

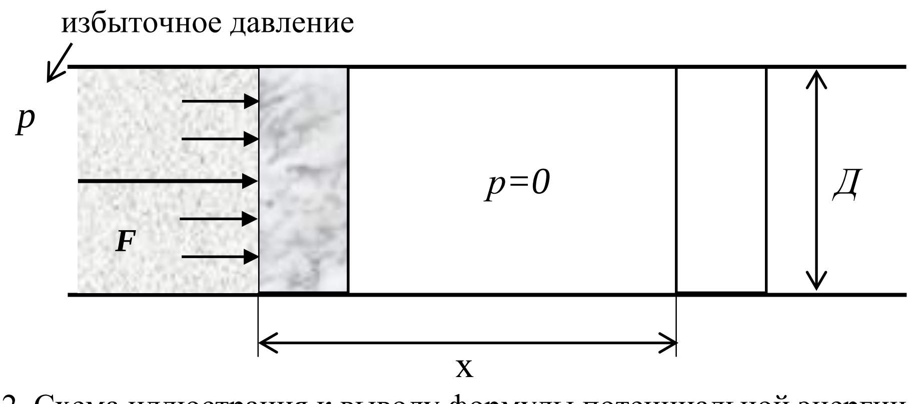

Рис. 2. Схема иллюстрация к выводу формулы потенциальной энергии давления.

Работа, совершаемая сжатым газом по перемещению поршня равна $A=F_x=pV$, где V – изменение объема газа в результате движения поршня.

С учетом того, что масса газа равна произведению объема, который он занимает V, на его плотность ρ $(m=V\rho)$, можно записать в следующем виде

$$E_{давл} = \frac{pV}{\rho} \quad (5)$$

Идеальная жидкость и идеальный газ еще обладают одним уникальным свойством, которое принято называть, как упругая среда с распределенными параметрами.

Итак, полный запас энергии объема упругой среды с распределенными параметрами m относительно нулевого уровня равен

$$E = mgZ + \frac{mp}{\rho} + \frac{mU^2}{2} \quad (6)$$

С учетом того, что в идеальной среде отсутствуют потери энергии при движении, то при прохождении упругой среды с распределенными параметрами в произвольных сечениях 1-1 и 2-2 их полные энергии должны быть равны, то есть $E_1 – E_2$. С учетом (6), определяющего запас полной энергии, справедливо

$$mgZ_1 + \frac{mp_1}{\rho} + \frac{mU_1{}^2}{2} = mgZ_2 + \frac{mp_2}{\rho} + \frac{mU_2{}^2}{2} \quad (7)$$

Уравнение (7) можно представить, как закон сохранения удельных энергий. Удельная энергия предполагает отношение полной энергии к некоторому количеству вещества, выраженному в объемах, массовых или весовых характеристиках. Так же заметим, что энергия, отнесенная к весу распределенной упругой среды, является напором, который измеряется в метрах.

После деления всех членов (7) на вес упругой распределенной среды, равный $\sigma = m \cdot g$, получим

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1{}^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2{}^2}{2g}. \quad (8)$$

Уравнение (3.18) было получено швейцарским математиком и механиком Даниилом Бернулли и носит его имя.

При расчете газо, нефте и других продуктопроводов (8) используют обычно в виде баланса энергий, отнесенных не к весу, а к объему протекающего продукта ($V=m/\rho$), то есть

$$\rho g Z_1 + p_1 + \frac{\rho U_1{}^2}{2} = \rho g Z_2 + p_2 + \frac{\rho U_2{}^2}{2} \quad (9)$$

где $\rho g Z_1$ и $\rho g Z_2$– весовые давления в поле силы тяжести сечений 1-1 и 2-2;

ρ_1 и ρ_2 – статические давления в поле силы тяжести сечений 1-1 и 2-2;

$\rho U_1{}^2/2$ и $\rho U_2{}^2/2$ – динамические давления в поле силы тяжести сечений 1-1 и 2-2.

Под статически давлением понимается напряжение сжатия в упругой среде, которые появляются в результате действия на нее сжимающих сил, а под динамическим – давление упругой среды на преграду при ее остановке и превращении кинетической энергии в энергию давления.

Особенности решения задач для реальных распределенных упругих сред.

Реальная распределенная упругая среда (жидкость или газ) в отличие от идеальной, имеет вязкость, вызванную силами молекулярного взаимодействия при сдвиге, которое проявляется как между распределенной средой и стенкой, так и между отдельными слоями распределенной среды. Вследствие этого в сечении потока скорости получаются неравномерными, как показано в эпюрах скоростей на рисунке 3.

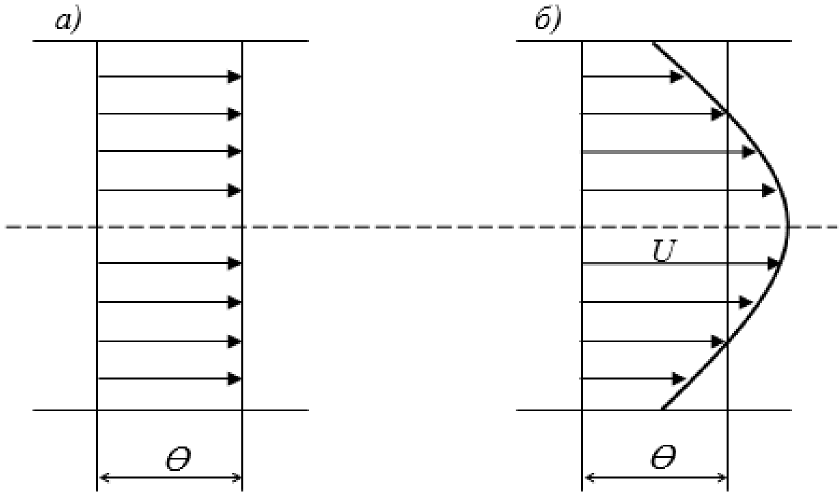

Рис. 3. Эпюры скоростей потока распределенной упругой среды:
а) идеальной; б) реальной.

Пусть U – местная скорость в сечении dS элементарной струйки в потоке, а Θ – средняя скорость в сечении потока или скорость движения всех струй в идеальной распределенной среде. Тогда объемный расход распределенной упругой среды в сечении S потока будет равен:

$$Q = \int U dS = \theta S$$

Определим действительную кинетическую энергию потока, как сумму кинетических энергий отдельных струек, то есть

$$E_K = \int dm \frac{U^2}{2} = \int \rho dQ \frac{U^2}{2} = \rho \int udS \frac{U^2}{2} = \rho t \int dS \frac{U^3}{2} \tag{10}$$

На практике удобно определять климатическую энергию потока по средней скорости. Но равна ли действительная кинематическая энергия E_k значению, рассчитываемому по средней скорости.

Пусть местная скорость элементарной струйки распределенной среды равна $U=\Theta+\varepsilon$ (сумма средней скорости потока и некоторой знакопеременной добавки). Тогда отношение значений кинетических энергий действительной и по средней скорости будет следующим

$$\frac{E_K}{m\frac{\theta^2}{2}} = \frac{Pt\int(\theta+\varepsilon)^3}{PtQ\theta^2} = \frac{\int\left(\theta^3+3\theta^2\varepsilon+3\theta\varepsilon^2+\varepsilon^3\right)dS}{Q\theta^2} =$$

$$= \frac{\int\left(\theta^3+3\theta\varepsilon^2\right)dS}{\theta^3 S} = \frac{\int\left(1+\frac{3\varepsilon^2}{\theta^2}\right)dS}{S} = 1+\int\frac{3\varepsilon^2 dS}{S\theta^2}$$

При проведении преобразований учитывалось, что при суммировании те слагаемые, куда входит знакопеременная добавка ε в нечетной степени, равен нулю. Результат преобразований показывает, что отношение больше единицы, следовательно, необходимо корректировать значение кинетической энергии, рассчитываемой по средней скорости потока.

С учетом вязкости и деформации потока уравнение Бернулли для реальной распределенной упругой среды примет вид

$$Z_1+\frac{P_1}{\rho_1 g}+\frac{\alpha_1 Q_1^2}{2g} = Z_2+\frac{P_2}{\rho_2 g}+\frac{\alpha_2 Q_2^2}{2g}+h_{1-2}. \quad (11)$$

Необходимо заметить, что (11) справедливо только для тех сечений, где элементарные струйки не искривляются и где не возникает сил инерции. Отсюда возникают два правила выбора сечений. Первое – сечения всегда выбираются перпендикулярно направлению движения. Второе – в сечениях элементарные струйки должны быть параллельны друг другу.

Решение теоретической задачи создания подпора воздуха в ограниченном негерметичном объеме.

Пусть имеется вентиляционный короб с прямоугольным сечением 1-1. По вентиляционному коробу подается упругая распределенная субстанция со средней скоростью Q_1. За время t через сечение пройдет объем субстанции, заключенный между 1-1 и 1′-1′, равный произведению средней скорости потока, площади сечения S_1 и времени, то есть $V_1=Q_1S_1t$, как показано на рисунке 4. Соответственно масса субстанции, проходящей через сечение 1-1 за время t, будет равна $m_1=\rho_1Q_1S_1t$.

Прямоугольный короб встроен в прямоугольное помещение, которое вентилируется по средствам подачи распределенной упругой субстанции в помещении. Помещение имеет определенные размеры (высоту, ширину и длину), соизмеримые с размерами вентиляционного короба. Другими словами, площадь сечения 2-2 в вентиляционном помещении отличается от площади S_1 не более, чем на один порядок.

Будем считать, что в месте сечения 1-1, как показано на схеме-иллюстрации, поток субстанции является установившемся и средняя скорость будет равна Q_2. За время t через сечение 2-2, площадь которого равна S_2, протекает объем субстанции, равный произведению площади сечения, средней скорости и времени, то есть $V_2=Q_2S_2t$. Соответственно масса субстанции, проходящей через сечение 2-2 за время t будет равна $m_2=\rho_2Q_2S_2t$.

В соответствии с законом сохранения массы следует, что $\rho_1Q_1S_1=\rho_2Q_2S_2$.

Составляя систему уравнений с учетом закона сохранения удельной энергии потока и закона сохранения массы, получим

$$\begin{cases} \rho_1 Q_1 S_1 = \rho_2 Q_2 S_2 \\ Z_1 + \dfrac{P_1}{\rho_1 g} + \dfrac{\alpha_1 Q_1^2}{2g} = Z_2 + \dfrac{P_2}{\rho_2 g} + \dfrac{\alpha_2 Q_2^2}{2g} + h_{1-2} \end{cases} \quad (12)$$

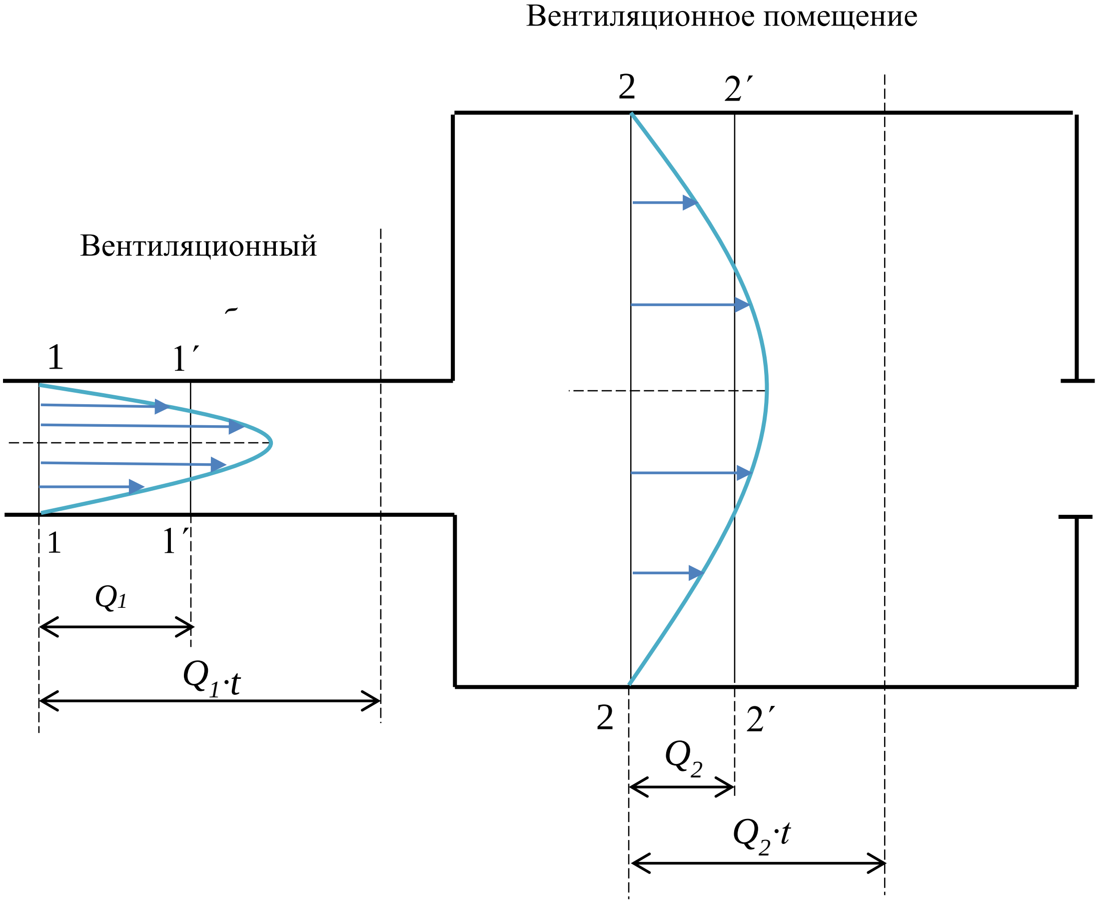

Рис. 4. Схема-иллюстрация к решению теоретической задачи, часть 1.

Однако (12) не обеспечивает решение теоретической задачи. Дополним ее исходными условиями.

Объем вентилируемого помещения является конечным. Его не герметичность можно представить в виде вытяжного короба, сечение 3-3 которого соизмеримо с сечением вдувного вентиляционного короба (рис. 5).

Осуществляя запор субстанции по коробу *a*, фильтровентиляционное устройство (ФВУ) забирает энергию от электроприводов и часть ее, равное $H_{ФВУ}$ (напор ФВУ), передает ее субстанции, подаваемой в вентиляционный короб.

С учетом этих условий система уравнений (12) примет вид

$$\begin{cases} \rho_1 Q_1 S_1 = \rho_2 Q_2 S_2 = \rho_3 Q_3 S_3 \\ H_{ФВУ} + Z_1 + \dfrac{P_1}{\rho_1 g} + \dfrac{\alpha_1 Q_1^2}{2g} = Z_2 + \dfrac{P_2}{\rho_2 g} + \dfrac{\alpha_2 Q_2^2}{2g} + h_{1-2} = Z_3 + \dfrac{P_3}{\rho_3 g} + \dfrac{\alpha_3 Q_3^2}{2g} \end{cases} \quad (13)$$

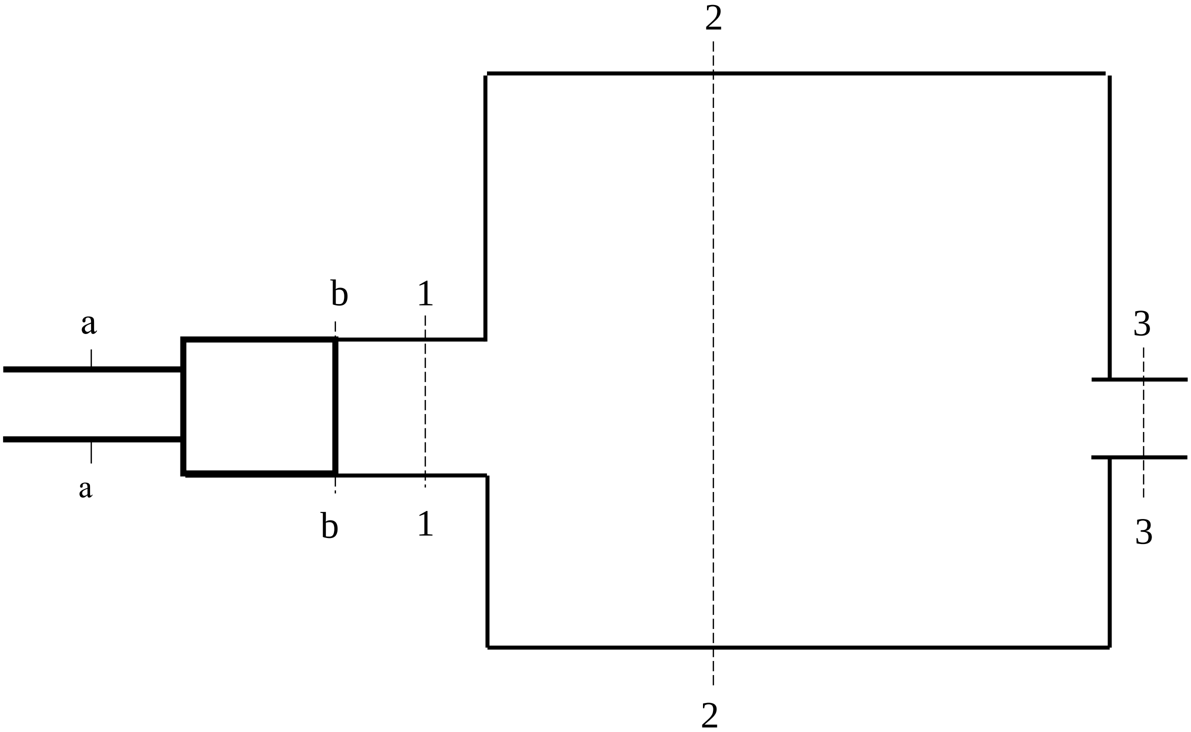

Рис 5. Схема-иллюстрация к решению теоретической задачи, часть 2.

Для решения теоретической задачи необходимо сделать еще одно уточнение. Рассматриваемая субстанция - газовоздушная среда. Главное отличие газовоздушной сплошной среды состоит в том, что она сжимаема, то есть плотность газа зависит от давления и температуры, которые связаны уравнением Клапейрона.

С учетом уравнения Клапейрона внутренняя энергия будет равна

$$\frac{P}{\rho g(n-1)} = \frac{RT}{g(n-1)}, \qquad (14)$$

где n – показатель политропы.

Теперь теоретическая задача создания подпора воздуха в помещении, вентилируемом ФВУ, сводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \rho = \dfrac{P}{RT} \\ \dfrac{P}{\rho g(n-1)} = \dfrac{RT}{g(n-1)} \\ \rho_1 Q_1 S_1 = \rho_2 Q_2 S_2 = \rho_3 Q_3 S_3 \\ H_{ФВУ} + Z_1 + \dfrac{P_1}{\rho_1 g} + \dfrac{\alpha_1 Q_1^2}{2g} = Z_2 + \dfrac{P_2}{\rho_2 g} + \dfrac{\alpha_2 Q_2^2}{2g} + h_{1-2} = Z_3 + \dfrac{P_3}{\rho_3 g} + \dfrac{\alpha_3 Q_3^2}{2g} \end{cases}$$

Выводы

Теоретическая задача создания подпора воздуха в ограниченном негерметичном помещении сводится к решению системы уравнений, описывающих закон сохранения энергии движущегося воздушного потока по ограниченным определенными сечениями воздуховодом и рассматриваемом помещении, закон сохранения массы воздуха, проходящего в единицу времени по различным сечениям, уравнением внутренней энергии сжатого воздуха и уравнением Клапейрона.

Литература

1. J. Samuel Walker. Three Mile Island: A Nuclear crisis in historical perspective. Berkley: University of California Press, 2004. – 231 p.

2. Чорнобильська катастрофа – 20 років / За редакцією В.Г. Барьяхтара. – К.: Наукова думка, 1996. – 575 с.

3. Иванов В.К. Радиологические последствия аварии на АЭС Фукусима – окончательное заключение экспертов МАГАТЭ. – М.: Российская научная комиссия по радиологической защите, 2014. – 17 с.

4. Кулаков М.А. Цивільна оборона. Харків: НТУ-ХПІ, 2005. – 125 с.

5. Харькевич А.Е. Эксплуатация убежищ гражданской обороны. – М: Стройиздат, 1970 – 202 с.

6. Рыжкин А.С. Предпосылки создания защитных помещений в административных и жилых зданиях / Е.В. Азаренко, Ю.Ю. Гончаренко, М.М. Дивизинюк, А.С. Рыжкин // Техногенна безпека 2016 №1, С. 5-12.

7. Рыжкин А.С. Особенности чрезвычайных ситуаций, приводящих к загрязнению атмосферы радиоактивными и отравляющими веществами / Ю.Ю.Гончаренко, М.М. Дивизинюк, А.С. Рыжкин // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» - Хмельницький, 2016 - № 3, С. 215-219.

8. Черняк В.Г. Механика сплошных сред. / В.Г. Черняк, П.Е.Суетин. – М.: В. школа, 1960 – 522 с

9. Подземная гидромеханика. Доступ: http//portal.tpu.ru:7777/SHARED/K/KARPOVAEG/cng/ /materials%20students/S

10. Цуренко Ю.И. Гидромеханика. Гидравлика. – Северодвинск: Севмаш ВТУЗ, 2007. – 61 с.

11. Гидромеханика. Основные понятия, законы, формулы. Доступ: http//alexandr4784.nador.ru/balasch/balasch_g106_01.pdf

12. Раикина Л.Н. Гидромеханика. Учебное пособие по решению задач. – М.: РТУ нефти и газа им. Губкина, 2005. – 119 с.

Надійшла 18.07.2016 р. Рецензент: д.т.н., проф. Рудницький В. М.