

5. Mohammed Fouad Alnahhal, Ubagaram Johnson Alengaram, Mohd Zamin Jumaat, Mamoun A. Alqedra, Kim Hung Mo, Mathialagan Sumesh. Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolanic Materials in Recycled Aggregate Concrete. Sustainability 2017, 9(5), 767; doi:10.3390/su9050767

6. Я. И. Вайсман, А. А. Кетов, П. А. Кетов. Получение вспененных материалов на основе синтезируемых силикатных стекол. // Журнал прикладной химии. 2013. Т. 86, № 7- С. 1016-1021. [Vaisman Ya. I., Ketov A. A., Ketov P. A. Production of foamed materials from synthesized silicate glasses. Russian Journal of Applied Chemistry 2013, 86 (7), pp

952–957;

<https://doi.org/10.1134/S1070427213070021>].

7. Я. И. Вайсман, А. А. Кетов, Ю. А. Кетов, Р. А. Молочко. Эффект окисления углерода парами воды при гидратном механизме газообразования при получении ячеистого стекла // Журнал прикладной химии. 2015. Т. 88, № 3- С. 118 - 121. [Vaisman Ya. I., Ketov A. A., Ketov Yu. A., Molochko R. A. Oxidation of carbon by water vapor in hydrate gas-formation mechanism in manufacture of cellular glass. Russian Journal of Applied Chemistry 2015, 88 (3), 382–385; <https://doi.org/10.1134/S1070427215030039>]

УДК 622.454:622.016.62

ГРНТИ 52.01.77

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ ШАХТЫ

DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.72.616](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.72.616)

Леонов Р.Е.

*кандидат технических наук, профессор кафедры
Автоматики и компьютерных технологий*

*Уральского государственного горного университета,
г. Екатеринбург, 620144, ул. Куйбышева, 30*

THE MODEL OF THE DISTRIBUTION OF AIR FLOW IN THE MINE SHAFT

Leonov R.E.

*Candidate of Technical Sciences, Professor,
Department of Automation and Computer Technology
Ural State Mining University,
Ekaterinburg, 620144, st. Kuybysheva, 30*

АННОТАЦИЯ

При некоторых допущениях общего характера составлено дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка относительно концентрации воздуха в выработанном пространстве шахты для прямоточной схемы вентиляции. Сформулированы граничные условия и на их основе получено аналитическое решение уравнения распределения воздуха утечек. Получена трехмерная визуализация распределения воздуха утечек без учета и с учетом подпитывающей воздушной струи.

ANNOTATION

Under some assumptions of a general nature, a partial differential equation of the second strand is compiled with respect to the air concentration in the mine shaft for a direct-flow ventilation circuit. Boundary conditions are formulated and on their basis an analytical solution to the leakage air distribution equation is obtained. Received three-dimensional visualization of air distribution.

Ключевые слова: утечки воздуха, математическая модель, распределения воздуха, граничные условия, выработанное пространство, трехмерная визуализация.

Keywords: air leakage, mathematical model, air distribution, boundary conditions, worked out space, three-dimensional visualization.

Введение

Вопросам движения воздуха через пористое пространство посвящено много исследований. В первую очередь здесь надо отметить основополагающую работу Л.С. Лейбензона [1], которая помимо большого теоретического значения имела и практическое значение в виде формул по расчёту дебита газа из нефтяных скважин, работу В.И. Аравина и С.Н. Нумерова [2], основанную на теоретических разработках [1], работы по рудничной аэрологии [3 - 6].

Во многих из этих исследований рассматривается движение газа в нефтяных скважинах. В то же время при рассмотрении режимов проветривания имеются особенности, которые определяют отличия проветривания рудников и шахт от истечения газа в нефтяных скважинах. Отличия связаны с утечками подаваемого на проветривание воздуха через конструктивные элементы и выработанное пространство [7]. Кроме того воздух на проветривание подаётся принудительно вентиляционными установками (в отличие от газа

нефтяных месторождений), воздух утекает через большое пространство обрушенной породы, в то время как газы нефтяных месторождений транспортируются через скважины несоизмеримо меньшие по геометрическим размерам. Наконец режимы выделения газа и подаваемого принудительно на проветривание воздуха совершенно различны.

Все это привело к развитию большого количества исследований движения воздуха в выработанном пространстве рудников и шахт, которое продолжается и в настоящее время [9]. В этих исследованиях [10,11] значительное внимание уделено коэффициенту фильтрации и применимости закона Дарси, устанавливающего линейную зависимость расхода воздуха через пористую среду от напора, вызывающего движение воздуха [6].

Следует отметить универсальность закона Дарси [12]. Однако ряд авторов считает, что зависимость, расхода воздуха от напора определяется местными условиями горных предприятий и имеет более сложный вид. Вид зависимости по их исследованиям связан с числом Рейнольдса и может быть степенным [1, 11]

$$W = \frac{V}{\sqrt{K}} \left(\frac{gK\sqrt{K}}{V^2 B_1} \right)^{1/s} \quad (1)$$

где $S = 2$ при турбулентной фильтрации;

W – скорость фильтрации (остальные составляющие (1) константы), либо по мнению других исследователей зависимость скорости фильтрации от расхода воздуха в зоне обрушения носит квадратичный характер [3,4,10]

$$h = a*Q + b*Q^2 \quad (2)$$

где h – сопротивление фильтрационной среды, Q – расход воздуха, a, b – константы.

Учитывая, что все авторы отмечают вид зависимости фильтрации воздуха через выработанное пространство от числа Рейнольдса, предложены различные методы расчёта числа Рейнольдса. При этом все считают, что число Рейнольдса можно установить только на основе эксперимента в конкретных условиях, расчётные выражения для коэффициента фильтрации, применённые на конкретном объекте исследований, дают разные результаты и в связи с этим рекомендуют эмпирические и полуэмпирические формулы для расчёта числа Рейнольдса и коэффициента фильтрации.

В то же время общие условия транспортирования воздуха через выработанное пространство исследованы недостаточно.

Целью данной работы является:

На основании общетеоретических данных и при некоторых допущениях получить аналитическое выражение для движения воздуха через выработанное пространство, сформулировать граничные условия для уравнений, описывающих фильтрацию флюида при принятых допущениях, создать визуализацию расхода воздуха в выработанном пространстве.

Методика исследования.

Выполненные исследования основаны на примере схемы подачи воздуха, приведённой на Рис.1 [13].

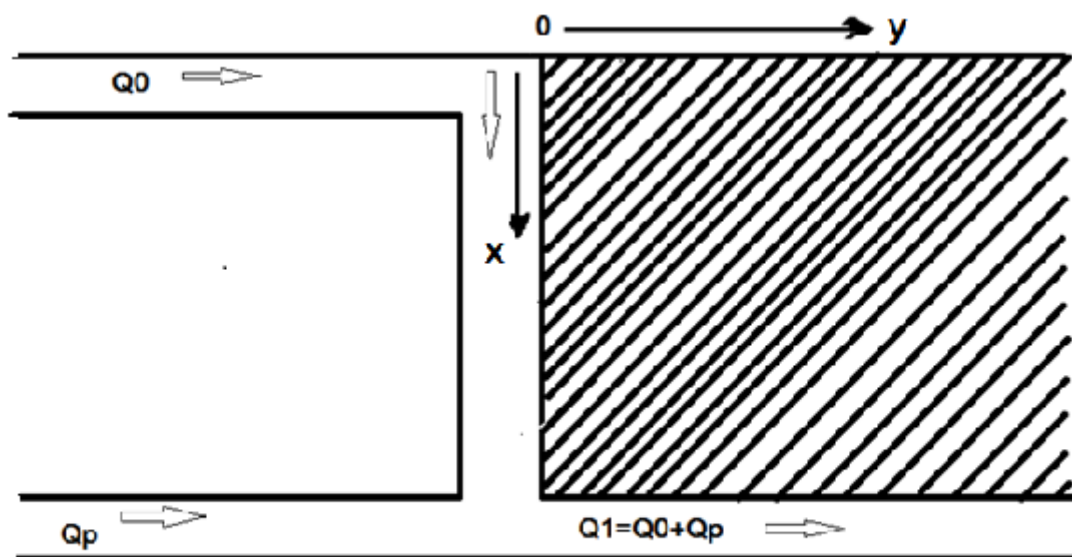


Рис.1.Схема воздушных потоков

Далее рассмотрен установившийся режим движения воздуха. При этом воздушный поток изменяется вдоль вентиляционного штрека.

Последнее связано с тем, что из входящей струи Q_0 при движении её вдоль лавы часть воздушного потока уходит в выработанное пространство и

затем, двигаясь в пространстве в том числе и в направлении вентиляционного штрека, добавляется к подпитывающей струе Q_p . Часть воздушного потока Q_0 , которая уходит выработанное пространство вдоль линии своего передвижения не остаётся постоянной.

Задача состоит в определении величин этого воздушного потока вдоль вентиляционного штрека с учётом Q_p , части Q_0 , которая ответвилась в выработанное пространство и остаточной части входящего потока воздуха Q_0 .

Рассмотрим систему координат с началом в точке О (см. рис.1) с осями координат x, y, z , причём ось z направлена перпендикулярно плоскости рис.1.

Выделим в пространстве малый элемент с координатами x, y, z , и сторонами dx, dy, dz . При промышленном давлении воздуха, подаваемого на проветривание, накоплением воздуха в выделенном элементе за счёт сжатия можно пренебречь. Можно также пренебречь выходом воздуха из выделенного элемента в направлении оси oz , так как отсутствует градиент давления в этом направлении – перпендикулярно плоскости рис.1.

Кроме этого ниже рассматривается стационарный режим и следовательно отсутствует изменение расхода в выделенном элементе во времени. Наконец, в первом приближении далее не учитывалось, что в выработанное пространство возможно некоторое ответвление воздуха подпитки. Обозначим расход воздуха, поступающего в выделенный элемент $Q(x, y)$, где (x, y) текущие координаты.

Неоднократно указывалось, что движение воздуха при стационарном режиме в первом приближении является аналогичным фильтрации жидкости через пористый слой и может быть описано законом Дарси [14]

$$Q = -K \frac{\partial p}{\partial l} \quad (3)$$

где Q – расход воздуха, пропорциональный скорости фильтрации,

K – коэффициент фильтрации,

$\partial p / \partial l$ – градиент давления в направлении фильтрации.

В данном случае скорость фильтрации пропорциональна расходу воздуха в точке (x, y) выработанного пространства. В действительности, как не однократно указывалось, на различных участках выработанного пространства может наблюдаться линейный, квадратичный и даже двучленный закон фильтрации [4]. Более того, так как, например, при двучленном законе в формулу входит больше параметров, подгонка формулы под реально наблюдаемые данные должна автоматически быть более точной. Ясно, что при дальнейшем усложнении формулы модели фильтрации и вводе в неё большего количества параметров будет получено ещё лучшее совпадение с экспериментальными данными.

Не отрицая безусловную практическую полезность более сложных, чем закон Дарси, моделей фильтрации, следует отметить, что усложнение расчётного закона фильтрации не основано на каких-либо теоретических положениях. Учитывая изложенное, далее принята линейная модель фильтрации. При этом предполагалось, что коэффициент сопротивления, а следовательно и коэффициент фильтрации обрушенного массива – это некоторый усреднённый по различным участкам пространства коэффициент, устанавливающий в среднем линейное соотношение между расходом воздуха и перепадом давления, вызывающим перемещение воздуха.

Такое представление, не претендуя на большую точность, позволяет наглядно представить воздушные потоки в выработанном пространстве. Кроме того, при малых скоростях движения воздуха можно пренебречь вторым членом в двучленной формуле и тогда это уравнение будет тождественно закону Дарси [3].

Считая коэффициент фильтрации в направлении всех осей координат одинаковым и равным k , пренебрегая перемещением воздуха в направлении oz ввиду отсутствия изменения градиента давления в этом направлении, учитывая принятую стационарность рассмотрения процесса фильтрации, пренебрегая изменением плотности воздуха, можно получить общее описание процесса фильтрации воздуха в направлении осей ox и oy в выработанном пространстве.

При принятых допущениях общая модель фильтрации воздуха с математической точки зрения аналогична модели диффузии и теплопроводности [12] и описывается уравнением Лапласа

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial Y^2} = 0 \quad (4)$$

Для получения решения (4) следует определить граничные условия.

Из физических соображений ясно, что при $x=y=0$ $Q(x, y) = Q_0$. В выработанное пространство может уходить 30-70% потока Q_0 [6,15,17,18]. Следовательно, при $x = L, y = 0$, $Q(x, y) = (0,3 \div 0,7) * Q_0$, где L – длина лавы. В дальнейших расчётах для проверки модели принято $L = 300$ м. Остаток начального потока в конце лавы принят $Q(L, 0) = 0,4 * Q_0$.

Проведённые в [16] расчёты показывают, что при длине выработанного пространства примерно в два раза больше длины лавы, выход воздуха в вентиляционный штрек практически равен нулю. В дальнейшем принято, что при длине выработанного пространства, равном L $Q(x, y) = 0,05 Q_0$. При сформулированных граничных условиях для решения (4) используем метод Фурье. Будем искать решение в виде

$$Q(x, y) = U(x) * V(y) \quad (5)$$

Из (4) и (5) следует

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} * V(y) \quad (6) \qquad V * \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = -U \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \quad (8)$$

Или

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} * U(x) \quad (7) \qquad \frac{1}{U} * \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} = -\frac{1}{V} * \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \quad (9)$$

Подставляя (6),(7) в (5), получим

Так как левая часть (9) зависит только от X, а правая только от Y, то это возможно только если обе эти части равны одной и той же постоянной величине C^2 . Разделяя уравнение (9) на два отдельных уравнения и интегрируя каждое из них, получим общее решение

$$Q(X,Y) = (C1 * \exp(C * X) + C2 * \exp(-C * X)) * (B1 * \cos(C * Y) + B2 * \sin(C * Y)) \quad (10)$$

Из условия, что расход воздуха в питающей струе не может быть равен бесконечности, получаем $C1=0$. Учитывая изложенное получаем при $X=Y=0$ в начале лавы $C2*B1=Q_0$ и снижение первоначального расхода на уровне вентиляционного штрэка до 40% от первоначального

$Q_0 * \exp(-C * X) * \cos(C * Y) = 0.4 * Q_0$ при $Y=0$ и $X=L$, находим $C = \ln(0.4)/300 = 0.0031$.

Используя условие, что при длине выработанного пространства, равном L на уровне вентиляционного штрэка равном L $Q(x,y) = 0.05Q_0$

$$Q(x,y) = Q_0 * \exp(-0.0031 * x) * (\cos(0.0031 * y) - 0.6 * \sin(0.0031 * y)) \quad (11)$$

В дальнейшем использовано выражение (11) для построения картины распределения расхода воздуха в выработанном пространстве.

Изменяя координаты $0 \leq X \leq L$, $0 \leq Y \leq 300$ получим картину распределения потоков воздуха в пространстве. Изменяя $0 \leq Y \leq 300$ при $X=L=300$ м. и учитывая Q_p , получим распределение расхода воздуха в вентиляционном штрэке

$$Q_{ob} = Q(0,L) + Q_p.$$

Ниже на Рис.2 приведена визуализация распределения расхода воздуха в пространстве при расходе подаваемого основного воздуха 4000 куб.м/мин. и дополнительного воздуха по вентиляционной выработке 2000 куб.м./мин.

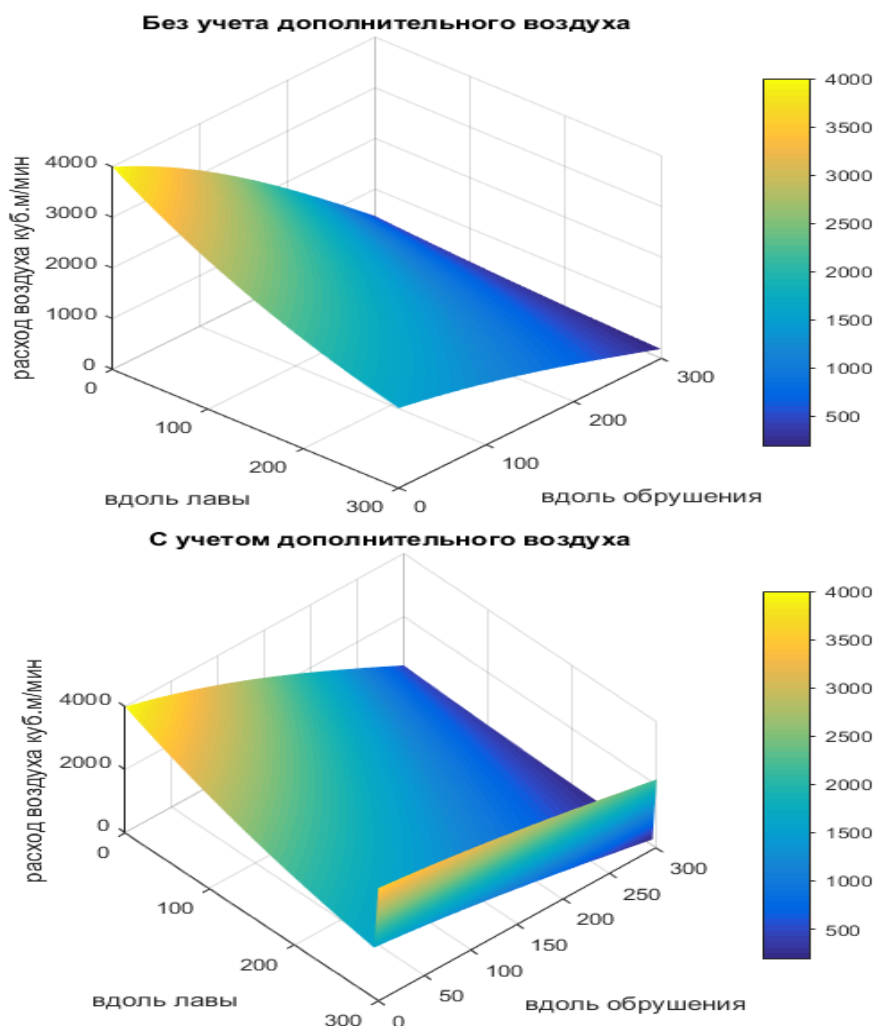


Рис.2. Визуализация распределения воздуха в пространстве

Выводы.

На основании проведенных исследований сформулированы граничные условия уравнений Лапласа, описывающих расход воздуха утечек в выработанном пространстве шахт и получено выражение, описывающее зависимость расхода воздуха в пространстве от координат точек выработанного пространства, а также выражение для расхода дополнительного воздуха с учётом частичного возврата воздуха из выработанного пространства в вентиляционный штрек. Построена на конкретном примере визуализация распределения воздуха в выработанном пространстве шахты и в вентиляционном штреке.

Литература

1. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. - М-Л. ОГИЗ, 1947 г. - 214 с.
2. Аравин В.Н., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в недеформируемых пористых средах. - М.: Гостехтеориздат, 1956 г. - 618 с.
3. Абрамов Ф.А. Рудничная аэродинамика. - М.: Недра, 1972 г. - 274 с.

4. Алехичев С.П., Вассерман А.Д. Воздухораспределение в рудниках с зонами обрушения. - Л.: Наука, 1973 г. - 84 с.

5. Пучков Л.А. теоретические основы рудничной аэрологии. Ч.1. Общая аэродинамика. - М.: Изд МГИ, 1977 г. - 87 с.

6. Алехичев С.П. Основные вопросы проветривания на горных рудниках с большими площадями зон обрушения. Докт дисс., фонды СГИ, - 1972 г. - 276 с.

7. Милетич А.Ф. Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт - М.: Недра, 1968 г. - 146 с.

8. Абрамов Ф.А., Грецингер В.Е., Соболевский В.В., Шевелнев Г.А. Аэродинамика выемочного участка. Сборник. Изд. Наукова Думка, К., 1972 г. - 236 с.

9. Бунько Т.В., Кокоулин И.Е., Головкин С.А. Обобщенный алгоритм расчета утечек воздуха через выработанное пространство для различных схем проветривания выемочных участков. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2013. — Вип. 108. — С. 143-151.

10.

https://studopedia.ru/3_73876_ploskoradialniy-

filtratsionniy-potok-neszhimaemoy-zhidkosti-i-gaza-po-dvuchlennomu-zakonu-filtratsii.html 23.10.2019

11. https://studopedia.su/14_69625_formuli-filtratsii.html 23.10.2019

12. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. - Л.: Химия, 1968 г. - 824 с.

13. Шувалов Ю.В., Павлов И.А., Веселов А.П. Комплексное использование ресурсов и регулирование газового режима шахт Воркутинского месторождения. - СПб, Изд. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы. - 2006 г. - 302 с.

14. <https://rengm.ru/rengm/zakon-darsidvizhenie-zhidkosti-i-gaza-v-sisteme.html> 27.10.2019

15. https://studopedia.ru/5_118785_utechki-cherez-virabotannoe-prostranstvo.html 27.10.2019

16. <http://geotm.dp.ua/attachments/article/1943/sb10811.PDF> 27.10.2019

17. k-ru.ru/s6973t15.html 28.10.2019

18. Порцевский А.К. Вентиляция шахт, Аэрология карьеров. Аэрология горных предприятий. - М.: Изд. Московский государственный открытый университет. - 2004 г., 71 с.

Literature

1. Leibenzon L.S. The movement of natural liquids and gases in a porous medium. - M-L. OGIZ, 1947 - 214 p

2. Aravin V.N., Numerov S.N. The theory of the movement of liquids and gases in non-deformable porous media. - M: Gostekhteorizdat, 1956 - 618 p.

3. Abramov F.A. Mine aerodynamics. - M.: Nedra, 1972 - 274 p.

4. Alekhichev S.P., Wasserman A.D. Air distribution in mines with collapse zones. - L.: Science, 1973 - 84 p.

5. Puchkov L.A. theoretical foundations of mine aerology. Part 1. General aerodynamics. - M.: MGI Publishing House, 1977 - 87 p.

6. Alekhichev S.P. The main issues of ventilation in mountain mines with large areas of caving zones. Doctoral diss., Funds of the State Property Institute, - 1972 - 276 p.

7. Miletich A.F. Air leaks and their calculation during ventilation of mines - M: Nedra, 1968 - 146 s.

8. Abramov F.A., Grezinger V.E., Sobolevsky V.V., Shevelov G.A. Aerodynamics excavation site. Collection. Ed. Naukova Dumka, K.: 1972 - 236 p.

9. Bunko T.V., Kokoulin I.E., Golovko S.A. A generalized algorithm for calculating air leaks through a mined-out space for various ventilation schemes for excavation sites. Geotechnical Mechanics: Mezhd. Sat scientific tr - Dnepropetrovsk: IGTM NASU, 2013. - VIP. 108. - S. 143-151.

12. Batuner L.M., Pozin M.E. Mathematical methods in chemical engineering. - L.: Chemistry, 1968 - 824 p.

13. Shuvalov Yu.V., Pavlov I.A., Veselov A.P. Integrated use of resources and gas regulation of the mines of the Vorkuta deposit. - St. Petersburg, Publ. International. Academy of Ecology, Human Security and Nature. - 2006 - 302 s.

18. Portsevsky A.K. Mine ventilation, Aerology quarries. Aerology of mining enterprises. - M.: Ed. Moscow State Open University. - 2004, 71 c.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА НА ЕГО БЕЗОПАСНОСТЬ"

Представлен инженерный подход к оценке последствий подводного разрыва и оценка структурной целостности подводного заглубленного трубопровода.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.72.617

Л.В. Муравьева¹, И.Г. Овчинников²

¹Саратовский государственный технический университет,
г. Саратов, Политехническая ул., 77

²Тюменский индустриальный университет,
г. Тюмень, ул. Республики, 47

Саратовский государственный технический университет,
г. Саратов, ул. Политехническая, 77

AN ENGINEERING APPROACH TO ASSESSING THE CONSEQUENCES OF AN UNDERWATER EXPLOSION AND EVALUATING THE STRUCTURAL INTEGRITY OF AN UNDERWATER BURIED PIPELINE IS PRESENTED.

L. V. Muravieva¹, I. G. Ovchinnikov²

¹ Saratov state technical University, Saratov,

² Tyumen industrial University,
Tyumen, Republic street, 47;

Saratov state technical University,
Saratov, Polytechnic street, 77

АННОТАЦИЯ

Введение: Производительность систем нефте и газопроводов при эксплуатационных и природных нагрузках является важным инженерным показателем. В настоящее время энергетические ресурсы и методы их транспортировки улучшились. У нас есть обильные поставки природного газа и нефти; атомные