

## Численный анализ схлопывания упругопластической оболочки с учетом развития неустойчивости процесса

© А.С. Новосельцев, А.В. Бабкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*В статье представлено схлопывание упругопластической оболочки (кумулятивной облицовки) под действием внешних поверхностных сил, имитирующих взрывное нагружение, изучаемое с помощью математического моделирования с использованием численных методов расчета. Данная оболочка рассматривалась в рамках двумерной плоской нестационарной задачи механики сплошных сред. В качестве численного метода использовался лагранжесв метод Уилкинса. Неустойчивость деформирования оболочки инициировалась гармоническими поверхностными возмущениями, изначально задаваемыми на наружной или внутренней поверхности. Параметры взрывного нагружения (максимальное давление, постоянная времени спада давления, время приложения взрывной нагрузки) также изменялись в ходе численного эксперимента. Степень проявления неустойчивости определялась по отклонению возмущенной поверхности (границы так называемого струеобразующего слоя) от цилиндрической поверхности. Показано влияние на развитие неустойчивости параметров оболочки, импульсного нагружения на оболочку. Установлены параметры, наиболее сильно влияющие из них на неустойчивость при схлопывании.*

**Ключевые слова:** оболочка, поверхность, нагружение, взрыв, возмущение, развитие, неустойчивость

**Введение.** При функционировании кумулятивных зарядов [1], других взрывных устройств сверхвысоких мощностей и энергий [2] одним из факторов, оказывающих влияние на формирование кумулятивной струи, является устойчивость деформирования кумулятивной облицовки [3, 4].

Это явление было изучено с помощью методов численного моделирования [5, 6]. Используя математическую модель, алгоритм численного конечно-разностного расчета и расчетную программу, представленную авторами в работе [7], проведено исследование режимов схлопывания упругопластической оболочки под действием импульсной нагрузки. Оболочка рассматривалась как двумерная плоская, а соответствующая решаемая задача механики сплошных сред — как нестационарная.

Цель настоящей статьи — проанализировать влияния характеристик материала и параметров оболочки на развитие неустойчивости и выявить параметры, наиболее сильно влияющие на развитие возмущений. В рассматриваемом примере авторы настоящей статьи использовали технологический аспект решаемой задачи — процесс развития неустойчивости инициировался геометрическими несовер-

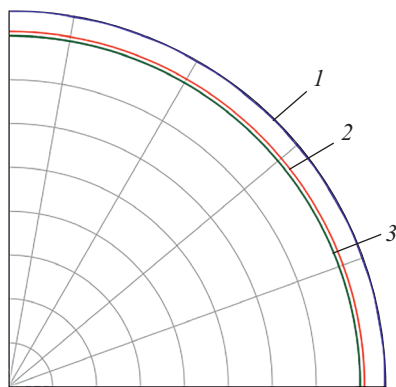
шенствами формы оболочки, нагружаемой взрывом, или асимметрией, прилагаемой к оболочке взрывной нагрузки.

**Влияние изначальных параметров поверхностных возмущений и их локализации.** Анализ развития неустойчивости был представлен в виде сопоставления соответствующих рисунков, полученных в результате расчета, и коротких комментариев к ним. Для изучения разнообразия вариантов развития неустойчивости схлопывающейся оболочки проведем сопоставление оболочек с гармоническими поверхностными возмущениями, различающимися параметрами этих возмущений и их изначальной локализацией (на наружной или внутренней поверхности) [8].

Все сравниваемые варианты построены по следующей схеме. На всех рисунках в настоящей статье показаны фрагменты оболочки (1/4), полученные тангенциальным кратным повторением расчетного элемента [5]. Каждый фрагмент ограничен возмущаемыми наружной 1 или внутренней 3 поверхностями (рис. 1), между ними находится так называемый струеобразующий слой 2 — зона, из которой образуется кумулятивная струя (КС). Данный слой задан как 20 % [2] массы оболочки со стороны внутренней поверхности.

Начальные гармонические возмущения были заданы достаточно малой амплитуды, которая соответствовала технологической погрешности по разностенности кумулятивной облицовки (КО), равной  $2A = 30$  мкм, что составляет примерно 2 % толщины оболочки (см. рис. 1).

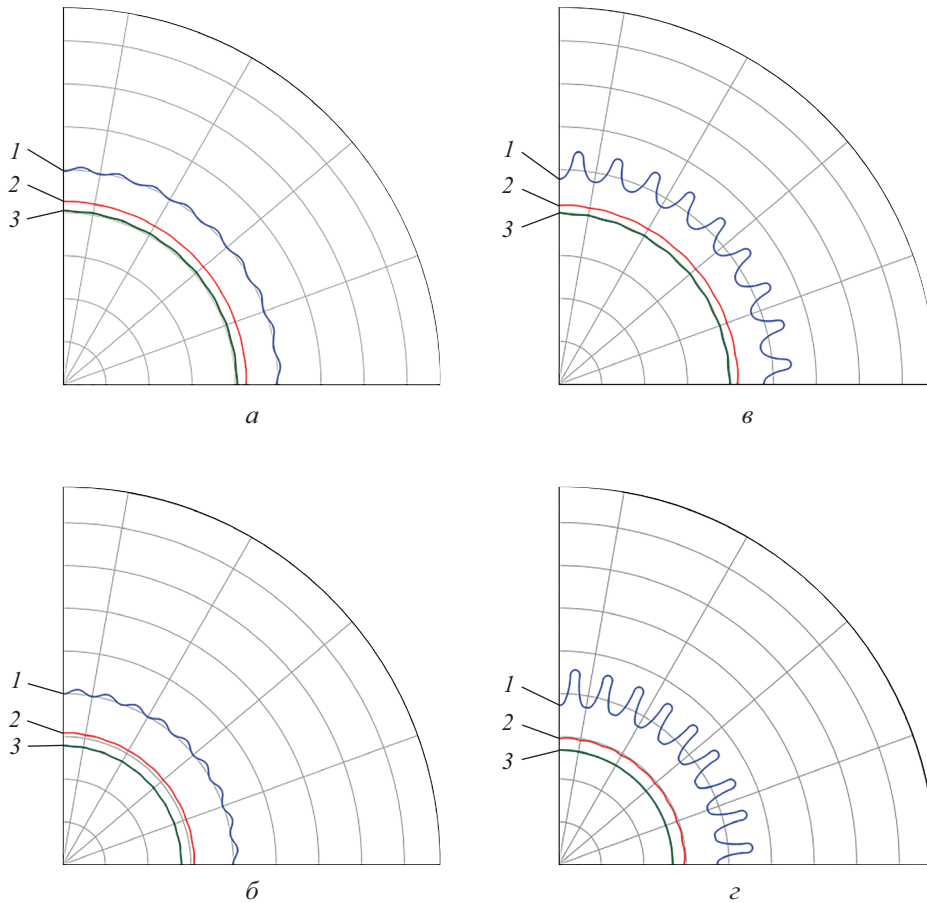
Влияние на процесс схлопывания оболочки пространственной локализации изначальных задаваемых гармонических поверхностных



**Рис. 1.** Фрагмент оболочки в начальный момент времени ( $t = 0$ ): 1 — наружная граница оболочки; 2 — струеобразующий слой; 3 — внутренняя граница оболочки

возмущений показано на рис. 2. Пространственная частота возмущений в обоих случаях одинакова: изображения на рис. 2, б и в соответствуют заданию возмущений на наружной поверхности, на рис. 2, г и д — на внутренней. Для различных моментов времени  $t$  показаны конфигурации наружной и внутренней поверхностей оболочки, а также граница струеобразующего слоя. Начальные малые возмущения формы наружной поверхности в процессе динамического деформирования оболочки вырастают в десятки и сотни раз и значительно изменяют ее форму. Однако (в отличие от [9])

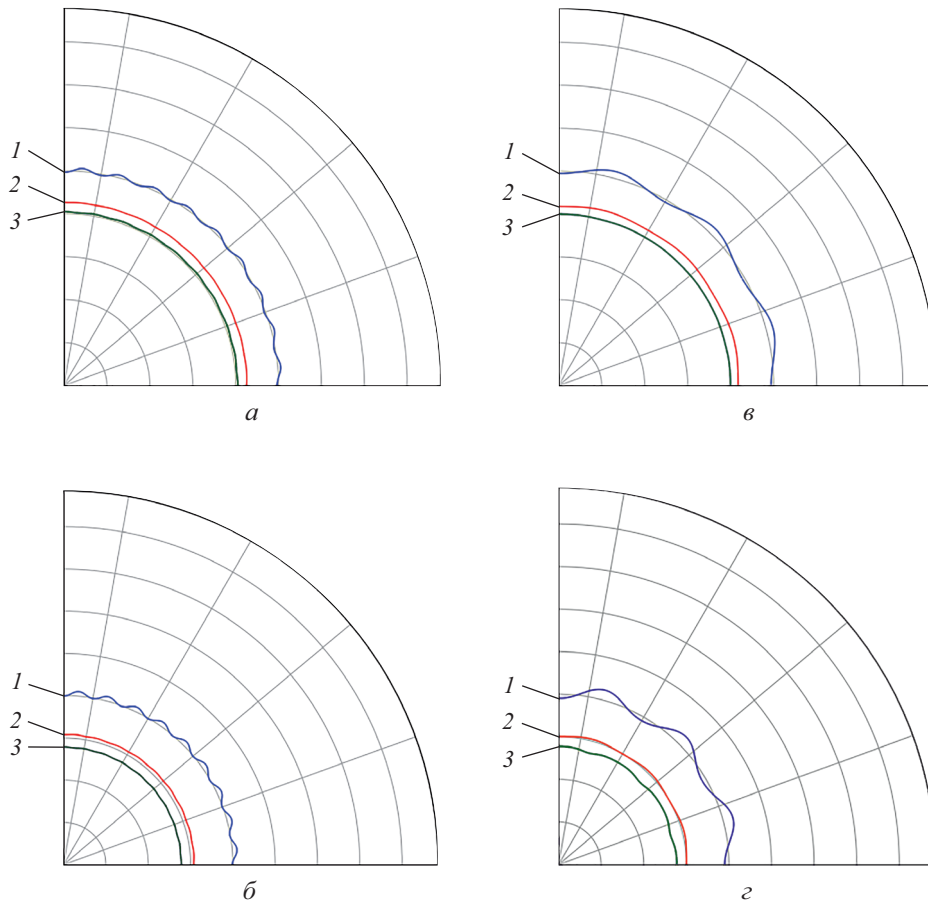
искажение формы оболочки существенно проявляется лишь на наружной поверхности, тогда как внутренняя поверхность и струеобразующий слой в целом деформируются устойчиво.



**Рис. 2.** Развитие возмущений, заданных на внутренней или внешней поверхности:  
*a, б* — изначально возмущена наружная поверхность оболочки;  
*в, г* — изначально возмущена внутренняя поверхность оболочки;  
 $t = 3,7$  мкс (*a, в*),  $t = 4,5$  мкс (*б, г*)

Для сопоставления на рис. 3 приведены разночастотные возмущения при неизменных других параметрах (амплитуда, область задания возмущений и т. д.): изображения на рис. 3, *a* и *б* соответствуют относительно коротковолновым возмущениям; на рис. 3, *в* и *г* — относительно длинноволновым. В этом случае, несмотря на явную потерю формы длинноволновым возмущением, струеобразующий слой сохраняет форму. Кроме того, коротковолновые возмущения, изначально существующие на внутренней поверхности, перемещаются на наружную поверхность. Неустойчивость при динамическом схлопывании оболочки при рассмотренных соотношениях амплитуд и длин волн развивается в соответствии с закономерностями неустойчи-

ности Рэлея — Тейлора [10–12]. Движущим фактором ее развития в рассматриваемом случае являются массовые силы инерции, направленные в системе отсчета оболочки от оси и стремящиеся «разгладить» внутреннюю и «возмутить» внешнюю поверхности оболочки. Как следует из результатов расчетов (см. рис. 3), при схлопывании рассмотренных оболочек эффекты ударноволновой неустойчивости Рихтмайера — Мешкова [13, 14] не проявляются.



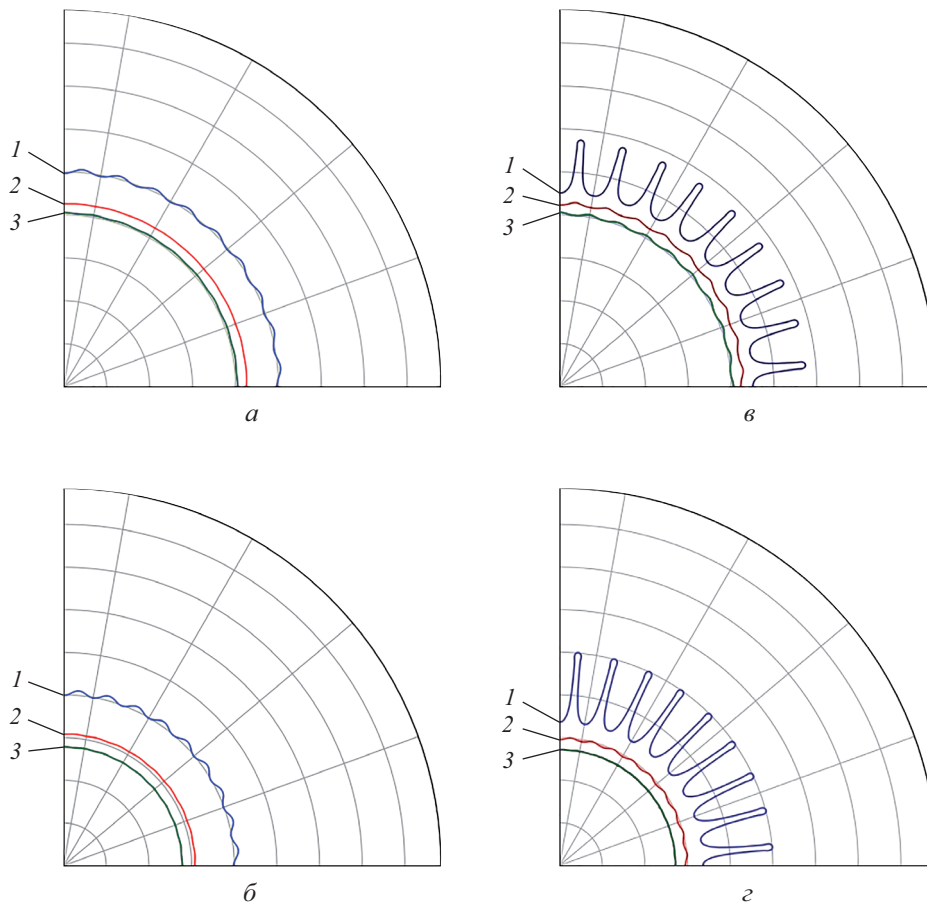
**Рис. 3.** Развитие возмущений разной частоты, изначально задаваемых на внутренней поверхности оболочки:

*a, б* — высокочастотные возмущения; *в, г* — низкочастотные возмущения;  
 $t = 3,7$  мкс (*a, в*),  $t = 4,5$  мкс (*б, г*)

Согласно рис. 3, можно сделать вывод о том, что с увеличением длины волны начального гармонического возмущения формы оболочки степень проявления неустойчивости деформирования оболочки уменьшается на наружной и увеличивается на внутренней поверхности. Следовательно, с увеличением длины волны геометрических возмущений в большей степени проявляется эффект разнотолщинности оболочки (разнотолщинность оболочки ведет к различию в ради-

альных скоростях движения на участках фрагмента оболочки), что и приводит к большему искажению внутренней поверхности. Более коротковолновые возмущения взаимодействуют между собой по внутренней поверхности, мешая развиваться друг другу. Однако на наружной поверхности, более подверженной развитию неустойчивости, те же более коротковолновые (более интенсивные) начальные возмущения проявляются в большей степени.

Влияние начальной амплитуды гармонических возмущений на схлопывание фрагмента оболочки (при прочих равных условиях) показано на рис. 4.

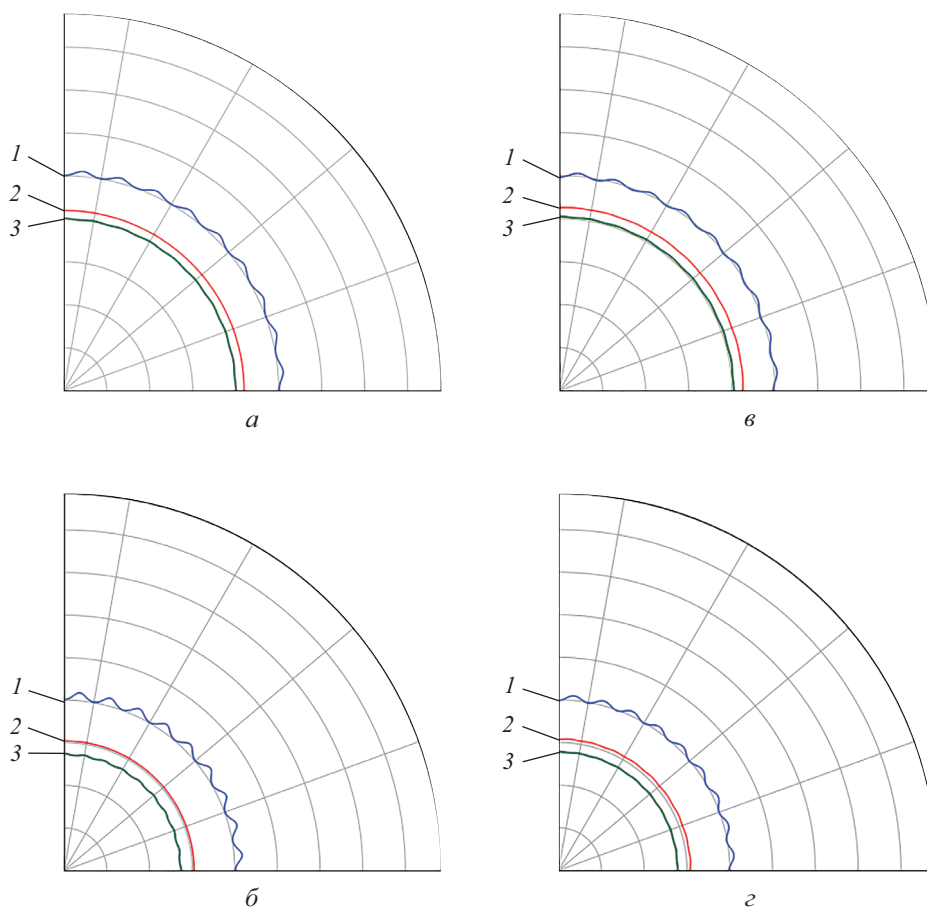


**Рис. 4.** Развитие возмущений меньшей и большей амплитуд, изначально задаваемых на внутренней поверхности оболочки:  $2A = 30$  мкм (*а, б*),  $2A = 60$  мкм (*в, г*);  $t = 3,7$  мкс (*а, в*),  $t = 4,5$  мкс (*б, г*)

Оболочка деформируется абсолютно устойчиво (внутренняя и внешняя поверхности остаются цилиндрическими, см. рис. 1) только в одном случае отсутствия начальных несовершенств формы (разностенность  $2A = 0$ ). Даже при разностенности  $2A = 15$  мкм (в 2 раза меньше разностенности, реализуемой технологически, амплитуда со-

ставляет 0,5 % толщины оболочки) внешняя поверхность деформируется с развитием начальных возмущений. При амплитудах, соответствующих разностенностям  $2A = 60$  мкм (амплитуда составляет 2 % толщины оболочки) и  $2A = 90$  мкм (амплитуда составляет 3 %), развитие неустойчивости проявляется таким образом, что затрагивает внутреннюю поверхность и 20 % струеобразующего слоя облицовки.

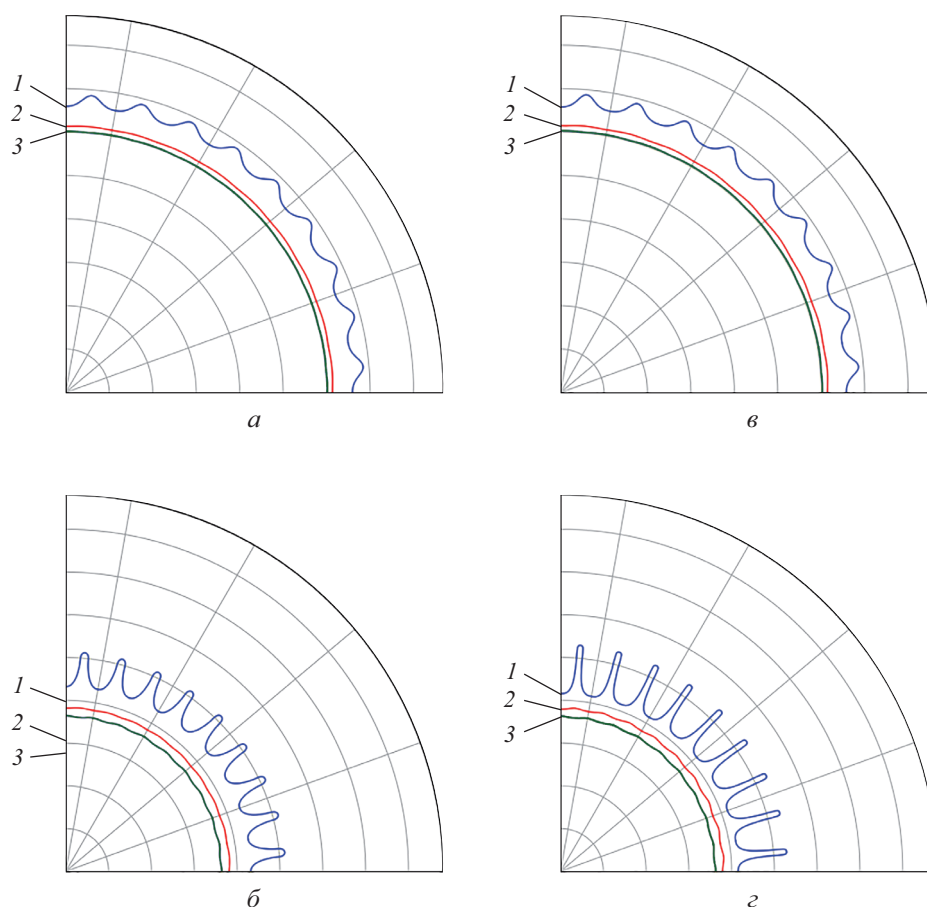
**Влияние на развитие неустойчивости схлопывающейся оболочки физико-механических свойств ее материала.** Из основных свойств материала рассмотрены плотность  $\rho_0$  и динамическая прочность, характеризуемая динамическим пределом текучести  $Y_0$ . Влияние данных величин на развитие возмущений показано на рис. 5.



**Рис. 5.** Развитие возмущений в непрочной и прочных средах, изначально задаваемых на внутренней поверхности оболочки:  
 а, б —  $Y_0 = 0$ ; в, г —  $Y_0 = 0,2$  ГПа;  $t = 3,7$  мкс (а, в),  $t = 4,5$  мкс (б, г)

При заданных прочих параметрах возмущений (изначальная локализация на внутренней, см. рис. 5, а, б, или наружной поверхности, см. рис. 5, в, г; одинаковые относительная амплитуда и простран-

ственная частота и т. д.) влияние прочности  $Y_0$  на процесс развития возмущений зависит от начальной локализации гармонических возмущений. Если изначально возмущена внутренняя поверхность, то в динамике струеобразующий слой остается близким к геометрически идеальному, а возмущения с внутренней поверхности тем не менее остаются малыми (см. рис. 5, б, з) вплоть до окончания схлопывания оболочки. Если возмущения изначально задаются на внешней поверхности, по мере схлопывания развивается ее неустойчивое деформирование, затрагивающее струеобразующий слой.



**Рис. 6.** Развитие возмущений на поверхностях относительно плотной и менее плотной оболочек при разном среднем радиусе внутренней поверхности  $r$ :  
 $a, б$  —  $\rho_0 = 8900 \text{ кг/м}^3$ ;  $в, з$  —  $\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$ ;  $r = 15 \text{ мм}$  ( $a, в$ ),  $r = 9 \text{ мм}$  ( $б, з$ )

Подобное «неопасное» влияние на схлопывание оболочки и развитие неустойчивости имеет и плотность: более легкий и более «скоростной» материал способствует более быстрому и устойчивому схлопыванию при практически идеальном струеобразующем слое (рис. 6).

**Влияние асимметрии взрывного нагружения геометрически совершенных оболочек на развитие неустойчивости.** Ниже приведены результаты, показывающие влияние параметров асимметрии взрывного нагружения изначально геометрически совершенных оболочек (без начальных поверхностных возмущений, изначально цилиндрических) на их схлопывание.

При моделировании взрывного нагружения использовалось следующее уравнение для поверхностного давления:

$$p_{\text{гр}} = p_{\text{м}} \exp\left[-H(t-t_*)(t-t_*)/\tau\right], \quad (1)$$

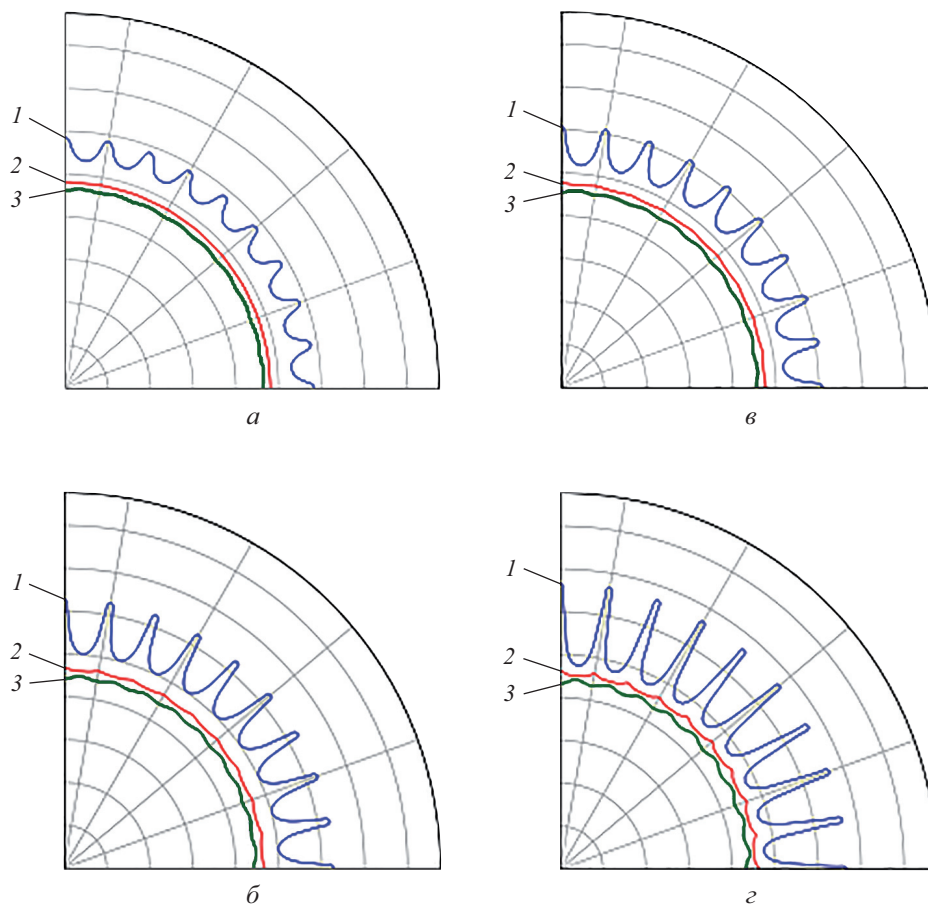
где  $p_{\text{м}}$  — максимальное граничное давление, Па;  $H(t-t_*)$  — функция Хевисайда ( $H = 0$  при  $t < t_*$ ;  $H = 1$  при  $t > t_*$ );  $t_*$  — время задержки появления давления нагружения на данном участке наружной поверхности, мкс;  $\tau$  — характерное время спада давления, мкс.

С помощью граничного условия (1) нагрузку на оболочку моделировали как при равномерном ее приложении по наружной поверхности фрагмента ( $t_* = 0$ ,  $p_{\text{м}}$  и  $\tau$  не зависят от тангенциальной координаты), так и при наличии тангенциальной асимметрии нагрузки (величины  $p_{\text{м}}$ ,  $\tau$  и  $t_*$  изменяются по гармоническому закону в зависимости от угловой координаты в пределах полного угла  $\theta_0$  выделенного фрагмента оболочки). Расчет проводился при максимальном давлении  $p_{\text{м}} = 35$  ГПа и  $\tau = \tau_0 = 1,5$  мкс [15].

На рис. 7 показаны результаты влияния на схлопывание изначально геометрически совершенной оболочки действия максимального давления  $p_{\text{м}}$ , заданного в виде гармонической функции в зависимости от угловой координаты.

При одинаковом моменте времени  $t = 3,3$  мкс возмущения поверхностного давления оказывают существенное влияние на схлопывание оболочки. При его отклонении в 1 % от номинального давления неустойчивость активно развивается на наружной поверхности, не затрагивая внутреннюю поверхность и струеобразующий слой. При флуктуациях максимального давления, составляющих 2 %, неустойчивость на наружной поверхности значительно превышает наблюдающуюся при схлопывании оболочки с гармоническими поверхностными возмущениями такой же относительной начальной амплитуды и длины волны (см. рис. 4, а, б). При гармонических возмущениях максимального давления в 3 и 5 % развитие неустойчивости на схлопывающейся оболочке затрагивает внутреннюю границу поверхности со струеобразующим слоем.

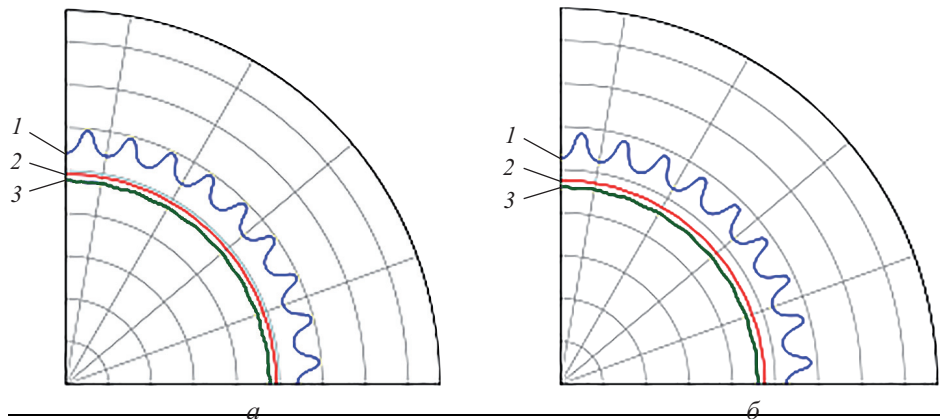




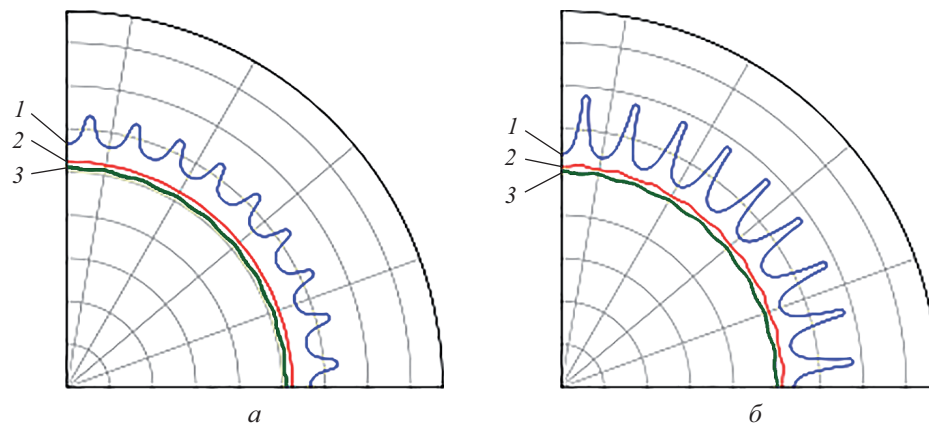
**Рис. 7.** Развитие возмущений в оболочке с заданным на наружной поверхности гармоническим законом изменения максимального давления:  
*a* — 1 %; *б* — 3 %; *в* — 2 %; *г* — 5 %

При таком же моменте времени  $t = 3,3$  мкс меньшее влияние на развитие неустойчивости динамического деформирования изначально геометрически совершенной оболочки оказывает асимметрия взрывной нагрузки, задаваемая в виде гармонической зависимости характерного времени спада давления  $\tau$  (см. граничное условие (1) от угловой координаты). На рис. 8 приведены результаты расчетов развития неустойчивости при варьировании значения характерного времени спада давления  $\tau = 0,95 \dots 1,05\tau_0$  мкс.

Меньшее влияние по сравнению с колебаниями максимального давления оказывает асимметрия характерного времени спада давления  $\tau$  несмотря на то, что их вклад в величину удельного импульса равноправен. Отсюда можно предположить, что на развитие неустойчивости наибольшее влияние оказывает начальная ударноволновая фаза взрывного нагружения, а влияние асимметрии последующей взрывной нагрузки вторично.



**Рис. 8.** Развитие возмущений в оболочке на внешней поверхности при характерном времени спада  $\tau = 0,95\tau_0$  (а),  $\tau = 1,05\tau_0$  (б)



**Рис. 9.** Развитие возмущений в оболочке при разновременности  $t_* = 10$  (а) и  $t_* = 25$  нс (б)

Вместе с тем, проведенные расчеты (рис. 9) показывают сильное влияние разновременности приложения взрывной нагрузки на различных по угловой координате участках оболочки (величина  $t_*$  в граничном условии (1) изменяется по гармоническому закону).

Даже при разновременности  $t_* = 10$  нс неустойчивость видна на наружной поверхности. При разновременности  $t_* = 25$  нс развитие неустойчивости носит катастрофический характер: возмущения проникают в струеобразующий слой, происходит значительное движение материала в тангенциальном направлении и перераспределение массы оболочки по угловой координате.

**Заключение.** В настоящей статье были выделены параметры, оказывающие наибольшее влияние на развитие неустойчивости при схлопывании оболочки, соответствующие в реальности неидеальности нагружения кумулятивной облицовки детонационной волной или несовершенству формы облицовки:

- геометрические параметры поверхностных возмущений на оболочке;
- время приложения импульсной нагрузки к оболочке;
- отклонения максимального давления.

В рассмотренных вариантах поверхностных возмущений механизмом неустойчивости является инерционная неустойчивость Релея — Тейлора, согласно которой неустойчивости практически во всех расчетных вариантах внутренняя поверхность оболочки деформировалась устойчиво, наружная поверхность оболочки чаще всего искажалась с проявлением мощных тангенциальных движений. С такими движениями можно сравнить результирующее разрушение оболочки на фрагменты.

Продолжение изучения этой темы приведет к большему пониманию происходящих в кумуляции процессов, выявлению рациональных конструктивных параметров, режимов функционирования кумулятивных зарядов и созданию кумулятивных взрывных устройств повышенной эффективности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, 506 с.
- [2] Орленко Л.П., ред. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Москва, Физматлит, 2002, 656 с.
- [3] Пай В.В., Титов В.М., Лукьянов Я.Л., Пластинин А.В. Исследование неустойчивости конической облицовки в процессе формирования кумулятивной струи. *Физика горения и взрыва*, 2019, № 4, с. 69–73.
- [4] Зельдович В.И., Фролова Н.Ю., Хейфец А.Э., Хомская И.В., Дегтярев А.А., Шорохов Е.В. [и др.]. Деформационные явления при схождении металлических цилиндрических оболочек. Потеря устойчивости. *Физика горения и взрыва*, 2019, № 4, с. 92–102.
- [5] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. *Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов*. Т. 3. 2-е изд., испр. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 520 с.
- [6] Колпаков В.И., Ладов С.В., Рубцов А.А. *Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998, 36 с.
- [7] Новосельцев А.С., Бабкин А.В. Математическая модель схлопывания упругопластической оболочки с учетом возможного развития неустойчивости процесса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1874>
- [8] Бабкин А.В., Бондаренко П.А., Федоров С.В., Ладов С.В., Колпаков В.И. Ограничения возможностей повышения пробития кумулятивного заряда

- при импульсном тепловом воздействии на его облицовку. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды Междунар. конф. III Харитоновские тематические научные чтения*. Саров, ВНИИЭФ, 2002, с. 257–263.
- [9] Elliot L.A. Calculation of the Growth of Interface Instabilities by a Lagrangian Mesh Method. *4th Int. Symp. on Detonation*. Washington, 1967, pp. 316–320.
- [10] Barnes J.F., Blewitt P.J., McQueen R.G., et al. Tailor instabilities in solids. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no. 4, pp. 727–734.
- [11] Barnes J.F., Janney D.R., London R.R., et al. Further experimentation on Tailor instability in solids. *Journal of Applied Physic*, 1980, vol. 51, no. 9, pp. 78–79.
- [12] Дреннов О.Б., Михайлов А.Л., Огородников В.А. О задании и эволюции локальных (периодических) возмущений в экспериментах по исследованию неустойчивости Рэлея — Тейлора в средах с прочностью. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 4, с. 171–176.
- [13] Чарахчян А.А. Об устойчивости кумулятивных струй, возникающих при импульсном воздействии на конические мишени. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 3, с. 10–13.
- [14] Чарахчян А.А. Неустойчивость Рихтмайера — Мешкова границы раздела сред при прохождении через нее двух последовательных ударных волн. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 1, с. 28–37.
- [15] Маринин В.М., Бабкин А.В., Колпаков В.И. Методика расчета функционирования кумулятивного заряда. *Оборонная техника*, 1995, № 4, с. 34–39.

Статья поступила в редакцию 21.02.2020

Ссылку на статью просим оформлять следующим образом:

Новосельцев А.С., Бабкин А.В. Численный анализ схлопывания упругопластической оболочки с учетом развития неустойчивости процесса. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 3.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-3-1962>

**Новосельцев Алексей Сергеевич** — аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [novoseltsev.alexey@yandex.ru](mailto:novoseltsev.alexey@yandex.ru)

**Бабкин Александр Викторович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [pc-os@bmstu.ru](mailto:pc-os@bmstu.ru)

## **Analysis of numerical calculation of elastic-plastic shell collapse with growing instability**

© A.S. Novoseltsev, A.V. Babkin

Bauman Moscow State Technical University (National Research University),  
Moscow, 105005, Russia

*The paper presents research of the collapse of the elastic-plastic shell under external surface forces simulating explosive loading by mathematical simulation using numerical methods. The problem was solved in two-dimensional curved geometries as a non-stationary problem of continuum mechanics. We applied the Wilkins Lagrangian method. The instability of the shell was initiated by harmonic surface perturbations on the outer or inner surfaces. The characteristics of the explosive loading were also changed: the maximum pressure, pressure fall time constant, and the time of application of the explosive load. The size of instability was determined by the deviation of the disturbed surface or the boundary of the jet-forming layer from the cylindrical one. We have established the parameters of the shell and the impulse loading on the shell, which affect most strongly the growth of instability during collapse.*

**Key words:** shell, surface, load, explosion, perturbation, instability

### REFERENCES

- [1] Selivanov V.V., ed. *Boepripasi* [Ammunition]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2019, 506 p.
- [2] Orlenko L.P., ed. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion.]. In 2 vols. Vol. 2. Moscow, Fizmatlit Publ., 2002, 656 p.
- [3] Pai V.V., Titov V.M., Lukyanov Y.L., Plastinin A.V. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2019, no. 4, pp. 69–73.
- [4] Zeldovich V.I., Frolova N.Yu., Heifets A.E., Chomskaya I.V., Degtyarev A.A., Shorokhov E.V., et al. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2019, no. 4, pp. 92–102.
- [5] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov* [Numerical methods in problems of physics of fast-flowing processes]. In 3 vols. Vol. 3. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 520 p.
- [6] Kolpakov V.I., Ladov S.V., Rubtsov A.A. *Matematicheskoye modelirovaniye funktsionirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Mathematical modeling of the functioning of shaped charges]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 36 p.
- [7] Novoseltsev A.S., Babkin A.V. Mathematical model of the elastoplastic shell collapse with regard to the possible instability process development. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-5-1874>
- [8] Babkin A.V., Bondarenko P.A., Fedorov S.V., et al. Ogranicheniya vozmozhnostey povysheniya probitiya kumulyativnogo zaryada pri impulsnom teplovom vozdeystvii na ego obshivku [Limitations of the possibilities for increasing the penetration of a shaped charge under pulsed heating its liner]. In: *Trudy III Mezhdunarodnoy konferentsii. Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. "Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny"* [Proceedings of the III International conference. Kharitonov's thematic scientific readings. "Extreme states of the substance. Detonation. Shock

- waves”]. Sarov, Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut eksperimental'noy fiziki Publ., 2002, pp. 257–263.
- [9] Elliot L.A. Calculation of the growth of interface instabilities by a Lagrangian Mesh Method. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Detonation. White Oak, USA, 1965*. Washington, 1967, pp. 316–320.
- [10] Barnes J.F., Blewitt P.J., McQueen R.G., Meyer K.A., Venable D., Taylor D.H., London R.K., et al. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no. 4, pp. 727–734.
- [11] Barnes J.F., Janney D.R., London R.R., et al. *Journal of Applied Physics*, 1980, vol. 51, no. 9, pp. 78–79.
- [12] Drennov O.B., Michaylov A.L., Ogorodnikov V.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 4, pp. 171–176.
- [13] Charakhchyan A.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 3, pp. 10–13.
- [14] Charakhchyan A.A. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, no. 1, pp. 28–37.
- [15] Marinin V.M., Babkin A.V., Kolpakov V.I. *Oboronnaya tekhnika — Defence Technology*, 1995, no. 4, pp. 34–39.

**Novoseltsev A.S.**, postgraduate student, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: novoseltsev.alexey@yandex.ru

**Babkin A.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: pc-os@bmstu.ru