

РАСЧЕТ ТОЧНЫМИ МЕТОДАМИ СТАБИЛИЗАТОРА ДАВЛЕНИЯ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМИ УПРУГИМИ КАМЕРАМИ

Ф.В. Рекач¹, Е.К. Синиченко¹, И.И. Грицук^{1,2}

¹ Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

² Институт водных проблем Российской академии наук
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

В статье описан расчет на прочность и податливость стабилизатора с эллиптическими камерами.

Ключевые слова: стабилизатор давления, гидроудар

Трубопроводная система энергетических установок представляет собой упругую конструкцию, состоящую из прямых участков труб, поворотов, различной арматуры, тройников, патрубков и средств крепления — опор. При перекачке через такую систему жидкости или газа возникает неустановившееся движение, приводящее к колебаниям давления и расходу рабочей среды.

Возникновение колебаний потока в энергетических установках связано с несовершенством рабочего процесса нагнетательных устройств, вихреобразованием в рабочей среде, автоколебательными процессами в агрегатах управления и распределительных элементах. Амплитуды давления и расхода в трубопроводах энергетических установок могут достигать значительных величин, так как они связаны с агрегатами высокого давления, мощными циркуляционными насосами, турбоагрегатами, имеющими большие нестационарные расходы рабочих сред.

Механизм образования пульсаций давления жидкости и газа подробно изложен в работе И.А. Чарного [2].

Периодические изменения рабочей среды (жидкости или газа) вследствие взаимодействия между потоком и трубопроводом могут вызывать механические колебания трубопровода и связанного с ним оборудования и опорных конструкций. При резонансных условиях под действием продольных волн могут возникать резонансные колебания трубопроводной системы.

На рисунке 1 приведена схема стабилизатора с упругими камерами. Он представляет собой центральный трубопровод 1 цилиндрического поперечного сечения, соединенного через распределенную перфорацию 2 с коаксиальной упругой камерой 3 эллиптического поперечного сечения 4 из пружинной стали. Центральный трубопровод соединен с гидромагистралью с помощью фланцев 6. Длина коаксиального эллиптического участка выбирается в зависимости от заданной степени коррекции динамических процессов гидросистемы.

При возникновении колебаний в трубопроводе в результате упругой деформации коаксиальной камеры и наличия распределенной перфорации происходит диссипация энергии колебаний давления рабочей среды. При выборе соответствующих параметров коаксиальной камеры и распределенной перфорации можно добиться необходимой степени уменьшения уровня колебаний давления и изменения собственной частоты системы.

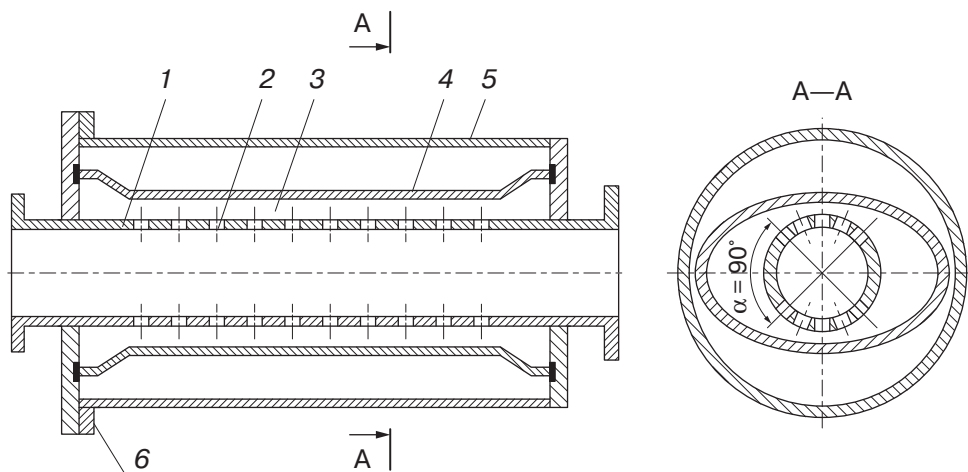


Рис. 1. Схема стабилизатора с упругими камерами

Значительный практический интерес представляет стабилизатор с разветвленной системой эллиптических трубок.

Гипотезы, принимаемые при расчете стабилизатора:

- эллиптический контур сечения принимается нерастяжимым;
- считается, что эллиптическая форма сечения до деформации остается эллиптической и после деформации.

Расчет заключается в том, чтобы при заданных параметрах (геометрических размерах, материале) эллиптической трубы определить максимальное давление, которое она может выдержать по прочности и дополнительный объем жидкости, который она может вместить.

Метод расчета камер на податливость описан в [3].

В расчете задается коэффициент β , равный отношению малой полуоси эллипса к большой, а также длина контура эллипса, равная длине окружности диаметра D . Размер большой полуоси эллипса выражается формулой

$$a_0 = \frac{l_k}{E(k)},$$

где $E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$ — полный эллиптический интеграл второго рода; $l_k = \pi D/4$ — смоченный периметр $1/4$ части эллипса; $k = \sqrt{1 + \beta^2}$.

Составляя уравнения равновесия для четверти эллипса [3], можно получить площадь поперечного сечения $\bar{F} = \pi ab/l_k^2$ после приложения внутреннего давления p :

$$\bar{F} = \psi(\alpha, k),$$

где $\alpha = (24p(1 - \nu^2)l_k^3)/h^3E$; ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости материала трубы; h — толщина стенки трубы; a и b — длины полуосей эллипса после деформации.

Средняя податливость стабилизатора вычисляется по следующей формуле:

$$\Pi = \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{\bar{F} - F_0}{p} L,$$

где \bar{F} — максимальное изменение площади поперечного сечения эллипса.

Расчет эллиптических камер на прочность. Проводится для длины $L = 1$ м. Максимальное напряжение вычисляется по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} \cdot \left(\frac{h}{2}\right),$$

где $I = h^3/12$; $M_{\max} = \frac{EI}{1 - \nu^2} \left(\frac{1}{\bar{R}} - \frac{1}{R_0}\right)$; R_0 — первоначальный радиус кривизны поперечного сечения в точке $A(a_0, 0)$; \bar{R} — радиус кривизны в точке $\bar{A}(a_0, 0)$ после деформации.

Расчет эллиптических трубок на вмещение объема жидкости. Гидравлическая система с рабочим давлением в коллекторе $D_k = 80$ мм, $p = 120$ атм и рабочей средой маслом с плотностью $\rho = 900$ кг/м³ и скоростью распространения волн давления $c = 1200$ м/с испытывает синусоидальные вредные колебания с частотой $\eta = 95$ Гц и высотой пиков синусоиды $\pm(\Delta p/2) = \pm 10$ атм (это связано с неравномерной подачей жидкости поршневым насосом). Эллиптическое сечение выполнено из круглых трубок с внутренним диаметром $D = 39$ мм, толщиной $h = 3$ мм и коэффициентом $\beta = 0,4$. Общая длина эллиптических трубок $L = 3,84$ м.

Решение. Максимальная виброскорость V_m жидкости определяется из формулы $(\Delta p/2) = \rho V_m c$ и равна 0,93 м/с. Объем жидкости, который должен вместить стабилизатор равен

$$W = \frac{Q_m}{\pi \eta} = \frac{V_m D_k^2}{4 \eta} = 15,7 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Увеличение площади поперечного сечения ΔF по вышеописанной методике для скачка давления от 120 атм до $120 + (\Delta p/2) = 130$ атм.

$$\Delta F = \bar{F}_{130} - \bar{F}_{120} = 6,3 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Итак, объем жидкости, который может вместить стабилизатор при повышении давления от 120 атм до 130 атм, равен

$$W_{cm} = \Delta F \cdot L = 24,1 \text{ см}^3 > 15,7 \text{ см}^3,$$

т.е. стабилизатор гарантированно погасит вредные пульсации давления.

Выводы. При уменьшении β и постоянном диаметре D и давлении p площадь поперечного сечения увеличивается.

Необходимо иметь в виду, что при слишком малом β ($\beta < 0,2$) трудно будет выполнить условия прочности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Низамов Х.Н., Рекач Ф.В., Синиченко Е.К. Расчет вынужденных колебаний трубопровода со стабилизатором давления диссипативного принципа действия методом Лапласа с учетом трения в магистральном трубопроводе и нелинейной зависимости скорости перетекания жидкости через перфорацию // *Двойные технологии*. 2005. № 2. С. 20—25.
- [2] Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. М.: Недра, 1975. 296 с.
- [3] Чучеров А.И., Галюк В.Х., Низамов Х.Н. и др. Пульсации давления в трубопроводах и способы их устранения // *Обзорная информация. Серия «Транспорт и хранение нефти»*. 1991.
- [4] Young W.R. and Wolfe C.L. (2014) Generation of surface waves by shear-flow instability // *J. Fluid Mechanics*. Vol. 739. P. 276—307.

ANALYSIS OF PRESSURE STABILIZER WITH ELLIPTIC CHAMBERS BY EXACT METHOD

F.V. Rekach¹, E.K. Sinichenko¹, I.I. Gritsuk^{1,2}

¹ Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze str., 3, Moscow, Russia, 115419

² Water Problems Institute Russian Academy of Science
Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

A short essay of pressure stabilizer analysis on strength and volume capacity by exact methods is described in an article.

Key words: pressure stabilizer, water hammer

REFERENCES

- [1] Nizams H.N., Rekach F.V., Sinichenko E.K. Calculation of forced oscillations of the pipeline from the pressure stabilizer of the dissipative action principle by Laplace with the friction in the main pipeline and nelineynly depending on the speed of the liquid overflow through the perforations. *Dual Technology*. 2005. № 2. S. 20—25. [Nizamov Kh.N., Rekach F.V., Sinichenko Ye.K. Raschet vynuzhdennykh kolebaniy truboprovoda so stabilizatorom davleniya dissipativnogo printsipa

- deystviya metodom Laplasya s uchetom treniya v magistralnom truboprovode i nelineynly zavisimosti skorosti peretekaniya zhidkosti cherez perforatsiyu. *Dvoynye tekhnologii*. 2005. № 2. S. 20—25.]
- [2] Charny I.A. Unsteady motion of a real fluid in pipes. 2nd ed. M.: Nedra, 1975. 296 p. [Charnyy I.A. Neustanovivsheesya dvizhenie realnoy zhidkosti v trubakh. 2-e izd. M.: Nedra, 1975. 296 s.]
- [3] Tschütscher A.I., Galyuk V.H., Nizams H.N. and others. The pulsations of pressure in the pipes and their solutions. M.: VNIIOENG (Overview. Series “Transport and storage of oil”), 1991. 88 s. [Chucherov A.I., Galyuk V.Kh., Nizamov Kh.N. i dr. Pulsatsii davleniya v truboprovodakh i sposoby ikh ustraneniya. M.: VNIIOENG (Obzornaya informatsiya. Seriya «Transport i khranenie nefi»), 1991. 88 s.]
- [4] Young W.R. and Wolfe C.L. (2014) Generation of surface waves by shear-flow instability. *J. Fluid Mechanics*. Vol. 739. P. 276—307.