

УДК 378.147.88

**ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА В ПОДГОТОВКЕ ГОРНЫХ ИНЖЕНЕРОВ**

© *Налисько Н.Н.*

*Українська інженерно-педагогічна академія,*

**Информация об авторе:**

**Налисько Микола Миколайович:** ORCID: 0000-0003-4039-1571; [05075442732@mail.ru](mailto:05075442732@mail.ru);  
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии горного производства и охраны труда;  
Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Для изучения процесса горения и взрыва метановоздушной среды, а также формирования и распространения ударных воздушных волн в горных выработках разработана интерактивная программа VL-MCE 1.0 – виртуальная лаборатория моделирования горения и взрыва. В статье раскрыта роль и значение применения виртуальной лабораторий в изучении горных дисциплин из цикла промышленной безопасности и охраны труда. Дидактическая составляющая использования VL-MCE 1.0 состоит в непосредственной оценке студентом параметров рассматриваемых процессов в зависимости от начальных условий, это позволяет сформировать проектировочные функции в деятельности горного инженера а также знания на уровне ПС (продуктивно-синтетические) и выработать знаково-умственные и знаково-практические профессиональные умения на уровне С (самостоятельно).

**Ключевые слова:** виртуальная лаборатория, газодинамический процесс, визуализация результатов расчета, проектировочные функции, профессиональные умения.

**Налисько М.М.** «Віртуальна лабораторія вивчення процесів горіння і вибуху в підготовці гірничих інженерів»

Для вивчення процесу горіння і вибуху метаноповітряної середовища, а також формування та розповсюдження ударних повітряних хвиль в гірських виробках розроблена інтерактивна програма VL-MCE 1.0 - віртуальна лабораторія моделювання горіння і вибуху. У статті розкрито роль і значення застосування віртуальної лабораторій у вивченні гірських дисциплін з циклу промислової безпеки та охорони праці. Дидактична складова використання VL-MCE 1.0 полягає в безпосередній оцінці студентом параметрів розглянутих процесів в залежності від початкових умов, це дозволяє сформулювати проектувальні функції в діяльності гірничого інженера а також знання на рівні ПС (продуктивно-синтетичні) і виробити знаково-розумові та знаково-практичні професійні вміння на рівні С (самостійно).

**Ключові слова:** віртуальна лабораторія, газодинамічний процес, візуалізація результатів розрахунку, проектувальна функція, професійні вміння.

**Nalisko M.** «The Virtual Laboratory of Studying Combustion and Explosion Processes in Teaching Mine Engineers»

The author described designed interactive program VL-MCE 1.0, that is a virtual laboratory of combustion and explosion modeling for studying a process of combustion and explosion of methane-air atmosphere, and also formation and propagation of shock air waves in mine workings. In the article there has been observed the role and significance of a virtual laboratory in studying mining disciplines from the cycle of industrial and labor safety. The didactic component of using VL-MCE 1.0 lies in direct estimation by a student of considered processes parameters in dependence of initial conditions. This allows to form project functions in the activity of a mine engineer, and also knowledge on the ES level (effectively-synthetic) and develop indicative-mental and indicative-practical professional skills on the S level (self-dependently).

**МЕТОДИКА НАВЧАННЯ**

**Key words:** virtual laboratory, gas-dynamic process, visualization of computation results, project functions, professional skills.

**Постановка проблеми.** Качественное выполнение студентами лабораторно-практической части учебного плана является необходимым условием подготовки квалифицированного специалиста. В современных тяжелых экономических условиях обновление лабораторной базы учебных заведений является актуальной проблемой. Одно из решений этой проблемы состоит в разработке и использовании виртуальных лабораторий.

Для некоторых прикладных дисциплин которые изучают процессы с экстремальными параметрами (высокие и низкие температура и давление, взрывные и быстропротекающие процессы, высокие напряжения, опасные химические вещества) проведение лабораторных работ весьма затруднено и использование виртуальных лабораторий является единственно возможной формой получения практических навыков исследований соответствующих явлений [1, 2].

В подготовке горного инженера значительное место занимают прикладные дисциплины одним из объектов которых являются процессы взрыва и горения. К ним относятся дисциплины "Охрана труда в отрасли", "Горноспасательное дело", "Разрушение горных пород взрывом", "Предупреждение и ликвидация аварий на горных предприятиях", "Теория горения и взрыва", "Взрывозащита горных выработок" и др. Для практического изучения взрывов конденсированных ВВ (промышленных взрывчатых веществ), еще в период существования СССР, взрывные камеры имели только три горных ВУЗа: в Москве, Донецке и Новосибирске. Для изучения взрывов газовых и газопылевых смесей учебные лаборатории (ударные трубы) в системе горного образования отсутствовали как в прошлые времена, так и в настоящее время. Поэтому, разработка компьютерных программ, моделирующих горение и взрыв газовых смесей позволит выйти на новый более качественный уровень в подготовки горных инженеров-педагогов и изучении взрывных процессов в целом.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известно, что виртуальные лаборатории делятся на программы для визуализации известных явлений или объектов (качественные) и программы для расчета параметров явлений, процессов или работы объектов (количественные) [3, 4]. Особое место среди последних занимают программы, позволяющие проводить численный эксперимент, т.е. программы, очень точно моделирующие поведение объектов или процессов. Такие программы разрабатываются и используются в основном в научных целях. В принципе они являются идеальным инструментом обучения, но в связи со сложностью математических моделей процессов горения и взрыва такие программы реализуются на специальных мощных аппаратно-программных комплексах и практически не имеют блоков визуализации динамической картинки процесса. Например, в работе [5] приводятся результаты численного моделирования распространения детонационных волн в профилированных каналах на многопроцессорной технике. Выполнение расчета производится на специальных мощных суперЭВМ, расчет занимает не менее 10 ч. Визуализация выполняется в виде иллюстраций состояния системы в различные моменты времени, которые строятся по результатам расчетов.

Для учебных целей по возможности применения в рассматриваемой области, ближе всего находится программный комплекс FlowVision. Модуль позволяет моделировать сложные движения жидкости и газа, включая течения с сильной турбулентностью, горением, течением со свободной поверхностью [6]. Программа имеет достаточно развитый блок визуализации, в котором расчетная область заполняется цветной заливкой со сплошным градиентом цвета. Цветовая гамма зависит от величины расчетного параметра: скорости потока, температуры, ускорений и др. Для количественной оценки расчета приводится цветовая шкала. Однако визуальный результат расчета выводится в виде статической картинки или их набора для различных моментов времени. Так же недостатком

**МЕТОДИКА НАВЧАННЯ**

программи с точки зрения применения в учебных целях является то, что интерфейс программы реализуется через элементы программирования, для освоение которого необходимо задалживать аудиторные часы прикладных дисциплин, а модель горения не вполне соответствует условиям, возникающим в горных выработках.

**Цель работы.** Раскрыть роль и значение применения виртуальной лабораторий VL-MSE 1.0 в изучении горных дисциплин из цикла промышленной безопасности и охраны труда. Качественная оценка повышения эффективности подготовки горного инженера при использовании виртуальных лабораторий.

**Изложение основного материала.** Дидактическое обеспечение изучения теоретического курса горных дисциплин из цикла промышленной безопасности и охраны труда имеет достаточный объем. По дисциплинам "Охрана труда в отрасли", "Горноспасательное дело", "Разрушение горных пород взрывом" имеются учебники, по дисциплинам "Предупреждение и ликвидация аварий на горных предприятиях", "Теория горения и взрыва", "Взрывозащита горных выработок" учебные пособия и конспекты лекций. Лабораторно-практический курс обеспечивается за счет издания собственных вузовских методических указаний. Тематика процессов горения и взрыва в этих дисциплинах, как правило ограничивается проведением практических занятий. Для горных специальностей по указанным тематикам (согласно требованиям квалификационной характеристики) необходимо формирование проектировочной функции в деятельности горного инженера, что очень трудно развить без лабораторного практикума. Лабораторные работы позволяют сформировать знания на уровне ПС (продуктивно-синтетические) и выработать знаково-умственные и знаково-практические профессиональные умения на уровне С (самостоятельно).

Такой подход обоснован, по крайней мере, по двум причинам: 1) горное предприятие изначально относится опасному виду производств, в т.ч. по взрывам газа и пыли. Наличие у выпускника-специалиста знаний и умений достаточно высокого уровня по количественной оценке опасностей производства жизненно необходимо в этой области. Об этом может свидетельствовать и недавняя широкомасштабная авария на нефтехранилище "БРСМ-Нафта", обобщенной причиной которой стала недооценка опасности этого вида деятельности. Ведь нельзя сказать, что инженерный и руководящий персонал не имел знаний по опасным факторам данного вида производства. Катастрофические последствия произошли из-за недооценки правил промышленной безопасности; 2) выпускники стационара, горные инженеры-педагоги которые приходят работать в учебные заведения имеют меньше возможностей по скорейшему формированию профессиональных навыков в горном производстве, т.к. имеют меньший контакт с производственными процессами по сравнению с инженерами горного предприятия. При этом в отличие от специалистов других областей, например, сварочного производства или машиностроения, они не сталкиваются с аналогичными процессами производства в быту или другой сфере деятельности. Поэтому на стадии обучения требуется формирование максимально уровня специализированно-профессиональных компетенций специалиста, в т.ч. на лабораторных занятиях.

Для изучения процессов горения и взрыва метановоздушной среды, а также формирования и распространения ударных воздушных волн в горных выработках разработана интерактивная программа VL-MSE 1.0 – виртуальная лаборатория моделирования горения и взрыва. Сложность в разработки модели состоит в том, что в одной системе необходимо объединить два процесса: процесс химической кинетики горения и взрыва метановоздушных смесей, который представляют зависимостями физической химии и процесс формирования и распространения ударных воздушных волн, который описывается законами газовой динамики. До настоящего времени эти процессы рассматривались как самостоятельные задачи. В разработанной виртуальной лаборатории выполнено совместное решение этих задач в единой расчетной сетке методом крупных частиц.

## МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

Для решения поставленной задачи была произведена модификация метода крупных частиц для возможности ведения расчета в гетерогенной газовой среде.

Задача решалась путём использования методов численного счёта уравнений гидродинамики в системе "газовая взрывчатая среда – окружающая среда" [7]. Движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера (в дивергентном виде):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) &= 0, & \text{неразрывности;} \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{движения;} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(P W) = 0, \quad \text{энергии;}$$

где  $\rho$  – плотность;  $P$  – давление;  $W$  – скорость;  $u, v$  – компоненты скорости  $W$  по оси  $z$  и  $r$  соответственно;  $z, r$  – цилиндрические координаты;  $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$  – полная энергия.

Для замыкания этой системы используются уравнение состояния (УРС) среды. В качестве УРС продуктов взрыва и рудничной атмосферы используется уравнение состояния идеального газа:

$$P = (\gamma - 1) \rho \cdot J \quad (2)$$

где  $J$  – внутренняя энергия;  $\gamma$  – показатель адиабаты;  $\rho$  – плотность газа.

Таким образом, система уравнений (3) является замкнутой и полностью описывает среду при решении газодинамических задач.

Поскольку формирование избыточного давления при взрыве определяется скоростью тепловыделения, то для ее расчета предлагается использовать уравнения химической кинетики газофазных реакций горения в форме Аррениуса [8]:

$$Q = q \cdot c_1^n \cdot c_2^m \cdot k(T), \quad (3)$$

где:  $q$  – тепловой эффект реакции, кДж/моль;  $c_1, c_2$  – концентрации компонентов смеси (метан, кислород);  $n, m$  – порядок реакции;  $k(T)$  – константа скорости химической реакции:

$$k(T) = Z \exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

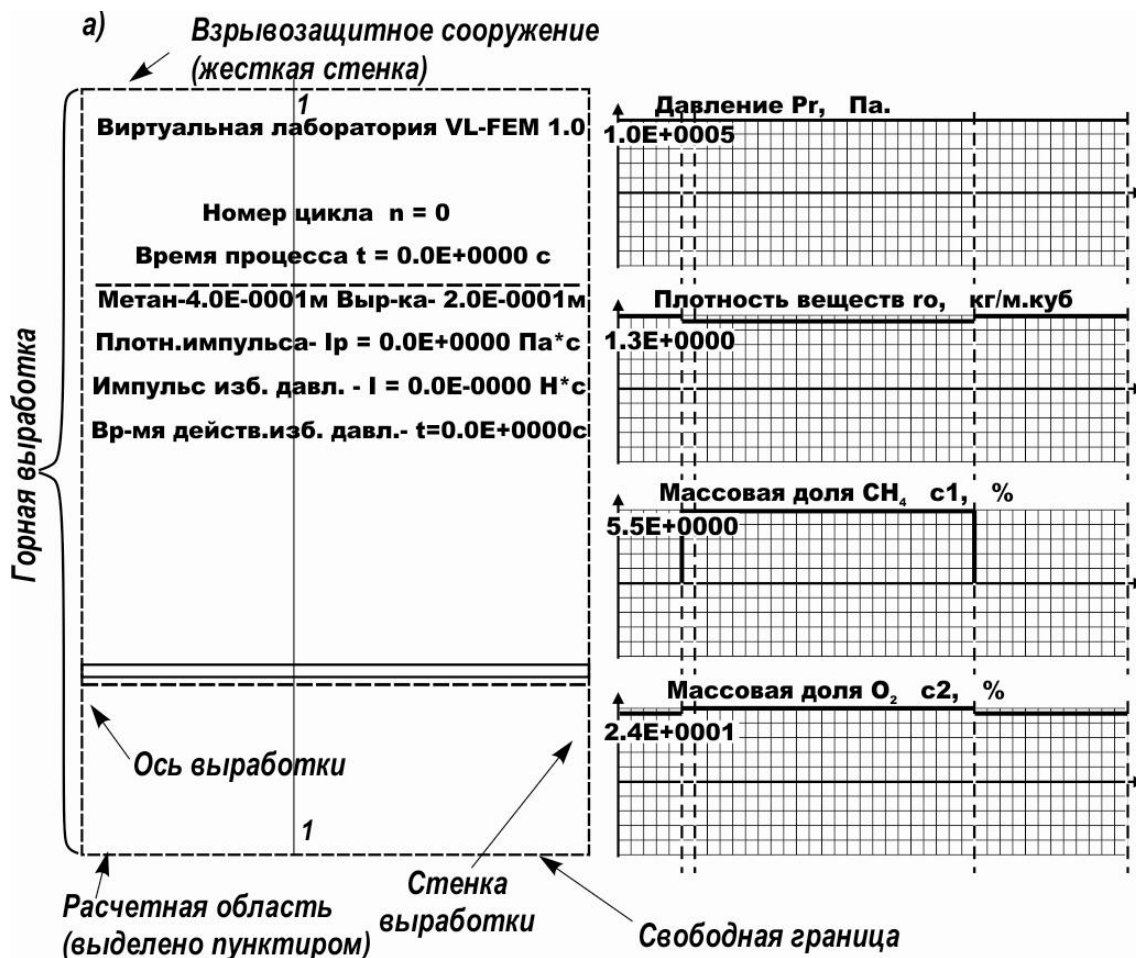
где  $Z$  – предэкспонент;  $E$  – энергия активации  $T$  – температура компонентов реакции,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Выделившееся в результате реакции тепло увеличивает внутреннюю энергию частиц газа  $J$ , зная которую, можно определить избыточное давление взрыва по уравнению состояния газа (2).

Таким образом, приведенный алгоритм численного счёта позволяет выполнять динамический расчет с выводом текущих параметров процесса в каждый момент времени в виде графиков и значений конкретных величин. На рис. 1 представлено окно виртуальной лаборатории в начальный момент времени, все параметры имеют исходное значение. В левой части окна показана расчетная область – продольное сечение цилиндрического канала, которым представлена модель горной выработки. Поскольку задача осесимметрична, то она решена в цилиндрической системе координат и для ускорения счёта на схеме представлена левая часть симметрии, т.е. левая граница – ось выработки, правая – стенка выработки. Верхняя граница расчетной области – тупиковая часть выработки образованная взрывозащитным сооружением (рис. 1а). На схеме наглядно представлено

**МЕТОДИКА НАВЧАННЯ**

соотношение длины области газированного участка и расстояния до сооружения (рис. 1б). В этой части окна так же выводятся время от начала процесса, максимальные значения концентрации метана в газированной области, расстояние до тупика выработки, значение плотности и полного механического импульса действующего на сооружение и время силового воздействия. В правой части окна выведены динамические графики распределения значений параметров вдоль линии сечения 1-1. Графики выводятся группами по 4. Набор графиков в группе по задает пользователь.



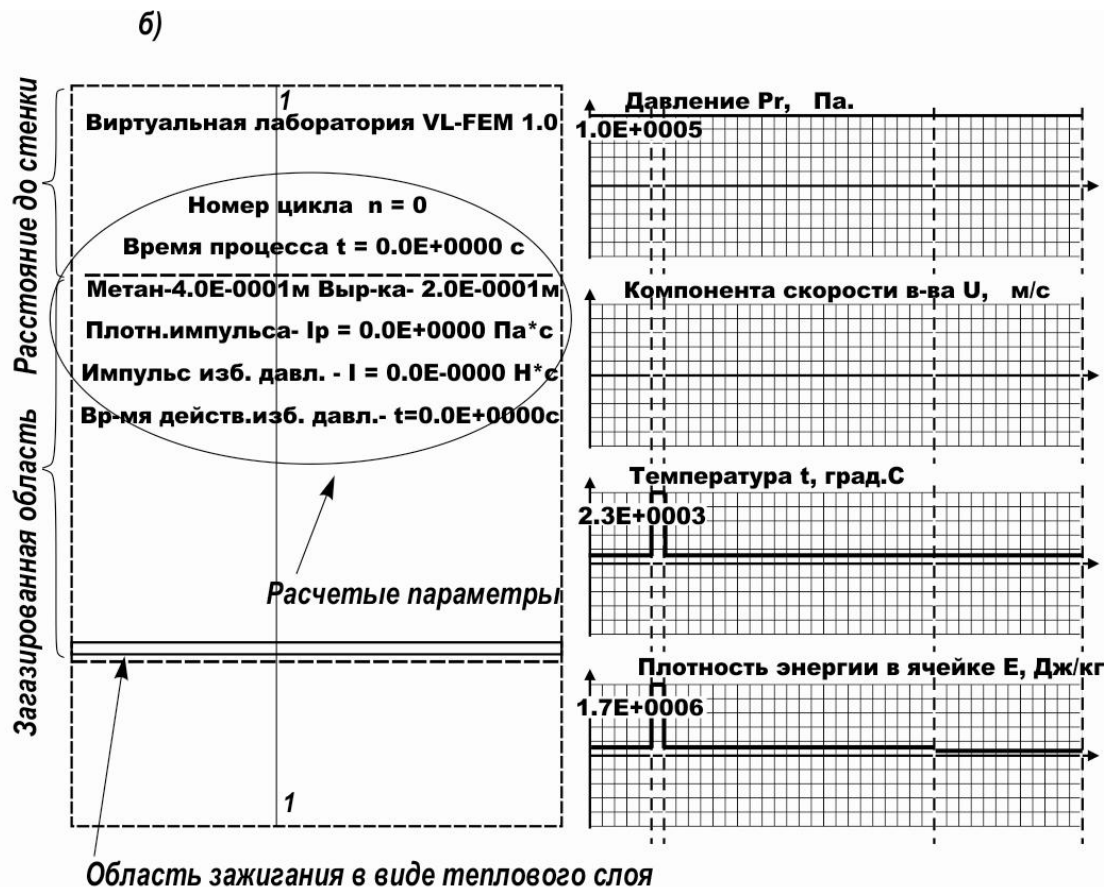


Рис. 1. Визуализация результатов расчета в виртуальной лаборатории VL-MCE 1.0: а) начальные условия с графиками давления, плотности и концентрации реакционных газов; б) начальные давления с графиками давления, скорости температуры и плотности внутренней энергии газового потока.

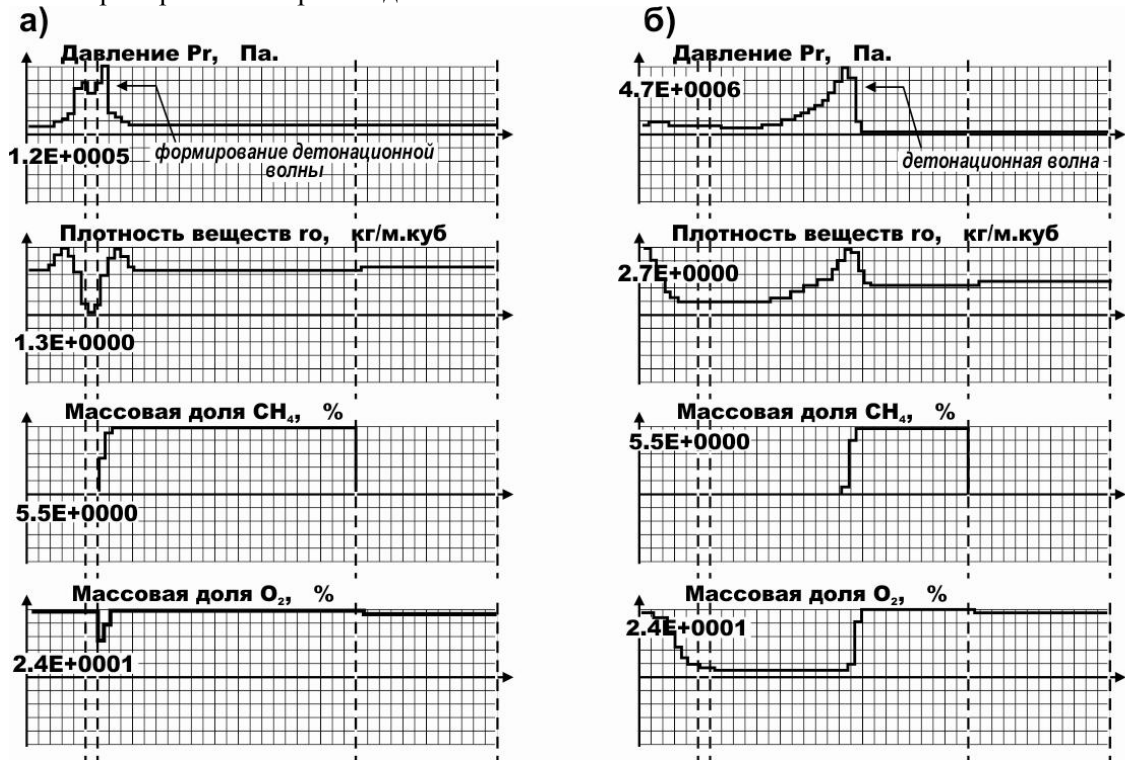
С точки зрения наглядности такая компоновка визуальной части программы позволяет исследователю полностью представить механику процесса, легко вникнуть и оценить количественные показатели газодинамики.

Очень важно для выработки профессиональных умений в вопросах безопасности горных работ в газовых шахтах видеть в динамике причинно-следственные связи между начальными параметрами и последующими эффектами распространения взрывных волн. Для этого графики строятся в вертикальной проекционной связи. При этом легко наблюдать как изменяются, например, во фронте горения или детонационной волны состав шахтной атмосферы, ее температура плотность, избыточное давление, как распределяются эти параметры по сечению выработки как вдоль так и поперек ее оси (рис. 2). В любой момент времени в программе есть возможность остановить расчет, проанализировать соотношение параметров и затем далее продолжить расчет. Например, на рис. 2 приведены снимки части экрана (screenshot) с динамическими графиками. На снимке 2а мы можем наблюдать процесс зажигания газовой смеси: давление во фронте горения начинает расти (график давления), а метан и кислород выгорают (нижние графики содержания кислорода и метана в атмосфере). На рис. 2б-2е изображен последовательный процесс распространения детонации и ударной волны в горной выработке, отражение ударной волны от взрывозащитного сооружения (жесткой стенки) в различные моменты времени.

Согласно хронометражным наблюдениям в репрезентативной выборке группы студентов, время на самостоятельное освоения инструкции по лабораторной работе и

## МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

інтерфейсу програми на аудиторних заняттях складає не більше 10 мин. при умови попереднього вивчення теоретичного курсу по темі на лекціях. Повне самостійне вивчення теми і виконання лабораторної роботи для студентів-заочників займає 2 години. Середній бал відповідей на контрольні запитання 3,75 (за п'ятибальною шкалою). При цьому студент в стані кількісно оцінити можливі варіанти розвитку подій в аварійних ситуаціях і відповідно планувати адекватні заходи по їх запобіганню. Такі вміння як правило молодий фахівець набуває на виробництві.



МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

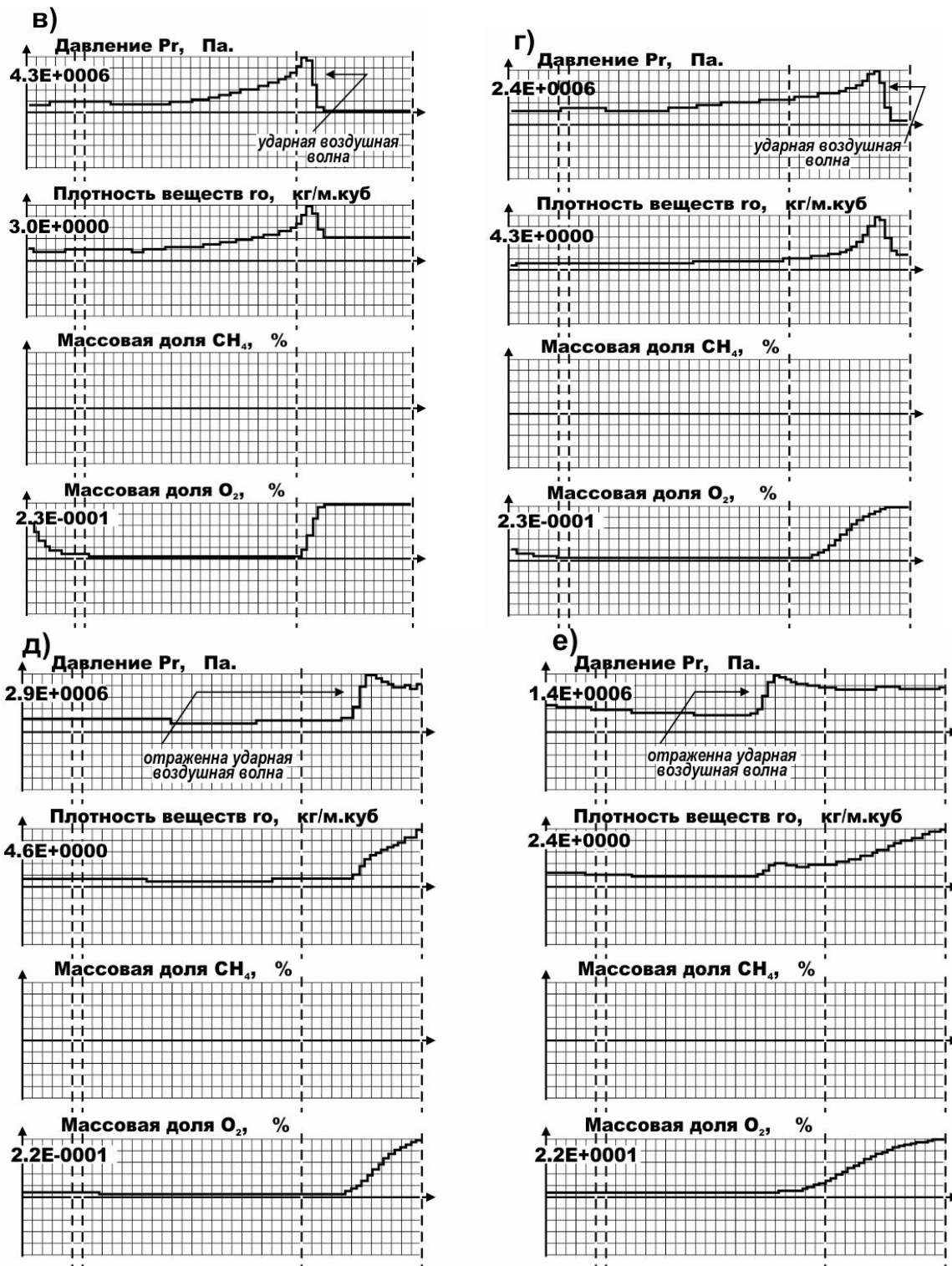


Рис. 2. Визуалізація динаміки процесів запалювання метановоздушної суміші, розповсюдження детонації та ударної хвилі в горній вироботці, відбиття ударної хвилі від вибухозащитного спорудження (жесткої стінки): а) запалювання суміші, формування детонаційної хвилі, б) розповсюдження фронту детонаційної хвилі, в) перехід детонаційної хвилі в ударну, г) приближення ударної повітряної хвилі до вибухозащитного спорудження, д) відбита ударна повітряна хвиля, е) розповсюдження відбитої ударної



**МЕТОДИКА НАВЧАННЯ**

волны по выработке.

Для виртуальной лаборатории VL-MCE 1.0 в настоящее время разработаны лабораторные работы по пяти дисциплинам (табл.). Приведенные в табл. работы носят репродуктивный характер. Форма организации студентов на лабораторных работах – фронтальная или групповая. Количество аудиторных часов на одну работу – 2.

Таблица

Лабораторные работ проводимые с использованием виртуальной лаборатории VL-MCE 1.0

| <i>Дисциплина</i>   | <i>Тема лабораторной работы</i>  | <i>Цель работы</i>  |
|---|--|---|
| Предупреждение и ликвидация аварий на горных предприятиях | Изучение методики изоляции аварийных участков шахты.                             | Определение и анализ безопасных расстояний при выполнении работ по изоляции аварийных участков в зависимости от размеров загазированной области.    |
| Теория горения и взрыва                                   | Изучение режимов горения углеводородов.  | Определение и анализ скорости распространения фронта горения для различных углеводородов. Определение типа горения: дефлаграция, детонация.         |
|   | Изучение влияния параметров источника зажигания на режим горения;                | Определение и анализ скорости энерговыделения в зависимости от размеров и температуры источника зажигания.  |
| Горноспасательное дело                                    | Изучение степени опасности атмосферы угольных шахт по треугольнику взрываемости. | Определение и анализ условий зажигания метановоздушной среды, условий затухания вспышек и развития взрывов.   |
|   | Изучение эффектов отражения ударных волн в тупиковых частях выработки            | Определение и анализ параметров ударных воздушных волн при их полном отражении.   |
| Охрана труда в отрасли                                    | Изучение параметров распространения взрывных волн по горной выработке            | Определение избыточного давления в ударной волне, установление характера влияния на его величину шероховатости и теплообмена со стенками выработок. |
| Взрывозащита горных выработок                             | Изучение устойчивости взрывозащитных сооружений к импульсным воздействиям        | Определение и анализ плотности импульса воздействия ударной волны на взрывозащитное сооружение.   |

Результаты применения виртуальной лаборатории в учебном процессе были обсуждены на научно-методичном и методичном семинаре кафедры технологии горного производства и охраны труда СУНИГОТ УИПА и на научно-методической конференции профессорско-преподавательского состава УИПА.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Применение виртуальной лаборатории на стандартном 2-х часовом занятии при изучении дисциплин из цикла промышленной безопасности и охраны труда позволит выработать знаково-умственные и знаково-практические профессиональные умения на уровне С (самостоятельно).

В перспективе исследований разработка тематики лабораторных работ для виртуальной лаборатории VL-MCE 1.0 с частично-поисковым и поисковый характером, а

## МЕТОДИКА НАВЧАННЯ

также индивидуальной формой организации её выполнения. Для этого необходимо в т.ч. модернизировать интерактивную часть программы.

### Список использованных источников

1. Трухин А.В. Об использовании виртуальных лабораторий в образовании / А. В. Трухин // Открытое и дистанционное образование. – 2002. – № 4 (8). – С. 52-58;
2. Современные проблемы исследования быстропротекающих процессов и явлений катастрофического характера: Сборник - доклады на семинаре, посвященном 75-летию юбилею чл.-кор. РАН В.П. Коробейникова / под. ред. О. М. Белоцерковского. – М.: Наука, 2007. – 223 с.
3. Образовательный web-ресурс <http://www.virtulab.net>;
4. Трухин А.В. Виды виртуальных компьютерных лабораторий // Информационные технологии в высшем образовании. – Алматы, 2005. – Т.2, № 2. С. 58–68;
5. Семенов И.В., Уткин П.С., Марков В.В. Численное моделирование двумерных детонационных течений на многопроцессорной вычислительной технике // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т.9. – С. 119-128.
6. Аксенов А.А., Похилко В.И., Дядькин А.А., Сельвачев А. Система моделирования движения жидкости и газа FlowVision. – Москва: ООО “ТЕСИС”, 2007. – 265 с;
7. Налисько Н.Н. Газодинамический расчет параметров распространения воздушных ударных волн в горных выработках // Вестник КрНУ им. Михаила Остроградского. – 2013. – Выпуск 5/(82). – С. 136 – 144;
8. Чернай А.В., Налисько Н.Н. Обоснование новых подходов к расчету параметров взрывного горения газозвудушных смесей в выработках угольных шахт / Материалы научного семинара "Высокоэнергетическая обработка материалов и моделирование взрывных процессов" 25-27 мая 2013 г. – Днепропетровск: НГУ, 2013. – Выпуск 10. – С. 147-151.

### References

1. Trukhin, AV 2002, ‘About usage of virtual laboratories in education’, *Open and distance education*, no.4 (8), pp. 52–58.
2. Belotserkovskiy, OM 2007, *Sovremennyye problemy issledovaniya bystroprotekajushchikh protsessov i yavleniy katastroficheskogo kharaktera: Sbornik – doklady na seminare, posvjashhenom 75-letnemu jubileju V.P. Korobeynikova*, [Present-day research problems of fast processes and phenomena of disastrous character: Collection of reports at the seminar, dedicated to the Corresponding Member of the RSA Korobeynikov V.P. 75<sup>th</sup> anniversary], Nauka, Moscow, Russia;
3. *The educational web-resource*, <<http://www.virtulab.net>>
4. Trukhin, AV 2005, ‘Types of virtual computer laboratories’, *Informatsionnyye tekhnologii v vysshem obrazovanii*, [Informational technologies in higher education], Almaty, Vol. 2, no.2, pp. 58–68;
5. Semenov, IV, Utkin, PS & Markov, VV 2008, ‘The numerical modelling of two-dimensional detonation flows on multiprocessor computing equipment’, *Vychislitelnyye metody i programmirovaniye*, Vol. 9, pp. 119–128;
6. Aksenov, AA, Pohilko, VI, Dyadkin, AA & Selvachev, A 2007, *Sistema modelirovaniya dvizheniya zhidkosti i gaza FlowVision*, [The modeling system of liquid and gas movement FlowVision], TESIS, Moskva, Russia;
7. Nalisko, NN 2013, ‘Gas-dynamic calculation of shock air wave propagation parameters in mine working’, *Vesnik Kremenchugskogo Natsionalnogo universiteta im. Mikhaila Ostrogradskogo*, iss. 5/(82), pp. 136–144;
8. Chernay, AV & Nalisko, NN 2013, ‘Substantiation of new approaches to parameters calculation of explosive combustion of gas-air mixtures in mine workings’, *Vysokoenergeticheskaya obrabotka materialov i modelirovaniye vzryvnykh processov*, materialy nauchnogo seminar, 25-27.05.2013 [High-energy treatment of materials and modeling of explosion processes, materials of scientific seminar on 25-27th May 2013], National Mining University, Dnepropetrovsk, iss. 10, pp. 147–151.

*Стаття надійшла до редакції 09.04.2015 р.*