

**Received:** 29.04.2018

**Revised:** 25.05.2018

**Accepted:** 29.06.2018



**DOI:** 10.17804/2410-9908.2018.4.023-033

## MODELING OF TANK DAMAGE SCENARIOS CAUSED BY FOUNDATION SUBSIDENCE

E. M. Reizmunt<sup>a)\*</sup>, S. V. Doronin<sup>b)</sup>

*Institute of Computational Technologies, SB RAS, Krasnoyarsk Branch Office,  
53 Mira Ave., 660049, Krasnoyarsk, Russian Federation*

a)  <https://orcid.org/0000-0003-1631-893X> ;  [e.sigova@gmail.com](mailto:e.sigova@gmail.com);

b)  <https://orcid.org/0000-0002-5256-3871> ;  [sdoronin@ict.nsc.ru](mailto:sdoronin@ict.nsc.ru)

\*Corresponding author. E-mail: [e.sigova@gmail.com](mailto:e.sigova@gmail.com)

Address for correspondence: P.O. Box: 25515, 660049, Krasnoyarsk, the Russian Federation  
Tel.: +7(391)227 72 96

A computational model of the accumulation of vertical steel tank damage caused by non-uniform foundation subsidence is developed. This model is a tool for analyzing the structure damage scenarios when the structure interacts with the system environment. The nature and sequence of damage initiation and accumulation (elastic-plastic strains, bottom and wall buckling) in the tank are investigated.

**Keywords:** tank, foundation subsidence, damage accumulation, scenario, computational model.

### References

1. Makhutov N.A., Kotousov A.G. Principles of increasing the safety of complex technical systems. *Zashchita Metallov*, 1996, vol. 32, no. 4, pp. 346–351. (In Russian).
2. Ishlinsky A.Yu. *Mekhanika. Kn. 1: Oktyabr i nauchno-tehnicheskij progress* [Mechanics. Book 1: October and Scientific-Technical Progress]. Moscow, APN Publ., 1967, pp. 567–626. (In Russian).
3. Rozenshtein I.M. *Avarii i nadezhnost stalnykh rezervuarov* [Accidents and Reliability of Steel Tanks]. Moscow, Nedra Publ., 1995, 253 p. (In Russian).
4. Liu W.Y., Chen C.H., Chen W.T., Shu C.M. A study of caprolactam storage tank accident through root cause analysis with a computational approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, vol. 50, pp. 80–90. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.09.004.
5. Schmidt M.S. Atmospheric tank failures: Mechanisms and an unexpected case study. *Process Safety Progress*, 2017, vol. 36 (4), pp. 353–361. DOI: 10.1002/prs.11881
6. Atherton W., Ash J.W. Review of failures, causes and consequences in the bulk storage industry. Available at: [http://lightningsafety.com/nlsi\\_lls/Causes-of-Failures-in-Bulk-Storage.pdf](http://lightningsafety.com/nlsi_lls/Causes-of-Failures-in-Bulk-Storage.pdf).
7. Chang J.I., Lin C.C. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, vol. 19, pp. 51–59. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015.
8. Kondrashova O.G., Nazarova M.N. Root cause analysis of vertical steel tank accidents. *Neftgazovoe Delo electronic scientific journal*, 2004, no. 2. (In Russian). Available at: <http://ogbus.ru/article/view/prichinno-sledstvennyj-analiz-avarij-vertikalnyx-stalnyx-rezervuarov>
9. Zhemochkin B.N. *Teoriya uprugosti* [Theory of Elasticity]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1957, 256 p. (In Russian).
10. Wang P., Zhu X., Liu M., Li Y. Buckling behaviors and simplified design method for steel silos under locally distributed axial load. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, vol. 134, pp. 114–134. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.03.019

11. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1772, pp. 060011. DOI: 10.1063/1.4964591.
12. Zhang Y., Zhang X. Numerical simulation of post-construction deformation characteristics of storage oil tank ground. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, vol. 353–356, pp. 593–596. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353–356.593.
13. Rondon A., Guzey S. Determination of failure pressure modes of the API specification 12f shop-welded, flat-bottom tank. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2017, vol. 139, pp. 041409. DOI: 10.1115/1.4036430.
14. Landuccia G., Gubinellia G., Antonionib G., Cozzani V. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis and Prevention*, 2009, vol. 41, pp. 1206–1215. DOI: 10.1016/j.aap.2008.05.006
15. Ivanov Yu.K., Konovalov P.A., Mangushev R.A., Sotnikov S.N Osnovaniya i fundamenty rezervuarov [Bases and Foundations of Tanks, ed. by P.A. Konovalov]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989, 223 p. (In Russian).
16. Lukash A.P. Osnovy nelineynoy stroitelnoy mekhaniki [Basics of Nonlinear Construction Mechanics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 208 p. (In Russian).
17. Novozhilov V.V. Osnovy nelineynoy teorii uprugosti [Basics of Nonlinear Theory of Elasticity]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 208 p. (In Russian).

Подана в журнал: 29.04.2018

УДК 539.4 : 64.066.8



DOI: 10.17804/2410-9908.2018.4.023-033

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ПОВРЕЖДЕНИЯ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ОСАДКЕ ОСНОВАНИЯ

Е. М. Рейзмунт<sup>а)</sup>\*, С. В. Доронин<sup>б)</sup>

*Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал,  
660049, пр. Мира, 53, г. Красноярск, Российская Федерация*

<sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1631-893X> ;  [e.sigova@gmail.com](mailto:e.sigova@gmail.com);

<sup>б)</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-5256-3871> ;  [sdoronin@ict.nsc.ru](mailto:sdoronin@ict.nsc.ru)

\* Ответственный автор. Электронная почта: [e.sigova@gmail.com](mailto:e.sigova@gmail.com)

Адрес для переписки: 660049, а/я 25515, Красноярск, Российская Федерация

Тел.: +7(391)227-72-96

Разработана вычислительная модель накопления повреждений вертикального стального резервуара при неравномерной осадке основания. Модель является инструментом анализа сценариев повреждения конструкции при ее взаимодействии с системным окружением. Исследуется характер и последовательность возникновения и накопления повреждений (упругопластических деформаций и потери устойчивости днища и стенки) в конструкции резервуара.

**Ключевые слова:** резервуар, осадка основания, накопление повреждений, сценарий, вычислительная модель.

### 1. Введение

Развитие технических объектов сопровождается ростом их структурной сложности, повышением геометрических, энергетических, силовых характеристик, изменением характера и масштаба угроз, инициируемых как со стороны внешнего окружения, так и внутри объекта в результате проявления эффекта эволюционной неожиданности сложной технической системы [1], обусловленного тем, что при проектировании и создании сложной технической системы принципиально невозможно предусмотреть все комбинации внешних факторов в эксплуатации и учесть все связи и взаимодействия между элементами системы. Она скрыто, но неизбежно приобретает ряд дополнительных свойств и возможных состояний, не соответствующих проектным. В результате этого, по мнению акад. А.Ю. Ишлинского, новые эффекты в механике обнаруживаются чаще всего в результате заранее непредвиденного поведения творений техники – иногда и с аварийным исходом [2].

В связи с этим актуальным является развитие сценарных подходов, направленных на моделирование различных ситуаций, возникающих на различных стадиях жизненного цикла объекта. Эти ситуации описываются различными комбинациями свойств объекта, системного окружения и условий их взаимодействия. Моделирование, преимущественно вычислительное, сценариев повреждения технических объектов потенциально позволяет установить безопасные границы параметров, используемые при принятии технических решений.

Резервуары вертикальные стальные (РВС) широко используются в различных отраслях промышленности для хранения жидкостей и газов бытового и промышленного назначения. Их изготавливают номинальным объемом от 100 до 120 000 м<sup>3</sup>. Несмотря на достигнутый в последние годы прогресс в резервуаростроении, в процессе эксплуатации продолжают происходить аварии резервуаров, при этом разрушаются не только отдельные их элементы, но иногда конструкция полностью, повреждая расположенные рядом резервуары, инфраструктуру, строительную технику и другие объекты [3–8]. Истечение из резервуара таких

продуктов хранения, как нефть, нефтепродукт, химический продукт, сжиженный газ, горячая вода и проч., приводят к разрушениям, материальным потерям, экологическим бедствиям, а порой и к человеческим жертвам. Поэтому резервуары относят к опасным объектам.

Одной из причин аварийных ситуаций при эксплуатации РВС является осадка основания. Она связана с особенностями строения и свойств грунта, особенностями распределения веса в конструкции, уровня и режимов нагружения, а также с физико-техническими процессами в грунте вследствие природно-климатических воздействий. Осадка основания может происходить как равномерно, так и неравномерно. Наиболее опасна неравномерная осадка. Она может проявляться в виде полной или частичной осадки по наружному контуру резервуара, местных осадок основания под днищем и приводить к перераспределению напряжений и деформаций, возникновению упругопластических эффектов деформирования, потери устойчивости, частичному или полному крену резервуара.

В основу расчета цилиндрических резервуаров положены развитые в теории упругости модели деформирования цилиндрических оболочек [9]. В течение нескольких десятилетий на базе этих моделей была создана и применялась система нормативных документов по проектированию и эксплуатации резервуаров. Она основана на аналитических методах расчета, что накладывает ограничения на рассматриваемые при проектировании расчетные случаи нагружения и условия кинематического и силового взаимодействия с системным окружением резервуаров. Развитие численных методов и моделей механики деформируемого твердого тела открыло возможность проведения многовариантных и многомодельных вычислительных экспериментов по исследованию поведения резервуаров в широком спектре условий, в том числе при нештатных и аварийных воздействиях с учетом частичного повреждения силовых конструкций. Условия потери устойчивости резервуара при локальной сжимающей нагрузке изучались в работе [10]. Поведение резервуара в связи с осадкой основания рассматривалось в [11, 12]. Моделированию сложных сценариев возникновения катастрофических разрушений посвящены [4, 5, 13, 14].

Цель работы – разработка и апробация вычислительной модели накопления повреждений в резервуаре при неравномерной осадке основания. Основанием для этого являются анализ аварий, произошедших вследствие осадки основания, а также информация о технических условиях создания оснований и фундаментов резервуаров [15]. Использование такой модели позволяет исследовать поведение конструкции на стадии живучести, а именно – характер и последовательность возникновения и накопления повреждений в конструкции резервуара.

## 2. Постановка задачи и методы решения

Геометрическая модель РВС представляет собой цилиндрическую оболочку толщиной 4 мм, диаметром 7580 мм, с плоским днищем толщиной 4 мм и подкрепляющим уголком на верхнем контуре. В качестве нагрузок рассматриваются собственный вес и гидростатическое давление от налитой жидкости. Деформация грунтов моделируется упругим основанием, разбитым на зоны с различными коэффициентами жесткости упругого основания (постели).

Использованы три подхода к моделированию основания РВС, соответствующие типичным сценариям его осадки. В первом случае (рис. 1 а) основание разбивается на параллельные полосы, коэффициенты постели ступенчато уменьшаются от центра основания к контуру. Во втором варианте (рис. 1 б) основание представлено концентрическими полосами, осадка основания наибольшего значения достигает около стенок и наименьшего – в центре. Для третьего подхода (рис. 1 в) также характерно концентрическое разбиение, однако центр смещен относительно центра резервуара, при этом жесткость основания уменьшается к центру разбиения. Все три модели имеют вертикальную плоскость симметрии, что позволяет в два раза сократить размерность задачи.

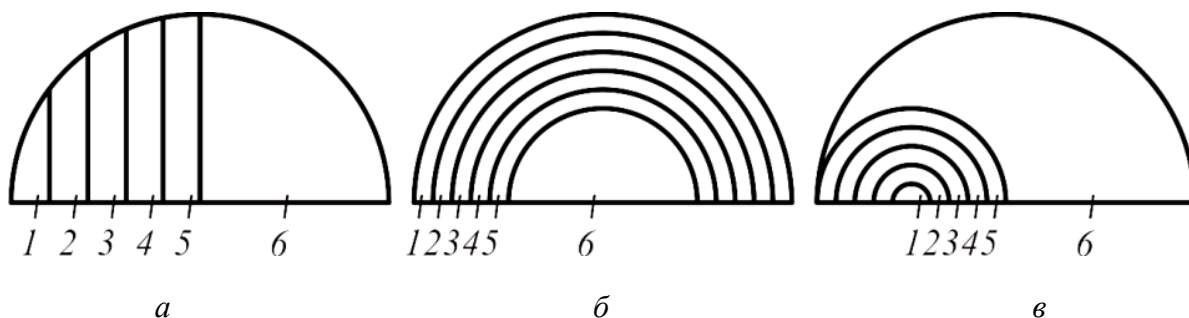


Рис. 1. Три способа разбиения упругого основания на зоны опирания 1, 2, 3, 4, 5, 6

Для каждого из трех вариантов модели было выполнено четыре серии вычислительных экспериментов, соответствующих различной степени осадки основания. При этом регулировалась жесткость зон упругого основания, а собственно осадка оказывалась одной из результирующих величин моделирования. Коэффициенты жесткости упругого основания (постели)  $k$  по зонам опирания представлены на рис. 2. Они варьировались от  $0,002 \text{ Н/мм}^3$  (грунт малой плотности – плавун и т. п.) до  $0,2 \text{ Н/мм}^3$  (грунт весьма плотный – песчаноглинистый, искусственно уплотненный и т. п.). Промежуточные значения соответствуют различной степени ослабления грунта в результате технологических и естественных природных причин.

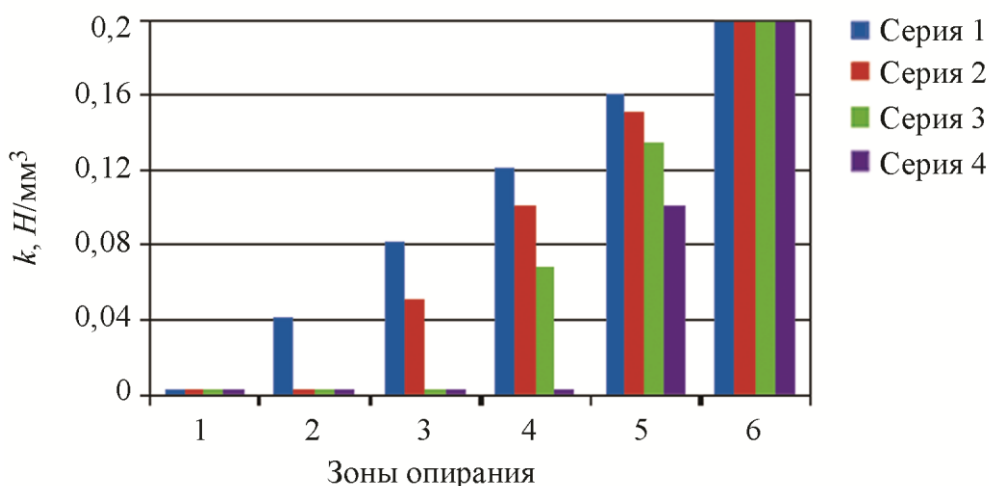


Рис. 2. Коэффициенты жесткости упругого основания (постели)  $k$  по зонам опирания

Задача численного анализа поведения резервуара при осадке основания относится к четвертому типу нелинейных задач по классификации В.В. Новожилова [16, 17] – нелинейных физически и геометрически. Вычислительная модель накопления повреждений в виде упругопластических деформаций в резервуаре включает в себя численную (конечно-элементную) модель резервуара, разрешающие уравнения и алгоритм метода конечных элементов в перемещениях, а также итерационные процедуры решения физически (учет упругопластического поведения материала) и геометрически (учет больших деформаций) нелинейной задачи. Эти процедуры включают в себя внутренние циклы решения упругопластической задачи (учет физической нелинейности) и итерации решения геометрически нелинейной задачи при пошаговом приращении нагрузки.

Упругопластическое поведение конструкционного материала резервуара аппроксимировано билинейным законом:

$$\begin{cases} \sigma = E \cdot \varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_y; \\ \sigma = E_0 \cdot \varepsilon, & \varepsilon \geq \varepsilon_y, \end{cases}$$

где  $\sigma$  – напряжения;  $\varepsilon$  – деформации;  $\varepsilon_y$  – деформации, соответствующие началу текучести;  $E$  – модуль Юнга (первоначальный модуль упругости);  $E_T$  – тангенциальный модуль упругости. Последний определяется исходя из уравнения Рамберга-Осгуда в соответствии с уравнением:

$$E_T = \frac{E \cdot \sigma_y}{\sigma_y + 0,002 \cdot n \cdot \varepsilon \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^{n-1}},$$

где  $\sigma_y$  – предел текучести;  $n$  – показатель деформационного упрочнения в уравнении Рамберга-Осгуда;  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  – напряжения и деформации, соответствующие границе интервала кривой деформирования, на котором строится ее аппроксимация.

Численный анализ устойчивости резервуара с учетом его деформирования вследствие осадки основания осуществляется путем итерационного решения уравнения

$$(K + \lambda_i K_\sigma) \varphi_i = 0,$$

где  $K$  – матрица жесткости,  $K_\sigma$  – матрица геометрической жесткости, учитывающая изменение деформированного состояния;  $\lambda_i$  – коэффициент, умножение нагрузки на который приводит к  $i$ -й форме потери устойчивости, описываемой вектором  $\varphi_i$  относительных перемещений узлов конечно-элементной модели.

Численная модель (рис. 3) построена с использованием граничных условий симметрии и двумерных конечных элементов, реализующих теорию оболочек Миндлина-Рейсснера. Для описания поведения упругого основания использована модель Винклера с постоянными значениями жесткости.

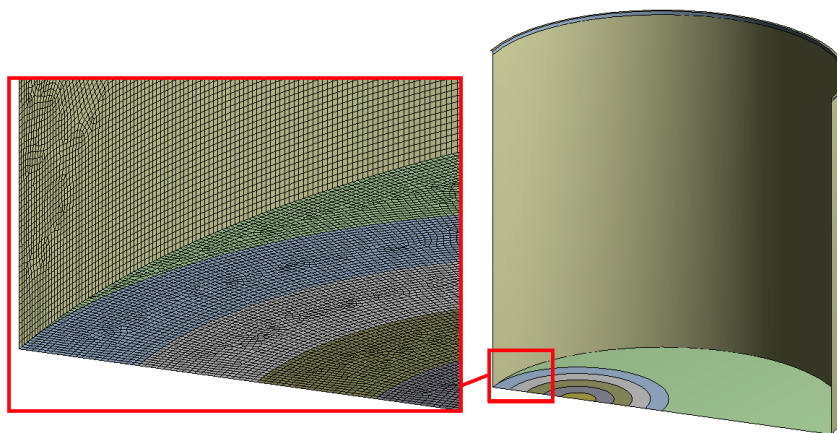


Рис. 3. Конечно-элементная модель резервуара при разбиении упругого основания на зоны опирания в соответствии с рис. 1 в

### 3. Результаты и обсуждение

Для анализа поведения конструкции интерес представляют величины максимальных эквивалентных напряжений  $\sigma_i$ , эквивалентных пластических деформаций  $\varepsilon_{pli}$ , коэффициент запаса по первой форме устойчивости  $\lambda_1$ , максимальные  $u_{\max}$  и минимальные  $u_{\min}$  вертикальные смещения днища резервуара (табл. 1).

Таблица 1 – Результаты расчетов для рассматриваемых сценариев в зависимости от степени осадки основания

Серия экспериментов	Модель 1				Модель 2				Модель 3			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
$\sigma_i$ , МПа	239,1	239,4	240,7	246,0	233,4	210,3	221,0	208,8	123,6	179,2	235,2	242,3
$\varepsilon_{pli} \times 10^4$	3,85	4,15	5,46	10,4	0,01	0	0	0	0	0	0,17	6,91
$\lambda_1$	8,0	2,6	2,3	2,1	0,6	0,1	~0	~0	10,1	3,5	1,8	1,003
$u_{\min}$ , мм	0,267	0,006	-0,171	-0,220	0,364	0,363	0,362	0,359	0,309	0,300	0,285	0,264
$u_{\max}$ , мм	21,72	38,08	37,78	37,88	41,84	45,92	44,98	45,84	13,72	25,15	32,65	35,93

При осадке основания возможно развитие двух типов повреждений: возникновение и накопление упругопластических деформаций и потеря устойчивости элементов резервуара (днища и стенки). Расчетные распределения эквивалентных пластических деформаций и формы потери устойчивости для трех сценариев осадки основания показаны в табл. 2–4.

Качественная картина деформирования резервуара характеризуется локальным прогибом днища в связи с ослаблением основания. В результате прогиба возникают изгибающие моменты, как в днище, так и в зоне сочленения днища и стенки, а также непосредственно в стенке. Максимальные напряжения вследствие осадки основания достаточно велики и при последовательном снижении жесткости основания быстро достигают предела текучести и приводят к упругопластическим деформациям. Уровень этих деформаций зависит от осадки основания – распределения его жесткости под поверхностью днища. Основным количественным результатом анализа потери устойчивости является коэффициент запаса по первой форме потери устойчивости  $\lambda_1$ . Значения  $\lambda_1 < 1$  свидетельствуют о потере устойчивости.

Анализ данных табл. 1–4 показывает, что по мере развития осадки основания по первому сценарию идет прогрессирующее накопление упругопластических деформаций и снижение запаса устойчивости. При дальнейшем увеличении осадки стадия накопления упругопластических деформаций переходит в стадию потери устойчивости. Таким образом, этот сценарий характеризуется последовательным накоплением и сменой типа повреждений.

Второй сценарий характеризуется преобладанием условий возникновения потери устойчивости, а не развития упругопластических деформаций: только при незначительных осадках основания низка опасность потери устойчивости и могут возникнуть упругопластические деформации.

При реализации третьего сценария по мере увеличения осадки основания увеличивается опасность потери устойчивости и накопления упругопластических деформаций. Расчетные значения максимумов осадки основания – порядка 38, 46 и 36 мм, соответственно, для первого, второго и третьего сценариев – не превышают допускаемых по нормам эксплуатации резервуаров. Это свидетельствует о реалистичности полученных результатов.

Таблица 2 – Результаты моделирования повреждения резервуара при первом сценарии осадки основания

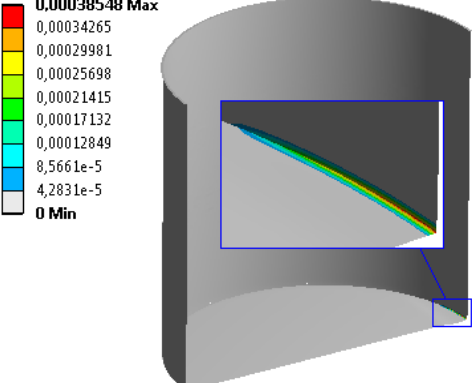
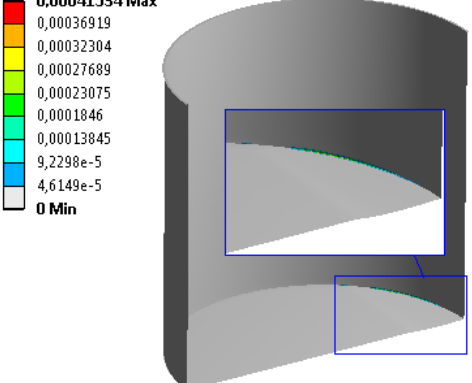
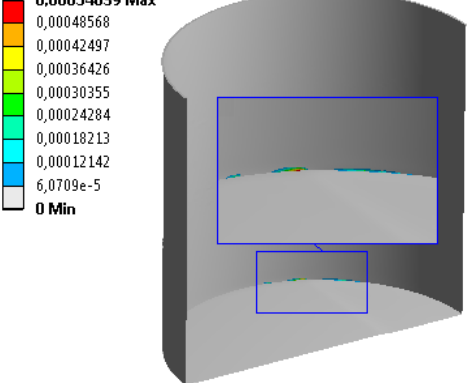
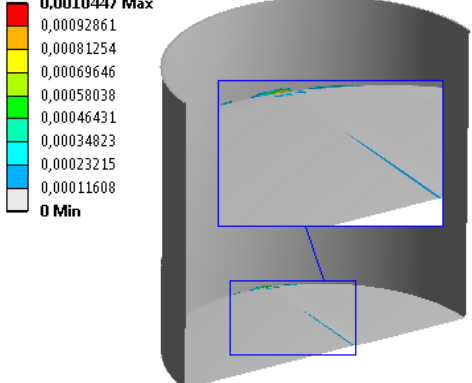
Уровень осадки	Эквивалентные пластические деформации	Потеря устойчивости (первая форма)
1		Отсутствует
2		— « —
3		— « —
4		— « —



Таблица 3 – Результаты моделирования повреждения резервуара при втором сценарии осадки основания

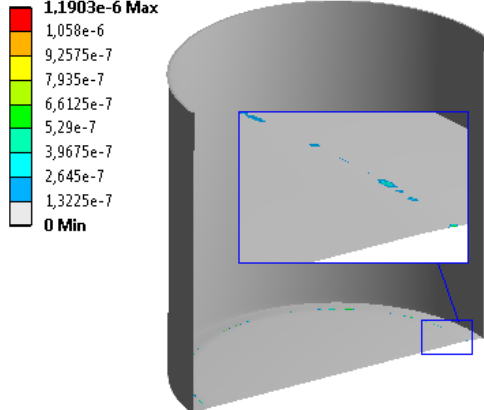
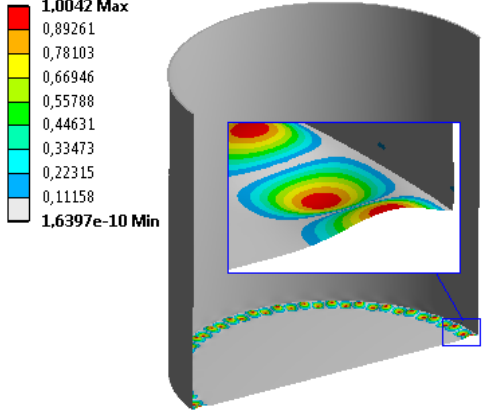
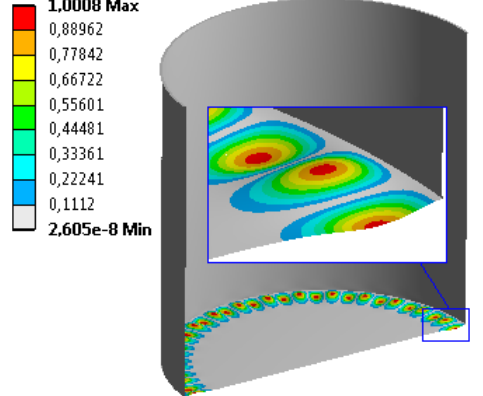
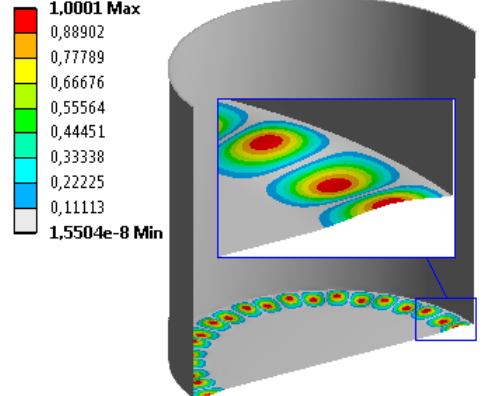
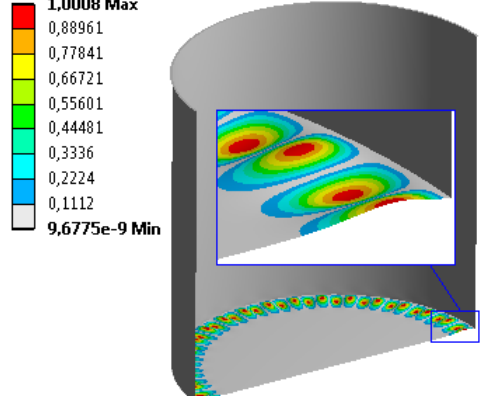
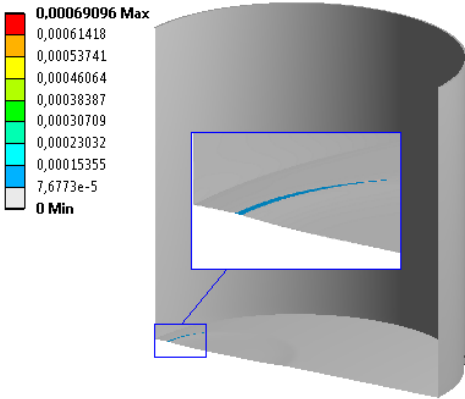
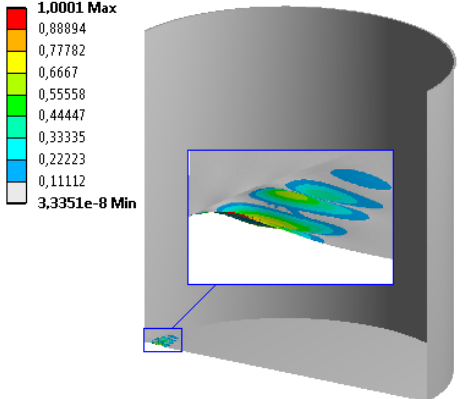
Уровень осадки	Эквивалентные пластические деформации	Потеря устойчивости (первая форма)
1		
2	Отсутствуют	
3	— « —	
4	— « —	

Таблица 4 – Результаты моделирования повреждения резервуара при третьем сценарии осадки основания

Уровень осадки	Эквивалентные пластические деформации	Потеря устойчивости (первая форма)
1	Отсутствуют	Отсутствует
2	– « –	– « –
3	– « –	– « –
4		

#### 4. Заключение

Разработанная вычислительная модель является инструментом анализа сценариев повреждения конструкции при ее взаимодействии с системным окружением. Она включает анализ развития двух взаимосвязанных сценариев – внешнего и внутреннего по отношению к исследуемому объекту. Внешний сценарий описывает последовательность изменения состояний системного окружения (в данном случае изменений распределения жесткости по площади упругого основания), внутренний – соответствующие изменения в состоянии объекта (в данном случае возникновение и развитие упругопластических деформаций, локальная потеря устойчивости днища и стенки резервуара).

Для различных вариантов осадки основания определены три возможных сценария накопления повреждений: 1 – упругопластическое деформирование с переходом к потере устойчивости; 2 – потеря устойчивости; 3 – потеря устойчивости с переходом к упругопластическому деформированию. Эти сценарии являются частью различных сценариев катастрофического разрушения резервуаров. Использование разработанной вычислительной модели открывает перспективную возможность систематизации поврежденных состояний объекта в связи с одним из возможных сценариев взаимодействия с системным окружением. Это является информационным обеспечением решения обратных задач научно-технической экспертизы аварийных разрушений.

#### Литература

1. Махутов Н. А., Котоусов А. Г. Принципы повышения безопасности сложных технических систем // Защита металлов. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 346–351.
2. Ишлинский А. Ю. Механика. Кн. 1 : Октябрь и научно–технический прогресс. – М. : Изд-во АПН, 1967. – С. 567–626.
3. Розенштейн И. М. Аварии и надежность стальных резервуаров. – М. : Недра, 1995. – 253 с.
4. A study of caprolactam storage tank accident through root cause analysis with a computational approach / W. Y. Liu, C. H. Chen, W. T. Chen, C. M. Shu // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2017. – Vol. 50. – P. 80–90. – DOI: 10.1016/j.jlp.2017.09.004

5. Schmidt M. S. Atmospheric tank failures: Mechanisms and an unexpected case study // *Process Safety Progress*. – 2017. – Vol. 36 (4). – P. 353–361. – DOI: 10.1002/prs.11881.
6. Atherton W., Ash J. W. Review of failures, causes and consequences in the bulk storage industry. – URL: [http://lightningsafety.com/nlsi\\_lls/Causes-of-Failures-in-Bulk-Storage.pdf](http://lightningsafety.com/nlsi_lls/Causes-of-Failures-in-Bulk-Storage.pdf)
7. Chang J. I., Lin C. C. A study of storage tank accidents // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2006. – Vol. 19. – P. 51–59. – DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015.
8. Кондрашова О. Г., Назарова М. Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2004. – № 2. – URL: [http://ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf)
9. Жемочкин Б. Н. Теория упругости. – М. : Госстройиздат, 1957. – 256 с.
10. Buckling behaviors and simplified design method for steel silos under locally distributed axial load / P. Wang, X. Zhu, M. Liu, Y. Li // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2017. – Vol. 134. – P. 114–134. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.03.019.
11. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1772. – P. 060011. – DOI: 10.1063/1.4964591.
12. Zhang Y., Zhang X. Numerical simulation of post-construction deformation characteristics of storage oil tank ground // *Applied Mechanics and Materials*. – 2016. – Vol. 353–356. – P. 593–596. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353–356.593.
13. Rondon A., Guzey S. Determination of failure pressure modes of the API specification 12f shop-welded, flat-bottom tank // *Journal of Pressure Vessel Technology*. – 2017. – Vol. 139. – P. 041409. – DOI: 10.1115/1.4036430
14. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire / G. Landuccia, G. Gubinellia, G. Antonionib, V. Cozzani // *Accident Analysis and Prevention*. – 2009. – Vol. 41. – P. 1206–1215. – DOI: 10.1016/j.aap.2008.05.006.
15. Основания и фундаменты резервуаров / Ю. К. Иванов, П. А. Коновалов, Р. А. Мангушев, С. Н. Сотников / под ред. П. А. Коновалова. – М. : Стройиздат, 1989. – 223 с.
16. Лукаш А. П. Основы нелинейной строительной механики. – М. : Стройиздат, 1978. – 208 с.
17. Новожилов В. В. Основы нелинейной теории упругости. – М. : Стройиздат, 1978. – 208 с.