

**Моделирование напряженно-деформированного состояния
лапы рыхлителя с гибкой стойкой**

С. П. Пирогов^{1,2}, Д. А. Черенцов^{1*}

¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

²Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень, Россия

*e-mail: dacherentsov@tinn.rosneft.ru

Аннотация. В работе приводятся результаты расчета напряжений и деформаций конструкции стойки рыхлителя, выполненной в виде гибкого трубчатого элемента, при нагружении внутренним давлением и внешней силой. Для исследований использовался метод конечных элементов, реализованный в программе ANSYS. Были решены задачи построения сеточной модели трубчатого элемента, определены перемещения свободного конца и напряжений под действием внутреннего давления, найдено предельно допустимое значение давления. Определена горизонтальная составляющая силы воздействия почвы на культиватор, при которой наблюдается потеря устойчивости. Численными методами определены силы сопротивления почвы в зависимости от формы лапы и скорости движения.

Ключевые слова: напряжение; деформация; трубчатый элемент

Simulation of the stress-strain state of the Ripper foot with a flexible stand

Sergey P. Pirogov^{1,2}, Dmitry A. Cherentsov^{1*}

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

²Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

*e-mail: dacherentsov@tinn.rosneft.ru

Abstract. The article presents the results of the calculation of stresses and strains of the structure of the Ripper rack, made in the form of a flexible tubular element, under loading by internal pressure and external force. The finite element method implemented in the ANSYS program was used for the research. The problems of constructing a grid model of a tubular element were solved, displacements of the free end and stresses under the action of internal pressure were determined, the maximum allowable pressure value was found. The horizontal component of the force of influence of the soil on the cultivator, in which there is a loss of stability, is determined. The soil resistance forces were determined by numerical methods depending on the shape of the paw and the speed of movement.

Key words: strain; buckling; tubular element

Введение

В последнее время в сельскохозяйственной технике предложены устройства, содержащие гибкий трубчатый элемент [1–4]. Применение таких

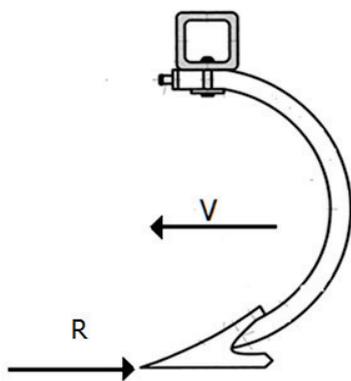


Рис. 1. Рабочий орган рыхлителя

Изменение давления во внутренней полости стойки заставляет поперечные сечения деформироваться, и свободный конец с рыхлительной лапой совершает возвратно-поступательное перемещение. В процессе обработки почвы на рабочий орган оказывают влияние силы сопротивления почвы переменного характера, что вызывает колебания стойки. Подача рабочей жидкости в полость стойки под переменным давлением приводит к колебательным движениям с определенной амплитудой и частотой, которые зависят от параметров подаваемого давления. Расчет параметров колебания гибких трубчатых пружин приводится в работах [5–12].

Объект и методы исследования

Исследованию манометрических трубчатых пружин посвящены работы многих исследователей [7]. Основными методами расчета были энергетические методы и теория гибких оболочек.

Существенными недостатками всех методов являлось то, что они описывали напряженно-деформированное состояние трубок без учета концевых участков, которые сильно влияют на распределение напряжений. Кроме того, рассматривались только малые перемещения, то есть не учитывалась геометрическая нелинейность, возникающая при достаточно больших перемещениях конца трубки. Также эти методы не позволяли исследовать условия потери устойчивости.

Для устранения этих недостатков было предложено моделировать напряженно-деформированное состояние трубчатых пружин методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS [13–19]. Применение этого метода позволяет также определить собственные частоты колебаний.

Результаты

Точность расчетов будет напрямую зависеть от качества сеточной модели рассматриваемой конструкции. Жесткое ограничение (точка крепления) и наконечник строятся по умолчанию с использованием метода Sweep, а для построения сеточной модели манометрической пружины необходимо определить наилучший метод построения сетки (Tetrahedrons или Sweep) и минимальный размер сеточных элементов, обеспечивающих устойчивость решения без потери точности.

В качестве образца взята трубка со следующими геометрическими характеристиками: центральный угол — 180 град., радиус кривизны — 500 мм, большая полуось поперечного сечения — 25 мм, малая полуось поперечного сечения — 12,5 мм, толщина стенки — 2,5 мм, материал — сталь 36НХТЮ.

Для оценки влияния методов построения сетки и размеров элементов определялось перемещение свободного конца трубки при воздействии горизонтальной силы 1 000 Н на свободный конец трубки.

Расчеты производились в toolbox — Static Structural, результаты представлены на рисунке 2.

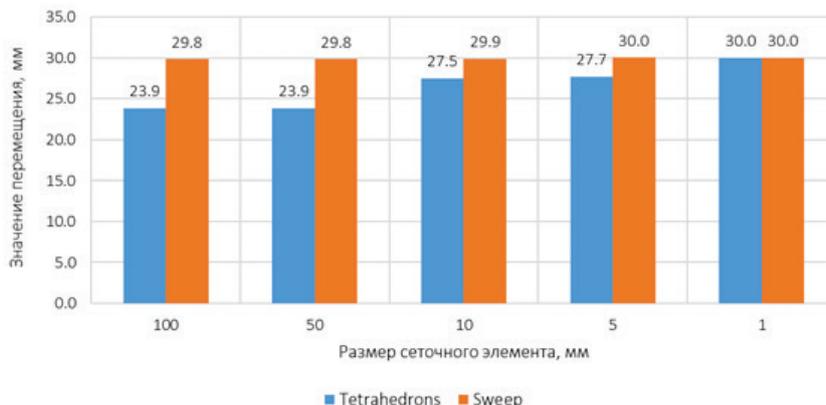


Рис. 2. Результаты оценки перемещений свободного конца трубки

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при уменьшении размера элементов сеточной модели трубки значения перемещения свободного конца стремятся к некоторому пределу. Более «гладкое» решение получается при использовании метода Sweep, минимальный размер элемента, при котором наблюдается отклонение результатов расчета менее 0,5 %, составляет 5 мм.

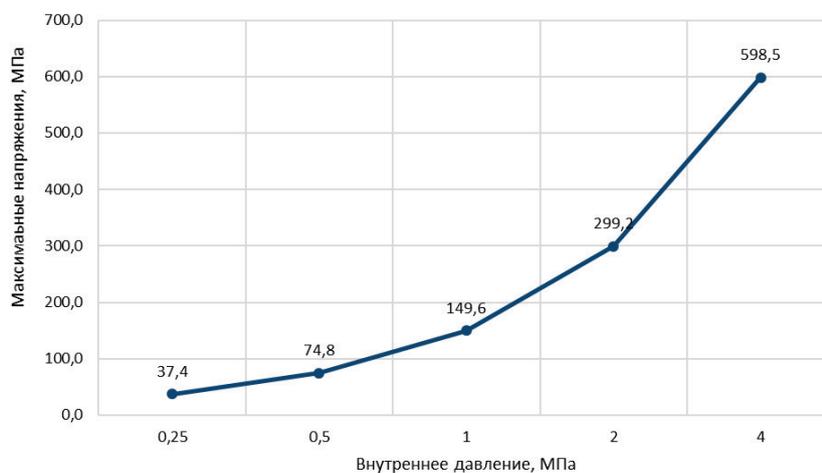


Рис. 3. Влияние внутреннего давления на максимальные напряжения

На рисунках 3 и 4 показаны результаты вычислительных экспериментов по определению максимальных напряжений и перемещений конца трубки.

Анализ зависимостей перемещений и напряжений от внутреннего давления показывает, что на начальном этапе нагружения — при давлении до 4 МПа

наблюдается линейный рост напряжений и перемещений, при больших давлениях происходит отклонение от линейной зависимости.

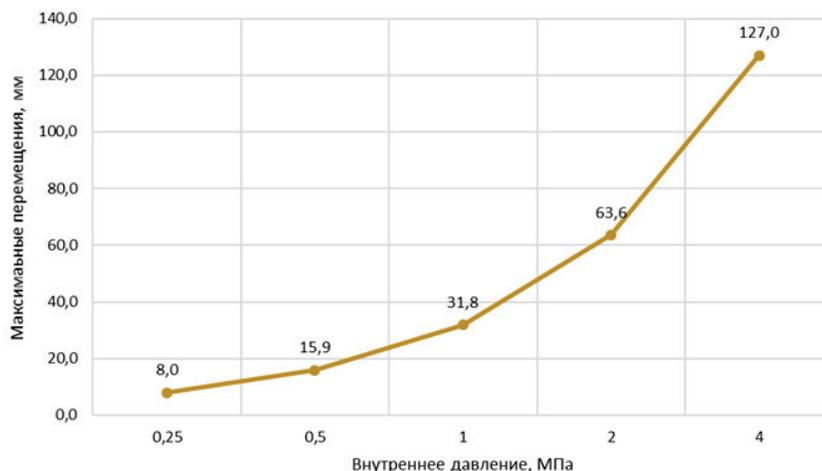


Рис. 4. Влияние внутреннего давления на перемещения конца трубки

Также была поставлена и решена задача определения максимального значения горизонтальной силы R , приложенной к концу трубки, при котором наблюдается потеря устойчивости. Расчет производился в toolbox — Eigenvalue Buckling. Максимальные напряжения, как и нарушение целостности МТП, наблюдаются в основании жесткой заделки.

Гидродинамический расчет производился в toolbox — Fluent. Рыхлительная лапа выполнена из стали, геометрические характеристики: длина — 500 мм, высота — 200 мм, ширина — 400 мм.

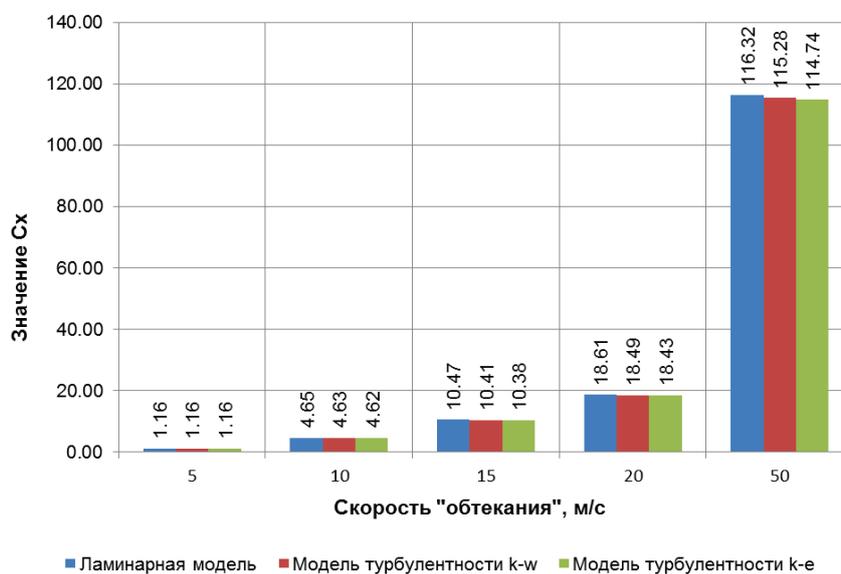


Рис. 5. Результаты оценки влияния скорости обтекания

Все задачи гидродинамики требуют итеративного подхода к решению, рассмотрим изменение значения коэффициента лобового сопротивления C_x в зависимости от итераций и от скорости обтекания сплошной средой для различных моделей поведения сплошной среды.

Результаты расчета показали, что для получения достоверных результатов, возможно ограничиться 300 итерациями.

Распределение скоростей в моделируемом объеме показано на рисунке 5, а влияние скорости перемещения на силу сопротивления — на рисунке 6.

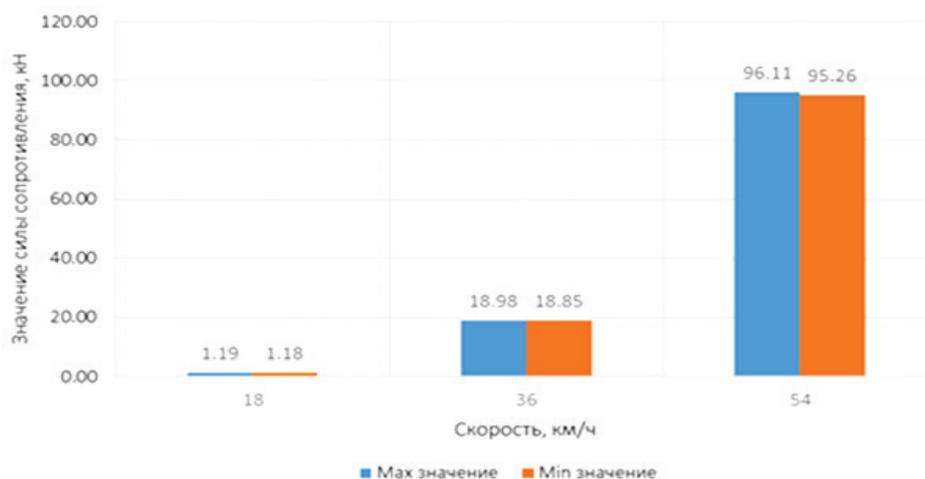


Рис. 6. Влияние скорости перемещения на силу сопротивления

Обсуждение

При построении сеточной модели трубчатой пружины было установлено, что лучший способ построения сетки — Sweep, а минимальный размер элементов, обеспечивающий устойчивое решение без потери точности, равен 1 мм.

Анализ напряженно-деформированного состояния под действием внешней силы 1 000 Н показал, что перемещение конца трубки будет 30 мм. Для потери устойчивости рассматриваемой конструкции необходимое горизонтальное усилие должно быть не менее 12 800 Н. Это подтверждает достаточный запас прочности.

Выводы

Анализ зависимостей перемещений и напряжений от внутреннего давления показывает, что на начальном этапе нагружения — при давлении до 4 МПа наблюдается линейный рост напряжений и перемещений, при больших давлениях происходит отклонение от линейной зависимости.

Расчет сил сопротивления показал, что для предотвращения потери устойчивости необходимо ограничить максимальную скорость движения не более 30–35 км/час.

Библиографический список

1. Кокошин С. Н. Физические основы процесса разрушения почвы // Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья. – 2015. – № 4 (31). – С. 100–104.

2. Пирогов С. П., Чуба А. Ю. Применение манометрических трубчатых пружин в сельскохозяйственных машинах // *Агропродовольственная политика России*. – 2017. – № 9 (69). – С. 82–88.
3. Кокошин С. Н. Культиваторные стойки с изменяемой жесткостью // *Сельский механизатор*. – 2012. – № 5. – С. 8.
4. Патент на полезную модель РФ № 116000 от 03.05.2011. Рабочий орган культиватора / Маратканов А. А., Смолин Н. И., Кокошин, С. Н., Устинов Н. Н.; заявл. 03.05.2011; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14. – 3 с.
5. Пирогов С. П. Манометрические трубчатые пружины. – СПб.: Недра, 2009. – 276 с.
6. Пирогов С. П., Черенцов Д. А. Теоретические основы проектирования вибростойких манометров // *Измерительная техника*. – 2016. – № 8. – С. 38–41.
7. Пирогов С. П., Черенцов Д. А., Чуба А. Ю. Колебания манометрических трубчатых пружин: моногр. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 95 с.
8. Oscillations of manometric tubular springs with rigid end / D. A. Cherentsov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 357. – Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/357/1/012030>.
9. Pirogov S. P., Cherentsov D. A., Gulyaev B. A. Prospects of Applying Vibration-Resistant Pressure Gauges in the Oil and Gas Industry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 154. – Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/154/1/012013>.
10. Pirogov S. P., Cherentsov D. A., Chuba A. Yu. Study of Elastic Sensing Elements for Vibration-Resistant Pressure Gauges // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 154. – Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/154/1/012015>.
11. Pirogov S. P., Chuba A. Yu., Cherentsov D. A. Effect of section shape on frequencies of natural oscillations of tubular springs // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 357. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/357/1/012032>.
12. Pirogov S. P., Chuba A. Yu. Automation of calculations of technical characteristics of manometric tubular springs // *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*. – 2019. – Vol. 42, Issue 2. – P. 27–29. DOI: 10.26480/jmerd.02.2019.27.29
13. Бордовский Г. А. Физические основы математического моделирования: учеб. пособие для студентов физ.-мат. специальностей вузов. – М.: Academia, 2005. – 315 с.
14. Кузнецов Ю. И. Моделирование колебательных систем в природных средах. – Новосибирск: Изд-во РАН, 2008. – 231 с.
15. Ревинская О. Г. Основы программирования в MatLab: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016. – 208 с. – (Учебное пособие).
16. Басов К. А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 640 с.
17. Денисов М. А. Компьютерное проектирование. ANSYS: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2014. – 76 с.
18. Морозов Е. М., Муйземнек А. Ю., Шадский А. С. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения. – СПб.: Ленанд, 2018. – 456 с.
19. ANSYS в руках инженера. Температурные напряжения / А. С. Шадский [и др.]. – СПб.: Едиториал УРСС, 2018. – 480 с.

References

1. Kokoshin, S. (2015). The physical basis of the soil destruction process. *Bulletin of the Northern Trans-Ural State Agricultural University*, (4(131)), pp. 100-104. (In Russian).
2. Pirogov, S. P., & Chuba, A. Yu. (2017). *Primeneniye manometricheskikh trubchatykh pruzhin v sel'skokhozyaystvennykh mashinakh*. *Agro-food policy in Russia*, (9(69)), pp. 82-88. (In Russian).
3. Kokoshin, S. (2012). Cultivator rack with the measured stiffness. *Sel'skiy mekhanizator*, (5), pp. 8. (In Russian).
4. Maratkanov, A. A., Smolin, N. I., Kokoshin, S. N., & Ustinov, N. N. *Rabochiy organ kull'tivatora*. Patent na poleznuyu model' RF, No 116000. Applied: 03.05.2011. Published: 20.05.2012. Bulletin No 14. 3 p. (In Russian).
5. Pirogov, S. P. (2009). *Manometricheskiye trubchatyye pruzhiny*. St. Petersburg, Nedra Publ., 276 p. (In Russian).

6. Pirogov, S. P., & Cherentsov, D. A. (2016). Theoretical Foundations of the Design of Vibration-Resistant Manometers. *Measurement Techniques*, 59(8), pp. 845-849. (In English).
7. Pirogov, S. P., Cherentsov, D. A., & Chub, A. Yu. *Kolebaniya manometricheskikh trubchatykh pruzhin*. Tyumen, TyumGNGU Publ., 95 p. (In Russian).
8. Cherentsov, D. A., Pirogov, S. P., Dorofeev, S. M., & Ryabova, Y. S. (2018). Oscillations of manometric tubular springs with rigid end. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 357. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/357/1/012030>
9. Pirogov, S. P., Cherentsov, D. A., & Gulyaev, B. A. (2016). Prospects of Applying Vibration-Resistant Pressure Gauges in the Oil and Gas Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 154. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/154/1/012013>
10. Pirogov, S. P., Cherentsov, D. A., & Chuba, A. Yu. (2016). Study of Elastic Sensing Elements for Vibration-Resistant Pressure Gauges. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 154. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/154/1/012015>.
11. Pirogov, S. P., Chuba, A. Yu., & Cherentsov, D. A. (2018). Effect of section shape on frequencies of natural oscillations of tubular springs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 357. (In English). Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/357/1/012032>
12. Pirogov, S. P., & Chuba, A. Yu. (2019). Automation of calculations of technical characteristics of manometric tubular springs. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, 42(2), pp. 27-29. (In English). DOI: 10.26480/jmerd.02.2019.27.29
13. Bordovskiy, G. A. (2005). *Fizicheskiye osnovy matematicheskogo modelirovaniya*. Moscow, Academia Publ., 315 p. (In Russian).
14. Kuznetsov, Yu. I. (2008). *Modelirovaniye kolebatel'nykh sistem v prirodnykh sredakh*. Novosibirsk, the Russian Academy of Sciences Publ., 231 p. (In Russian).
15. Revinskaya, O. G. (2016). *Osnovy programirovaniya v MatLab*. St. Petersburg, BKHV-Peterburg Publ., 208 p. (In Russian).
16. Basov, K. A. (2014). *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya*. Moscow, DMK Press Publ., 640 p. (In Russian).
17. Denisov, M. A. (2014). *Komp'yuternoye proyektirovaniye. ANSYS*. Ekaterinburg, UrFU Publ., 76 p. (In Russian).
18. Morozov, Ye. M., Muzemnek A. Yu., & Shadskiy, A. S. (2018). *ANSYS v rukakh inzhenera. Mekhanika razrusheniya*. St. Petersburg, Lenand Publ., 456 p. (In Russian).
19. Shadskiy, A. S., Morozov, Ye. M., Zhekov, K. N., & Plotnikov, A. S. (2018). *ANSYS v rukakh inzhenera. Temperaturnyye napryazheniya*. St. Petersburg, Editorial URSS, 480 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Пирогов Сергей Петрович, д. т. н., профессор кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, доцент кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики, Государственный аграрный университет Северного Зауралья, г. Тюмень

Черенцов Дмитрий Андреевич, к. т. н., доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: dacherentsov@tnc.rosneft.ru

Information about the authors

Sergey P. Pirogov, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, Associate Professor at the Department of Forestry, Woodworking and Applied Mechanics, Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen

Dmitry A. Cherentsov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, e-mail: dacherentsov@tnc.rosneft.ru