

**А.А. Василькин**, канд. техн. наук, доцент, НИУ МГСУ (Москва, Россия) (e-mail: vergiz@mail.ru)

## **УПРАВЛЕНИЕ ПОВЕДЕНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА В ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*В стальных вертикальных цилиндрических резервуарах, выполненных методом рулонирования, часто возникают дефекты геометрической формы в области монтажного сварного стыка стенки. Впоследствии в этих областях в результате малоциклового усталости появляется недопустимый дефект в виде трещины, что вызывает необходимость вывода резервуара из эксплуатации и проведения комплекса мер по его ремонту. Для определения сроков безопасной эксплуатации вертикальных стальных резервуаров с дефектами геометрической формы предлагается использовать методологию управления поведением несущих конструкций, одним из направлений которой является регулирование напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных конструкций. Для осуществления возможности регулирования НДС конструкции необходимо выявить такие параметры, изменение которых даст максимальных эффект в достижении поставленных целей. В качестве указанных параметров могут выступить характеристики конструкции (свойства материала, расчетная схема, геометрические характеристики) и факторы внешних воздействий (нагрузка, условия эксплуатации). Для регулирования НДС конструкции вертикальных стальных резервуаров предложены следующие регуляторы: высота налива продукта, стрела прогиба стенки и допустимое число циклов нагружения резервуара.*

*Путем численного определения НДС конструкции вертикального стального резервуара с дефектами геометрической формы, определены необходимые величины и значения напряженного состояния. Далее, используя известные аналитические зависимости из области механики разрушения возможно установить допустимое количество циклов нагружения резервуара до появления трещиноподобного дефекта. Применение методологии управления поведением несущих конструкций, путем определенного изменения установленных параметров регулирования, позволяет увеличить количество циклов нагружения резервуара, увеличив тем самым срок безопасной эксплуатации резервуара с дефектом и повысить таким образом экономическую эффективность резервуарного парка.*

**Ключевые слова:** управление поведением конструкций, регулирование НДС; параметры регулирования.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-4-66-74

**Ссылка для цитирования:** Василькин А.А. Управление поведением вертикального стального резервуара в период эксплуатации // Известия Юго-Западного государственного университета. 2018. Т. 22, № 4(79). С. 66-74.

\*\*\*

### **Введение**

В отечественной практике резервуаростроения нашли применение два способа монтажа вертикальных стальных резервуаров – полистовой метод и метод рулонирования [1,2,3], являвшийся основным методом долгие годы. Наряду с достоинствами данного метода монтажа существует и значительный недостаток, обусловленный технологией изготовления рулона. При разворачивании рулона на монтажной площадке края стенки ру-

лона не принимали проектное положение в связи с возникшими пластическими деформациями стали и имели различные отклонения от цилиндрической формы, главным образом в области монтажного сварного шва [4,5,6]. В дальнейшем, при эксплуатации резервуара, в этой зоне могли появляться дефекты геометрической формы (рис.1), из-за чего происходило разрушение сварного шва вследствие малоциклового усталости [7].

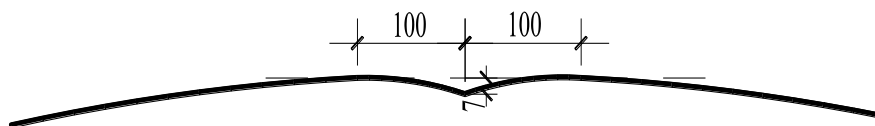


Рис. 1. Схема радиального отклонения стенки в зоне монтажного стыка,  $a=100$  мм – база;  $f=7$ мм - прогиб стыка

Для обеспечения безопасной эксплуатации резервуара с геометрическими дефектами, появившимися в процессе эксплуатации сооружения, можно применить методы управления поведением несущих конструкций, реализуемые путем регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции и успешно применяемые в авиационной и космической области [12,13].

Регулирование НДС конструкции осуществляется за счет управления (изменения, варьирования) определенными параметрами конструкции, которые в данном случае выступают как параметры регулирования [23]. В области строительного проектирования можно выделить следующие способы регулирования напряженно-деформированным состоянием – за счет изменения расположения массы [8], изменения уровня опор [9], предварительного напряжения [10,11].

При решении задачи регулирования НДС вертикального стального резервуара с дефектами геометрической формы необходимо определить регуляторы – такие параметры конструкции, изменение которых даст наибольший эффект для достижения цели. В качестве критерия эффективности примем обеспечение безопасной эксплуатации резервуара в течение определенного срока

Анализ работы конструкции показал, что в качестве таких регуляторов мы можем принять следующие:

– уровень налива продукта, м;

– стрела прогиба стенки в области монтажного сварного стыка;

– допустимое количество циклов нагружения резервуара.

Среди предложенных регуляторов уровень налива продукта является ведущим параметром, определяющим НДС конструкции резервуара [6], поскольку определяет гидростатическое давление и соответственно максимальные радиальные перемещения стенки резервуара

$$\Delta r = \frac{\rho r^2 (h-x)}{E \cdot t},$$

где  $\rho$  – плотность хранимого продукта;

$r$  – радиус резервуара;  $(h-x)$  – расстояние от поверхности продукта до участка с дефектом;  $E$  – модуль Юнга;  $t$  – толщина стенки резервуара в области дефекта. То есть, чем больше разница отметок зеркала продукта и исследуемого участка стенки, тем больше величина гидростатического давления и больше перемещение стенки.

Для определения области допустимых значений регуляторов исследуемой конструкции необходимо проведение экспериментальных исследований, либо на натурной физической модели, либо на имитационной математической модели [14,15].

Осуществление натурального эксперимента является достаточно длительной и трудоемкой процедурой [16], особенно учитывая тот факт, что необходимо установить предельно допустимые – критические значения регуляторов, при которых

происходит разрушение конструкции. Таким образом при проведении исследования пришлось бы изготавливать несколько физических моделей резервуара, что увеличило бы сроки и стоимость проведения работы.

Поэтому в настоящей работе для решения поставленной задачи определения области допустимых значений регуляторов будем использовать метод имитационного моделирования в прикладных расчетных комплексах, нашедших широкое применение при исследовании работы строительных конструкций [17,18].

Имитационное моделирование используется для оценки многочисленных режимов функционирования объекта, отклика системы на внешние возмущения, поведение под нагрузкой, проверки живучести объекта. Моделирование сочетает простоту и удобство работы с моделью, эффективность, возможность генерирования случайных параметров и возмущений, удобство ввода и интерпретации результатов моделирования.

Численное моделирование применяется в следующих целях:

- как средство изучения конструкции, анализа ее поведения при различных условиях функционирования;
- для сравнения и оценки эффективности различных расчетных схем;
- прогнозирования поведения конструкции при различных возмущениях.

Численное моделирование обеспечивает:

- возможность повторения и точного воспроизведения различных условий функционирования проектируемого объекта;
- легкость прерывания и возобновления численного эксперимента;
- возможность направленного управления условиями эксперимента (здания

различных состояний окружающей среды, параметров моделируемой конструкции, возмущающих факторов и т.д.);

- скорость проведения численного эксперимента, существенное сокращение продолжительности эксперимента по сравнению с натурным;
- экономичность по сравнению с натурным экспериментом.

Процедура имитационного моделирования включают в себя процесс построения имитационных моделей и проведения численных экспериментов для определения допустимых и эффективных значений регуляторов.

Важным аспектом в численном моделировании является оценка адекватности получаемых результатов моделирования – так называемая верификация модели [19,20].

В рассматриваемой задаче, в условиях отсутствия однозначно определенной зависимости между уровнем налива продукта, стрелой прогиба дефекта и допустимым количеством циклов нагружения – налива-слива продукта, возможно несколько критериев эффективности (целевой функции) полученного решения, выбор которых определяется заказчиком. Соответственно существует несколько стратегий.

При принятии в качестве целевой функции срока безопасной эксплуатации резервуара с имеющимися дефектами следует установить допустимый уровень налива продукта.

При принятии в качестве целевой функции допустимого уровня налива продукта в резервуар с имеющимся дефектом необходимо установить срок дальнейшей безопасной эксплуатации до проведения ремонтных работ или ко-

личество циклов нагружения до появления трещины.

При снижении уровня налива продукта уменьшается полезный объем резервуара, соответственно снижается оборачиваемость и экономическая эффективность резервуарного парка [21]. Поэтому заказчик может задавать требуемый срок безопасной эксплуатации резервуара или необходимый уровень налива продукта. В такой постановке заданных ограничений необходимо определить максимально допустимое значение третьего регулятора – стрелы прогиба дефекта.

Для полного соответствия реальной конструкции, имитационная модель резервуара должна учитывать моментное напряженное состояние стенки; жесткостные характеристики и собственный вес элементов; а также при необходимости жесткость сварных швов, что требует введения дополнительных элементов, моделирующих работу шва; предусматривать возможность приложения нагрузок с минимальной их идеализацией и к тем элементам, на которые нагрузки фактически действуют; быть универсальной, позволяющей рассчитывать несущую систему стенки резервуара независимо от характера воздействий и стадии напря-

женно-деформированного состояния без изменения расчетной схемы.

Построение математической модели вертикального стального резервуара состоит из традиционных этапов: создание геометрии дефектов; формирование конечно-элементной сетки; задание атрибутов элементов.

Поведение резервуарных конструкций в том числе определяется нелинейной работой материала резервуара – появлением пластических деформаций, и геометрической нелинейностью – большими деформациями стенки резервуара при нагружении. Учет пластической работы стали возможен путем введения в расчетном комплексе мультилинейной диаграммы работы материала (рис.2.).

Далее выполняется формирование сетки конечных элементов, сложность которой заключается в выборе оптимальной, достаточно простой для расчета и эффективной в моделировании физических параметров сетки.

Регулирование НДС вертикальных стальных резервуаров в зоне монтажного сварного стыка с заданной действующей нагрузкой  $P$ , и числом циклов нагружения  $N$ , при повторно-переменном нагружении можно разбить на несколько этапов.

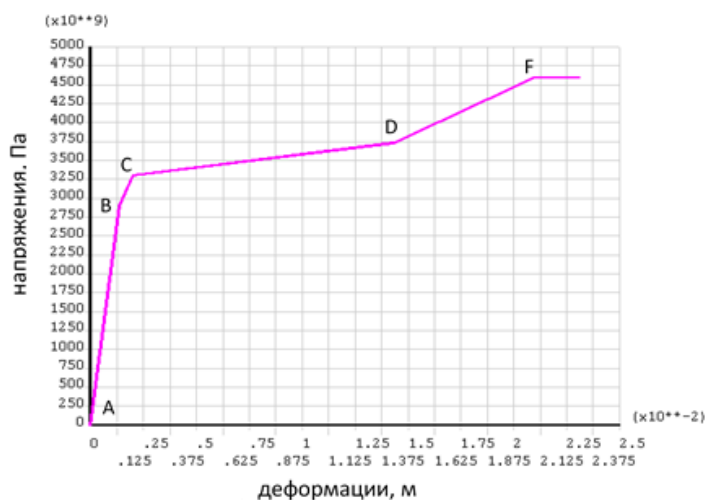


Рис. 2. Мультилинейная диаграмма работы стали

На первом этапе, исходя из данных проведенного обследования резервуара, данных технической экспертизы, размеров резервуара и условий эксплуатации, определяется значение действующих внешних нагрузок и физико-механические характеристики металла.

Далее создается имитационная модель конструкции с фактической геометрической формой, задаются установленные физико-механические характеристики металла, к модели прикладываются действующие нагрузки и граничные условия.

Затем выполняется определение напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции. По полученным значениям остаточной пластической деформации (рис.3), амплитуды упругих деформаций и остаточных напряжений после разгрузки, используя известные условия прочности при малоцикловом нагружении [22]:

$$[e_a] = \frac{1}{4e_T (n_N [N])^m} \ln \frac{1}{1-\psi} + \frac{\sigma_{-1}}{Ee_T},$$

где  $[e_a]$  – амплитуда упругих деформаций;  
 $N$  – число циклов до образования трещины;

$e_T$  – амплитуда пластических деформаций (деформации предела текучести);

$\psi$  – относительное сужение площади поперечного сечения образца при статическом растяжении;

$m = 0,5$  – постоянная;

$n_N = 10$  – коэффициент запаса по долговечности;

$E$  – модуль упругости;

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости при симметричном цикле на базе  $2 \cdot 10^6$  циклов; определяется число циклов  $N_k$  до образования трещины в области геометрического дефекта для соответствующего уровня нагрузки.

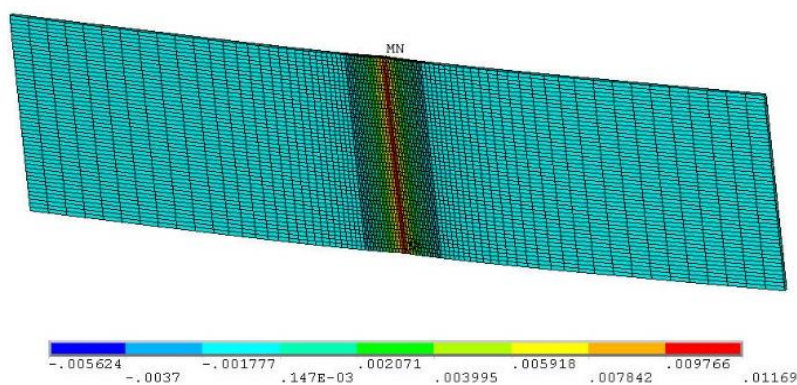


Рис. 3. Остаточные пластические деформации,  $\varepsilon_{pl} = 1,17\%$

По известным значениям эксплуатационного числа циклов нагружения и полученного числа циклов до появления трещины, по выражению  $n_N = \frac{[N]}{N_s}$  определяется запас по числу циклов для заданной нагрузки  $P$ , где  $N_s$  – число циклов

нагружения в год, зависящее от области применения резервуара.

Таким образом, варьируя в выбранном диапазоне принятые параметры регулирования, можно установить допустимое количество циклов нагружения вертикального стального резервуара или допустимый уровень напряжений в стен-

ке. Это, в свою очередь, позволит повысить надежность работы конструкции, уточнить сроки безопасной эксплуатации и увеличить экономичность использования резервуарного парка. Применение метода регулирования НДС и имитационного моделирования дает синергетический эффект, позволяя решать различные задачи по обеспечению эксплуатационной надежности строительных объектов с несущими стальными конструкциями.

### Список литературы

1. Крампит Н.Ю., Михалкин А.С. Изготовление вертикальных резервуаров полистовым методом // Альманах современной науки и образования. 2009. № 11-1. С. 55-57.
2. Востров В.К., Василькин А.А. Оптимизация высот поясов стенки резервуара // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2005. №11. С. 37-40.
3. Поповский Б.В. Перспективы применения технологии рулонирования для изготовления некоторых видов стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 26-29.
4. Ерофеев В.В., Шарафиев Р.Г., Ерофеев С.В. К вопросу о повышении эксплуатационной надежности вертикальных цилиндрических резервуаров // Вестник ЧГАА. 2011. Т. 58. С. 118-126.
5. Дефекты вертикальных стальных резервуаров / Д. Нестеров, М. Сидорчук, В. Миллионщиков, Т. Беликова, Н. Ястребова // Регламент. 2015. № 5 (43). С. 131.
6. Агеева М.А., Лапшин А.А., Иноземцев В.В. Натурные испытания и численные исследования эксплуатируемого вертикального резервуара с дефектами геометрической формы на допустимый налив нефтепродуктами // Приволжский научный журнал. 2016. № 2 (38). С. 17-23.
7. Рыбина М.А., Агеева М.А., Колесов А.И. Статистический анализ дефектов и повреждений, несовершенств формы эксплуатируемых вертикальных цилиндрических резервуаров, отработавших нормативный срок // Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума. Н.Новгород, 2016. С. 74-77.
8. Ляхович Л.С. Повышение первой частоты собственных колебаний оптимальным изменением расположения внешней массы // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (45). С. 70-80.
9. Демидов Н.Н., Меликова В.Г. О влиянии неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стержневых пространственных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 10. С. 29-32.
10. Тур В.И. Предварительное напряжение сферического сетчатого купола // Вестник Ульяновского государственного технического университета. 1998. № 2 (3). С. 98-103.
11. Кузьмичева И.Г., Колесников А.Г. Регулирование усилий предварительным напряжением отдельных элементов // Проблемы и достижения современной науки. 2016. № 1 (3). С. 113-116.
12. Механика больших космических конструкций / Н.В. Баничук, И.И. Карпов, Д.М. Климов, А.П. Маркеев, Б.Н. Соколов, А.В. Шаранюк. М., 1997.
13. Королев В.С., Поляхова Е.Н. Проблемы устойчивости движения космического аппарата с солнечным парусом // Технические науки - от теории к практике. 2016. № 8 (56). С. 21-34.
14. Василькин А.А., Щербина С.В. Автоматизированное решение задачи определения оптимальной высоты сталь-

ной фермы по критерию минимума массы при вариации высоты фермы // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сборник материалов Международной конференции (12-13 ноября 2014 г.). М.: МГСУ, 2015.

15. Белоусов В.Е., Нгуен В.Т. Алгоритм выбора наилучшего варианта проведения натурального эксперимента в многокритериальных задачах моделирования сложных технических объектов // Системы управления и информационные технологии. 2016. Т. 63. № 1. С. 55-59.

16. Бирюков А.В. Методика проведения эксперимента и осреднения параметров // Совершенствование энергетических машин: сборник научных трудов / под ред. В. В. Роголёва. Брянск, 2011. С. 124-136.

17. Oluwole O., Joshua J., Nwagwo H. Finite element modeling of low heat conducting building bricks // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2012. № 11. P. 800-806.

18. Kulkarni S. A., Vesmawala G. Study of steel moment connection with and without reduced beam section // Case Studies in Structural Engineering. 2014. № 1. P. 26-31.

19. Соболев Ю.В., Василькин А.А., Колосков А.Д. Определение напряженно-

деформированного состояния стенки с геометрическими дефектами в области монтажного стыка численными методами // Промышленное и гражданское строительство. 2005. №12. С. 44-45.

20. Данилов В.И., Лялин В.Е. Верификация математической модели сооружения на основе проведения натурального эксперимента деформации и разрушений существующего строения с учетом изменения литологического состояния грунта // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 11-16.

21. Доронин В.В., Нгуен Кань Тхуан, Прохоров А.Д. Определение оптимальной мощности нефтебазы // Нефть, газ и бизнес. 2008. № 4. С. 77-78.

22. Серенсен С.В. Избранные труды: в 3 т. Т.3. Квазистатическое и усталостное разрушение материалов и элементов конструкций. М., 1985.

23. Регулирование. Синтез. Оптимизация. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости / Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский, В.И. Савченков [и др.]. М.: Стройиздат, 1993. 456 с.

*Поступила в редакцию 09.07.18*

UDC 624.014.2

**A. A. Vasilkin**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) (Moscow, Russia) (e-mail: vergiz@mail.ru)

### CONTROL OF ACTIONS OF STEEL TANK IN WORKING

*In steel tanks made by the method of rolling, defects of a geometric shape often occur in the area of the welded joint of the wall. Subsequently, in these areas, as a result of low cycle fatigue, an unacceptable defect appears in the form of a crack, which makes it necessary to remove the reservoir from operation and carry out a set of measures for its repair. To determine the terms of safe operation of vertical steel tanks with geometric defects, it is proposed to use the methodology control of the actions of structures of load-bearing structures, one of the directions of which is the regulation of the stress-strain state of steel structures. To implement the possibility of regulating construction, it is necessary to identify such parameters, the change of which will give the maximum effect in achieving the set goals. As the indicated parameters, the design characteristics (material properties, design scheme, geometric characteristics) and factors of external influences (load, operating conditions) can act. To regulate the*

stress-strain state design of vertical steel tanks, the following regulators are proposed: product loading height, wall deflection arrow and permissible number of tank loading cycles.

By numerical calculation of the VAT of the vertical steel tank design with geometric defects, the necessary values and values of the stress state are determined. Further, using known analytical dependencies from the field of fracture mechanics, it is possible to determine the permissible number of loading cycles of the reservoir before the appearance of a crack-like defect. The application of the methodology control of the actions of structures load-bearing structures, by means of a certain change in the established control parameters, allows increasing the number of loading cycles of the reservoir, thereby increasing the period of safe operation of the defective reservoir and thereby increasing the economic efficiency of the tank farm.

**Key words:** control of the actions of structures, modification of stressed state, regulatory parameter.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2018-22-4-66-74

**For citation:** Vasilkin A. A. Control of Actions of Steel Tank in Working. Proceedings of the Southwest State University, 2018, vol. 22, no. 4(79), pp. 66-74 (in Russ.).

\*\*\*

## Reference

1. Krampit N.Ju., Mihalkin A.S. Izgotovlenie vertikal'nyh rezervuarov polistovym metodom. *Al'manah sovremennoj nauki i obrazovaniya*, 2009, no. 11-1, pp. 55-57.
2. Vostrov V.K., Vasil'kin A.A. Optimizacija vysot pojasov stenki rezervuara. *Montazhnye i special'nye raboty v stroitel'stve*, 2005, no. 11, pp. 37-40.
3. Popovskij B.V. Perspektivy primeneniya tehnologii rulonirovaniya dlja izgotovleniya nekotoryh vidov stal'nyh konstrukcij. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 12, pp. 26-29.
4. Erofeev V.V., Sharafiev R.G., Erofeev S.V. K voprosu o povyshenii jekspluatacionnoj nadezhnosti vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov. *Vestnik ChGAA*, 2011, vol. 58, pp. 118-126.
5. Nesterov D., Sidorchuk M., Milionshnikov V., Belikova T., Jastrebova N. Defekty vertikal'nyh stal'nyh rezervuarov. *Reglament*, 2015, no. 5 (43), p. 131.
6. Ageeva M.A., Lapshin A.A., Inozemcev V.V. Naturnye ispytaniya i chislennye issledovaniya jekspluatiruемого vertikal'nogo rezervuara s defektami geometricheskoj formy na dopustimyj naliv nefteproduktami. *Privolzhskij nauchnyj zhurnal*, 2016, no. 2 (38), pp. 17-23.
7. Rybina M.A., Ageeva M.A., Kolesov A.I. Statisticheskij analiz defektov i povrezhdenij, nesovershenstv formy jekspluatiruemyh vertikal'nyh cilindricheskikh rezervuarov, otrabotavshih normativnyj srok. *Trudy nauchnogo kongressa 14-go Rossijskogo arhitekturno-stroitel'nogo foruma*. N.Novgorod, 2016, pp. 74-77.
8. Ljahovich L.S. Povyszenie pervoj chastoty sobstvennyh kolebanij optimal'nym izmeneniem raspolozhenija vneshnej massy. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2014, no. 4 (45), pp. 70-80.
9. Demidov N.N., Melikova V.G. O vlijanii neravnomernyh osadok na naprazhenno-deformirovanoe sostojanie sterzhnevnyh prostranstvennyh konstrukcij. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2015, no. 10, pp. 29-32.
10. Tur V.I. Predvaritel'noe naprazhenie sfericheskogo setchatogo kupola. *Vestnik Ul'janovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 1998, no. 2 (3), p. 98-103.
11. Kuz'micheva I.G., Kolesnikov A.G. Regulirovanie usilij predvaritel'nym naprazheniem otdel'nyh jelementov. *Problemy i dostizhenija sovremennoj nauki*, 2016, no. 1 (3), pp. 113-116.



12. Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M., Markeev A.P., Sokolov B.N., Sharanjuk A.V. *Mehanika bol'shikh kosmicheskikh konstrukcij*. Moscow, 1997.

13. Korolev V.S., Poljahova E.N. Problemy ustojchivosti dvizhenija kosmicheskogo apparata s solnechnym parusom. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*, 2016, no. 8 (56), pp. 21-34.

14. Vasil'kin A.A., Shherbina S.V. Avtomatizirovannoe reshenie zadachi opredelenija optimal'noj vysoty stal'noj fermy po kriteriju minimuma massy pri variacii vysoty fermy. *Integracija, partnerstvo i innovacii v stroitel'noj nauke i obrazovanii. Sbornik materialov Mezhdunarodnoj konferencii (12-13 nojabrja 2014 g.)* Moscow, 2015.

15. Belousov V.E., Nguen V.T. Algoritm vybora nailuchshego varianta provedenija naturnogo jeksperimenta v mnogokriterial'nyh zadachah modelirovanija slozhnyh tekhnicheskikh ob'ektov. *Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii*. 2016, vol. 63, no. 1, pp. 55-59.

16. Birjukov A.V. Metodika provedenija jeksperimenta i osrednenija parametrov. *Sovershenstvovanie jenergeticheskikh mashin. Sbornik nauchnyh trudov*, ed. by Rogal'ov V. V.. Brjansk, 2011, pp. 124-136.

17. Oluwole O., Joshua J., Nwagwo H. Finite element modeling of low heat conducting building bricks. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012, no. 11, pp. 800-806.

18. Kulkarni S. A., Vesmawala G. Study of steel moment connection with and without reduced beam section. *Case Studies in Structural Engineering*, 2014, no. 1, pp. 26–31.

19. Sobolev Ju.V., Vasil'kin A.A., Koslov A.D. Opredelenie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija stenki s geometricheskimi defektami v oblasti montazhnogo styka chislennymi metodami. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2005, no.12, pp. 44-45.

20. Danilov V.I., Ljalin V.E. Verifikacija matematicheskoj modeli sooruzhenija na osnove provedenija naturnogo jeksperimenta deformacii i razrushenij sushhestvujushhego stroenija s uchetom izmenenija litologicheskogo sostojanija grunta. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no. 2 (22), pp. 11-16.

21. Doronin V.V., Nguen Kan' Thuan, Prohorov A.D. Opredelenie optimal'noj moshhnosti neftebazy. *Neft', gaz i biznes*, 2008, no. 4, pp. 77-78.

22. Serensen S.V. Izbrannye trudy. vol. 3. Kvazistaticheskoe i ustalostnoe razrushenie materialov i jelementov konstrukcij. Moscow, 1985.

23. Abovskij N.P., Endzhievskij L.V., Savchenkov V.I. i dr. Regulirovanie. Sintez. Optimizacija. Izbrannye zadachi po stroitel'noj mehanike i teorii uprugosti. Moscow, Strojizdat Publ., 1993, 456 p.