

УДК 628.112

ИЗУЧЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ПРОДУКТОВ ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА ВОДОРОДА ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ СКВАЖИН

Канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В.,
канд. физ.-мат. наук, доц. ВЕРЕМЕНЮК В. В.,
инженеры ГУБИН В. В., КОНДРАТОВИЧ А. Н.

Белорусский национальный технический университет

Регенерацию фильтров скважин подводными взрывами водородно-кислородной газовой смеси (ВКГС) можно производить как в открытых снизу взрывных камерах, так и в замкнутых камерах, снабженных эластичными оболочками [1–3].

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование особенностей пульсаций продуктов подводного газового взрыва ВКГС, заключенных в полузамкнутые и замкнутые взрывные камеры, и сравнение полученных данных с результатами теоретических расчетов.

В экспериментах использовались следующие взрывные камеры: ВК-1 и ВК-1' – цилиндрические открытые снизу взрывные камеры (ВК-1 выполнена из толстостенного оргстекла, ВК-1' – из стали); ВК-2 и ВК-2' – цилиндрические взрывные камеры, боковые поверхности которых выполнены в виде эластичных оболочек толщиной δ_1 и δ_2 , которые закреплены хомутами к верхнему и нижнему днищам камер и натянуты на опорный каркас из 12 стальных шпилек диаметром 6 мм, установленных между днищами; ВК-3 – сферическая взрывная камера с наружной эластичной оболочкой толщиной δ . Геометрические параметры взрывных камер представлены в табл. 1.

Таблица 1

Номер взрывной камеры	Радиус камеры R_1 , см	Толщина стенки (оболочки) δ , мм	Длина камеры l , см	Геометрический объем камеры V_k , см ³
ВК-1	5,0	25	10	200
ВК-1'	6,5	3	17,4	2100
ВК-2	3,0	0,3	17,4	400
ВК-2'	2,7	1,8	17,4	330
ВК-3	3,0	2,2	–	90

Модель скважины, в которой происходила регистрация пульсаций, представляла собой металлическую трубу с прозрачным окном из оргстекла в нижней части. В опытах применялись трубы нескольких типоразмеров. Внутри модели скважины в прозрачном окне помещали на специальной штанге взрывную камеру, а напротив устанавливали скоростную киносъемочную камеру СКС-1М. Полость взрывной камеры заполняли ВКГС от специального электролизера. Для поджига смеси использовали калильную свечу, которую располагали в верхней части взрывных камер. Для измерения импульсов давления в стенку модели скважины напротив взрывной камеры и в ее полость помещали пьезокерамические датчики давления, подключенные к запоминающему осциллографу С8-13. Моменты запуска скоростной камеры и поджигания смеси синхронизировали. Для определения скорости пленки и временных интервалов между кадрами использовался стандартный отметчик времени – неоновая лампа МН-7, которая давала 100 вспышек за 1 с, фиксируемых в виде полос на киноплёнке шириной 16 мм и чувствительностью 400 ед. Пленку проявляли, кинограмму процесса пульсаций оцифровывали, распечатывали на бумагу с обеспечением постоянного масштаба, а затем обрабатывали.

В процессе обработки изображений определяли зависимости $v = f(t)$, которые затем сравнивали с теоретически-вычисленными. По фотограммам также определяли максимальный объем продуктов взрыва $V_{\max}$ и степень ε расширения продуктов взрыва как отношение $V_{\max}$ к начальному объему V_1

$$\varepsilon = \frac{V_{\max}}{V_1}. \quad (1)$$

Далее вычисляли долю η_n начальной внутренней энергии продуктов $E = p_{\text{взр}} V_1 / (k - 1)$, перешедшую в энергию расширения $E_n = p_0 (V_{\max} - V_1)$ [4]:

$$\eta_n = \frac{E_n}{E}, \quad (2)$$

где p_0 , $p_{\text{взр}}$ – соответственно давление окружающей жидкости и давление взрыва перед расширением, $p_{\text{взр}} = 10p_0$ при взрывном горении ВКГС; k – коэффициент адиабаты. Для взрывного горения ВКГС теоретически возможные значения: $\varepsilon = 26$; $\eta_n = 0,43$, которые могут достигаться при взрывах очень больших объемов [5].

В табл. 2 представлены найденные экспериментально значения ε и η_n для различных условий взрыва.

Таблица 2

Номер взрывной камеры	Давление перед взрывом p_0 , МПа	Начальный объем V_1 , см ³	Максимальный объем $V_{\max}$, см ³	Степень расширения ε	Доля энергии η_n
ВК-1	0,103	40	180	4,5	0,058
ВК-1'	0,105	1000	4100	4,1	0,053
ВК-2	0,103	400	4700	11,8	0,18
ВК-2'	0,103	330	990	3	0,034
ВК-3	0,103	90	260	2,9	0,032

В опытах с открытыми снизу взрывными камерами ВК-1 и ВК-1' были получены близкие значения ε и η_n , несмотря на то, что начальный объем V_1 у ВК-1' в 25 раз больше, чем у ВК-1, и следовало ожидать, что эти характеристики у нее будут выше. Причина заключается в значительном теплообмене через стальные стенки камеры ВК-1' и большую поверхность раздела «пузырь – жидкость» при выходе пузыря из камеры, в то время как камера ВК-1 имеет высокую теплоизоляцию стенок и газовый пузырь не вышел в опыте за ее пределы в процессе расширения. Отсюда следует, что для повышения энергии гидротока необходимо обеспечить хорошую теплоизоляцию стенок и проектировать длину камеры такой, чтобы газовый пузырь не выходил за ее пределы, что соответствует $l = (4 - 5)h$, где h – толщина слоя ВКГС в камере.

В опытах с цилиндрической камерой ВК-2, имеющей тонкую эластичную оболочку толщиной $\delta_1 = 0,3$ мм, были получены значения $\varepsilon = 11,8$ и $\eta_n = 0,18$, почти в 3 раза превосходящие аналогичные параметры у открытых камер. Однако при увеличении толщины оболочки до $\delta_2 = 1,8$ мм (камера ВК-2') произошло значительное снижение ε и η_n до значений $\varepsilon = 3$ и $\eta_n = 0,034$, что вызвано затратами энергии продуктов взрыва на деформацию более толстой оболочки. Теми же причинами можно объяснить низкие значения $\varepsilon = 2,9$ и $\eta_n = 0,032$ у сферической камеры ВК-3, где толщина оболочки составляет $\delta = 2,2$ мм.

Удельные затраты энергии на деформацию оболочки составляют существенную долю энергии взрыва только при взрывах малых объемов на малых глубинах. Обработки фильтров взрывами ВКГС обычно производятся на глубине 40 м и более. Это означает, что накопленная в том же объеме камеры энергия возрастет в четыре раза и более, а энергия деформации оболочки останется практически той же. Следовательно, с ростом объема газовой смеси и глубины обработки будет наблюдаться тенденция к увеличению значений ε и η_n , однако при этом потребуются оболочки с оптимальным соотношением толщины и прочности.

Открытая снизу цилиндрическая взрывная камера. Физические процессы, происходящие при взрыве ВКГС в открытой снизу взрывной камере, изучались также в [5, 6], где приведены результаты скоростной съемки.

Опытами установлено, что взрыв протекает при постоянном объеме и высокой температуре (около 4000 °С) и в жидкость излучается первая (основная) волна давления с амплитудой A_1 . Под действием давления перегретого пара «водяная пробка» смещается вниз, а из-за высокой температуры газов граница «газ – вода» превращается в кипящий слой толщиной 2–3 см. Вытеснение «водяной пробки» сопровождается образованием кольцевого вихря на выходном отверстии камеры, имеющей острую кромку. Механизм формирования кольцевых вихрей в отверстиях изучался в [7].

Продукты взрыва достигают максимального объема, а затем начинают схлопываться под действием гидростатического давления и конденсации водяных паров и втягиваются внутрь камеры. Водяная пробка движется в камере с большой скоростью, что приводит к снижению в ней давления p ниже давления насыщенных паров $p_{н.п.}$. При $p < p_{н.п.}$ в жидкости возникает

кавитация. Образованию кавитации здесь способствует то, что пузырь вследствие теплообмена нагревает окружающую жидкость, а, как известно, давление насыщенных паров тем больше, чем выше температура жидкости. Вследствие кавитации поток становится молочно-белым от пузырьков выделяющегося из жидкости пара, и в камере движется двухфазный «поршень», состоящий из жидкости и водяного пара.

Частично отдавшие теплоту продукты взрыва сжимаются под действием инерции потока жидкости, и это давление сжатия превышает давление в полости сразу после взрыва, поэтому второй пик давления A_2 превышает первый A_1 .

Эффект захлопывания является одним из примеров куммуляции энергии газообразных взрывчатых веществ, при которой происходит концентрация энергии в малой области пространства с достижением высоких давлений. Описанный эффект никогда не наблюдается при расширении сжатого холодного газа в жидкости (физический взрыв), для которого хорошо выполняются условия адиабатических пульсаций [4, 8].

Эффект «аномальной пульсации», наблюдающийся при подводном взрыве газовых смесей, связан с тепловыми потерями из пузыря, приводящими к сжатию пузыря до размера, меньшего, чем начальный. В [4] сравнивались наблюдаемые и расчетные зависимости давление–время в волнах и оказалось, что найденные экспериментально величины периодов пульсаций ниже вычисленных из предположения об изэнтропичности процесса пульсаций. Это указывает на существование потерь из полости, заметно больших, чем акустическое излучение. Причиной потерь является теплопередача из пузыря к окружающей жидкости, чему способствует высокая температура в продуктах взрыва.

Процессы наполнения взрывной камеры газовой смесью, ее сгорания и расширения продуктов взрыва можно приближенно представить в виде диаграммы 0–1–2–3, построенной для идеального газа в координатах $p - V$ (рис. 1).

Из диаграммы видно, что идеальный газ при постоянном давлении p_0 , равном абсолютному давлению во взрывной камере, наполняет ее до объема V_1 (изобарный процесс наполнения 0–1). После этого газу при постоянном объеме V_1 сообщается некоторое количество теплоты q_1 , которое приводит к возрастанию давления до $p_{взр}$ (изохорный процесс сгорания 1–2). В процессе 2–3 рабочее тело расширяется по адиабате 2–3 и совершает полезную работу по перемещению жидкости во взрывной камере (адиабатный процесс расширения 2–3).

Действительные процессы, происходящие во взрывной камере скважинного снаряда, отличаются от идеальных: с газом происходят не только физические, но и химические изменения. Подвод теплоты осуществляется не извне, а в результате сжигания газовой смеси. В действительном процессе расширения вследствие теплообмена с окружающей средой рас-

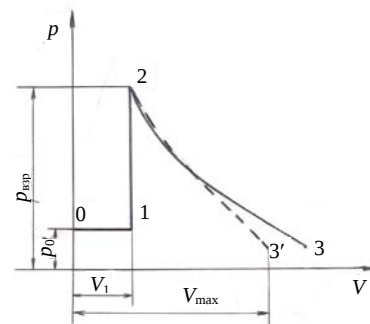


Рис. 1

ширение происходит не адиабатно, а политропно, причем показатель политропы непрерывно изменяется. Процесс расширения начинается в момент окончания процесса сгорания (точка 2). Параметры газа в начале расширения $p_{взр}$, V_1 , $T_{взр}$, в конце расширения p_3 , V_{max} , T_3 (точка 3'). Процесс расширения протекает с теплообменом. В начале расширения газ подогревается за счет теплоты догорающего энергоносителя. На всем протяжении хода расширения газ отдает теплоту более холодным стенкам взрывной камеры и жидкости, с которой он контактирует. Поэтому процесс расширения происходит политропно с непрерывно изменяющимся показателем политропы. В расчетах рабочих процессов, протекающих, например, в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания, коэффициент политропы n принимают некоторым средним и постоянным на всем протяжении такта расширения продуктов сгорания и определяют по опытным данным [9].

В настоящей работе коэффициент n приближенно определялся из выражения $n = (\lg p_{взр} - \lg p_3) / (\lg V_{max} - \lg V_1)$ по данным скоростной съемки и измерений давления в продуктах взрыва.

На показатель политропы влияют: 1) геометрический объем V_1 – при меньшем объеме показатель политропы расширения увеличивается, так как растет теплообмен из-за укорачивания путей отвода тепла по сравнению с большими объемами; 2) скорость сгорания смеси – чем меньше скорость сгорания, тем больше догорание на линии расширения и тем меньше n .

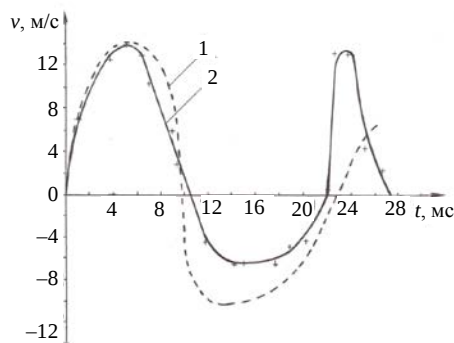


Рис. 2. Результаты теоретических (кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) исследований зависимости $v = f(t)$ в открытой снизу цилиндрической камере: $R_1 = 0,025$ м; $l = 0,1$ м; $l_{\phi} = 0,6$ м; $R_{\phi} = 0,1$ м; $h = 0,02$ м; $l_a = 0,22$ м; $n = 2,2$; $m = 10$

На рис. 2 показано сравнение полученной по фотограммам зависимости скорость – время для газового пузыря во взрывной камере ВК-1 при $V_1 = 1/5 V_k$ с расчетной зависимостью, полученной на основе решения энергетического уравнения [1] при постоянном значении коэффициента политропы в течение всего процесса $n = 2,2$.

Если сравнивать экспериментальные и расчетные зависимости, то видно, что достаточно хорошая сходимость полученных кривых наблюдается на участке разгона «водяной пробки» в камере при первой пульсации продуктов взрыва. Отклонение расчетных данных от экспериментальных на участке разгона не превышает 5 %. Сопоставление кривых на последующих участках движения – замедления «водяной пробки» и схлопывания продуктов взрыва, – показало, что теоретическая кривая дает несколько завышенные значения скоростей по сравнению с экспериментальными, за исключением окончания схлопывания, где действительные скорости выше расчетных. Как указывалось, это объясняется нестационарным теплообменом и фазовыми переходами в процессе пульсаций продуктов взрыва ВКГС, которые не могут быть учтены при $n = \text{const}$.

Замкнутая цилиндрическая взрывная камера с эластичной оболочкой. На рис. 3 представлен фрагмент кинограммы пульсаций замкнутой цилиндрической взрывной камеры ВК2 с эластичной оболочкой толщиной $\delta = 0,3$ мм.

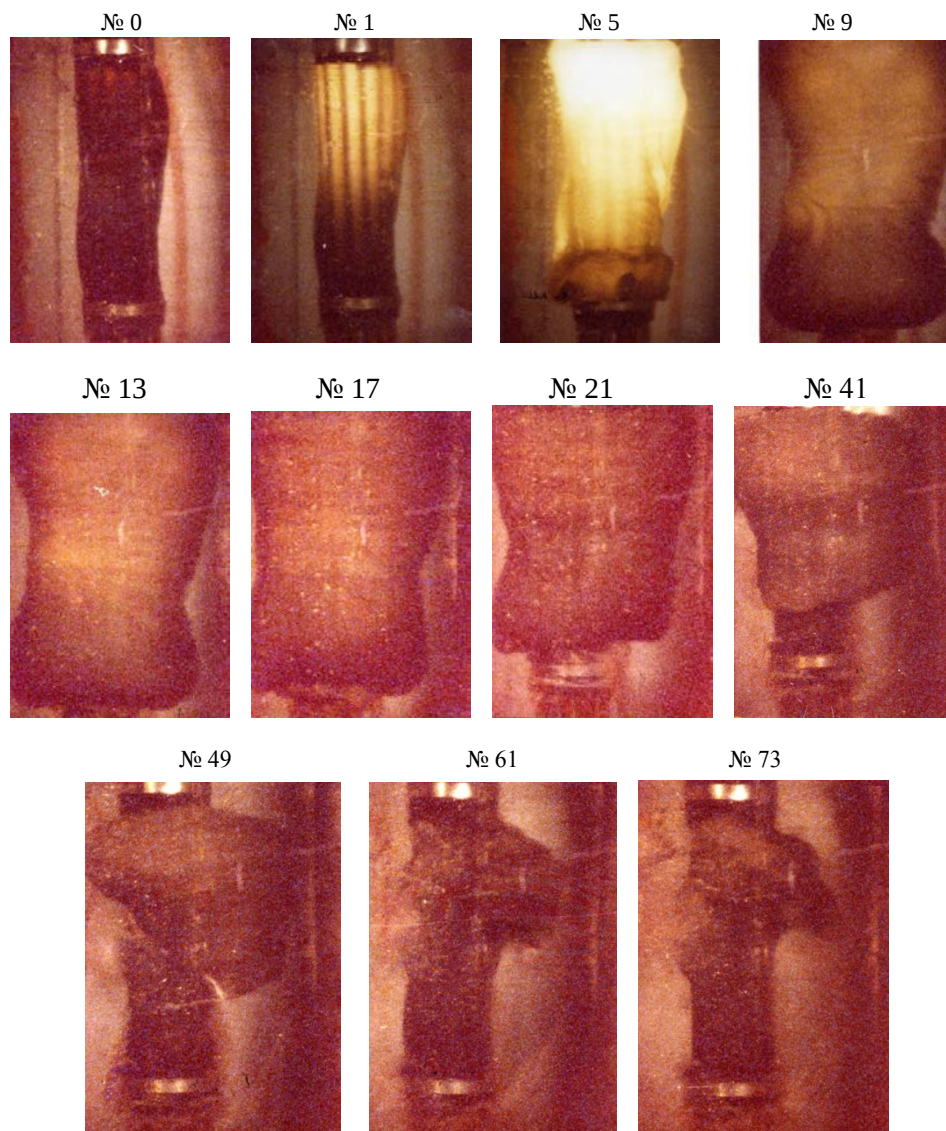


Рис. 3. Кинограмма пульсаций цилиндрической взрывной камеры ВК-2 с эластичной оболочкой толщиной $\delta = 0,3$ мм. Скорость пленки 2800 кад/с, время между кадрами $\Delta t = 0,36$ мс

Кадр № 0 фиксирует появление свечения в верхней части взрывной камеры, где установлена свеча поджига со спиралью накаливания, работающей в момент поджига в перекале. Промежуток времени между кадрами (0–1), равный около 0,36 мс, соответствует поджигу ВКГС в верхней части камеры и началу распространения пламени вдоль камеры. К моменту времени 0,72 мс (кадр № 2) фронт горения достигает нижнего дна камеры и с этого момента продукты взрыва начинают расширяться. Таким образом, средняя скорость движения фронта горения на участке

длины камеры приближенно равна $v \approx l/t \approx 0,174/0,00072 \approx 242$ м/с, что соответствует взрывному горению ВКГС. Как известно, при детонации $v = 2800$ м/с.

С этого момента продукты взрыва начинают расширяться с увеличением объема, причем кинограмма от кадра № 1 до кадра № 5 характеризуется сильным свечением из-за догорания топлива. Расширение сопровождается значительным теплообменом с окружающей жидкостью, что приводит к закипанию воды на поверхности оболочки и образованию пузырьков пара (кадр № 5). Так как оболочка закреплена хомутами по краям цилиндрической камеры, в верхней и нижней частях камеры она расширяется не аксиально, а по более сложной траектории. Причем верхняя треть оболочки расширяется быстрее, чем остальная ее часть, и к моменту окончания расширения имеет больший объем, чем нижняя, что объясняется наименьшим суммарным гидростатическим и гидродинамическим давлениями в жидкости в верхней части кольцевого зазора. Именно здесь в кольцевом зазоре между стенкой скважины и камерой при ее расширении будет наибольшая скорость и, следовательно, наименьшее гидродинамическое давление. Процесс расширения продолжается порядка 8 мс. Затем продукты взрыва начинают схлопываться, причем схлопывание также идет неравномерно: по направлению снизу вверх (кадры 21–73). Это объясняется тем, что схлопывание продуктов взрыва происходит под действием гидростатического давления, которое в нижней части взрывной камеры наибольшее. Кроме того, температура продуктов взрыва неодинакова по высоте взрывной камеры, и в верхней части она больше, поэтому процесс схлопывания здесь идет с некоторым запаздыванием.

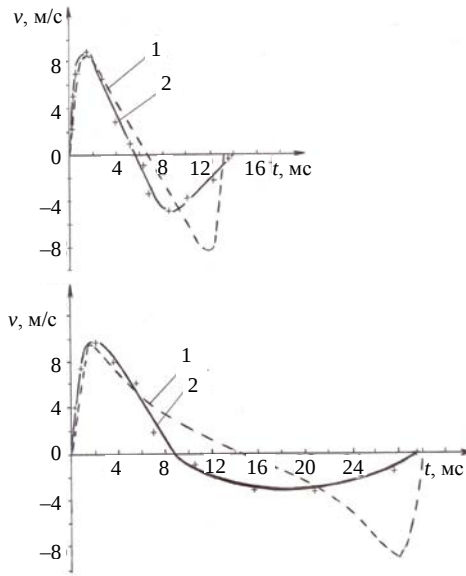
Анализ кинограммы пульсаций замкнутой цилиндрической взрывной камеры ВК-2' с более толстой эластичной оболочкой толщиной $\delta = 1,8$ мм показал, что расширение стенок взрывной камеры протекает по высоте более равномерно, чем у камеры ВК-2 с более тонкой оболочкой (рис. 3), однако и здесь наблюдаются некоторые вздутия в местах крепления оболочки хомутами. На стадии расширения не обнаружено образования пузырьков пара на наружной поверхности оболочки из-за теплообмена, хотя на стадии схлопывания вся наружная поверхность покрыта пузырьками пара. Это, видимо, вызвано кавитацией в слоях жидкости, прилегающих к схлопывающейся с большой скоростью оболочке. Высокая скорость схлопывания обусловлена как конденсацией продуктов взрыва, так и упругостью возвращающейся назад оболочки. Процесс схлопывания также начинается с нижней части взрывной камеры и заканчивается в верхней.

На рис. 4 показано сравнение полученных по фотограммам зависимостей скорость – время для взрывных камер ВК-2 и ВК-2', имеющих эластичные оболочки толщиной $\delta = 1,8$ мм и $\delta = 0,3$ мм, с расчетными зависимостями, полученными на основе решения энергетического уравнения [2].

Сопоставление полученных кривых показывает, что хорошая сходимость наблюдается на участке разгона фазы расширения первой пульсации продуктов взрыва. Отклонение расчетных данных от экспериментальных на участке разгона не превышает 5 %. Сопоставление кривых на после-

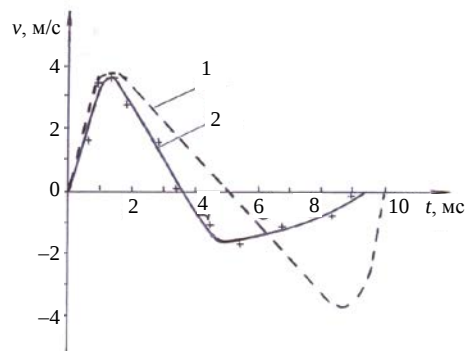
дующих участках движения: замедления и схлопывания продуктов взрыва показало, что, как и для открытой снизу камеры, теоретические кривые дают несколько завышенные значения скоростей по сравнению с экспериментальными. Как указывалось выше, это объясняется нестационарным теплообменом и фазовыми переходами в процессе пульсаций продуктов взрыва ВКГС.

Рис. 4. Результаты сравнения расчетных зависимостей скорость – время (кривые 1) радиального движения эластичной оболочки в замкнутой цилиндрической камере с экспериментальными зависимостями (кривые 2), полученными при скоростной съемке: а – $\delta = 1,8$ мм, $R_1 = 0,027$ м, $l_1 = 0,174$ м, $R_\phi = 0,125$ м, $l_\phi = 0,35$ м, $n = 1,5$, $m = 10$, $E = 7$ МПа; б – $\delta = 0,3$ мм, $R_1 = 0,03$ м, $l_1 = 0,174$ м; $R_\phi = 0,15$ м, $l_\phi = 0,35$ м, $n = 1,7$, $m = 10$, $E = 4$ МПа



Замкнутая сферическая взрывная камера с эластичной оболочкой. Анализ кинограмм показал, что в процессе пульсаций взрывная камера сохраняет сферическую форму. На рис. 5 показано сравнение полученных по фотограммам зависимостей скорость – время для взрывной камеры ВК-3 с расчетной зависимостью (на основе решения энергетического уравнения) [3].

Рис. 5. Результаты сравнения расчетной зависимости скорость – время (кривая 1) радиального движения эластичной оболочки замкнутой сферической взрывной камеры с экспериментальной зависимостью (кривая 2), полученной при скоростной съемке: $\delta = 2,2$ мм, $R_1 = 0,03$ м, $l_a = 0,25$ м, $R_\phi = 0,062$ м, $l_\phi = 0,5$ м, $n = 1,8$, $m = 10$, $E = 8$ МПа



Хорошая сходимость наблюдается на участке разгона фазы расширения первой пульсации продуктов взрыва, причем отклонение расчетных данных от экспериментальных здесь не превышает 5 %. При анализе дальнейшего движения сферической оболочки полученные расчетные кривые лежат выше экспериментальных, что объясняется нестационарным теплообменом и фазовыми переходами в процессе пульсаций продуктов взрыва ВКГС.

ВЫВОДЫ

1. В результате скоростной фоторегистрации получена качественная картина физических процессов, происходящих при пульсациях продуктов взрыва ВКГС в полузамкнутых и замкнутых камерах с эластичными оболочками. По фотограммам определены значения степени расширения $\varepsilon = 2,9\text{--}11,8$ и доли энергии продуктов взрыва, перешедшей в энергию расширения $\eta_n = 0,032\text{--}0,18$. Наибольшие значения указанных параметров имеют место для цилиндрической замкнутой камеры с минимальной толщиной эластичной оболочки. Установлено, что для повышения значений ε и η_n необходимо применять взрывные камеры с теплоизолированными стенками, при этом длина полузамкнутых камер должна быть не менее $l = (4\text{--}5)h$, а эластичные оболочки в замкнутых камерах должны иметь оптимальное соотношение толщины и прочности.

2. Эксперименты показали, что на стадии процесса разгона продуктов взрыва имеет место хорошее совпадение с результатами теоретических расчетов на базе математической модели, основанной на решении энергетического уравнения подводного взрыва [1–3]. Для расчетов стадий торможения и схлопывания продуктов взрыва необходимо использовать переменное во времени значение коэффициента политропы.

ЛИТЕРАТУРА

1. И в а ш е ч к и н, В. В. Гидродинамика подводного газового взрыва в полузамкнутой камере, находящейся в скважине / В. В. Ивашечкин, В. В. Верemenюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2009. – № 1. – С. 74–81.
2. И в а ш е ч к и н, В. В. Расчет пульсаций продуктов цилиндрического подводного газового взрыва в скважине / В. В. Ивашечкин, В. В. Верemenюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 2. – С. 79–90.
3. И в а ш е ч к и н, В. В. Расчет пульсаций продуктов сферического подводного газового взрыва в скважине / В. В. Ивашечкин, В. В. Верemenюк // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2008. – № 4. – С. 77–82.
4. П о п о в, О. Е. Об одной особенности подводного взрыва газовых смесей / О. Е. Попов, С. М. Когарко // Физика горения и взрыва. – 1976. – № 4. – С. 610–614.
5. И в а ш е ч к и н, В. В. Газоимпульсная технология восстановления пропускной способности фильтров водозаборных скважин / В. В. Ивашечкин; под ред. А. Д. Гуриновича. – Минск: БНТУ, 2005. – 270 с.
6. И в а ш е ч к и н, В. В. Экспериментальное исследование газодинамического способа воздействия на фильтр и прифильтровую зону скважин / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, Д. А. Прокопчук // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С. 41–46.
7. Н и к о л а е в с к и й, В. Н. Вихревые движения жидкости / В. Н. Николаевский, Г. Ю. Степанов. – М.: Мир, 1979. – 324 с.
8. С в е т л о в, Б. Я. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ / Б. Я. Светлов, Н. Е. Еременко. – М.: Недра, 1966. – 287 с.
9. Г р у з б е р г, Л. Ю. Главные судовые двигатели / Л. Ю. Грузберг, А. Д. Петренко. – Л.: Судостроение, 1972. – 398 с.

Представлена кафедрой
гидравлики

Поступила 02.12.2009