

С.В. Борщевский, д-р техн. наук, проф.
С.Н. Царенко, инженер
(ДонНТУ)

В.В.Левит, д-р техн. наук
(ОАО «Спецшахтобурение»)

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБСАДНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕЕ СПУСКЕ НА ПЛАВУ

Розглянуто конструктивні особливості обсадної труби при спуску її на плаву. Представлено розрахункову модель для дослідження напружено-деформованого стану труби в зоні стикування з днищем.

CALCULATION OF DESIGN FEATURES CASING IN ITS DESCENT AFLOATS

We consider design features of the casing during descent it afloat. The calculated model for the study of stress-strain state of pipes in the area of interface with the bottom.

При бурении скважин большого диаметра, как правило, грузоподъемность буровой установки выбирают по весу обсадной колонны, которую предстоит опускать в скважину. Если вес колонны превышает грузоподъемность буровой установки, то применяют три специальных способа спуска колонны: на воздушной подушке, на плаву или секциями.

В последнее время наиболее распространен спуск колонн секциями, но он сопряжен со значительным увеличением времени крепления скважин, причем не исключаются случаи не плотной стыковки секций, что осложняет тампонаж и последующую эксплуатацию скважин. Спуск колонны на плаву является наиболее простым и эффективным способом, но ограничен допустимым внешним давлением на колонну. Спуск колонн на воздушной подушке лишен недостатков предыдущих способов, но связан с усложнением технологии спуска и необходимостью применения специальных приспособлений.

Таким образом, актуальной задачей является определение наиболее рационального способа спуска в зависимости от горно-геологических параметров скважины и конструктивных особенностей трубы. Для решения данной задачи необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние трубы в процессе спуска.

Исследование напряженно-деформированного состояния колонны при спуске на плаву можно разделить на три этапа:

1. Определение несущей способности трубы из условия прочности;
2. Исследование напряженно-деформированного состояния трубы в зоне стыковки с днищем, как наиболее напряженной зоны;
3. Обоснование конструктивных параметров стального днища.

Определение несущей способности колонны из условия ее прочности следует осуществлять по следующей методике.

Конструктивно обсадная колонна представляет собой трубу диаметром d , сваренную из листов толщиной δ , и усиленную кольцевыми ребрами (шпанго-

утами) из швеллера или полосы с площадью поперечного сечения $F_{ш}$. Один край трубы заглушают днищем и спускают в скважину, заполненную промысловой жидкостью (рис.1).

Основная часть трубы находится в состоянии, соответствующего осесимметричному сжатию. В качестве расчетной модели принимаем тонкостенный

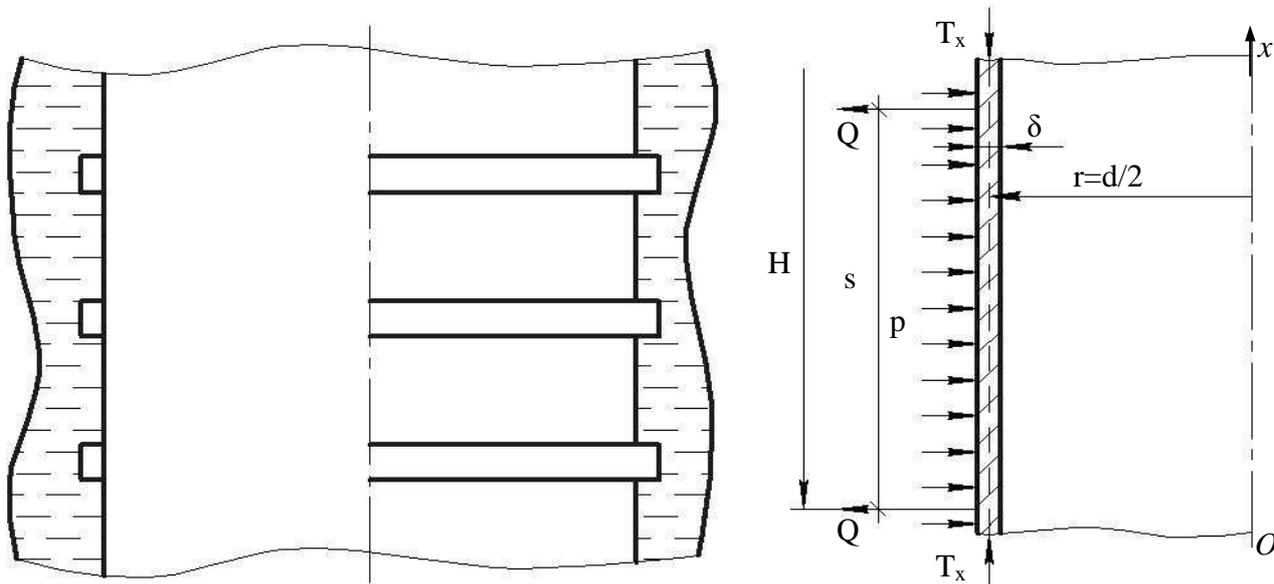


Рис. 1 – Расчетная схема спуска обсадной колонны на плаву.

цилиндр, нагруженный внешним давлением p и кольцевыми силами q , расположенными друг от друга на расстоянии $s = S_{ш}$, где $S_{ш}$ и $b_{ш}$ – шаг между шпангоутами и их ширина соответственно, а так же продольным усилием T_x , (рис.1). Давление, соответствующее гидростатическому давлению промысловой жидкости, $p = \rho g H$, где ρ – плотность промысловой жидкости, H – высота опорожнения колонны. Кольцевая сила q представляет собой реакцию со стороны шпангоута, $T_x = \frac{pd}{4}$ – усилие вызванное выталкивающей силой.

Принимая начало координат в точке приложения силы q , уравнение осесимметричной деформации оболочки возьмем в виде [1]

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{\mu T_x}{Dr} - \frac{p}{D}, \quad (1)$$

где, $\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r^2 \delta^2}}$,

$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ – изгибная жесткость оболочки.

Общее решение уравнения (1) представим в виде суммы общего решения

однородного уравнения и частного решения

$$w = w_0 + \bar{w}, \quad (2)$$

где $\bar{w} = \frac{\mu T_x}{4\beta^4 D r} - \frac{p}{4\beta^4 D} = \frac{\mu T_x r}{E\delta} - \frac{pr^2}{E\delta}$ – частное решение;

$w_0 = C_1 e^{-\beta x} \sin \beta x + C_2 e^{-\beta x} \cos \beta x + C_3 e^{\beta x} \sin \beta x + C_4 e^{\beta x} \cos \beta x$ – общее решение однородного уравнения.

Постоянные C_1, C_2, C_3, C_4 и q определяются из граничных условий:

$$\begin{cases} Q(0) = q; \\ v(0) = 0; \\ Q(s) = q; \\ v(s) = 0; \\ w(0) = w_u, \end{cases} \quad (3)$$

где w_u – деформация шпангоута в радиальном направлении;

$v = \frac{dw}{dx}$ – угол поворота нормали;

$Q = D \frac{d^3 w}{dx^3}$ – поперечная сила.

Кольцевую силу q определим из зависимости: $w_u = \frac{qr^2}{EF_u}$, где F_u – площадь

поперечного сечения шпангоута.

Решая систему (3), с учетом того, что для исследуемых труб ($\delta = 16 \div 20$ мм $r = 0,9 \div 2,5$ м) величина шага более $s \geq 0,1 \div 0,36$ м находим постоянные:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{F_u (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta (EF_u + 4\beta^3 Dr^2)}; \\ C_2 &= \frac{F_u (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta (EF_u + 4\beta^3 Dr^2)}; \\ C_3 &= \frac{F_u (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta (EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} e^{-\lambda} (\sin \lambda - \cos \lambda); \\ C_4 &= \frac{F_u (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta (EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} e^{-\lambda} (\cos \lambda + \sin \lambda). \end{aligned}$$

Подставляя значения постоянных в уравнение (2), получаем выражения для деформаций и усилий:

– радиальное перемещение

$$w(x) = \frac{F_u (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} (e^{-\beta x} \sin \beta x + e^{-\beta x} \cos \beta x + e^{-\lambda} (\sin \lambda - \cos \lambda) e^{\beta x} \sin \beta x + e^{-\lambda} (\cos \lambda + \sin \lambda) e^{\beta x} \cos \beta x) + \frac{\mu T_x r}{E\delta} - \frac{pr^2}{E\delta}; \quad (4)$$

– углы поворота нормали

$$v(x) = \frac{dw}{dx} = \frac{F_u (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} (-2e^{-\beta x} \sin \beta x + e^{-\lambda} (\sin \lambda - \cos \lambda) e^{\beta x} (\sin \beta x + \cos \beta x) + e^{-\lambda} (\cos \lambda + \sin \lambda) e^{\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)); \quad (5)$$

– окружное усилие

$$T_t(x) = -\mu T_x + \frac{E\delta w}{r} = \frac{F_u E (pr^2 - \mu T_x r)}{r(EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} (e^{-\beta x} \sin \beta x + e^{-\beta x} \cos \beta x + e^{-\lambda} (\sin \lambda - \cos \lambda) e^{\beta x} \sin \beta x + e^{-\lambda} (\cos \lambda + \sin \lambda) e^{\beta x} \cos \beta x) - pr \quad (6)$$

– изгибающий момент в осевом направлении

$$M_x(x) = D \frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{2DF_u \beta^2 (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} (-e^{-\beta x} \cos \beta x + e^{-\beta x} \sin \beta x + e^{-\lambda} (\sin \lambda - \cos \lambda) e^{\beta x} \cos \beta x - e^{-\lambda} (\sin \lambda + \cos \lambda) e^{\beta x} \sin \beta x); \quad (7)$$

– изгибающий момент в окружном направлении

$$M_t(x) = \mu M_x(x) = \frac{2DF_u \beta^2 \mu (pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_u + 4\beta^3 Dr^2)} (-e^{-\beta x} \cos \beta x + e^{-\beta x} \sin \beta x + e^{-\lambda} (\sin \lambda - \cos \lambda) e^{\beta x} \cos \beta x - e^{-\lambda} (\sin \lambda + \cos \lambda) e^{\beta x} \sin \beta x); \quad (8)$$

Напряжения определим по известным формулам [71]

$$\sigma_x = \frac{T_x}{\delta} \pm \frac{6M_x}{\delta^2}; \quad \sigma_t = \frac{T_t}{\delta} \pm \frac{6M_t}{\delta^2}; \quad \sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 - \sigma_x \sigma_t}. \quad (9)$$

На графике рис. 2 показано влияние шага на величину Δ по середине пролета для труб диаметра $d=4,3$ м с различной толщиной стенки $\delta=12; 16$ и 20 мм.

Определим жесткость ребер из условия прочности трубы в зоне состыковки, т.е. $\sigma_{екв}^{(1)}(0) \leq [\sigma]$ (рис. 1). На рис. 2 показан график изменения эквивалентных

напряжений в трубе $d=4,3$ при различной толщине стенок $\delta=12; 16$ и 20 мм в зависимости от параметра жесткости $F_{ш}$, из которого следует, что на напряжения в зоне состыковки основное влияние оказывает толщина трубы, а не жесткость ребер.

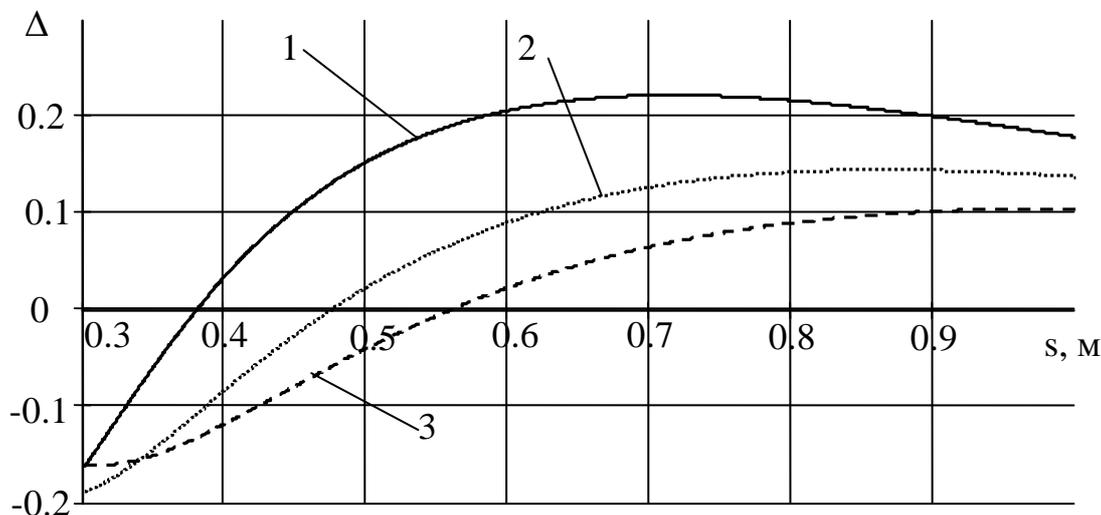


Рис. 2 – График изменения Δ в зависимости от величины шага труб диаметром 4,3 м с толщиной стенки: 1 – 12 мм; 2 – 16 мм; 3 – 20 мм.

Для спуска обсадных труб небольшого диаметра (до 1 м) на плаву или на воздушной подушке, как правило, в качестве днища используется цементный мост значительной толщины. При больших диаметрах использование такого днища становится неприемлемым из-за сложностей его монтажа, т.о. для труб большого диаметра возникает необходимость в конструкции менее массивного и достаточно прочного днища. Требуемые параметры может обеспечить стальное днище, но при не достаточной его жесткости значительные усилия могут передаваться на трубу, что приводит к установкам в зоне состыковки дополнительных ребер жесткости (стрингеры). Для разрешения таких технологических проблем, необходимо решить следующие задачи:

- определить требуемую жесткость днища из условия его прочности;
- определить длину участка трубы, который необходимо укрепить, а так же выбрать параметры усиливающих ребер.

В качестве расчетной модели при спуске обсадной колонны на плаву (рис.3.) рассмотрим полубесконечную цилиндрическую оболочку, погруженную в жидкость и подкрепленную продольными (стрингеры), кольцевыми (шпангоуты) ребрами с упругим днищем радиуса R . Оболочка имеет следующие параметры: толщина стенки δ , F_c , S_c – площадь сечения и шаг между стрингерами, $F_{ш}$, $S_{ш}$ – площадь сечения и шаг между шпангоутами. На цилиндрическую поверхность оболочки действует внешняя нагрузка $p = \gamma_{жс} H$ соответствующая давлению жидкости на днище.

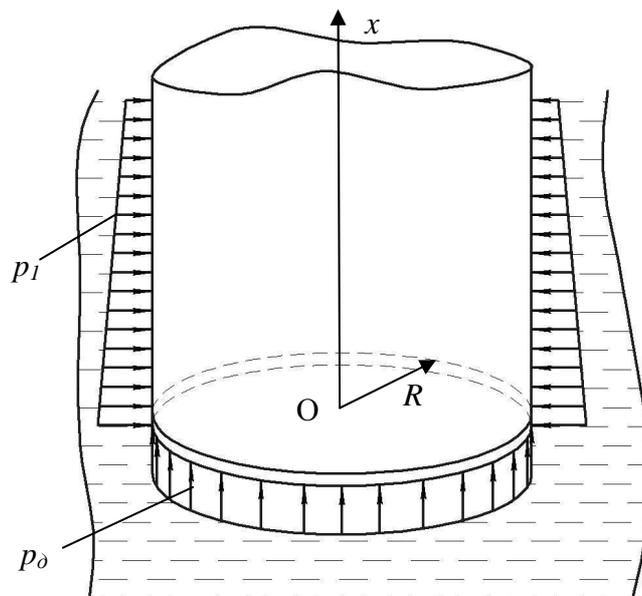


Рис. 3 – Расчетная модель обсадной колонны при ее спуске на плаву.

Колонну будем считать конструктивно анизотропной оболочкой, которая находится в осесимметричном напряженно-деформированном состоянии, при этом она при растяжении и изгибе в продольном и поперечном направлениях имеет один и тот же модуль упругости. Толщину оболочки, которую будем считать приведенной, при растяжении в кольцевом и меридиональном направлениях будет вычисляться по формулам [1]:

$$\delta_{uu} = \delta + \frac{F_{uu}}{S_{uu}}, \quad \delta_c = \delta + \frac{F_c}{S_c}.$$

Подсчитав моменты инерции элементов сечения оболочки относительно центра тяжести можно найти приведенные толщины при изгибе:

$$h_{uu} = \sqrt[3]{\frac{12J_{uu}}{S_{uu}}}, \quad h_c = \sqrt[3]{\frac{12J_c}{S_c}}$$

Уравнение осесимметричной деформации оболочки будет иметь вид [1]

$$E \frac{h_c^3}{12} \frac{d^4 w}{dx^4} + T_x \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{E h_{uu}}{R^2} w = p, \quad (10)$$

где x – осевая координата,

w – радиальное перемещение,

$T_x = \frac{pR}{2}$ – осевое усилие, которое определяется из условия равновесия днища.

Если обозначить $\alpha^2 = \sqrt{\frac{3\delta_u}{R^2 h_c^2} - \frac{3T_x}{Eh_c^3}}$, $\beta^2 = \sqrt{\frac{3\delta_u}{R^2 h_c^2} + \frac{3T_x}{Eh_c^3}}$, то общее решение с условием затухания уравнения (10) будет иметь вид

$$w = -\frac{pR^2}{Eh_u} + C_1 e^{-\alpha x} \sin \beta x + C_2 e^{-\alpha x} \cos \beta x; \quad (11)$$

Уравнение углов поворота днища имеет вид [3]

$$v_\delta = C_3 r + \frac{C_4}{r} + \frac{1}{D_\delta r} \int [r] Q_\delta dr; \quad (12)$$

где $Q_\delta = \frac{pr}{2}$ – поперечная сила,

$D_\delta = \frac{E\delta_\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ – изгибная жесткость днища.

Подставив выражение Q_δ в уравнение (12) и выполнив интегрирование найдем

$$v_\delta = C_3 r + \frac{C_4}{r} + \frac{p_\delta r^3}{16D_\delta} \quad (13)$$

Так как для сплошной пластины без отверстия угол поворота нормали при $r = 0$ не должен обращаться в бесконечность, то $C_4 = 0$. Остальные постоянные определим из граничных условий сопряжений оболочки с днищем

$$\begin{cases} w(0) = 0; \\ v(0) = -v_\delta(R); \\ -M(0) = M_r(R). \end{cases} \quad (14)$$

Решая систему (14) находим постоянные C_1, C_2, C_3 :

$$C_2 = \frac{pR^2}{E\delta_u};$$

$$C_1 = \frac{\frac{pR^2}{8} + C_2 \left(\frac{\alpha D_\delta (1+\mu)}{R} + D(\alpha^2 - \beta^2) \right)}{\frac{D_\delta \beta (1+\mu)}{R} + 2D\alpha\beta};$$

$$C_3 = -\frac{pR^2}{16D} - \frac{\beta C_1}{R} + \frac{\alpha C_2}{R},$$

где $D = \frac{Eh_c^3}{12(1-\mu^2)}$ – изгибная жесткость оболочки.

Силовые факторы M_x , T_t , и M_t возникающие в оболочке, определяются по формулам [2]:

$$T_t = \frac{E\delta_u w}{R} = pR + \frac{E\delta_u}{R} (C_1 e^{-\alpha x} \sin \beta x + C_2 e^{-\alpha x} \cos \beta x); \quad (15)$$

$$M_x = D \frac{d^2 w}{dx^2} = D e^{-\alpha x} (C_1 ((\alpha^2 - \beta^2) \sin \beta x - 2\alpha\beta \cos \beta x) + C_2 (2\alpha\beta \sin \beta x + (\alpha^2 - \beta^2) \cos \beta x));$$

$$M_t = D\mu \frac{d^2 w}{dx^2} = D\mu e^{-\alpha x} (C_1 ((\alpha^2 - \beta^2) \sin \beta x - 2\alpha\beta \cos \beta x) + C_2 (2\alpha\beta \sin \beta x + (\alpha^2 - \beta^2) \cos \beta x)). \quad (16)$$

Аналогично определяются усилия, возникающие в днище [2]:

$$M_r = D_o \left(\frac{dv}{dr} + \mu \frac{v}{r} \right) = D_o C_3 (1 + \mu) + \frac{p_o r^2}{16} (3 + \mu); \quad (17)$$

$$M_t = D_o \left(\frac{v}{r} + \mu \frac{dv}{dr} \right) = D_o C_3 (1 + \mu) + \frac{p_o r^2}{16} (1 + 3\mu). \quad (18)$$

Напряжения в оболочке определяются по формулам (9), в днище:

$$\sigma_r = \pm \frac{6M_r}{\delta_o^2}; \quad \sigma_t = \pm \frac{6M_t}{\delta_o^2}. \quad (19)$$

Оценка расчетного метода обсадных колонн на основе метода конечных элементов и степени влияния принятой модели на точность проведенных для некоторых случаев расчетов осуществлялась одним из наиболее распространенных и достаточно универсальных численных методов проведения анализа напряженно-деформированного состояния – МКЭ. Самой распространенной САЕ-системой основанной на этом методе является ANSYS [85-86]. Данная система позволяет заменить реальные процессы их виртуальным аналогом.

Программа статического анализа элементов обсадной колонны в среде ANSYS. Анализ проводился в следующей последовательности:

1. Создание модели;
2. Построение сетки;

3. Приложение нагрузок;

4. Получение решения.

Модель представляет собой тонкостенный цилиндр 1, усиленный ребрами из П-образного профиля 2, закрытый с одной стороны плоским дном 3 с 6-ю радиальными ребрами 4 (рис. 4).

Для построения сетки был выбран плоский элемент SHELL143. Для этого элемента было определено 5 констант соответствующих толщине трубы δ , толщине стенки швеллера d и полки t , приведенной толщине трубы h_c в зоне состыковки 5 (рис. 5), толщине дна δ_d , толщине радиальных ребер.

В качестве внешней нагрузки к наружной стороне цилиндра 1, 5 и дна 3 было приложено давление p . Верхний торец цилиндра закреплен вдоль оси z .

Проведем сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния обсадной колонны полученный: 1 – аналитическим методом; 2 – с использованием расчета МКЭ модели соответствующей принятой в аналитическом методе; 3 – с использованием расчета МКЭ комплексной модели (рис. 5).

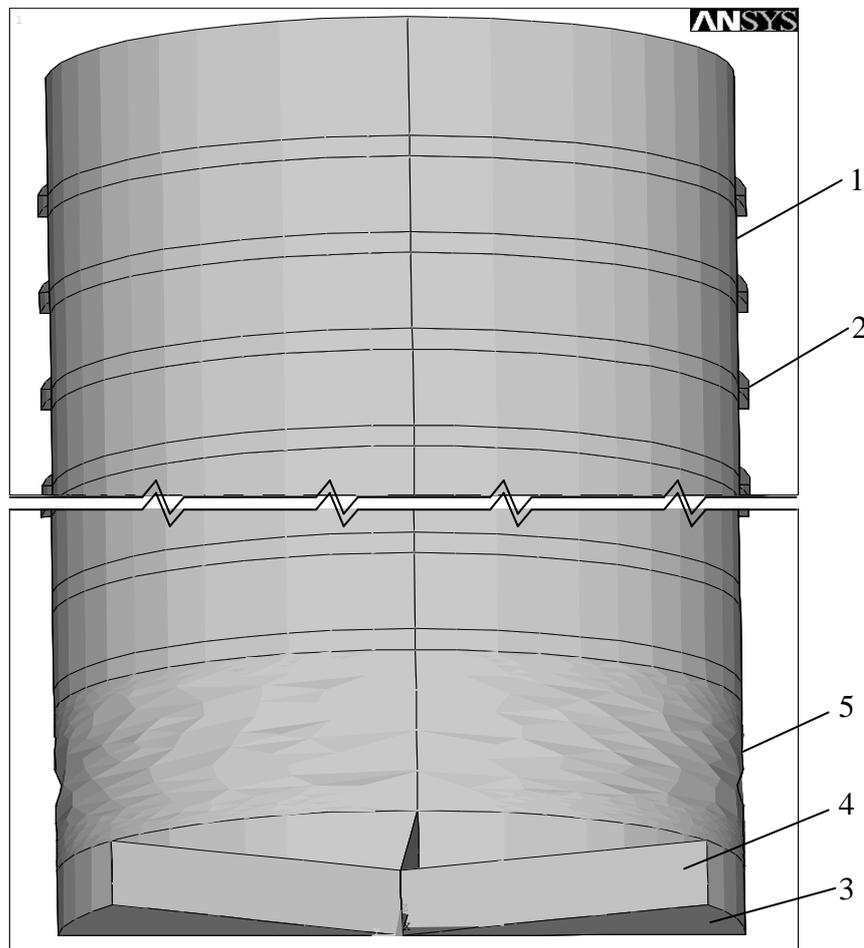


Рис.5 – Комплексная модель обсадной колонны.

В качестве исходных данных для комплексной модели принимаем параметры соответствующие процессу описанному выше: диаметр трубы $d = 4,3$ м;

толщина стенки трубы $\delta = 0,016$ м; параметры швеллера: ширина $H_{ш} = 160$ мм, высота $b_{ш} = 64$ мм, толщина стенки $d_{ш} = 5$ мм полки $t_{ш} = 8,4$ мм, шаг $S_{ш} = 0,75$ м; давление $p = 0,583$ МПа; приведенная толщина трубы $h_c = 100$ мм; для днища примем следующие параметры: толщина пластины $\delta_o = 40$ мм, толщина ребер $\delta_p = 40$ мм и высота ребер $H_p = 500$ мм.

Для сравнения результатов полученных аналитическим методом и с использованием МКЭ рассмотрим на исследуемых участках характер поведения функций w , соответствующих радиальным перемещениям в оболочке и прогибам днища, т.к. данные функции являются исходными для определения напряженно-деформированного состояния тел. Полученные графики перемещений позволяют определить, что поведения соответствующих функций идентично, расхождение значений перемещений составляет:

- в зоне состыковки шпангоутов с трубой – 9,3%;
- по середине пролета между шпангоутами – 11,3%;
- по центру днища, для модели с приведенной толщиной – 12,8%;
- по центру ребристого днища – 33,7%;
- максимальное значение по середине пролета между ребрами $\varphi = \pi / 2m$ – 7,8%;
- максимальное значение по сечению $\rho = R / 2$ – 6,9%.

Выводы:

- жесткость шпангоутов оказывает влияние на несущую способность трубы лишь в пределах определенного участка, зависящего от толщины стенки трубы δ . При величине шага шпангоутов превышающей длину этого участка наличие ребер жесткости не оказывает влияние на несущую способность трубы в целом;

- после выбора параметров трубы и ребер следует делать проверку прочности в зоне их состыковки, что обусловлено концентрацией напряжений в этой зоне;

- при использовании днища, для обеспечения прочности, участок трубы в зоне состыковки следует дополнительно усиливать стрингерами, при этом длина участка и параметры ребер должны выбираться в зависимости от конструкции днища;

- проверка аналитического метода численным показал, что принятые допущения в моделях используемых в аналитическом методе не оказывают значительного влияния не на характер поведения не на численные значения исследуемых функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояршинов С.В. Основы строительной механики машин / Бояршинов С.В. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с.
2. Основы строительной механики ракет: [учеб. пособие для студ. высш. уч. зав.] / Балабух Л. И., Колесников К. С., Зарубин В. С. и др. – М.: Высшая школа, 1969. – 496 с.
3. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер: [пер. с англ.] – М.: Наука, 1966. – 635 с.