

Методика расчета местных напряжений в рабочей камере для получения флюидной воды

Валерий Сукманов, Юлия Петрова, Стефан Стефанов,
Адриана Быркэ, Игорь Лаговский

Method of calculation of local tensions in a working chamber for the receipt of fluid water It is considered the current state of fluid technologies. The paper analyzed the tense-deformed state of working chamber for fluid technologies with use of water in place of connection with chokes. The results make it possible to develop reasonable design solutions.

Key words: . the tense-deformed state, fluid water, local stresses

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время существенное внимание уделяется поиску инновационных технологий, позволяющих максимально, дифференцированно извлекать из растительного сырья биологически активные вещества, обладающие антиоксидантными свойствами и эффективно связывающие свободные радикалы [1, 2].

Сверхкритические флюидные технологии (СФТ) в значительной степени отвечают этому вызову времени. [3, 4]. В настоящее время основные исследования связаны с CO₂ экстракцией [5-7]. Сверхкритический углекислый газ нетоксичен, дешёв, легко доступен и имеет удобные параметры ($T_c = 31^\circ\text{C}$, $P_c = 7,38$ МПа). Однако углекислый газ является одним из основных парниковых газов, как и метан, озон, галогеноуглероды, оксиды азота, фторсодержащие газы. Присутствие таких газов в атмосферах планет приводит к появлению парникового эффекта.

Из всех веществ, находящихся в сверхкритическом состоянии, самым эффективным и экологически чистым инструментом экстракции и химической модификации биологически активных соединений является вода. За счет возможности изменения ее физико-химических свойств (диэлектрической проницаемости, ионного произведения, диффузионных свойств и плотности) при увеличении давления и температуры вода растворяется почти все органические вещества. Растворимость неорганических веществ также меняется [8]. Практическое использование флюидной воды ограничено в связи со сложностью проектирования соответствующего оборудования. Вода становится флюидом при 374°C и 22,064 МПа. Тем не менее в последнее десятилетие вода из-за своих свойств в критическом и субкритическом состоянии стала объектом повышенного интереса при разработке новых перспективных технологических и экологических приложений [9-12].

Чтобы научные исследования стали коммерческой реальностью необходимо создание соответствующей линейки оборудования. Для конструирования надежного и безопасного лабораторного оборудования необходимо иметь точную картину распределения напряжений в корпусе устройства.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ – разработать методику расчета местных напряжений в рабочей камере для получения флюидной воды

ИЗЛОЖЕНИЕ

Рабочие камеры СФТ выполняются в виде толстостенных цилиндров и в основном испытывают безмоментное напряженное состояние по всей длине за исключением небольших участков в местах сопряжения цилиндра с торцевыми заглушками или кольцевыми ребрами жесткости.

Силловые факторы в местах сопряжения цилиндра с заглушками (в виде пластин) можно найти методом сил из канонических уравнений:

$$\begin{aligned} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1P} &= 0, \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2P} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

смысл которых определяет равенство взаимных линейных (по направлению X_1) и угловых (по направлению X_2) перемещений сечений образующей срединной поверхности цилиндра и заглушки (пластины), рисунок 1.

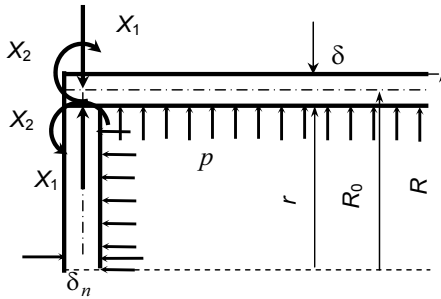


Рис. 1

В монографии [13] показано, что при отношении радиусов $r/R \geq 0,5$ при вычисления деформаций толстостенных цилиндров можно использовать теорию изгиба замкнутых круговых цилиндрических оболочек.

Тогда главный единичный коэффициент δ_{11} будет состоят из линейных перемещений в цилиндре $\frac{R_0^3}{2\beta^3 D}$ и пластине $\frac{R_0}{E\delta_n}(1-\mu)$.

Первую составляющую (в цилиндре) можно получить на основании уравнения деформированной образующей

$$w(\xi) = \frac{P_0 R_0^3}{2\beta^3 D} T(\xi) + \frac{M_0 R_0^2}{2\beta^2 D} U(\xi), \quad (2)$$

а вторую - из задачи Ляме [16] $w(R) = \frac{qR}{E} \left(\frac{1+\eta^2}{1-\eta^2} - \mu \right)$, положив $\eta = r/R = 0$ и $q = X_1 / \delta_n$. Таким путем находим

$$\delta_{11} = \frac{R_0^3}{2\beta^3 D} \left(1 + \frac{2\beta^3 D}{ER_0^2 \delta_n} (1-\mu) \right) = \frac{R_0^3}{2\beta^3 D} k_{11}, \quad (3)$$

где коэффициент линейных перемещений k_{11} учитывает жесткость пластины $E\delta_n$ толщиной δ_n и цилиндрическую жесткость цилиндра $D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ с

геометрической характеристикой $\beta = 4\sqrt{3(1-\mu^2) \frac{R_0^2}{\delta^2}}$.

Второй главный коэффициент δ_{22} состоит из углового перемещения в цилиндре от $X_2 = M_0 = 1$, т.е. $\frac{R_0}{\beta D}$ [14], полученного из уравнения углов поворота нормали к образующей полубесконечного цилиндра от распределенной моментной нагрузки $X_2 = M_0 = 1$

$$\vartheta(\xi) = \frac{P_0 R_0^2}{2\beta^2 D} W(\xi) + \frac{M_0 R_0}{\beta D} T(\xi). \quad (4)$$

и углов поворота на шарнирной опоре пластины [16]

$$\theta = \frac{dw}{d\rho} = \frac{m\rho}{D_n(1+\mu)} = \frac{R_0}{(1+\mu)D_n}, \text{ т.е.}$$

$$\delta_{22} = \frac{R_0}{\beta D} \left(1 + \frac{\beta \delta^3}{(1+\mu)\delta_n^3} \right) = \frac{R_0}{\beta D} k_{22}, \quad (5)$$

где коэффициент угловых перемещений k_{22} учитывает отношение цилиндрической жесткости цилиндра и пластины $D/D_n = \delta/\delta_n$.

Побочный коэффициент $\delta_{12} = \delta_{21}$ согласно (10), состоит лишь из угла поворота нормали к образующей цилиндра или равного ему линейного перемещения

$$\delta_{21} = \frac{R_0^2}{2\beta^2 D}. \quad (6)$$

Грузовой коэффициент Δ_{1P} состоит из радиального перемещения образующей цилиндра от внутреннего давления p [15]

$$\Delta_{1P} = \frac{pR_0^4}{4\beta^4 D}, \quad (7)$$

а Δ_{2P} представляет угол поворота на шарнирной опоре пластины от равномерно распределенной нагрузки интенсивностью p [14]

$$\vartheta = -\frac{dw}{d\rho} = -\frac{1}{d\rho} \left[\frac{\rho}{64D} \left(R_0^2 - \rho^2 \right) \left(\frac{5+\mu}{1+\mu} R_0^2 - \rho^2 \right) \right] = -\frac{pR_0^3}{8(1+\mu)D_n} = \Delta_{2P} \quad (8)$$

Таким образом, при сопряжении цилиндра с пластиной система канонических уравнений метода сил (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} k_{11} \frac{R_0^3}{2\beta^3 D} X_1 + \frac{R_0^2}{2\beta^2 D} X_2 &= -\frac{pR_0^4}{4\beta^4 D}, \\ \frac{R_0^2}{2\beta^2 D} X_1 + k_{22} \frac{R_0}{\beta D} X_2 &= \frac{pR_0^3}{8D_n(1+\mu)}. \end{aligned}$$

Отсюда находим силовые факторы в сопряжении:

$$X_1 = -\frac{pR_0}{\beta} \frac{k_{22} + \frac{\beta^3}{4(1+\mu)} \left(\frac{\delta}{\delta_n} \right)^3}{2k_{11}k_{22} - 1}, \quad (9)$$

$$X_2 = \frac{pR_0^2}{2\beta^2} \frac{1 + k_{11} \frac{\beta^3}{2(1+\mu)} \left(\frac{\delta}{\delta_n} \right)^3}{2k_{11}k_{22} - 1}. \quad (10)$$

При сопряжении цилиндра с кольцевым ребром жесткости сечением $b \cdot h$, составляющую пластины в $\delta_{11} \frac{R_0}{E\delta_n} (1-\mu)$ нужно заменить на радиальную

деформацию кольца $\frac{R_\kappa^2}{EF_\kappa}$, а в коэффициенте δ_{22} вместо $\frac{R_0}{(1+\mu)D_n}$ нужно подставить

угол поворота кольца из его плоскости $\frac{R_\kappa^2}{EJ}$ с моментом инерции площади

поперечного сечения кольца $J = \frac{bh^3}{12}$ [15]. При этом грузовой коэффициент $\Delta_{2P} = 0$ и вместо (9), (10) получим:

$$X_1 = -\frac{pR_0}{\beta} \frac{k_{22}}{2k_{11}k_{22}-1}, \quad X_2 = \frac{pR_0^2}{2\beta^2} \frac{1}{2k_{11}k_{22}-1}, \quad (11)$$

где

$$k_{11}^* = 1 + \frac{2D\beta^3 R_K^3}{R_0^2 E F_K}, \quad k_{22}^* = 1 + \frac{\beta D R_K^2}{R_0 E J}. \quad (12)$$

Если кольцо или пластина абсолютно жесткие, когда $J = F_K = \delta_n = \infty$, то $k_{11} = k_{22} = 1$, тогда получим формулы силовых факторов (опорных реакций) в жестко защемленной оболочке [15, 16]:

$$X_1 = -\frac{pR}{\beta}, \quad X_2 = \frac{pR^2}{2\beta^2}. \quad (13)$$

Тогда, продольные напряжения в цилиндре от изгиба и растяжения: $\sigma_x = X_2 \frac{6}{\delta^2} + \frac{\eta^2}{1-\eta^2} p$. С учетом неравномерности распределения изгибных напряжений по толщине кольцевые напряжения при отношении $r/R \geq 0,5$ через перемещения можно вычислять по формуле [13]:

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \frac{w(x)}{R_0} \left(\frac{1}{1 \pm \delta/2R_0} - \mu^2 \right). \quad (14)$$

Так как радиальное перемещение в месте сопряжения равно $w = \frac{R_0 X_1}{E \delta_n} (1-\mu)$, то кольцевое напряжение у внутренней поверхности цилиндра

$$\sigma_t = 0,820 \frac{pR_0^2}{E \delta_n \beta} \frac{E}{(1-\mu^2)R_0} \left(\frac{1}{1-\delta/2R_0} - \mu^2 \right)$$

Радиальное напряжение $\sigma_r = -p$. Расчетное напряжение по энергетической теории прочности

$$\sigma_{расч} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 + \sigma_r^2 - \sigma_x \sigma_t - \sigma_t \sigma_r - \sigma_r \sigma_x}.$$

Для снижения силовых факторов в сопряжении предлагается заглушку не приваривать к цилиндру, а лишь опирать на кольцевое ребро.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика расчета силовых факторов и местных напряжений в местах сопряжения рабочей камеры с заглушками позволит исследовать напряженно-деформированное состояние элементов конструкций при любом значении внутреннего давления и принять рациональное конструктивное решение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сердюк А.М., Тимченко О.І. Методологічні засади поліпшення медико-екологічної ситуації в Україні // Екологія і безпека життєдіяльності. – 2002. – №4. – С.3-9.
2. Генофонд і здоров'я населення: методологія оцінки ризику від мутагенів довкілля, напрямки профілактики генетично обумовленої патології // А.М. Сердюк, О.І. Тимченко, Н.Г. Гойда, О.І. Турос та співавт. – К.: ІГМЕ АМН України, 2003. – 190с.
3. Заплетухин Д.Ю. Развитие технологий, основанных на использовании сверхкритических флюидов / Д.Ю. Заплетухин, Н.А. Тилькунова, И.В. Чернышова, В.С. Поляков // Сверхкритические Флюиды: Теория и практика. - 2006. – Том1. - №1. – С.27 – 44.

4. Miguel Herrero, Alejandro Cifuentes, Elena Ibanez. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae // *Food Chemistry*.- 2006. - V.98. – P.136-148.

5. Леменовский Д.А. Сверхкритические среды. Новые химические реакции и технологии [Текст] / Д.А. Леменовский, В.Н. Баграташвили // *Соросовский Образовательный журнал*. – 1999. - № 10.- С.24-31.

6. Чьонг Нам Хынг. Термодинамические основы процессов подготовки зеленого Вьетнамского чая и его декофеинизации с использованием сверхкритического диоксида углерода: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14: Казань, 2008. – 158с.

7. Водяник А.Р. Сверхкритическая флюидная экстракция природного сырья: мировой опыт и ситуация в России/ А.Ю.Шадрин, М.Ю.Синев// *Сверхкритические Флюиды: Теория и практика*.- 2008. – Том3. - №2. – С.58 – 69.

8. Oparin R.D., Fedotova M.V. Influence of isobaric heating of hydrogen bonding in precritical water // *Russian Journal of General Chemistry*. - 2007. - V. 77. - № 1. - P. 17-24.

9. S.M.Ghoreishi, R.Ghlami Shahrestani. Subcritical water extraction of mannitol from olive leaves // *Journal of Food Engineering*. – 2009. – V.93. - P.474-481.

10. Omid Pourali, Feridoun Salak Asghari, Hiroyuki Yoshida. Sub-critical water treatment of rice bran to produce valuable materials // *Food Chemistry*.- 2009. - V.115. – P.1-7.

11. Филонова О.В. Разработка методики экстракции дигидрокверцетина из древесины лиственницы в среде субкритической воды / О.В. Филонова, С.Н.Борисенко, Е.В.Максименко // *Сверхкритические флюиды: теория и практика*.– 2008.-Т.3.-№2. –С.37-42.

12. Борисенко С. Н., Руднев М. И., Борисенко Р. Н., Тихомирова К. С., Борисенко Н. И., Ветрова Е. В., Зимаков Д. В. Масс-спектрометрия аралозидов, извлеченных в среде субкритической воды из корня аралии маньчжурской. – 2009 - Журнал «Масс-спектрометрия». – 2009. – Т. 6. - № 3. – С. 187-190.

13. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин.-М.: Машиностроение, 1973. – 453 с.

14. Шевченко Ф.Л. Изгиб балок на упругом основании и полярно симметричных оболочек. – Донецк: Изд ДПИ, 1993. – 47 с..

15. Шевченко Ф.Л. Задачи по механике упругих деформируемых систем, часть 2. – Киев: ИСИО, 1996. – 206 с.

16. Писаренко Г.С. Опір матеріалів: підручник / Г.С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський [за ред. Г. С. Писаренка]. – 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004. – 655с.

Об авторе

Доц., к.т.н., Юлия Петрова, Кафедра «Общеинженерных дисциплин», Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, Донецк, Украина тел.: 0622-304-50-82, e-mail: yunic@ukr.net

Докладът е рецензиран