

## Аналитический расчет рабочего профиля опоры постоянного усилия

*А.О. Звонов*

*Омский государственный технический университет*

**Аннотация:** Опоры постоянного усилия применяются на всех газо- и нефтеперерабатывающих заводах, в случаях, когда необходимо обеспечить подвижность трубопровода в точке его закрепления. В статье рассматривается алгоритм расчета формы профиля деталей опоры, имеющей определенную конструкцию. Данные детали обеспечивают постоянство вертикального усилия опоры трубопровода при его передаче от пружины сжатия на точку опоры трубопровода. Даны аналитический и геометрический варианты расчета. Статья будет полезна специалистам, занимающимся проектированием опор трубопроводов.

**Ключевые слова:** подвижное соединение, геометрический расчёт, изменяемая жёсткость, liseга, импортозамещение.

### Введение

В проектировании современных трубопроводов нередко применяются опоры постоянного усилия – узлы крепления трубы, обеспечивающие постоянное вертикальное усилие на достаточно большом диапазоне вертикальных перемещений [1]. Задача поддержания такого постоянного усилия возникает в случае, если значительного перемещения трубопровода нельзя избежать по технологическим или конструктивным соображениям (значительные перепады температур [2], специальное исполнение трубопроводов [3] и т.д.). Поскольку кроме постоянства обеспечиваемого усилия к рассматриваемым опорам предъявляются такие требования, как пожаробезопасность и большой межремонтный период, их конструкция, как правило, является полностью механической, а в связи с этим - сравнительно сложной и габаритной. Упрощение и уменьшение опор постоянного усилия является одной из актуальных задач современного машиностроения [4]. Другой задачей инженеров-конструкторов, которая становится всё более актуальной, является импортозамещение опор постоянного усилия [5]. При этом наряду с эффективными методами компьютерного моделирования успешно применяются и аналитические методы расчета опор [6]. Практика

---

показывает, что аналитические расчёты могут быть легко внедрены в инженерные методики, обеспечивая высокую скорость и малую вычислительную сложность расчётов [7,8].

В последние годы ведущие производители опор постоянного усилия широко используют конструкцию, схема которой показана на рис. 1 [9-11]. В данной конструкции построенный расчётным путём профиль позволяет компенсировать изменение усилия пружины при её сжатии или растяжении от вертикальных перемещений опираемой трубы.

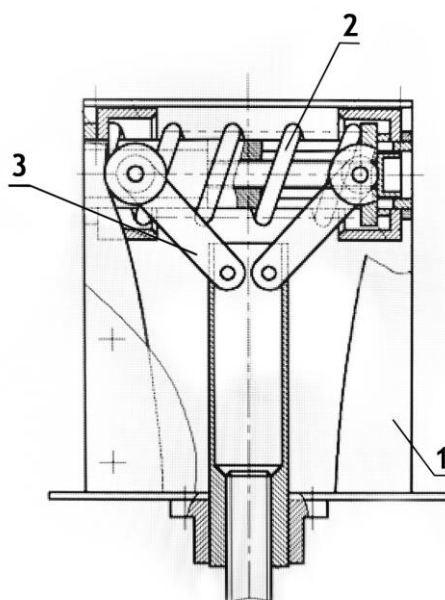


Рис. 1. – Один из широко используемых вариантов конструкции опоры постоянного усилия: 1 - профильный элемент; 2 - пружина сжатия; 3 - кулачок с низким коэффициентом трения

В соответствии со схемой, заранее поджатая пружина 2 устанавливается между двух кулачков 3, имеющих свободный ход по некоторому профилю 1. Если кулачки соединены с подвижной частью опоры, а профильный элемент - с неподвижной, смещение подвижной опоры от начального положения сопровождается вертикальным перемещением кулачков 3 по профилю. Поскольку профиль «сужается» к нижней части, перемещение кулачков вниз сопровождается сжатием пружины 2, однако

---

угол соприкосновения кулачков и профиля 1 может быть подобран таким образом, чтобы вертикальная составляющая усилия была постоянной при любом перемещении кулачков. Рассмотрим последовательность построения профиля, реализующего требуемые характеристики опоры.

### Аналитический расчёт профиля

Для выполнения расчета профиля составим расчетную схему распределения усилий в точке соприкосновения профиля и кулачка (рис. 2). Рисунок также иллюстрирует, как изменение угла  $A$  может компенсировать увеличение нормального усилия пружины  $F_{nn}$  для сохранения постоянной величины целевого вертикального усилия  $F_{ц}$ .

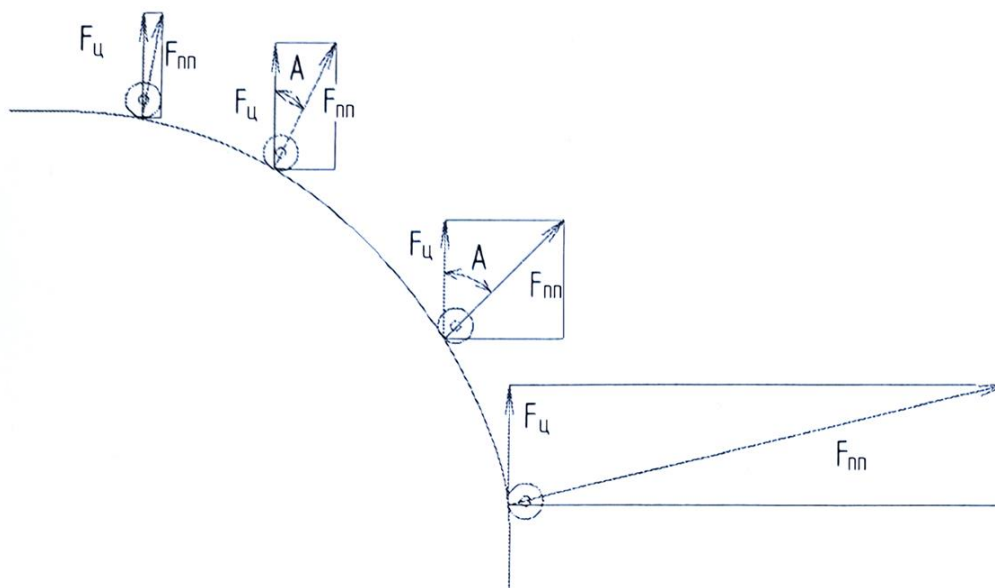


Рис. 2. – Схема распределения сил и реакций на рабочем профиле опоры

Последовательность расчета:

1. Записываем таблицу нормального усилия пружины  $F_n$  в координатах мм-кг (первые два столбца таблицы, показанной на рис. 3).

2. Устанавливаем целевое усилие в килограммах (постоянное усилие опоры, столбец 3)  $F_{ц}$ , а также выбираем начальное поджатие пружины  $T_0$  и записываем из таблицы соответствующее начальное усилие пружины  $F_{nn}$ .

3. Вычисляем косинус угла  $A$  (см. рис. 2) как отношение  $F_{ц}$  к  $F_{nn}$ .

4. Для построения профиля принимаем шаг сжатия пружины 0.5 мм (т.к. характеристика пружины взята с шагом 1 мм, а в рассматриваемой конструкции она сжимается с двух сторон). Искомый фрагмент профиля  $T$  будет гипотенузой треугольника с катетом 0,5 и прилежащим углом  $A$ , т.е. равен отношению  $0,5/\cos(A)$ . Чтобы отложить этот отрезок для графического построения рассчитанного профиля, вычисляем угол  $A$  по его косинусу и откладываем фрагмент  $T$  с полученным углом из начальной точки, как показано на рисунке 4.

	Сжатие пружины:		Целевая сила, кг	угол A	перемещение трубы, мм	длина профиля, мм
	T, мм	Fп, кг				
	1	0,2034	2			
	2	0,4068	2			
	...	...	...			
	10	2,034	2			
	11	2,2374	2			
точка начального сжатия	12	2,4408	2	49,14	0,43	0,66
	13	2,6442	2	44,61	0,5	0,71
	14	2,8476	2	40,99	0,57	0,76
	15	3,051	2	37,91	0,64	0,81
	16	3,2544	2	35,33	0,7	0,86
	17	3,4578	2	33,11	0,76	0,91
	18	3,6612	2	31,16	0,82	0,96
	19	3,8646	2	29,44	0,88	1,01
	20	4,068	2	27,91	0,94	1,06
	21	4,2714	2	26,54	0,1	1,11
	22	4,4748	2	25,3	1,05	1,16
	23	4,6782	2	24,18	1,11	1,22
	24	4,8816	2	23,16	1,16	1,27
	25	5,085	2	22,22	1,22	1,32

Рис. 3. – Файл аналитического расчета для построения профиля

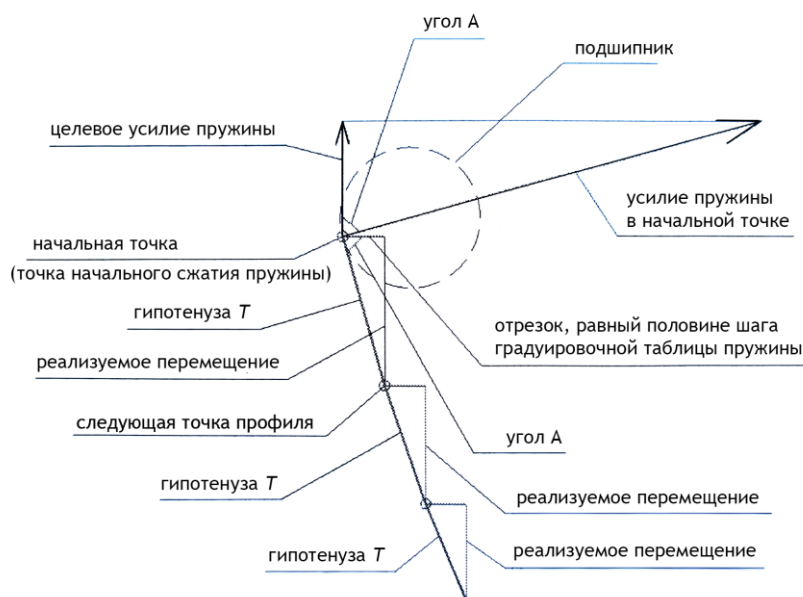


Рис. 4. – Отрисовка рассчитанного профиля

Повторяем шаги 3-4, подставляя новое усилие пружины из таблицы, таким образом получаем профиль в требуемом диапазоне перемещений опоры.

Необходимо отметить два важных момента. Во-первых, полученный профиль должен быть проверен на возможность его фактической реализации (возможность изготовления, приемлемые габариты, возникающие усилия среза в осях конструкции). Во-вторых, ни используемое в расчете перемещение по  $Y$  (половина сжатия пружины) ни гипотенуза  $T$  не равны соответствующему реализуемому опорой перемещению  $N$ . Перемещение  $N$  можно оценить после построения профиля, либо вычисляя их на каждом шаге как половину  $tg(A)$ . Также отметим, что обе профильные детали в сборке должны быть симметричными, но этого легко добиться совместной механической обработкой их заготовок.

### Геометрическое построение профиля

По аналогии с отрисовкой профиля, приведенной на рисунке 4, можно обойтись без вычисления угла, а построить профиль геометрически. Эскизное построение профиля не является трудоёмким, поскольку для него необходимо порядка 20 шагов.

Шаги построения:

1. Получаем таблицу нормального усилия пружины в мм-кг, выбираем усилие начального сжатия пружины.
2. Строим прямоугольный треугольник: вначале откладывая вертикальный катет (целевое усилие), затем разворачивая гипотенузу (выбранное начальное усилие пружины) на угол, необходимый для совмещения конца гипотенузы и перпендикуляра к первому катету (см. рис. 5а).
3. Строим перпендикуляр к гипотенузе в точке пересечения гипотенузы и катета, а также горизонтальный отрезок 0,5 мм (половина шага сжатия пружины, принимаемого в расчёте), см. рис. 5б.

4. Проецируем половину шага сжатия пружины на построенный перпендикуляр и получаем новую точку соприкосновения подшипника и профиля (см. рис. 5в).

5. Поскольку пройдя прочерченный участок пружина сожмется на 1 мм, откладываем из полученной точки прежний катет (целевое усилие) и новую гипотенузу (усилие от сжатия пружины на 1 мм больше предыдущего). Аналогично шагам 2-4 находим следующие точки профиля.

Если построенный профиль удовлетворяет поставленным требованиям, можно построить уточненный профиль с меньшим шагом.

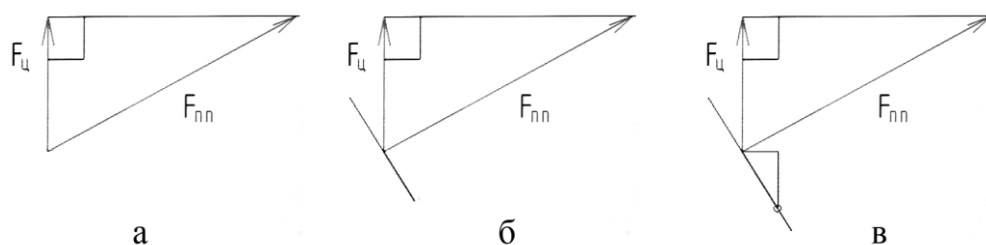


Рис. 5. – Шаги геометрического построения профиля

### Заключение

В статье сформулирован пошаговый алгоритм построения профилей рабочих деталей опор постоянного усилия, в которых усилие создают подпружиненные подшипники качения. Данный алгоритм упрощает выбор пружин, проектирование новых опор, а также позволяет задавать допуски выполнения профилей рабочих деталей в зависимости от фактической точности производства других компонентов.

Одним из практических приложений разработанного аппарата может быть оценка вклада погрешности изготовления в разброс характеристик опор.

Наличие алгоритма расчёта позволяет автоматизировать проектирование опоры под необходимые параметры, что сравнительно легко может быть сделано средствами тяжелых САПР, как продемонстрировано в работе [12].

Практический интерес представляет также получение аналитических выражений для рассматриваемых профилей. Для их получения, после построения полного профиля необходимо аппроксимировать полученные точки и исследовать поведение аппроксимирующей функции.

### Литература

1. Sheremetov L., Batyrshin I., Chi M., Rosas A. Knowledge-based collaborative engineering of pipe networks in the upstream and downstream petroleum industry // *Computers in Industry*, 2008. Vol. 59, issue 9. pp. 936-948.

2. Попов А.Б. Использование опор постоянного усилия при проектировании опорно-подвесных систем паропроводов высокого давления // *Энергетик*, 2008. № 2. С. 15-18.

3. Новиков А.В., Минеев Р.А. Проблемы импортозамещения в атомной отрасли России // *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта*, 2015. № 42. С. 247-252.

4. Александров А.А., Проворов А.В. Расчёт опоры постоянного усилия технологического трубопровода // *Семьдесят вторая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. Сборник материалов конференции*. Ярославль, 2019. С. 286-289.

5. Попов А.Б. К вопросу о наладке трубопроводов с упругими опорами иностранного производства // *Энергетик*, 2022. № 2. С. 13-15.

6. Chen L.-J., Zhang Y.-L., Ma Z.-Y. Analytical approach for support mechanism of feet-lock pipe combined with steel frame in weak rock tunnels // *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016. Vol. 20. pp. 2965–2980.

7. Лихов З.Р., Бердов М.М., Сабанчиев А.А., Пшуков В.Х. Аналитическое описание диаграмм деформирования материалов для расчёта железобетонных элементов с комбинированным предварительным

напряжением // Инженерный вестник Дона, 2016. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3650.

8. Вытчиков Ю.С., Сапарёв М.Е., Дядин А.А. Приближенный аналитический метод расчёта влажностного режима многослойных строительных ограждающих конструкций // Инженерный вестник Дона, 2020. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2020/6350.

9. Duong L., Wittek A., Pearse B. Redesign proposal for constant spring force pipe supports // CEED Seminar Proceedings, 2015. pp. 109-114.

10. Дьяконов Н.В., Зуга И.М. Опора постоянного усилия // Патент России № 2747532. 2021. Бюл. № 13. С. 1-10.

11. Дьяконов Н.В., Зуга И.М. Подвеска постоянного усилия // Патент России № 2753088. 2021. Бюл. № 23. С. 1-10.

12. Lebedev A.E., Gudanov I.S., Vinogradova E.A., Vatagin A.A. Automation of geometric simulation and strength calculation of construction of constant force support // Chemical and Petroleum Engineering, 2021. Vol. 57. pp. 143-147.

### References

1. Sheremetov L., Batyrshin I., Chi M., Rosas A. Computers in Industry. 2008. Vol. 59, issue 9. pp. 936-948.

2. Popov A.B. Energetik, 2008. № 2. pp. 15-18.

3. Novikov A.V., Mineyev R.A. Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta, 2015. № 42. pp. 247-252.

4. Aleksandrov A.A., Provorov A.V. Sem'desyat vtoraya vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya studentov, magistrantov i aspirantov vysshikh uchebnykh zavedeniy s mezhdunarodnym uchastiyem. Sbornik materialov konferentsii (Proc. Seventy-second All-Russian Sci. and Tech. Conf. of Students, Undergraduates and Postgraduates of Higher Educational Institutions with International Participation). Yaroslavl', 2019. pp. 286-289.





5. Popov A.B. Energetik, 2022. № 2. pp. 13-15.
6. Chen L.-J., Zhang Y.-L., Ma Z.-Y. KSCE Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 20. pp. 2965–2980.
7. Likhov Z.R., Berdov M.M., Sabanchiyev A.A., Pshukov V.KH. Inzhenernyj vestnik Dona., 2016. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n2y2016/3650](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3650).
8. Vytchikov YU.S., Saparëv M.E., Dyadin A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/ N3y2020/6350](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2020/6350).
9. Duong L., Wittek A., Pearse B. CEED Seminar Proceedings, 2015. pp. 109-114.
10. D'yakonov N.V., Zuga I.M. Opora postoyannogo usiliya [Constant force pipe support]. Patent Rossii № 2747532. 2021. Bulletin 13. pp. 1-10.
11. D'yakonov N.V., Zuga I.M. Podveska postoyannogo usiliya [Constant force pipe hanger]. Patent Rossii № 2753088. 2021. Bulletin 23. pp. 1-10.
12. Lebedev A.E., Gudanov I.S., Vinogradova E.A., Vatagin A.A. Chemical and Petroleum Engineering, 2021. Vol. 57. pp. 143-147.