

Ю.М. Сидоренко<sup>1</sup>, канд.техн.наук., доц., П.С. Шленский<sup>2</sup>, инж.  
1 - НТУ Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина  
2 - Институт электросварки им. Е.О. Патона, г. Киев, Украина

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛЕТА ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВЕ ПЛОСКОГО ЗАРЯДА КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ

*Як відомо одним з місць, де проводять зварку різних матеріалів вибухом є вибухові камери. Для проектування таких захисних пристроїв, у тому числі рішення задачі оптимізації їх конструкцій з метою зниження загальної металомісткості виробу, на перший план встає питання визначення параметрів повітряної ударної хвилі, що утворюється в результаті вибуху заряду вибухової речовини. Недоліком існуючих інженерних методик проектування є те, що вони базуються на тому припущенні, що відповідні рівні навантаження конструкції утворюються в результаті вибуху заряду або сферичної форми, або циліндричної великої довжини. Тому методом чисельного моделювання розглянуте питання формування повітряної ударної хвилі, яка утворюється в результаті вибуху плоского заряду вибухової речовини. Визначені оптимальні параметри скінченного елемента який використовується для побудови скінченно-елементної сітки такої задачі. Встановлені відмінності в значеннях надлишкового тиску в точках простору розташованих у вертикальному, горизонтальному напрямках і під кутом 45° на відстанях від 1 до 1,6м.*

*As is known one of the place were different materials may be welding by explosion is explosive chamber. In order to design those protective units, including design optimization for decreasing unit general steel intensity, we need to find values of air shock wave parameters witch forming as a result of explosion of high explosive. Limitation of present engineering methods is assumption of high explosive form. By all there methods we can calculate values of air shock wave parameters of sphere and long cylindrical HE forms. Therefore air-shock wave forming process was examined by numerical method. That wave was appeared as a result of plane HE detonation. Optimal size of finite element witch using for finite-element grid construction of there task was found. Differences between of overpressures values in a vertical, horizontal and angularly 45° direction space positions at a distance from 1 to 1,6m were defined.*

### **Введение.**

Сварка является одним из основных технологических процессов в машиностроении и строительстве. В настоящее время сваривают материалы толщиной от нескольких микрон (в микроэлектронике) до нескольких метров (в тяжелом машиностроении). Одним из перспективных и сравнительно новых представителей сварки является сварка взрывом.

Сварка взрывом – это технологический процесс соединения различных деталей путем их высокоскоростного соударения, вызванного процессом детонации взрывчатого вещества. Являясь по сути "холодной" сваркой, сварка взрывом позволяет соединять между собой металлы с различными физико-механическими характеристиками, например, легкоплавкие металлы и сплавы с тугоплавкими, чего трудно достичь другими методами. Поэтому сварку взрывом часто используют как первоначальный этап по производству биметаллических материалов, с дальнейшей их прокаткой до необходимых размеров [1, 2].

В современных процессах металлообработки взрывом применяют заряды взрывчатого вещества (ВВ) массой от нескольких граммов до сотен килограммов. Большая часть энергии, выделяющейся при взрыве, излучается в окружающую среду в виде ударных волн, сейсмических возмущений, разлета осколков. Воздушная ударная волна (УВ) – наиболее опасный поражающий фактор взрыва. Поэтому сварку взрывом производят на полигонах (открытых и подземных), удаленных на значительные расстояния от жилых и промышленных объектов, и во взрывных камерах (ВК). Внешний вид одной из таких камер показан на рис. 1 [3-5].

### **Постановка задачи.**

Для проведения работ по проектированию таких защитных устройств, в том числе для оптимизации их конструкций с целью снижения общей металлоемкости изделия, возникает необходимость определения нагрузки на силовые элементы взрывной камеры. Данная нагрузка является результатом взаимодействия воздушной УВ и потока продуктов детонации (ПД) заряда ВВ с внутренней поверхностью взрывной камеры. Поэтому для ее определения необходимо знать всю информацию о поведении этих двух основных факторов взрыва.

На сегодняшний день уже известны аналитические и эмпирические зависимости, которые позволяют определить параметры воздушных УВ, образующихся в результате взрыва [6, 7]. Однако эти зависимости были определены на основе исследований процесса детонации в основном сферических и бесконечно удлиненных цилиндрических зарядов ВВ, в то время как для сварки взрывом наиболее часто используются плоские заряды.

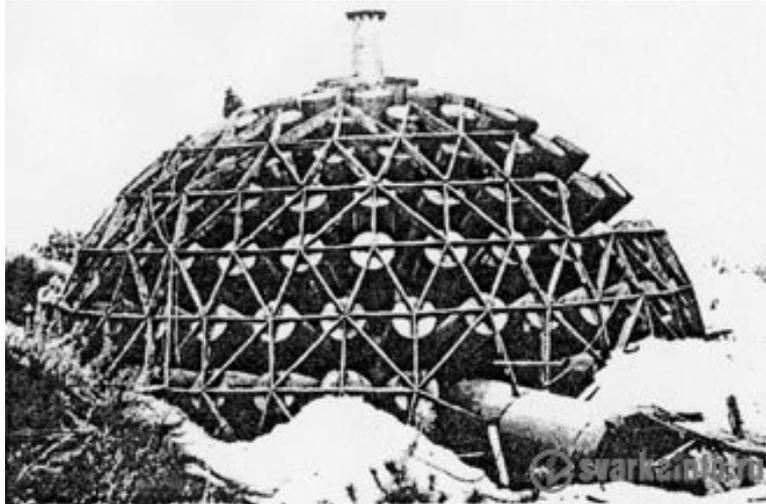


Рис. 1. Общий вид камеры для сварки взрывом ([www.etwm.narod.ru](http://www.etwm.narod.ru))

На рис. 2 изображено поперечное сечение масштабной модели трубчатой взрывной камеры в форме полусферы, созданной в институте электросварки им. Е.О. Патона.

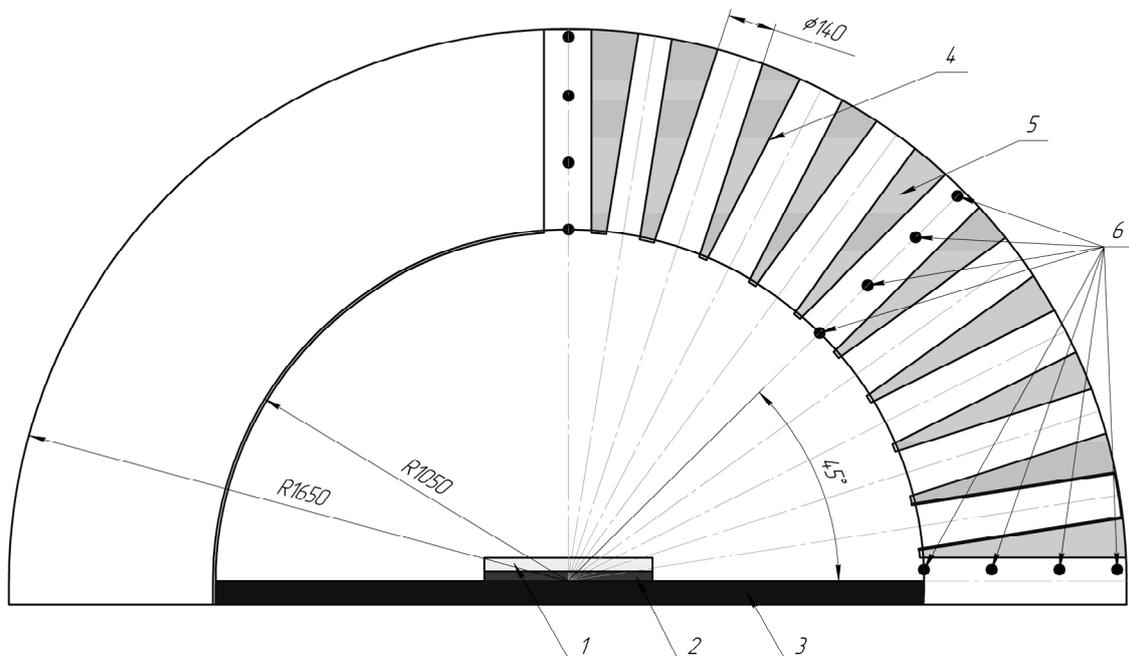


Рис. 2. Схема поперечного сечения трубчатой взрывной камеры, разработанной в Институте электросварки им. Е.О. Патона:

1 – заряд ВВ, 2 – свариваемые детали, 3 – рабочий стол (плита), 4 – трубы,  
5 – сыпучий наполнитель, 6 – маркеры

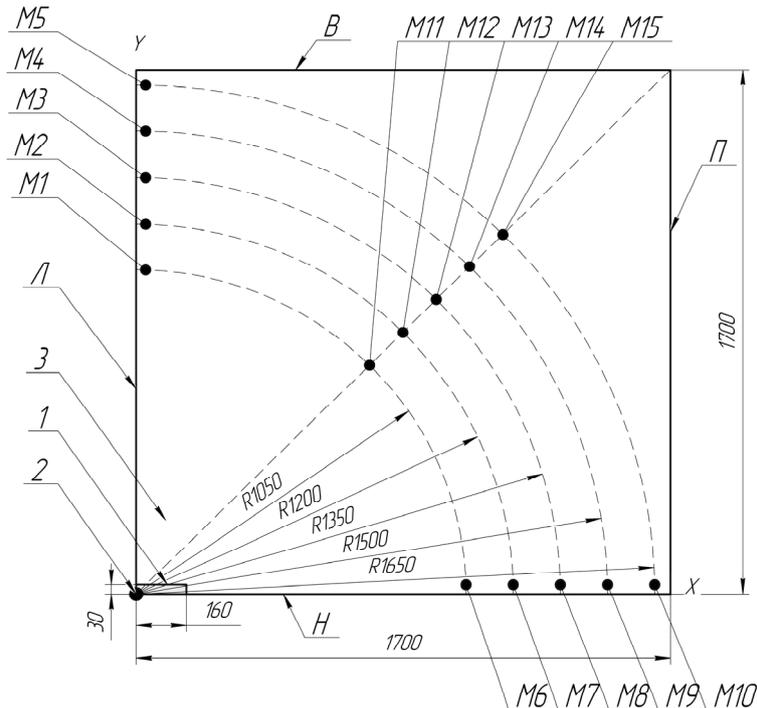
Свариваемые материалы (2) в виде пластин располагаются в центре камеры на рабочем столе (3) и сверху на них устанавливается плоский заряд ВВ (1). Для проведения сварочных работ в таких ВК обычно используются слабые (с низкой скоростью детонации) промышленные ВВ, например, аммонит №6 ЖВ и его смеси с аммиачной селитрой и песком. Стоит отметить, что предельное расчетное значение массы аммонита, которую можно использовать для проведения взрывных работ внутри данной камеры, не превышает 2,4 кг. При этом размеры заряда ВВ составляют 320x250x30 мм. Очевидно, что для такой формы и расположения заряда ВВ основное действие воздушной УВ будет направлено вверх. Именно в этом направлении она окажет свое максимальное воздействие на силовые элементы камеры (4). Эти элементы представляют собой набор сваренных стальных труб с закрытой донной частью, а свободное пространство между ними заполняется песком (5).

В работе [6] предложена зависимость для определения параметров плоской воздушной УВ, полученная по результатам исследования взрыва в каналах (выработках) и затекания УВ в канал из свободного пространства. Если воспользоваться этой формулой для определения величины нагрузки на внутреннюю поверхность трубчатой взрывной камеры, то следствием такого расчета станет высокая металлоемкость конструкции. Это вызвано тем, что в основу такого расчета закладывается допущение о том, что воздушная УВ, сформированная в результате взрыва

плоского заряда ВВ, одинаково воздействует на различные области защитной конструкции. Однако, учитывая форму и размеры нашего заряда ВВ, формирующиеся при его взрыве фронты воздушной УВ и потока ПД быстро потеряют плоскую форму. Они искривятся и, как следствие, возникнет разный уровень нагрузки на верхний и нижний ярусы силовых труб (4) (рис. 2). Поэтому перед тем как провести работу по оптимизации конструкции ВК сначала необходимо определить значения параметров воздушной УВ и потока ПД в разных направлениях от места взрыва плоского заряда ВВ.

#### Методика математического моделирования.

Одним из способов получения этих значений является компьютерное моделирование. Определим расчетную схему и метод моделирования. С учетом сказанного выше рассмотрим задачу свободного истечения ПД плоского заряда ВВ (аммонита) массой 2,4 кг в воздух, т.е. влияние на этот процесс силовых элементов ВК отсутствует. Учитывая то, что форма поперечного сечения взрывной камеры, форма заряда ВВ с учетом его расположения внутри камеры обладают осевой симметрией, моделирование можно проводить в двухмерной плоской постановке. Тогда расчетная схема задачи будет выглядеть следующим образом (рис. 3).



**Рис. 3. Расчетная схема задачи о взрыве плоского заряда ВВ:**  
**1 – заряд ВВ, 2 – точка инициирования процесса детонации заряда ВВ,**  
**M1...M15 – исследуемые точки пространства,**  
**Л – левая, П – правая, Н – нижняя, В – верхняя границы расчетной области.**

Расчетная область задачи представляет собой квадрат со стороной 1700 мм. В левом нижнем углу этой области расположен заряд ВВ высотой 30 мм. Длина заряда равна 160 мм, что составляет половину наибольшего линейного размера. Иницирование процесса детонации заряда происходит в точке с координатами (0;0).

Решение задачи было проведено с помощью программы ANSYS/LS-DYNA [8-9], в которой реализованы известные на сегодня подходы для описания поведения различных сред под действием импульсной нагрузки. Могут быть использованы эйлеровый, лагранжевый и смешанный лагранжево-эйлеровый (ALE) подходы [10-12]. Эйлеровый подход описывает движение сред через неподвижную расчетную сетку и наилучшим образом подходит для изучения течения жидкостей и газа. Лагранжевый подход, в отличие от эйлерового, использует подвижную сетку, которая связывается с конкретными элементами среды. Такой подход удобен для исследования поведения твердых тел, в том числе металлов. Смешанный ALE-подход рекомендуется для решения задач физики взрыва и удара, когда расчетная модель содержит как газообразные (жидкие) среды, так и твердые. Учитывая, что в нашей задаче рассматриваются только газообразные материалы – ПД и воздух, компьютерное моделирование проводилось с использованием эйлерового подхода.

Следующий этап – построение конечно-элементной расчетной сетки задачи. Согласно [13], для моделирования процесса взрыва рекомендуется использовать конечный элемент в форме гексаэдра. Данный элемент является объемным и используется для решения объемных трехмерных (3-D) задач. Однако ранее было установлено, что наша задача может решаться в двухмерной (2-D) постановке, которая помимо всего прочего позволит существенно снизить требования по производительности используемого компьютера. Для того чтобы адаптировать трехмерный конечный элемент под решение задачи в плоской двухмерной постановке, разработчики программы рекомендуют наложить на его узлы дополнительные граничные условия [14]. Они касаются наложения запрета на любое перемещение всех узлов конечно-элементной сетки в направлении перпендикулярном плоскости задачи X-Y.

Кроме того, необходимо учесть и то, что свариваемые детали (2) располагаются на рабочем столе (3) взрывной камеры (рис. 2). Наличие такой опоры не позволяет продуктам детонации и воздуху перемещаться вниз.

Введение дополнительного граничного условия на запрет перемещения узлов конечно-элементной сетки, расположенных на оси X (нижняя граница расчетной области задачи (Н, рис. 3)), в вертикальном направлении Y удовлетворяет данному условию (эквивалентно моделированию абсолютно жесткой преграды).

Также, наличие в задаче осевой симметрии (рис. 3) позволяет моделировать только одну ее геометрическую половину. Реализация данного условия возможна путем введения дополнительного аналогичного предыдущему граничного условия для всех узлов расчетной сетки расположенных на оси Y (левая граница расчетной области задачи (Л, рис. 3)) и заключается в наложении запрета на их перемещение, но уже в горизонтальном направлении.

Для узлов, находящихся на верхней (В) и правой (П) границах расчетной области (рис. 3) никаких дополнительных ограничений не накладывалось, что равносильно моделированию "прозрачных" границ. Другими словами, расширяющиеся под действием внутреннего давления продукты детонации и вытесняемый ими воздух могут беспрепятственно их пересекать с последующим выбыванием из математического рассмотрения.

Для проведения компьютерного моделирования в качестве материала взрывчатого вещества был взят состав HNS-1 (США), по характеристикам близкий к аммониту №6 ЖВ [6]:

- начальная плотность заряда  $\rho_0=1000 \text{ кг/м}^3$ ,
- скорость детонации  $D=5100 \text{ м/с}$ ,
- давления продуктов детонации на фронте детонационной волны  $P_{с.г}=7,5 \text{ ГПа}$ .

В отличие от отечественного состава, для данного ВВ известны экспериментальные значения параметров уравнения состояния в форме Джонса-Уилкинса-Ли (JWL) [6, 15]:

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E}{V},$$

где  $V$  – относительный объем ПД;

$$A=162,7 \text{ ГПа}; B=1,082 \text{ ГПа}; R_1=5,4; R_2=1,8; \omega=0,25; E_0=4,1 \text{ ГПа}.$$

Поведение окружающего воздуха с начальным значением плотности равным  $\rho_0=1,26 \text{ кг/м}^3$  описывалось с помощью уравнения состояния в форме линейного полинома:

$$P = C_0 + C_1 \cdot \mu + C_2 \cdot \mu^2 + C_3 \cdot \mu^3 + (C_4 + C_5 \cdot \mu + C_6 \cdot \mu^2) \cdot E, \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

где  $\rho$  – текущее значение плотности воздуха.

Величины других параметров уравнения выбирались согласно рекомендациям [13, 16].

Для расчетов использовался персональный компьютер, оснащенный 4-х ядерным центральным процессором IntelCore2Quad тактовой частотой 2,83ГГц, 4Гб оперативной памяти и 2Тб жестким диском.

Немаловажной проблемой численного анализа является вопрос определения размера конечного элемента расчетной сетки, с помощью которой можно осуществить адекватное моделирование рассматриваемого процесса. Одним из критериев, определяющих правильность выбора размера конечного элемента, является не только точность воспроизведения параметров воздушной УВ, которая является следствием взрыва заряда ВВ, а и точность воспроизведения самого процесса детонации.

Поэтому сначала была рассмотрена задача о детонации заряда HNS-1, но с меньшими размерами расчетной области. По сравнению с основной задачей эти размеры были уменьшены с 1700x1700мм до 200x200мм. Размеры заряда ВВ были сохранены и составляли 160x30мм.

Уменьшение размеров расчетной области позволило применить для построения конечно-элементной расчетной сетки конечные элементы с размерами: 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2 и 5мм. Основные параметры расчетных конечно-элементных сеток каждого варианта представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры конечно-элементных сеток задачи детонации заряда ВВ.

Размер конечного элемента, мм	Количество элементов		
	ВВ	Воздух	Всего
5	192	1408	1600
2	1200	8800	10000
1	4800	35200	40000
0,5	19200	140800	160000
0,25*	76800	115200	192000
0,1*	480000	720000	1200000

\* размеры расчетной области составляли 200x60мм.

Расчет проводился до момента времени 30 мкс, что приблизительно соответствует времени прохождения детонации по заряду ВВ. Для вариантов задачи с размером конечных элементов 0,25 и 0,1 мм размер расчетной области был уменьшен с 200x200 мм до 200x60 мм. Это связано с ограниченными возможностями используемой ПЭВМ, а именно малым объемом оперативной памяти.

Сравнительная картина моделирования процесса движения детонационной волны по заряду ВВ на конечно-элементных сетках различной разрешающей способности представлена на рис. 4.

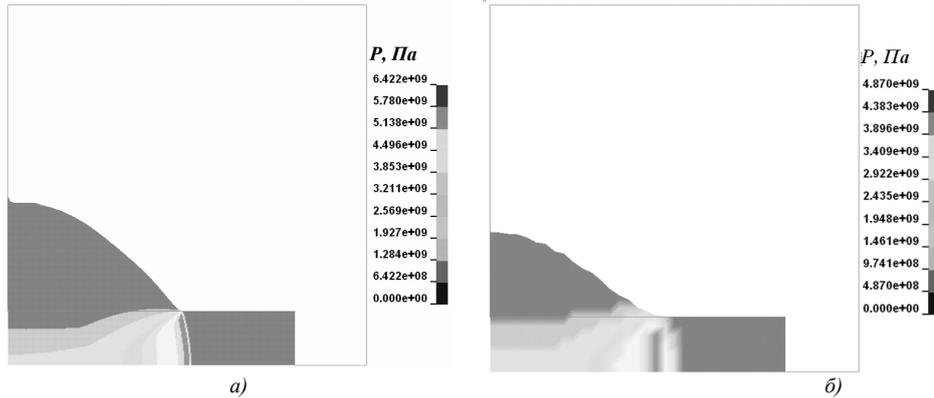


Рис. 4. Кадры компьютерного моделирования процесса движения детонационной волны по заряду ВВ при использовании конечно-элементной сетки различной разрешающей способности ( $T=20$  мкс): а) характерный размер конечного элемента 0,5 мм б) характерный размер конечного элемента 5 мм

На рис. 4, б видно, что детонационный фронт размыт гораздо сильнее, чем на рис. 4, а. Кроме того, можно наблюдать отличия в значениях давления Челмена-Жуге ( $P_{CJ}$ ). Сравнительные графики изменения давления на фронте детонационной волны при моделировании процесса взрыва заряда ВВ на конечно-элементных сетках построенных с использованием конечного элемента с различными величинами характерного размера приведены на рис. 5.

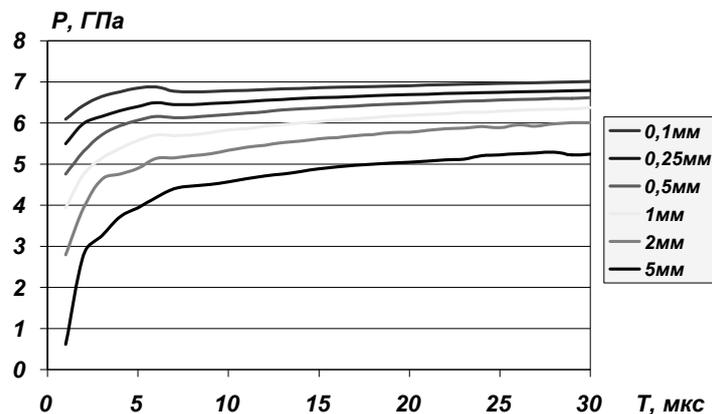


Рис.5. Давление на фронте детонационной волны при моделировании процесса взрыва заряда ВВ на конечно-элементных сетках с различной разрешающей способностью

Данные рис. 5 подтверждают вывод о том, что чем меньше размер конечного элемента, тем точнее решение, но, с другой стороны, резко возрастает длительность расчета одного варианта задачи (табл. 2).

Таблица 2

Параметр	Качество воспроизведения значений давления на фронте детонационной волны					
	Характерный размер конечного элемента, мм					
	0,1	0,25	0,5	1	2	5
Давление, ГПа	6,97	6,795	6,623	6,375	6,015	5,250
Погрешность воспроизведения давления на фронте детонационной волны в заряде ВВ, %	7	9,4	11,7	15	19,8	30
Прирост величины погрешности, %	2,4	2,3	3,3	4,8	10,2	
Продолжительность расчета на ПЭОМ, мин.	354	85	33	4	0,5	0,04

Наилучший результат соответствует варианту с конечным элементом размером 0,1 мм. При этом отличие расчетного значения давления на фронте детонационной волны от экспериментального составляет 7%. Если считать удовлетворительной расчетную погрешность не более 10%, то для моделирования формирования и распространения воздушной УВ можно использовать элемент с характерным размером равным 0,25 мм. Тогда для решения основной задачи истечения ПД плоского заряда ВВ конечных размеров в воздух (рис. 3), где размеры расчетной области составляют 1700x1700 мм, потребуется более 46 млн. расчетных элементов. Численный анализ на такой расчетной сетке на сегодняшний день для ПЭОМ является неразрешимой задачей.

Поэтому для решения этой основной задачи исследования были рассмотрены варианты построения конечно-элементной сетки на основе более крупных конечных элементов. Рассматривался ряд значений характерного размера

конечного элемента – 2, 3, 4, 5, 6 и 10 мм. Основные параметры полученных конечно-элементных сеток и длительность расчета каждого варианта задачи приведены в табл. 3.

Для оценки основных отличий в уровне нагрузки на различных расстояниях и в разных направлениях от точки инициирования детонации заряда ВВ (центра камеры) брались соответствующие значения избыточного давления в 15 точках пространства, по 5 значений в каждом из трех направлений – горизонтальном, вертикальном и под углом 45°.

Таблица 3

Размер элемента (сторона куба, мм)	Количество элементов			Длительность непрерывного расчета на ПЭОМ до $t=500$ мкс, мин
	Заряд ВВ	Воздух	Всего	
2	1200	721300	722500	198
3*	530	319826	320356	111
4**	320	180305	180625	55
5	192	115408	115600	22
6***	135	79954	80089	17
10	48	28852	28900	3

\* длина заряда ВВ составляла 159 мм,

\*\* высота заряда ВВ составляла 32 мм, а размер расчетной области – 1698x1698 мм,

\*\*\* длина заряда ВВ составляла 162 мм, а размер расчетной области – 1698x1698 мм.

Положение указанных точек указано на рис. 3, а на рис. 2 они обозначены как маркеры. Основные результаты расчета приведены в табл. 4 и на рис. 6.

Таблица 4

Максимальные значения давления в различных точках пространства, МПа.							
Направление	R, мм	Характерный размер конечного элемента, мм					
		2	3	4	5	6	10
Вертикальное	1040	12,1	11,9	12,0	11,8	11,5	10,1
	1200	11,5	11,3	11,5	10,8	10,7	9,61
	1350	10,6	10,3	10,4	10,0	9,79	9,00
	1500	9,33	9,16	9,36	9,23	8,85	8,30
	1645	8,46	8,23	8,43	8,32	8,04	7,56
Под углом 45°	1040	2,55	3,9	4,25	4,19	4,03	4,09
	1200	3,91	4,49	5,17	3,49	3,89	3,89
	1350	4,07	4,156	3,97	2,96	3,93	3,44
	1500	3,31	3,13	3,26	2,52	3,41	3,04
	1645	2,69	2,68	2,84	2,20	2,82	2,72
Горизонтальное	1040	8,01	7,93	7,58	4,10	5,53	4,22
	1200	6,92	6,77	6,63	3,47	4,59	3,42
	1350	6,07	5,98	5,81	3,05	3,92	2,85
	1500	5,34	5,29	5,15	2,71	3,40	2,39
	1645	4,96	4,77	4,59	2,41	3,01	2,03

Результаты расчетов подтвердили высказанное предположение о неоднородности формирования поля давления в различных направлениях от места взрыва плоского заряда ВВ. На рис. 6 видно, что фронт УВ представляет собой форму колокола и основное воздействие взрыва сосредоточено в вертикальном направлении. При этом плоская форма УВ сохраняется до 300мкс. К этому моменту времени его ширина приблизительно равна 1м, что примерно составляет 3 характерных размера заряда ВВ ( $3 \times 320 = 960$  мм).

Если бы математическая модель задачи включала в себя кроме ПД и окружающего их воздуха металлические части конструкции ВК, то именно в этом вертикальном направлении на расстоянии  $R=1040$  мм от центра взрыва произошел бы их первый контакт с воздушной УВ. При этом давление на фронте УВ в этом месте примерно составляет 12 МПа.

Другим характерным направлением действия воздушной УВ является горизонтальное. Значение избыточного давления на ее фронте на том же удалении ( $R=1040$  мм) еще достаточно высокое – 8 МПа, но все же ниже на 30% аналогичной величины для вертикального направления.

Если провести сравнение всех значений избыточного давления для данных направлений на всем промежутке расстояний от 1040 до 1645 мм, то уровень нагружения в горизонтальном направлении в среднем ниже в 1,7 раза.

Последней к внутренней поверхности камеры подойдет часть УВ, которая движется под углом 45° к поверхности рабочего стола ВК. Средние значения давления для этого направления ниже в 3 и 1,8 раза по сравнению с вертикальным и горизонтальным направлениями соответственно.

Кроме того, данные табл. 4 указывают на тенденцию уменьшения абсолютных значений избыточного давления  $P$  с увеличением характерного размера конечного элемента. Это хорошо объясняется математической

процедурой получения среднего значения  $P$  на большей (по площади или объему) части расчетной области, которая соответствует конечному элементу увеличенных геометрических размеров.

В тоже время результаты расчетов полученных с использованием конечных элементов с характерным размером равным 2, 3 и 4 мм практически мало отличаются друг от друга. Максимальное расхождение значений давления для этих вариантов составляет не более 2,5%.

На основании такого результата можно сделать следующий вывод. Несмотря на то, что для данной задачи ранее было получено оптимальное значение характерного размера конечного элемента равное 0,1...0,25 мм (из условия точности воспроизведения параметров детонационной волны), для адекватного численного моделирования поведения воздушной ударной волны на расстоянии более 1 м от центра взрыва достаточно использовать конечный элемент с размером 2...3 мм.

Такой результат указывает на тенденцию, что для моделирования поведения воздушной УВ с более низкими значениями избыточного давления на ее фронте можно использовать конечный элемент с увеличенными характерными размерами.

Эта зависимость может стать основой для формулирования рекомендаций по выбору оптимального размера конечного элемента для построения конечно-элементной сетки задачи оценки действия взрыва плоского заряда ВВ в ближней, средней и дальней зонах.

Указанную зависимость дополнительно подтверждают данные табл. 4 описывающие изменение величины избыточного давления в направлении под углом  $45^\circ$ . Видно, что данные значения для 2 и 10 мм вариантов конечных элементов практически не отличаются.

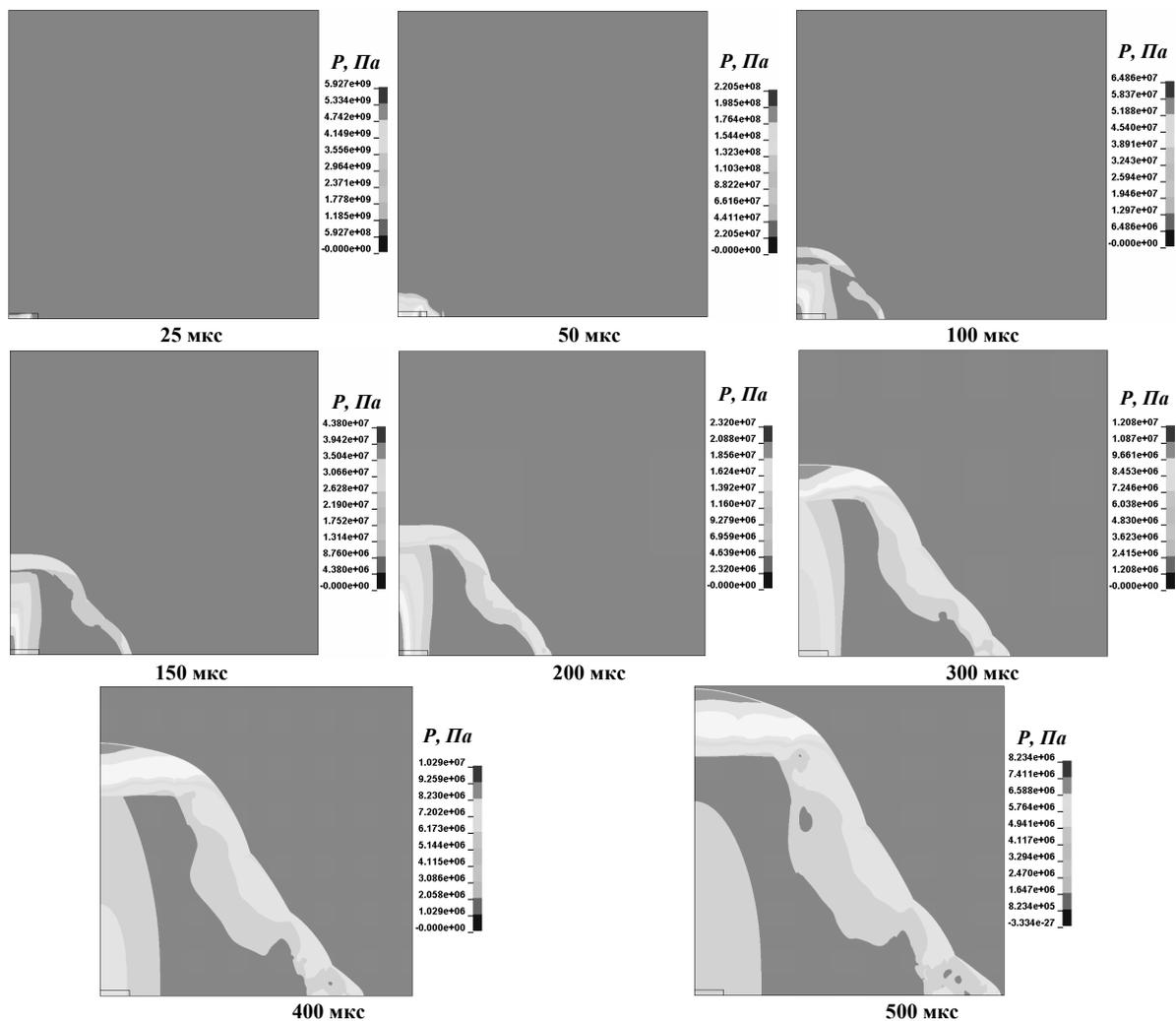


Рис. 6. Кадры двухмерного компьютерного моделирования процесса формирования и распространения воздушной УВ в результате взрыва плоского заряда ВВ

Однако обращает на себя внимание резкое увеличение давления на расстояниях  $R=1040$  и  $1200$  мм в этом направлении у варианта задачи использующей 4 мм конечный элемент. С целью установления причины такого результата были построены зависимости изменения данной величины от времени для всех 5 расстояний от центра взрыва для двух вариантов задачи, использующей как 4 мм, так и 2 мм конечный элемент (рис. 7).

Рассмотрев поведение зависимостей, представленных на рис. 7, можно констатировать, что характер изменения величины давления для варианта задачи использующей 4 мм конечного элемента в основном является унимодальным, а для 2 мм – би-модальным. Это говорит о том, что формирование значения избыточного давления

проходило в два етапа. Тогда становится очевидным, что причиной резкого увеличения давления для 4 мм элемента стала все та же математическая процедура усреднения значения давления по поверхности конечного элемента. Так как площадь плоского 4 мм конечного элемента в 4 раза выше площади аналогичного 2 мм элемента, то это стало причиной того, что характерная би-модальность процесса пропадает.

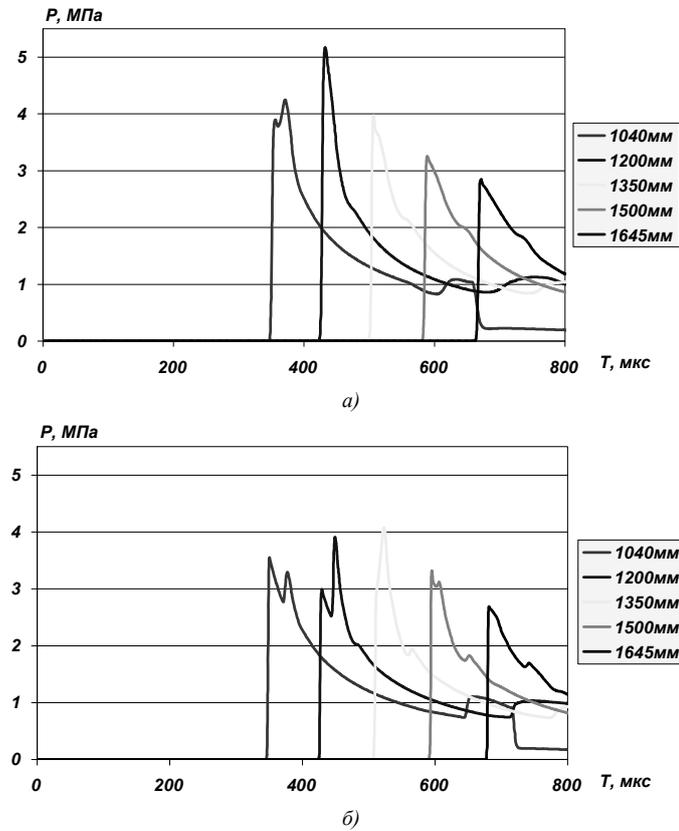


Рис. 7. Изменение давления во времени на различных расстояниях от точки инициирования детонации заряда ВВ в направлении под углом 45° по углу к горизонту: а) 4 мм конечный элемент б) 2 мм конечный элемент

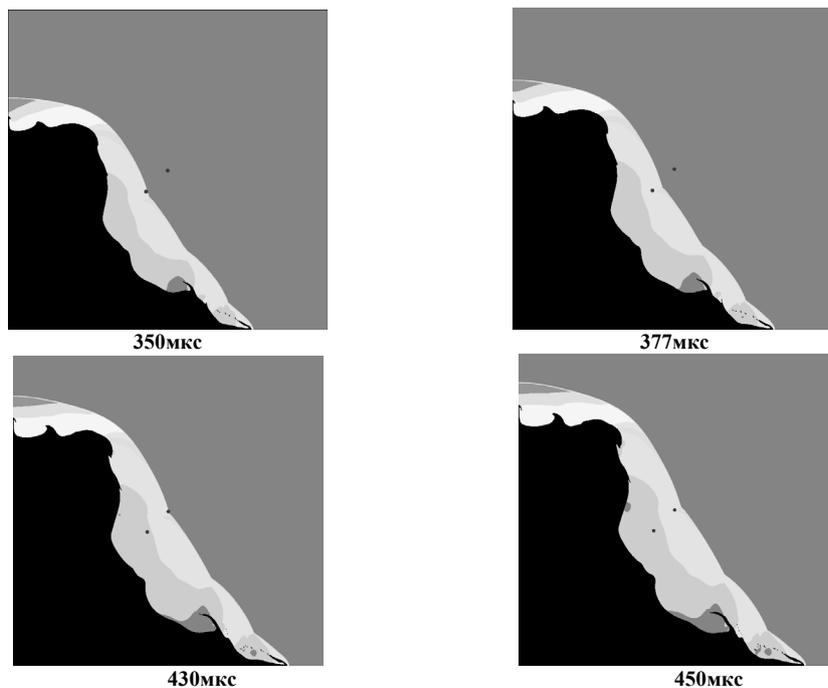
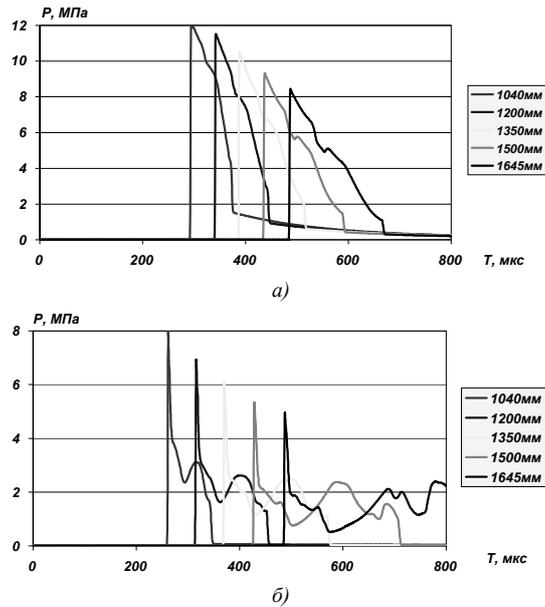


Рис. 8. Кадры компьютерного моделирования распространения фронта воздушной ударной волны и фронта продуктов детонации в результате взрыва плоского заряда



**Рис. 9. Изменение давления в различных точках пространства:**  
**а) вертикальное направление б) горизонтальное направление**

В свою очередь, причина такой би-модальности находится в особенностях поведения волновых процессов в продуктах детонации и окружающем воздухе.

Сначала в первую точку ( $R=1040$  мм) в момент времени  $t=350$  мкс подходит фронт воздушной УВ. Давление в этом месте возрастает до  $3,55$  МПа. По мере дальнейшего продвижения УВ давление за ее фронтом падает до величины  $2,77$  МПа к  $371$  мкс (рис. 7, б). В этот момент времени к указанной точке пространства подходит небольшая локальная область повышенного давления. Эта зона была образована в результате взаимодействия двух фронтов воздушных УВ, двигающихся во взаимно перпендикулярных направлениях – вертикальном и горизонтальном. Формирование такой области приводит к повторному повышению давления в первой точке до  $3,29$  МПа.

Аналогичные процессы проходили и во второй точке ( $R=1200$  мм), что наглядно подтверждают кадры компьютерного моделирования, представленные на рис. 8. Исследуемые места пространства изображены на рисунке в виде точек красного цвета (продукты детонации не показаны и изображены в виде черной области).

Таблица 5

**Время наступления максимального значения давления в различных точках пространства, мкс**

Направление	R, мм	Характерный размер конечного элемента, мм						
		2	3	4	5	6	10	
Вертикальное	1040	294	298	300	314	310	321	
	1200	342	347	348	363	359	368	
	1350	388	393	394	411	406	418	
	1500	437	442	442	460	455	469	
	1645	487	492	493	510	505	522	
Под углом 45°	1040	351	378	371	351	358	354	
	1200	449	447	432	428	439	429	
	1350	523	515	507	505	517	509	
	1500	595	596	589	591	600	596	
	1645	681	682	671	676	684	679	
Горизонтальное	1040	262	271	277	342	305	334	
	1200	316	329	336	426	377	414	
	1350	370	386	396	511	451	498	
	1500	429	446	458	603	530	590	
	1645	488	508	524	695	611	690	

По результатам расчета можно сделать вывод, что данное явление является локальным и характерно только для точек пространства расположенных в направлении под углом  $45^\circ$  к горизонту на удалении  $1000...1300$  мм от центра взрыва.

Подтверждение данных слов можно найти на аналогичных зависимостях истории нагружения среды в различных точках пространства, полученных для вертикального и горизонтального направлений на конечно-элементной сетке, использующей  $2$  мм конечный элемент (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что все представленные зависимости являются унимодальными, т.е. формирование значения избыточного давления проходило за один этап.

Также обращает на себя внимание поведение графика изменения избыточного давления на расстоянии  $1040$  мм от точки взрыва под углом  $45^\circ$  к горизонту в районе  $630$  мкс, изображенному на рис.7б. В этот момент

времени наблюдается повторное резкое увеличение значения давления с 0,74 до 1,1 МПа. Анализ показал, что данный результат есть следствие влияния на значение давления пришедшего в эту точку пространства фронта ПД.

Кроме того, следует обратить внимание на значения времен наступления максимальной величины давления в различных точках пространства, представленные в табл. 5.

Данные значения указывают еще на одну существенную тенденцию. С увеличением характерного размера конечного элемента расчетная скорость распространения воздушной УВ и продуктов детонации уменьшается. Однако, как и в случае определения избыточного давления (табл. 4), эти значения также мало отличаются для вариантов задачи, проведенных с использованием конечных элементов размером 2, 3 и 4 мм.

Такие результаты хорошо согласуются с высказанным в [17] утверждением о том, что для адекватного моделирования взрывных процессов минимальное необходимое количество конечных элементов эйлеровой сетки должно составлять 6-10 элементов на минимальный характерный размер конструкции.

Как указывалось выше, аналитические зависимости, описанные в работах [6, 7], не дают полной информации о характере изменения параметров УВ в различных направлениях от точки взрыва заряда ВВ. Кроме того, диапазон применимости различных формул ограничивается значениями предельных расстояний от места взрыва. Как правило, эта величина колеблется в диапазоне 15...20 начальных радиусов заряда. Если привести наш плоский заряд ВВ к эквивалентному по массе сферическому, то начальный радиус такой сферы составит 0,1 м. Тогда минимальное расстояние от центра взрыва, с которого можно аналитически определять значение избыточного давления на фронте сферической воздушной УВ, составит  $r_{\min}=1,5...2$  м. В случае приведения плоского заряда к эквивалентному цилиндрическому, радиус его основания составит 0,78 м. Для этого варианта формы заряда ВВ соответствует минимальное расстояние  $r_{\min}=1,2...1,6$  м.

Таким образом, сравнение значения  $r_{\min}$  с геометрическими размерами ВК (рис. 2) доказывает эффективность использования современных методов численного моделирования при проектировании и оптимизации конструкции взрывных камер.

В дальнейшем планируется продолжение данного исследования с целью определения отличий в значениях поля давления полученного в результате взрыва плоского заряда ВВ той же массы (2,4 кг), но изготовленного из тринитротолуола и октогена, а также решение задачи определения НДС различных частей силовых элементов взрывной камеры.

#### Выводы.

1. В связи с тем, что известные аналитические зависимости по определению значения избыточного давления на фронте воздушной ударной волны и величины ее импульса имеют ограниченную область применения, для проектирования взрывных камер, особенно когда необходимо решать задачу оптимизации их конструкции, целесообразно применять компьютерное моделирование.

2. Для определения основных параметров воздушных ударных волн оптимальное значение характерного размера конечного элемента, полученное из условия точности воспроизведения параметров детонационной волны должно быть не более 0,1...0,25 мм.

3. Для адекватного численного моделирования поведения воздушной ударной волны, сформированной в результате взрыва плоского заряда взрывчатого вещества конечных размеров, на расстоянии более 1 м от центра взрыва достаточно использовать конечный элемент с характерным размером 2...3 мм.

4. Поле давления в различных направлениях от места взрыва плоского заряда взрывчатого вещества является неоднородным. Основное воздействие взрыва сосредоточено в вертикальном направлении. При этом уровень нагрузки в горизонтальном направлении от места взрыва заряда ВВ (аммонит №6 ЖВ массой 2,4 кг) по сравнению с вертикальным ниже в среднем в 1,7 раза, а в направлении под углом 45° к горизонту в 3 раза.

#### Список литературы

1. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – 512с.
2. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом / Под ред. В.М. Кудинова. – М.: Машиностроение, 1987. – 216с.
3. Единые правила безопасности при взрывных работах. – К.: Норматив, 1992. – 172с.
4. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 166с.
5. Демчук А.Ф., Исаков В.П. Металлические взрывные камеры. – Красноярск: РИО КрасГУ, 2006. – 297с.
6. Физика взрыва / С.Г. Андреев, Ю.А. Бабкин, Ф.А. Баум и др. / Под ред. Орленко Л.П. – Изд. 3-е, перераб. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – в 2 т. Т.1. – 832 с.
7. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны: методы исследования. – М.: МГУ им. Ломоносова, 1990.
8. <http://www.ansys.com/>;
9. <http://www.ls-dyna.ru/>;
10. Численные методы в задачах физики взрыва и удара: Учебник для вузов / А.В. Бабкин, В.И. Колпаков, В.Н. Охитин и др. / Под ред. В.В. Селиванова. – М.: МГУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 516 с.
11. Рудаков К.М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій: Навч. посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 379 с.: іл.
12. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA: учебное пособие / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
13. LS-DYNA 971. Keyword user's manual. Livermore software technology corporation (LSTC), 2007. – Volume 1. – 2206p.
14. <http://www.dynasupport.com/manuals>.
15. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants / B.M. Dobratz. Livermore. – California, 1981. – 257 p.
16. John O. Hallquist. LS-DYNA. Theory manual. Livermore Software Technology Corporation. March 2006. – 680p.
17. Одинцов В.А., Сидоренко Ю.М. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборонная техника. – 2001. – № 1-2. – С. 17-20.