

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА МЕТАЛЛА ТРУБОПРОВОДОВ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

DETERMINING STEEL RESOURCE OF PIPELINES, PROCESS UNITS AND THEIR ELEMENTS

УДК 622.691.2/234

А.Н. ШАУРО**М.А. БЕРЛИН****И.В. МИЩЕНКО****Е.П. ЗАПОРОЖЕЦ**

кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «НИПИ «ИнжГео»

д.т.н., проф., ученый секретарь ЗАО «НИПИ «ИнжГео»

аспирант КубГТУ

доктор технических наук, профессор, научный консультант ЗАО «НИПИ «ИнжГео»

Краснодар

injgeo@injgeo.ru

A.N. SHAURO**M.A. BERLIN****MISHENKO I.V.****ZAPOROZHETS E.P.**

PhD in Technical Sciences, CJSC «SRIDS InjGeo» Director General

Doctor of Engineering, Professor, CJSC «SRIDS InjGeo» academic secretary

Post-graduate KubGTU

Doctor of Engineering, Professor, CJSC «SRIDS InjGeo» Academic Adviser

Krasnodar

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
KEYWORDS:**аппарат, гидрогазодинамика, давление, металл, параметр, плотность, процесс, ресурс, связь, скорость, среда, старение, стенка, трубопровод, температура, энергия
unit, hydrogas dynamics, pressure, steel, parameter, density, process, resource, linkage, speed, environment, aging, wall, pipeline, temperature, energy

Статья посвящена актуальной проблеме – определению ресурса металла в конструкциях трубопроводов, корпусов технологических аппаратов и сосудов, нефтегазового комплекса.

В статье предлагается метод расчета ресурса конструкционного металла в зависимости от газо-гидродинамических параметров сред, воздействующих на металл, а также от основных механических и геометрических параметров конструкции, в которой он применяется.

The article is dedicated to actual problem, i.e. determining oil/gas complex pipeline, process unit and vessel casing steel resource. The article suggests calculation method for structural steel resource depending on gas-hydrodynamic environmental and main mechanical and geometrical structure parameters.

На объектах современной нефтяной и газовой промышленности в длительной эксплуатации находится большое количество технологических аппаратов, сосудов и трубопроводов, ресурс которых к настоящему времени исчерпан или подходит к концу. Полная их замена требует больших капитальных затрат. Однако при изменении условий эксплуатации, например, при уменьшении давления газа и его расхода, аппараты, сосуды и трубопроводы могут прослужить еще некоторое время. Для разработки рекомендаций по дальнейшему сроку службы необходимо уметь определять ресурс металла, из которого изготовлены эти аппараты, сосуды, трубопроводы. В настоящее время имеется тенденция интенсификации технологических процессов сбора. Подготовки и переработки углеводородов путем применения новых аппаратов, принципы действия которых основаны на использовании высокоскоростных течений (звуковых, сверхзвуковых, кавитационных). Неизвестно сколько времени будут служить проточные части, элементы конструкций и корпуса таких аппаратов. При проектировании и эксплуатации необходимо знать, хотя бы в первом приближении, ресурс металла, из которого они изготавливаются. При создании оборудования

традиционного типа также требуется складывать оптимальное время его службы. Поэтому при разработке новых и модернизации существующих трубопроводов и оборудования требуется уметь рассчитывать ресурс применяемых конструкционных материалов. Создание метода расчета ресурса металла трубопроводов, корпусов технологических аппаратов, их конструктивных элементов, сосудов для хранения углеводородов под давлением и прочего оборудования, применяемого при добыче, сборе, подготовке и переработке углеводородов является актуальной проблемой. Решение этой проблемы позволит оптимизировать сроки службы трубопроводов и технологического оборудования, повысить безопасность их эксплуатации и снизить аварийность.

В настоящей статье предлагается физико-математическая модель для определения ресурса металла рабочих элементов технологических аппаратов и трубопроводов в зависимости от газо-гидродинамических параметров перемещаемых в них сред, а также от основных механических и геометрических параметров этих элементов.

Известно [1 – 7], что износ металла конструкций зависит от гидрогазодинамики, термодинамики, химической

агрессивности перемещаемых в них сред, и просто от времени. Воздействие текучей среды: жидкости, газа или их суспензий на металл вызывает в нем ослабление и нарушение межкуристаллитных связей. Процесс ослабления межкуристаллитных связей от действия на металл разности давлений текучей и внешней сред, динамики текучей среды, её загрязненности абразивными частицами и старения металла в первом приближении выражается уравнением

$$E_M - E_u - \tau \cdot (K \cdot E_T + E_r) = 0 \quad (1)$$

где:

E_M – энергия межкуристаллитных связей в металле, Дж;

E_u – энергия напряжения в металле при действии на него разности давлений текучей среды и внешней среды, Дж;

E_T – расход энергии, действующей на металл от динамики текучей среды, Дж/с;

K – загрязненность потока частицами абразивного материала, учитываемой величиной коэффициента (чистый поток $K=1$; загрязненный поток $K>1$);

E_r – расход энергии на старение металла, Дж/с;

τ – время процесса, с.

При известных (определенных) значениях параметров E_M, E_u, E_T, K, E_r ►

величина τ является ресурсом металла в секундах. С учетом того, что количество секунд в году $3,1536 \cdot 10^7$, формула для определения ресурса металла в годах имеет вид

$$\tau = \frac{E_m - E_u}{(K \cdot E_T + E_T) \cdot 3.1536 \cdot 10^7} \quad (2)$$

Энергия E_m межкристаллитных связей между частицами металла рассчитывается по формуле [4, 5]

$$E_m = \sigma \cdot V_m \quad (3)$$

где:

σ – временное сопротивление металла разрыву, Н/м², (Дж/м³); V_m – объем металла, м³.

Энергия E_u напряжения в металле при действии на него разности давлений текучей среды и внешней среды выражается формулой

$$E_u = u \cdot V_m \quad (4)$$

где u – напряжение металла, возникающее под действием разности давлений, Н/м², (Дж/м³).

Величина u зависит от конфигурации (геометрии) конструктивного элемента и толщины стенки [4, 5], например, внутреннее давление внутри элементов конструкций (рис.1), имеющих цилиндрическую форму (трубопроводов, патрубков, штуцеров и пр.), вызывает в их стенках кольцевые напряжения:

– для тонкостенных

$$u_k = \frac{\Delta P \cdot [(D_H + D_B)]}{2 \cdot (D_H - D_B)} = \frac{\Delta P \cdot D_c}{2 \cdot \delta} \quad (5)$$

– для толстостенных

$$u_k = \frac{\Delta P \cdot (R_H^2 + R_B^2)}{R_H^2 - R_B^2} \quad (6)$$

где ΔP – разность внутреннего P_B и наружного P_H давлений, Н/м², (Дж/м³); D_B , D_H , D_c – внутренний, наружный и средний диаметр цилиндрического элемента, м; δ – толщина стенки, м; R_B , R_H – внутренний и наружный радиусы цилиндра, м.

В закрытом цилиндре донushками, (например, в цилиндрическом корпусе технологического аппарата или сосуда) дополнительно возникает разрывающая сила, которая вызывает растягивающее меридиональное напряжение, выражаемое для:

– тонкостенного цилиндра

$$u_p = \frac{\Delta P \cdot D_c}{4 \cdot \delta} \quad (7)$$

– толстостенного цилиндра

$$u_p = \frac{\Delta P \cdot R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \quad (8)$$

Расчетное напряжение в стенках тонкостенного и толстостенного цилиндрических элементов, согласно энергетической теории прочности [5], определяется по формуле

$$u = u_{\Sigma} = \sqrt{u_k^2 + u_p^2 - 2 \cdot \varepsilon \cdot u_k \cdot u_p} \quad (9)$$

где

ε – коэффициент Пуассона.

В шарообразном элементе, например, в корпусе сосуда для хранения углеводородов под давлением, величины напряжений в стенках рассчитываются по уравнениям [8] для:

– тонкостенного элемента

$$u = u_{\Sigma 1} = \frac{\Delta P \cdot R_c}{\delta} \quad (10)$$

– толстостенного элемента, соответственно, на его внутренней и внешних поверхностях

$$u_{\Sigma B} = \frac{P_B \cdot R_B^3 - P_H \cdot R_H^3}{R_H^3 - R_B^3} - (P_H - P_B) \frac{R_H^3}{R_H^3 - R_B^3} \quad (11)$$

$$u_{\Sigma H} = \frac{P_B \cdot R_B^3 - P_H \cdot R_H^3}{R_H^3 - R_B^3} + (P_B - P_H) \frac{R_B^3}{2 \cdot (R_H^3 - R_B^3)} \quad (12)$$

P_B , P_H – где давление внутри и снаружи шара, Н/м² (Дж/м³); R_B , R_H – радиусы внутренней и внешней поверхностей, м.

Расчетное напряжение в стенке шарообразного толстостенного элемента

$$u = u_{\Sigma 2} = \sqrt{u_{\Sigma B}^2 + u_{\Sigma H}^2 - 2 \cdot \mu \cdot u_{\Sigma B} \cdot u_{\Sigma H}} \quad (13)$$

В формуле (4) под величиной u учитывается удельное напряжение в стенках, работающих под разностью давлений в корпусах сосудов, аппаратов, трубопроводах, патрубках, штуцерах, насадках и пр. любой конфигурации.

Известно [8], что при течении потока в элементах конструкций аппаратов, сосудов и трубопроводах происходит уменьшение его энергии, выражаемое в уменьшении давления. Часть энергии диссипируется (её количество, например, для газа определяется по интегральному эффекту Джоуля – Томпсона). Другая часть превращается в тепло и электричество. Оставшаяся энергия E_T идет на ослабление внутренних связей между частицами металла и на его разрушение.

В первом приближении расход этой энергии (Дж/с) для газа E_{TG} или жидкости E_{TL} , протекающих на расчетном участке трубопровода, насадка, патрубка, штуцера, корпуса сосуда и пр. рассчитывается, соответственно, по формулам

$$E_T = E_{TG} = \left(\frac{\delta \cdot \pi}{S} + \sin \alpha \right) \cdot$$

$$\left\{ \frac{k \cdot R_{const} \cdot G \cdot T_1}{(k-1) \cdot m} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] - G \cdot C_p \cdot \varrho \cdot (P_1 - P_2) \right\} \quad (14)$$

$$E_T = E_{TL} = \left(\frac{\delta \cdot \pi}{S} + \sin \alpha \right) \cdot \frac{L \cdot (P_1 - P_2)}{\rho_L} \quad (15)$$

В формулах (14) и (15) k – показатель адиабаты газа; R_{const} = 8,314 Дж/(моль · К) – молярная газовая постоянная; m – молярная масса газа, кг/моль; G – массовый расход газообразной среды, кг/с; L – массовый расход жидкой среды, кг/с; T_1 – исходная температура газообразной среды, К; C_p – изобарная теплоемкость газа, Дж/(кг·К); ϱ – интегральный эффект Джоуля – Томпсона, град/Па; ρ_L – плотность жидкости, кг/м³; P_1 – исходное давление текучей среды, Па; P_2 – давление среды в конце расчетного участка, Па; δ – средняя шероховатость поверхности стенки, контактирующей с текучей средой, м; S – длина расчетного участка, м; α – угол натекания потока текучей среды на поверхность стенки, градус; π – 3,14.

В выражении (14) внутри фигурных скобок второе произведение является энергией диссипации за счет интегрального эффекта Джоуля – Томпсона. В (14) и (15) не принимается в расчет энергия потоков, которая превращается электричество, в связи с тем, что последнее в основном идет на разрушение материала в виде электрохимической коррозии. На коррозию принято давать (см. рис.1) дополнительную толщину металла s , которая в расчетах по формулам (3) – (13) также не учитывается.

Величина угла α (в градусах) натекания потока на изогнутую стенку (например, изогнутого участка трубопровода или патрубка, представленных на рис.2) определяется из выражения [9]

$$\alpha \sim \frac{\Delta X}{R} \quad (16)$$

где ΔX – длина дуги (м) между двумя ближайшими точками 3 и 4 соприкосновения касательных 5 и 6 с кривой поверхностью стенки 2; R – радиус искривления, м.

Расход энергии E_T при $\alpha = 90^\circ$ максимальный. При $\alpha = 0$ он стремится к нулю. Однако необходимо отметить, что на практике угол натекания присутствует даже в потоке среды, движущейся параллельно поверхности металла, так как всегда имеются некоторая волнистость поверхности, конусность, а также прочие дефекты механической обработки. Конечно в этом случае величина угла α очень небольшая. Например, для прямолинейного участка трубопровода $\alpha \approx 1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-4}$ град.

В уравнениях (14) и (15) все параметры текучей среды кроме величины P_2 хорошо определяются опытным путем или задаются изначально при проектировании конструкции. Нахождение величины P_2 на действующих объектах ►

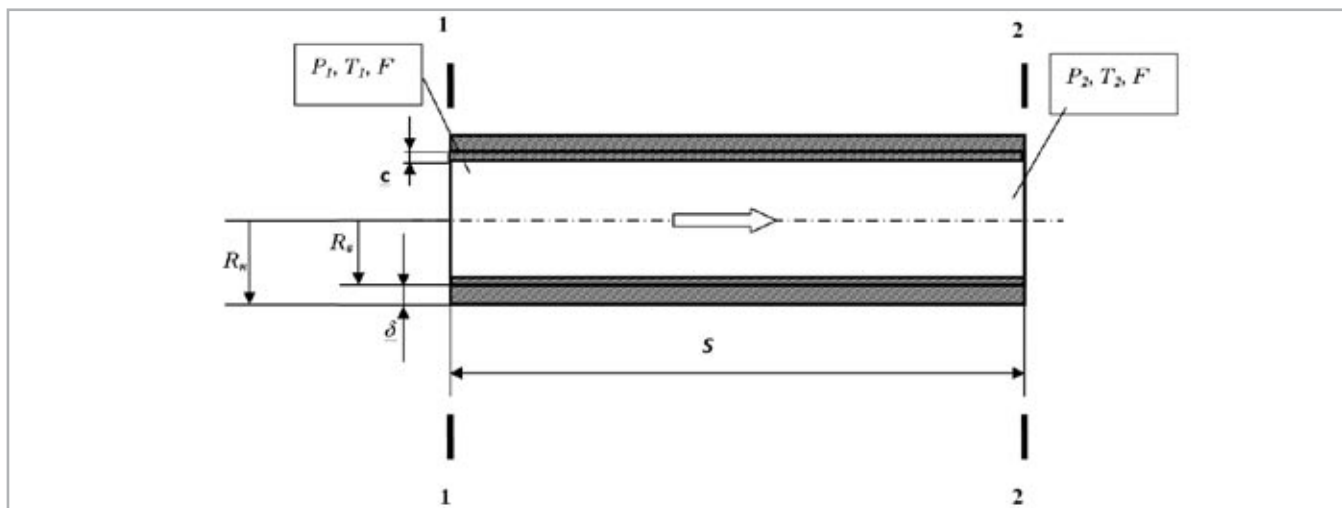
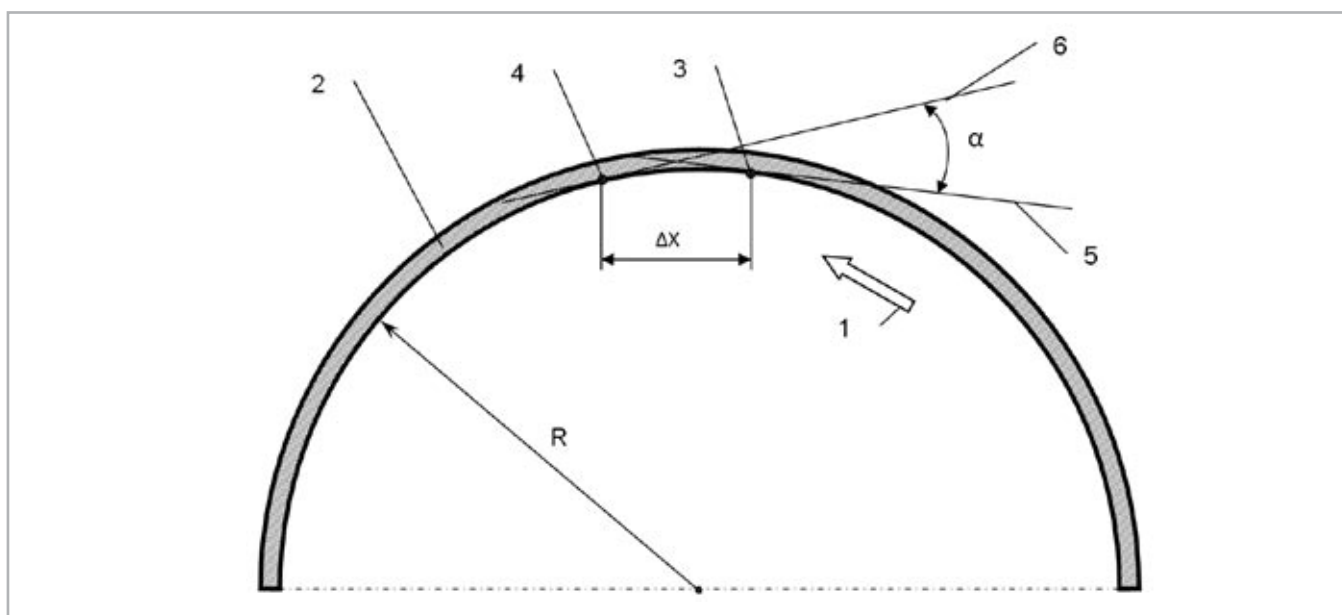


Рис.1. Расчетная схема цилиндрического элемента

P_1, P_2, T_1, T_2 – давление и температура в начале и конце (сечения 1 и 2) расчетного участка элемента, F – массовый расход текучей среды; R_n – внешний радиус; R_e – внутренний (расчетный) радиус; δ – толщина стенки; c – прибавка на коррозию; l – длина расчетного участка;

Рис.2. Расчетная схема определения угла α натекания потока на поверхность изогнутой стенки.

1 – направление потока; 2 – ограничивающая стенка, 3, 4 – ближайшие точки соприкосновения касательных 5 и 6 с дугой ΔX ; R – радиус поворота.

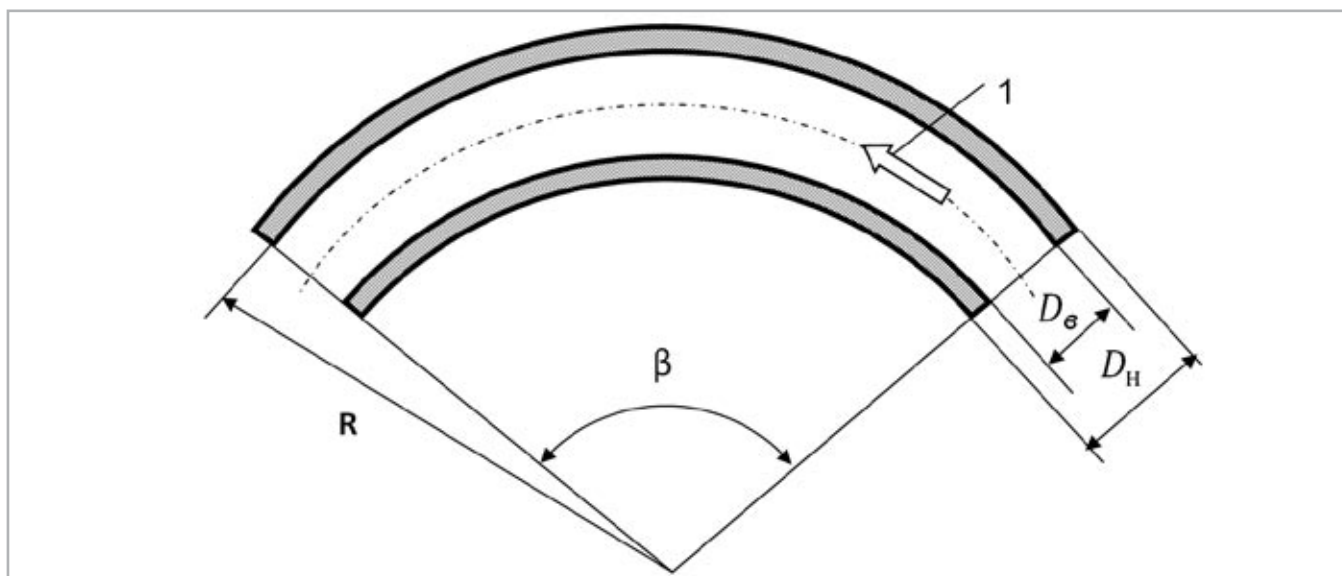


Рис.3. Расчетная схема изогнутого цилиндрического элемента.

1 – направление потока; R_{cp} – средний радиус, β – угол поворота, градус; D_n – наружный диаметр элемента, м; D_e – внутренний диаметр элемента, м.

также не вызывает затруднений. Для определения P_2 расчетным путем (при известном давлении в начале расчетного участка P_1) могут быть рекомендованы методы, описанные в работе [10]. Здесь представлены, в качестве примера, формулы для расчета величины P_2 в конце прямого (рис. 1) и изогнутого (рис. 3) элементов, которые часто используются на практике [10].

$$P_2 = P_1 - \xi \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot W_{\square}^2 \quad (17)$$

где:

$\xi > 1$ – коэффициент гидравлического сопротивления рассчитываемого элемента, $W_{\square}$ – скорость потока (жидкости или газа) на рассматриваемом участке, м/с; ρ – плотность потока (газа или жидкости), кг/м³;

$$W_{\square} = \frac{F \cdot \rho}{f} \quad (18)$$

где:

F – массовый расход текучей среды, жидкости L или газа G , кг/с.

Коэффициент гидравлического сопротивления для прямолинейного цилиндрического элемента определяется по формуле

$$\xi = \lambda \cdot \frac{S}{D_B} \quad (19)$$

где:

S – длина элемента, м; λ – коэффициент сопротивления, который рассчитывается – по закону Гагена – Пуазейля (при числе Re до 2000)

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (20)$$

$$Re = \frac{W \cdot D_B \cdot \rho}{\mu_{\square}} \quad (21)$$

D_B – внутренний диаметр, м; $\mu_{\square}$ – коэффициент динамической вязкости текучей среды, Н · с/м²;

– по закону Блаузиуса (при Re от 2000 до 4000)

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (22)$$

– по формуле Филоненко – Альтшуля (при $Re > 4000$)

для элементов длиной до 100 м

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot lqRe - 1,64)^2} \quad (23)$$

для элементов более 100 м по модифицированной формуле

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \cdot \ln Re - 1,64)^2} \quad (24)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ_k для изогнутого элемента (рис. 3):

$$\xi_k = 0,0175 \cdot \lambda_k \cdot \frac{R_{cp}}{D_B} \cdot \beta \quad (25)$$

$$\text{– при } 50 < Re \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot Re}} < 600$$

$$\lambda_k = \frac{20}{Re^{0,65}} \left(\frac{D_B}{2 \cdot Re} \right)^{0,175} \quad (26)$$

$$\text{– при } 600 < Re \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot Re}} < 1400$$

$$\lambda_k = \frac{10,4}{Re^{0,55}} \left(\frac{D_B}{2 \cdot Re} \right)^{0,225} \quad (27)$$

$$\text{– при } 1400 < Re \sqrt{\frac{D_B}{2 \cdot Re}} < 5000$$

$$\lambda_k = \frac{5}{Re^{0,45}} \left(\frac{D_B}{2 \cdot Re} \right)^{0,275} \quad (28)$$

где R_{cp} – средний радиус поворота (см. рис. 3), м; λ_k – коэффициент сопротивления изогнутого элемента; β – угол поворота, град.

Кроме гидродинамики и газодинамики на металл разрушающе действует время. От времени ослабевают его междоузелковые связи, вследствие чего уменьшается прочность металла. Величина E_T расхода энергии междоузелковых связей в металле от времени рассчитывается по формуле

$$E_T = b \cdot V_M \quad (29)$$

где V_M – объем металла, м³; b – скорость снижения энергии междоузелковых связей металла, Дж/(м³·с); Н/(м²·с)

Величину скорости b снижения энергии междоузелковых связей металла определяют опытным путем, она найдена И.В. МИЩЕНКО для сталей марок в следующих пределах:

- 09Г2С от 0,084 до 0,30;
- 14ХГС от 0,028 до 1,00;
- 17ГС от 0,055 до 0,30;
- Ст. 4 от 0,012 до 0,07.

Максимальные величины b определены для сталей, эксплуатирующихся в тяжелых условиях (в местностях с большими сезонными перепадами температур, часто меняющихся давлением и температуры текучей среды и пр.).

Расчет ресурса металла по формулам (1) или (2) выполняется для различных конструкций корпусов аппаратов, трубопроводов, патрубков, штуцеров и пр., работающих под внутренним давлением, и по которым транспортируется текучая среда.

Расчет ресурса металла сосудов, предназначенных для хранения текучих сред под давлением, или корпусов технологических аппаратов, в которых скоростью течения среды можно пренебречь, выполняется по упрощенной формуле

$$\tau = \frac{E_M - E_u}{E_T \cdot 3,1536 \cdot 10^7} \quad (30)$$

в которой не учитывается воздействие на металл динамики потока.

Расчет ресурса металла конструкции, которая работает только при натекании на неё потока (например, струи) может быть произведен по формуле

$$\tau = \frac{E_M}{(K \cdot E_T + E_T) \cdot 3,1536 \cdot 10^7} \quad (31)$$

в которой не учитывается статическое напряжение в металле, вызываемое разностью давлений.

Описанная модель проверялась при расчетах ресурса металлов прямых (длиной до 3000 м) и изогнутых (под 90°) участков газопроводов и нефтепроводов, которые прослужили 37–48 лет. Отклонения расчетных и имеющихся величин составили 2–3 года. ■

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 14249 – 89 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность – М.: ГОССТАНДАРТ – 1989 – 79 с.
2. ГОСТ 25859 – 83 Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках – М.: ГОССТАНДАРТ – 1983 – 30 с.
3. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. и др. Материаловедение и технология металлов – М.: Высш.шк., 2000. – 638 с.
4. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов – М.: Высшая школа – 1989 – 624 с.
5. Бабицкий И.Ф., Вихман Г.Л., Вольфсон С.И. Расчет и конструирование аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов – М.: Недра – 1965 – 904 с.
6. Быстрицкий В.В. Эрозионный износ направляющих насадок / Труды ЛИВТ – Л. – 1972 – Вып. 135 – С. 26 – 39.
7. Запорожец Е.П., Зиберт Г.К., Мищенко И.В. Расчет ресурса аппаратов и трубопроводов // Сб. науч. трудов ДОО «ЦКБН» ОАО «ГАЗПРОМ» – 55 лет – М.: ООО «Недра - Бизнесцентр» – 2006 – С. 308 – 314.
8. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии – М.: Химия – 1971 – 784 с.
9. Математика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. Прохоров Ю.В. – М.: Большая Российская энциклопедия – 2000 – 848 с.
10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям – М.: Машиностроение – 1975 – 559 с.