УДК 622.831.1

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 состыковки 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 (шпангоутами) из швеллера или полосы с площадью поперечного сечения $F_ш$. Один край трубы заглушают днищем и спускают в скважину, заполненную промывочной жидкостью (рис.1).

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

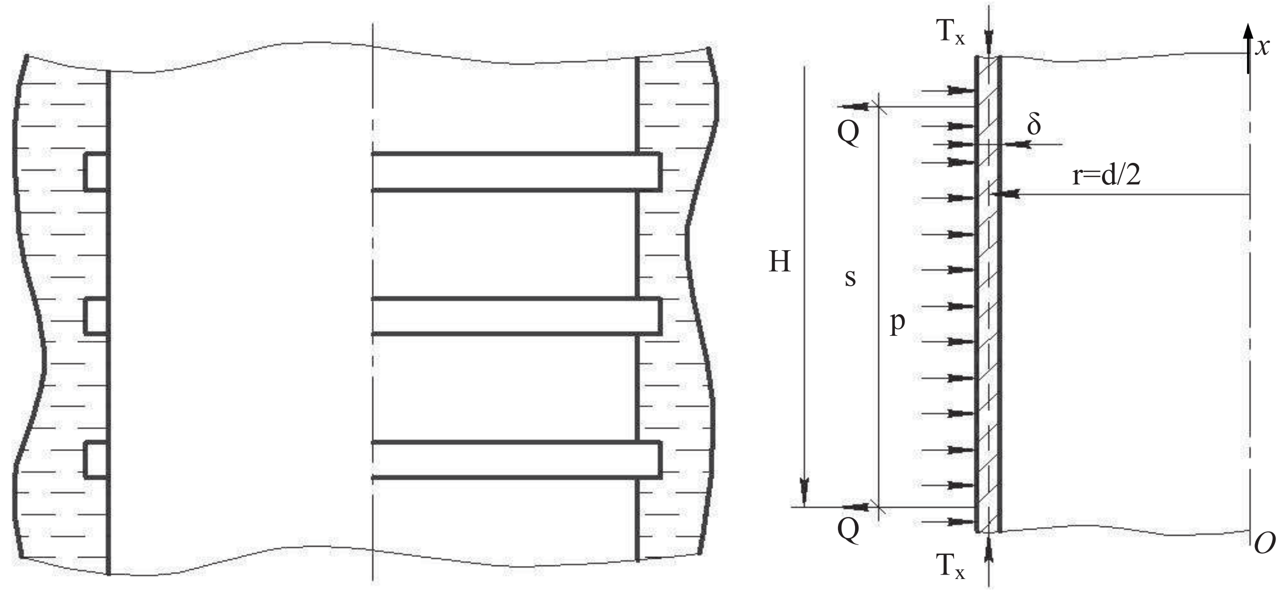

Рис. 1 – Расчетная схема спуска обсадной колонны на плаву.

цилиндр, загруженный 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 промывочной жидкости, $p = \rho g H$, где ρ – плотность промывочной 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]

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

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

$$w = w_0 + \overline{w}\,, \qquad (2)$$

где $\overline{w} = \dfrac{\mu T_x}{4\beta^4 Dr} - \dfrac{p}{4\beta^4 D} = \dfrac{\mu T_x r}{E\delta} - \dfrac{pr^2}{E\delta}$ – 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:

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

где $w_ш$ – деформация шпангоута в радиальном направлении;

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

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

Кольцевую силу q определим из зависимости: $w_ш = \dfrac{qr^2}{EF_ш}$, где $F_ш$ – 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:

$$C_1 = \frac{F_ш(pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_ш + 4\beta^3 Dr^2)};$$

$$C_2 = \frac{F_ш(pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_ш + 4\beta^3 Dr^2)};$$

$$C_3 = \frac{F_ш(pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_ш + 4\beta^3 Dr^2)} e^{-\lambda}(\sin\lambda - \cos\lambda);$$

$$C_4 = \frac{F_ш(pr^2 - \mu T_x r)}{\delta(EF_ш + 4\beta^3 Dr^2)} e^{-\lambda}(\cos\lambda + \sin\lambda).$$

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

– радиальное перемещение

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

– углы поворота нормали

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

– окружное усилие

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

– изгибающий момент в осевом направлении

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

– изгибающий момент в окружном направлении

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

Напряжения определим по известным формулам [71]

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

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

Определим жесткость ребер из условия прочности трубы в зоне состыковки, т.е. $\sigma_{екв}^{(1)}(0)\le[\sigma]$ (рис. 1). На рис. 2 показан график изменения эквивалентных напряжений в трубе d=4,3 при различной толщине стенок δ=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.

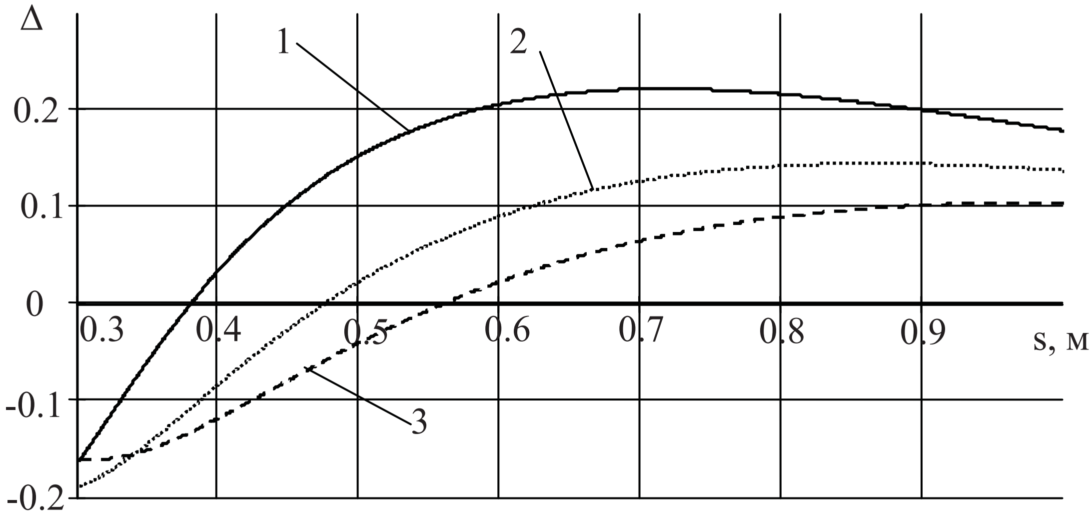

Рис. 2 – График изменения Δ в зависимости от величины шага труб диаметром 4,3 м с толщиной стенки: 1 – 12 мм; 2 – 16 мм; 3 – 20 мм.

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 $p = \gamma_{ж} H$ соответствующая давлению жидкости на днище.

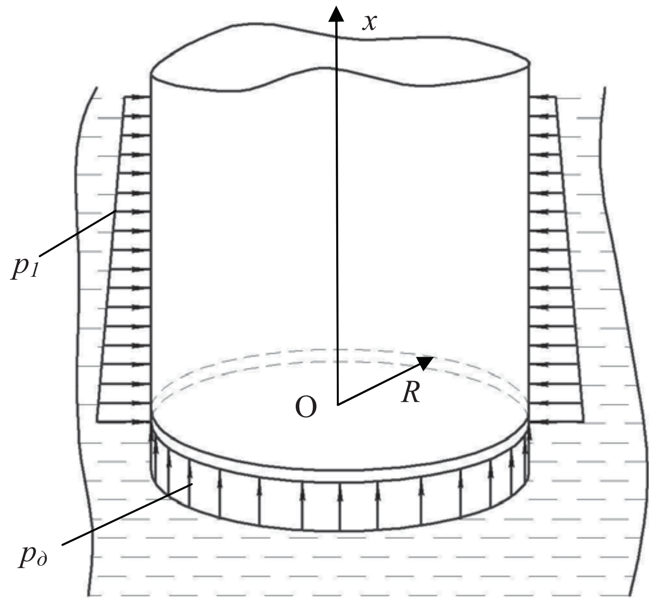

Рис. 3 – Расчетная модель обсадной колонны при ее спуске на плаву.

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]:

$$\delta_ш = \delta + \frac{F_ш}{S_ш},\ \delta_c = \delta + \frac{F_c}{S_c}.$$

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

$$h_ш = \sqrt[3]{\frac{12J_ш}{S_ш}},\ h_c = \sqrt[3]{\frac{12J_c}{S_c}}$$

Уравнение осесимметричной деформации оболочки будет иметь вид [1]

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

где x – осевая координата,
w – радиальное перемещение,
$T_x = \dfrac{pR}{2}$ – осевое усилие, которое определяется из условия равновесия днища.

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

$$w = -\frac{pR^2}{Eh_{ш}} + C_1 e^{-\alpha x}\sin\beta x + C_2 e^{-\alpha x}\cos\beta x; \tag{11}$$

Уравнение углов поворота днища имеет вид [3]

$$v_{д} = C_3 r + \frac{C_4}{r} + \frac{1}{D_{д} r}\int\left[\bar{r}\int Q_{д} d\bar{r}\right]d\bar{r}, \tag{12}$$

где $Q_{д} = \dfrac{pr}{2}$ – поперечная сила,

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

Подставив выражение $Q_{д}$ в уравнение (12) и выполнив интегрирование найдем

$$v_{д} = C_3 r + \frac{C_4}{r} + \frac{p_{д} r^3}{16 D_{д}} \tag{13}$$

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

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

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

$$C_2 = \frac{pR^2}{E\delta_{ш}};$$

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

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

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

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

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

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

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

Аналогично определяются усилия, возникающие в днище [2]:

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

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

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

$$\sigma_r = \pm\frac{6M_r}{\delta_д^2};\ \sigma_t = \pm\frac{6M_t}{\delta_д^2}. \tag{19}$$

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 CAE-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 днищем 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, толщинам стенки швеллера d и полки t, приведенной толщине трубы h_c в зоне состыковки 5 (рис. 5), толщине днища $\delta_д$, толщине радиальных ребер.

В качестве внешней нагрузки к наружной стороне цилиндра 1, 5 и днища 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).

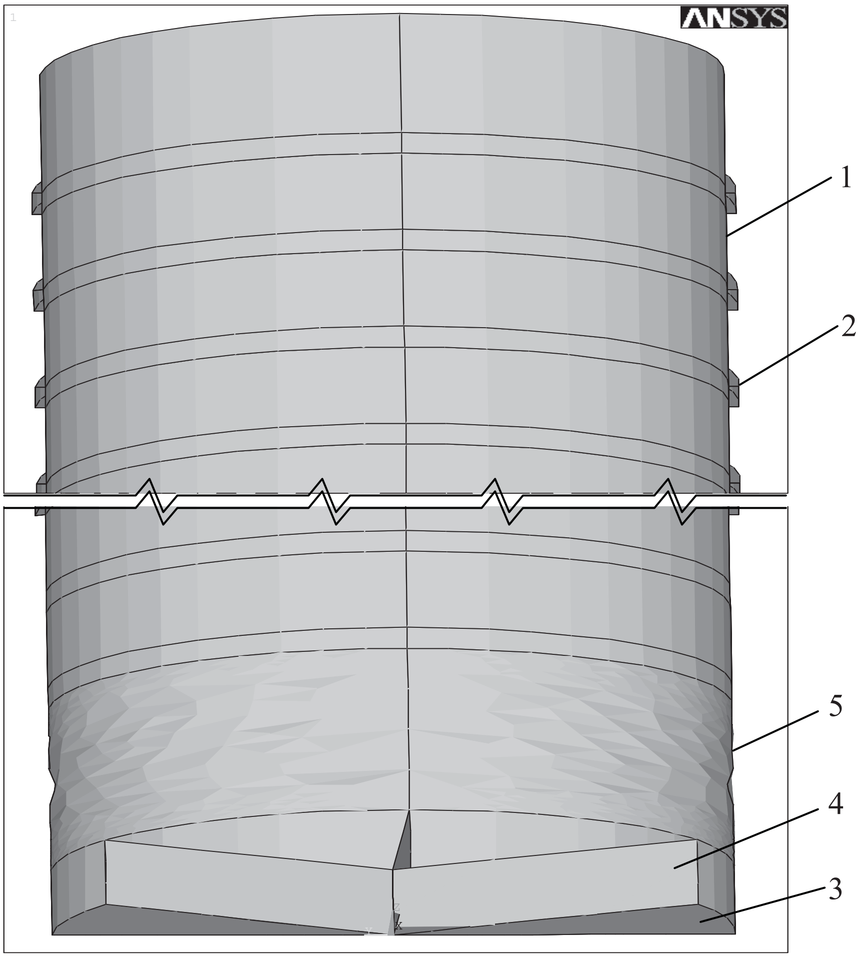

Рис.5 – Комплексная модель обсадной колонны.

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 $\delta_д$=40 мм, толщина ребер $\delta_р$=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.