

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОПРОСОВ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ С ПОНТОНАМИ

На кафедрі «Споруда і ремонт газонафтопроводів і газонафтохосовищ» УГНТУ розроблена нова конструкція понтона із заспокоювачами, що підвищують остійність, для резервуарів типу РВС. Для оцінки впливу заспокоювачів на остійність понтона була розроблена математична модель, що дозволила отримати розрахункові характеристики остійності понтона із заспокоювачами і без заспокоювачів. Досліджено питання міцності синтетичних понтонів при установці їх на опорну конструкцію у формі багатопроменевої зірки. У резервуарах великої місткості з понтонами виникає підвищене навантаження на конструкції ущільнюючих затворів, унаслідок чого можливі їх руйнування. Для обґрунтованих висновків про стабільну безпечну експлуатацію вказаних РВС створена і вивчена модель резервуару, що дозволила визначити виникаючі швидкості перебігу в процесі закачування продукту на зберігання і оптимальне розташування в резервуарі направляючої стійки.

The Chair «Construction and Maintenance of Oil and Gas Pipelines and Storages» has developed a new construction of a covering with dampers that increases stability for vertical steel tanks. For an evaluation of dampers influence on stability of a Covering a mathematical model permitting to receive design performances of stability for a Covering with dampers and without dampers was developed.

The issues of strength synthetic covering when mounted on the supporting structure in the form of multi-beam stars. Increased load to seal gates assembly appears in tanks of large capacity with floating roofs, which may lead to their destruction. For reasonable conclusion about safe exploitation of noticed tanks the model of such tank was constructed and researched, which gave possibility to determine the liquid speed during the process of uploading the product for storage and optimal position of directing racks inside the tank.

Описание проблемы и постановка задачи.

Для хранения нефти и нефтепродуктов используют различные конструкции резервуаров. Наиболее распространены стальные вертикальные резервуары типа РВС. Для сокращения потерь нефти и нефтепродуктов в них часто используют плавающие покрытия (ПП). Плавающие крыши, так называемые наружные ПП, применяют в резервуарах, не имеющих стационарной крыши. Плавающие крыши сокращают потери нефтепродуктов от испарения на 80...90% [1], но в районах с большим количеством осадков частые случаи затопления плавающих крыш приводят к неэффективности описанного способа сокращения потерь.

Внутренние ПП (понтон) применяют в резервуарах со стационарной крышей. Отсутствие нагрузок от ветра и атмосферных осадков упрощает и облегчает конструкцию, снижает эксплуатационные затраты, позволяет обеспечить чистоту хранимых в таких резервуарах продуктов.

Эффективность понтонов во многом зависит от конструкции уплотняющих затворов. Согласно приводимым в [1] данным, сокращение потерь от испарения при применении понтонов составляет 80...90%. Работоспособность же понтонов, тесно связанная с их эффективностью, в значительной мере обусловлена конструкцией и материалами плавающего покрытия. Наиболее распространенными являются стальные и алюминиевые понтоны. В понтонах используются также вспененные полимеры, которые облегчают и удешевляют конструкцию.

Преимуществами резервуаров с понтонами являются: защита продукта и самого плавающего покрытия от атмосферных осадков как в зимнее, так и в летнее время; значительное уменьшение потерь от испарения; снижение ремонтных расходов, поскольку отпадает необходимость в дренаже; легкость применения на действующих резервуарах. Но в процессе эксплуатации установлено, что возможно заклинивание металлических понтонов, перекосы, что в свою очередь приводит к крупным авариям (падению понтонов на откачиваемый продукт с возникновением теплового эффекта, приводящего к пожарам).

Перекосы, заклинивание и потопление понтонов могут возникнуть из-за отклонений от вертикали направляющих в период эксплуатации за счет неравномерной осадки оснований резервуаров и отклонений верхнего слоя (депланация) стенки резервуара от первоначальной формы, а также путем разлива нефти на понтон за счет ее вспенивания.

При перекачке на форсированных режимах нефть значительно нагревается, парциальное давление растворенных в ней газов повышается. При поступлении газонасыщенной нефти в резервуаре происходит разгазирование, нефть аэрируется и плотность ее, особенно в верхних слоях, значительно снижается.

Это приводит к большему погружению понтона, к выносу нефти на понтон в виде пены или аэрированной жидкости, скорость разделения фаз в которой ниже скорости подачи нефти в резервуар. К выносу нефти на понтон приводит и попадание в резервуар воздушной пробки, но в этом случае происходит динамическое воздействие на понтон, приводившим к его деформации и разрывам сварных швов кольцевых и радиальных ребер жесткости еще в положении наплаву [2].

Накопленная на понтоне нефть может сместить его центр тяжести. Создаваемый при этом перекося в отдельных случаях может привести к зависанию понтона при опорожнении резервуара и последующему его падению или заклиниванию и заполнению его нефтью при подъеме уровня нефти в резервуаре.

Изучение состояния понтонов после их потопления показал, что имеют случаи «спокойного» погружения понтонов в нефти и случаи, когда понтон и направляющие стойки были значительно деформированы.

Актуальными являются вопросы повышения остойчивости понтонов, т.е. способности плавающего покрытия, выведенного из положения равновесия воздействием внешних сил, возвращаться в прежнее положение по прекращении этого воздействия. Теория остойчивости изучает поведение тела в результате приложения пары сил (кренящего момента), плоскость действия которой вертикальна.

Согласно требованиям ГОСТ Р 52910-2008 [3] понтон в состоянии на плаву или на опорах должен безопасно удерживать, по крайней мере, двух человек (2 кН), которые перемещаются в любом направлении. Для понтонов из синтетических материалов вопрос обеспечения прочности требует теоретического обоснования.

В резервуарах большой вместимости со стальными плавающими покрытиями возникает повышенная нагрузка на конструкции уплотняющих затворов, вследствие чего возможны их разрушения. Для обоснованных выводов о стабильной безопасной эксплуатации указанных РВС необходимо создание и изучение модели резервуара, позволяющее определить возникающие скорости течения в процессе закачивания продукта на хранение и оптимальное расположение в резервуаре направляющей стойки.

Анализ путей решения задачи.

Для улучшения эксплуатационных характеристик понтонов и повышения остойчивости можно усовершенствовать их конструкцию. На кафедре «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ» УГНТУ разработана новая конструкция понтона с успокоителями, повышающими остойчивость [4]. Устройство для обеспечения остойчивости расположено на днище по периметру понтона, выполнено из металла, сваренного в соты, или в виде соединенных сваркой отрезков металлических труб, размеры которых зависят от размеров понтона.

Для исследования вопросов прочности понтона необходимо рассмотреть математическую модель установленного на опорную конструкцию понтона, т.к. в этих условиях в нем возникают наибольшие напряжения. Для понтонов из синтетических материалов используют опорные стойки в форме многолучевой звезды. В работе [5] получены аналитические выражения для определения прогибов в произвольной точке с полярными координатами (r, θ) изотропной секториальной тонкой пластинки с центральным углом, равным π и при граничных условиях, соответствующих свободному опиранию по всем краям под равномерно распределенной нагрузкой. Случай пластин из армированных вспененных полимеров с граничными условиями, соответствующими возникающим при эксплуатации синтетических понтонов, не был встречен в литературе.

В стальных вертикальных резервуарах большой вместимости возникает повышенная нагрузка на конструкции уплотняющих затворов, вследствие чего возможны их разрушения.

Для определения скорости течения в процессе закачивания продукта на хранение и действующего на уплотняющий затвор давления необходимо создание и изучение модели резервуара типа РВС с плавающим покрытием. Наиболее экономичной моделью является математическая модель, создание и исследование которой возможно при помощи программного комплекса для гидродинамических расчетов FlowVision.

Базовыми в пакете прикладных программ FlowVision являются уравнения Навье–Стокса (вместе с уравнением неразрывности). Для замыкания этих уравнений в зависимости от конкретной задачи могут использоваться дополнительные соотношения, описывающие изменение плотности, турбулентный перенос и т. п.

Для численного решения базовых уравнений в Flow Vision используется метод, основанный на консервативных схемах расчета нестационарных уравнений в частных производных, которые по сравнению с неконсервативными схемами дают решения, точно удовлетворяющие законам сохранения (в частности, уравнению неразрывности). По желанию пользователя для решения возникающей системы линейных алгебраических уравнений может использоваться как неявный (более надежный), так и явный (быстрее работающий, но расходящийся при больших шагах по времени) вариант итерационного процесса. Метод базируется на эйлеровом подходе к описанию движения жидкости, суть которого состоит в том, что различные скалярные и векторные величины рассматриваются как функции переменных времени и координат точки в неподвижной системе координат [6].

В Flow Vision численное интегрирование уравнений по пространственным координатам проводится с использованием прямоугольной адаптивной локально измельченной сетки. Такой подход обеспечивает, с одной стороны, использование простой равномерной неадаптивной сетки при решении задач с относительно несложной геометрией. С другой стороны, появляется возможность при решении задач со сложной геометрией проводить адаптацию (подстройку) сетки к особенностям геометрии вблизи границ, а при решении задач с разрывными течениями адаптацию по значениям искомым функций, их градиентов и др.

Решение задачи обоснования эффективности успокоителей.

Для оценки влияния успокоителей на остойчивость понтона разработана математическая модель, позволяющая получить расчетные характеристики остойчивости понтона с успокоителями и без успокоителей.

При установке приспособления для обеспечения остойчивости площадь плавающего покрытия увеличивается, при увеличении его площади увеличивается и сила поверхностного натяжения, препятствующая возникновению колебательных движений плавающего покрытия и уменьшающая кренящий момент.

При расчете объемного водоизмещения необходимо учитывать массу понтона с успокоителями, а при расчете статической остойчивости – массу понтона, успокоителя и продукта, находящегося в успокоителях.

Успокоители увеличивают площадь плавающего покрытия и содержат продукт, который при динамических воздействиях на понтон увеличивает инерционное сопротивление плавающего покрытия, но практически не ухудшает характеристики плавучести.

Предложена методика для расчета остойчивости понтона с установленными по периметру успокоителями.

Плечо статической остойчивости можно определить по формуле

$$l_{\theta} = \sin\theta \left(\frac{R^2}{4T_0} \left(1 + \frac{1}{2} \operatorname{tg}^2\theta \right) - Z_g + Z_c \right),$$

где R – радиус понтона, θ – угол крена понтона, T_0 – глубина погружения понтона, Z_c – аппликата центра водоизмещения; Z_g – аппликата центра тяжести.

В том случае, когда ватерлиния пересекает верхнюю или нижнюю поверхность понтона, меняется объемное водоизмещение. Для всех возможных случаев получены системы уравнений, которые необходимо решить численно. После чего можно рассчитать характеристики площади сечения понтона, ограниченного ватерлинией: площадь, статический момент площади плавания и момент инерции площади плавания.

Изучено влияние дополнительных элементов (водоизмещающих объемов, которые не учитывались в первоначальных расчетах остойчивости) на остойчивость понтонов.

Получены выражения для случая, когда дополнительные элементы располагаются симметрично относительно диаметральной плоскости, т.е. вертикально расположенной плоскости, являющейся плоскостью симметрии. Их положение характеризуется аппликатами Z_c – для центра водоизмещения и Z_g – для центра тяжести.

Изменение метацентрической высоты и изменение плеча статической остойчивости можно определить из соотношений:

$$\Delta h_0 = (T_0 - Z_g) \frac{\Delta D}{D} - (T_0 - Z_c) \frac{\Delta V}{V};$$

$$\Delta l = (T_0 - Z_g) \sin\theta \frac{\Delta D}{D} - (T_0 - Z_c) \sin\theta \frac{\Delta V}{V},$$

где ΔD – увеличение веса;

ΔV – объем дополнительных элементов.

Полученные формулы позволяют при известных характеристиках остойчивости понтона определить характеристики конструкции, модифицированной введением дополнительных элементов.

Рассмотрев идеальную систему «пonton – жидкость» без температурного воздействия и влияния окружающей среды, для определения восстанавливающего момента учли все силы, действующие на наклоненный на малый угол θ понтон и на успокоители в двух позициях: 1) наибольшая величина подъема понтона находится на месте успокоителя, 2) наибольшая величина подъема понтона находится между успокоителями.

По предлагаемой методике в разработанном комплексе программ рассчитываются: объемное водоизмещение; глубина погружения; углы выхода и входа нижней и верхней поверхностей понтона из жидкости, хранящейся в резервуаре; восстанавливающий момент; статическое плечо остойчивости при различных углах наклона; максимально выдерживаемые статически и динамически приложенные кренящие моменты по опрокидыванию понтона и заливанню понтона.

Проведены расчеты плавучести, остойчивости и непотопляемости внутренних плавающих покрытий.

Проведено численное сравнение расчетных величин остойчивости при увеличении массы понтона за счет его дополнительного утяжеления и при использовании предлагаемых успокоителей. Получена диаграмма выдерживаемых кренящих моментов для РВС-5000 м³ с алюминиевым понтоном. Применение успокоителей приводит к значительному увеличению выдерживаемых кренящих моментов. Применение успокоителей для стальных понтонов приведет к увеличению восстанавливающего момента на 18–20% в зависимости от расположения кренящего момента.

Показано, что для улучшения характеристик остойчивости применение успокоителей эффективнее увеличения массы понтона. При той же дополнительной массе восстанавливающий момент алюминиевого понтона с устройством для обеспечения остойчивости увеличивается на 9%, но материалоемкость и глубина погружения понтона увеличиваются незначительно.

Были проведены расчеты и получены графические зависимости влияния на остойчивость понтонов количества, диаметра и длины труб устройств для обеспечения остойчивости, показавшие, что выдерживаемые кренящие моменты с ростом диаметра используемых труб возрастают экспоненциально.

Решение задачи по определению напряженного состояния понтона резервуара.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние понтона при опорожнении резервуара и установке понтона на опорную конструкцию, которая имеет форму многолучевой звезды (рис. 1). Для проверки прочности плавающего покрытия достаточно рассмотреть его часть в виде сектора с центральным углом, равным углу между лучами опоры, свободно опирающуюся по краям и не опирающуюся по дуге контура (рис. 2). Обозначим величину центрального угла указанного сектора через π/k , где k – целое число. Перейдем к полярным координатам (r, θ) .

Уравнение изогнутой поверхности круглой пластинки можно записать в виде [5]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) = \frac{q}{D},$$

где w – прогиб пластинки,

q – интенсивность нагрузки,

D – цилиндрическая жесткость пластинки при изгибе.

Решив дифференциальное уравнение круглой пластинки в частных производных, получили аналитическое решение для определения прогиба пластинки в случае свободного (неопертого) дугового контура.

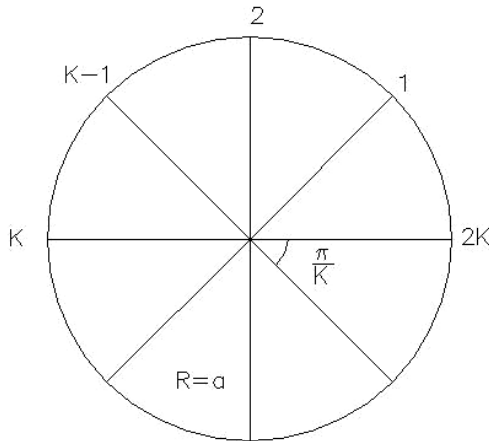


Рис. 1. Схема конструкции опоры

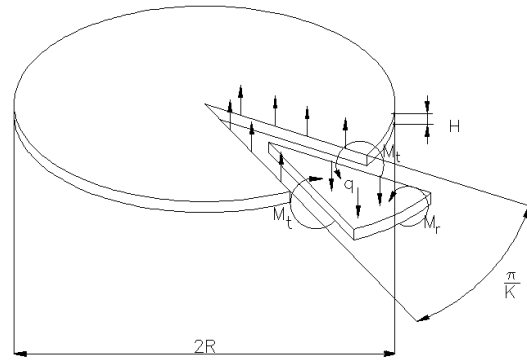


Рис. 2. Схема нагружения сектора понтона:
 q – интенсивность нагрузки, H – толщина понтона,
 R – его радиус

Получено решение для определения величины изгибающего момента в радиальном направлении M_r :

$$M_r = -D \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(\frac{4qr^2(12 + \mu(4 - m^2k^2))}{\pi m(16 - m^2k^2)(4 - m^2k^2)} \right) + A_m r^{km-2} km(km-1)(1-\mu) + B_m r^{km} ((km+2)(km+1+\mu) - k^2m^2\mu) \sin mk\theta.$$

Величину крутящего момента можно определить по формуле

$$M_{rt} = (1-\mu)D \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} mk \left(A_m r^{mk-2} (mk-1) + B_m r^{mk} (mk+1) + \frac{12qr^2}{D\pi m(16 - m^2k^2)(4 - m^2k^2)} \right) \cos mk\theta.$$

Для определения изгибающего момента в тангенциальном направлении M_t получена формула

$$M_t = -D \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \left(A_m r^{mk-2} mk(1-mk)(1-\mu) + B_m r^{mk} ((mk+2)(1+\mu(mk+1)) - m^2k^2) + \frac{4qr^2(4 - m^2k^2 + 12\mu)}{D\pi m(16 - m^2k^2)(4 - m^2k^2)} \right) \sin mk\theta.$$

Получено решение дифференциального уравнения круглой пластинки в частных производных и в случае, когда сектор понтона свободно опирается по всем краям (в том числе и по дуге контура). В этом случае прогиб в любой точке (r, θ) можно определить по формуле

$$w = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{qa^4}{D} \left(\frac{4r^4}{a^4 \pi m(16 - m^2k^2)(4 - m^2k^2)} + \frac{(-3km + 2\mu + 10 - k^2m^2 - km\mu) r^{km}}{a^{km} \pi m(16 - m^2k^2)(4 - m^2k^2) \left(km + \frac{1+\mu}{2} \right)} - \frac{(12 + 4\mu - k^2m^2 + km(1-\mu)) r^{km+2}}{a^{km+2} \pi m(16 - m^2k^2)(4 - m^2k^2) \left(km + \frac{1+\mu}{2} \right)} \right) \sin mk\theta.$$

Последняя формула при $k=1$ совпадает с выражением, полученным С.П. Тимошенко в [5] для определения прогибов в произвольной точке изотропной секториальной тонкой пластинки с центральным углом, равным 180° .

Покажем, что полученные зависимости могут быть использованы для определения напряженно-деформированного состояния понтона из изотропного, моноотропного материала и материала с армированием.

Ортотропным называется такое тело, через каждую точку которого проходят три ортогональные плоскости упругой симметрии. Если эти плоскости принять в качестве координатных плоскостей, то в предположении, что перпендикулярные к срединной плоскости пластинки, т.е. к плоскости xu , линейные элементы ее остаются прямыми и нормальными к изогнутой поверхности пластинки после ее изгиба, уравнение изогнутой поверхности изогнутой ортотропной пластинки можно записать в виде [5]

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_1 + 2D_{xy}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q, \quad (1)$$

где $D_x = \frac{E'_x h^3}{12}$, $D_y = \frac{E'_y h^3}{12}$, $D_1 = \frac{E'' h^3}{12}$, $D_{xy} = \frac{G h^3}{12}$, и выполняются следующие соотношения между компонентами напряжения и деформации

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E'_x \varepsilon_x + E'' \varepsilon_y, \\ \sigma_y &= E'_y \varepsilon_y + E'' \varepsilon_x, \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy}. \end{aligned} \quad (2)$$

В применении к анизотропным пластинкам $D_x = D_y$. Для пластинки, армированной в двух перекрестных направлениях x и y , М.Т. Губером [7] рекомендованы выражения

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{E_M}{1 - \mu^2} (I_{Mx} + (n - 1)I_{Bx}), \\ D_y &= \frac{E_M}{1 - \mu^2} (I_{My} + (n - 1)I_{By}), \\ D_1 &= \mu \sqrt{D_x D_y}, \\ D_{xy} &= \frac{1 - \mu}{2} \sqrt{D_x D_y}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $n = E_e/E_M$, E_e - модуль упругости волокна, E_M - модуль упругости матрицы, I_{Mx} - момент инерции материала матрицы, I_{Bx} - момент инерции арматуры относительно нейтральной оси в сечении $x = const$, I_{My} и I_{By} - соответствующие значения для сечения $y = const$.

Используя приведенные формулы, с помощью введения новой переменной $y_1 = y^4 \sqrt{D_x/D_y}$, уравнение (1) приводится к уравнению изгиба изотропной пластинки в декартовых координатах:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D_x}. \quad (4)$$

Для коэффициентов в системе уравнений (2) известны соотношения [3]:

$$E'_x = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, E'_y = \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, E'' = \frac{\mu_{12}E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} = \frac{\mu_{21}E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, G = G_{12}, \quad (5)$$

где $E_1, E_2, \mu_{12}, \mu_{21}, G_{12}$ - механические характеристики материала понтона.

Выражения (3), (5), а также равенство модулей упругости в направлениях x и y для анизотропного тела ($E_1 = E_2$) позволяют привести соотношения для определения моментов и перерезывающих сил в ортотропной пластинке к соответствующим соотношениям для изотропных пластинок.

Сравнительный анализ расчетов в сопоставимых условиях по предлагаемой методике и по предложенной академиком Б.Г. Галеркиным формуле для определения прогибов дугового края тонких упругих изотропных пластинок в виде кругового сектора со свободным дуговым краем доказал, что разработанные формулы не противоречат полученным ранее результатам. Разница при вычислениях составила: для прогибов алюминиевого понтона - 0,0124%, для прогибов понтона из изотропного материала, жесткость которого совпадает с жесткостью плавающего покрытия из пенополиуретана, - 0,024%.

Для определения прогибов в любой заданной точке, для вычисления величин моментов и соответствующих напряжений понтонов при установке их на опорную конструкцию разработан комплекс программ, позволяющий исследовать прочность понтона из изотропного, анизотропного или армированного материала для резервуара любой вместимости.

Определены значения фактических прогибов под дополнительной нагрузкой различной величины пенополиуретановых понтонов, установленных на опорожненных резервуарах на опору в форме многолучевой звезды. На основании проведенных наблюдений было рекомендовано уменьшить проектную толщину плавающих покрытий из пенополиуретана, так как прочность исследованных понтонов обеспечена с большим запасом.

Определенные в результате проведенных экспериментов значения коэффициентов поперечных деформаций образцов используемого для изготовления понтонов из пенополиуретана позволили проверить предлагаемый метод определения напряженно-деформированного состояния понтонов экспериментально. Проверка соответствия результатов натурных экспериментов с результатами расчетов по предлагаемой методике определения напряженно-деформированного состояния понтонов из армированных вспененных полимерных материалов показала, что относительная погрешность для различных способов дополнительного нагружения, отличающихся местом расположения и величиной груза, менялась от +9 до -20%.

Сравнение свидетельствует о возможности использования разработанной методики для определения оптимальных конструктивных параметров понтонов из синтетических ячеистых материалов, армированных сетками различных типов.

Решение задачи по определению нагрузок на уплотняющие затворы понтонов РВС.

Требования к надежности методов расчета и проектирования резервуарных конструкций все более ужесточаются, а сокращенные сроки проведения работ приводят к необходимости использования различных программных продуктов, для которых должны быть разработаны научно обоснованные методики их использования.

Приемо-раздаточный патрубок (ПРП) РВС представляет собой достаточно сложное устройство. Использование реальной модели ПРП с построением его геометрии возможно только в другой программе, т.к. FlowVision не имеет своих средств для разработки геометрической пространственной модели. Это требует необоснованного вложения дополнительных средств и времени, т.к. в [8] было показано, что допустимо с приемлемой точностью заменить в расчетной модели РВС конструкцию устройства, воздействующего на течение жидкости в емкости, диском, который может быть использован для задания всех значимых для расчета характеристик устройства ПРП.

В программном комплексе FlowVision была разработана модель резервуара вместимостью 50000 м³, необходимая для исследования перемещений плавающего покрытия резервуара. Для определения характеристик течения, возникающего при закачивании продукта, хранящегося в вертикальном цилиндрическом стальном резервуаре, в качестве базовой гидродинамической модели была выбрана модель несжимаемой жидкости, дополненная уравнениями определения границы раздела сред продукт-воздух, имеющая в FlowVision название – «Свободная поверхность».

Основной целью на этапе разработки геометрической модели является создание адекватной конечно-объемной модели, состоящей из узлов и элементов. При создании конечно-объемной модели использован метод твердотельного моделирования, при котором описываются геометрические границы модели.

Для моделирования приемо-раздаточных патрубков были использованы четыре фильтра движущегося тела в форме диска диаметром 700 мм с адаптацией (т.е. подстройкой сетки к особенностям геометрии) возле них до 2. Скорость втекания жидкости через ПРП принималась равной 5 м/с. Граничные условия приняты следующими: 1) на стенке резервуара тип границы – стенка; 2) в приемо-раздаточных патрубках – вход/выход с нормальной скоростью 5, что соответствует втеканию в резервуар; 3) в верхней части резервуара – свободный выход с нулевым давлением.

Плотность хранимого продукта принималась равной 900 кг/м³.

Получена картина распределения скоростей течения вблизи днища резервуара: в плоскости, перпендикулярной днищу РВС, и в плоскости дисков, моделирующих ПРП, - на которой стрелками показаны интенсивность и направление течения хранимой в резервуаре жидкости. Максимальные значения скорости находятся в районе приемо-раздаточных патрубков и составляют 4,5 м/с.

На рис. 3 приведена зависимость изменения скоростей в горизонтальном направлении от высоты налива продукта, из которой видно, что уже на высоте 6 м горизонтальные перемещения плавающего покрытия отсутствуют.



Рис. 3. Зависимость скоростей течения в горизонтальном направлении от высоты налива продукта

Результаты расчёта показывают, что для уменьшения влияния течения продукта и, соответственно, вероятности повреждения уплотняющего затвора для типовых проектов резервуаров РВСПК-50000 необходимо разместить направляющую стойку на линии симметрии между приемо-раздаточными патрубками.

Скорости перемещения плавающего покрытия достигают наибольшей величины 0,6 м/с при минимальном уровне налива продукта, хранящегося в РВС. Максимальные давления стального понтона, воздействующие на уплотняющий затвор, при $\rho=7800$ кг/м³ достигают величины 1400 Н/м². Для алюминиевого понтона $\rho=2700$ кг/м³, давление на уплотняющий затвор достигает величины 480 Н/м², что вполне допустимо.

Были проведены серии расчетов с разным уровнем заполнения нефтепродуктом РВС [9]. Для существующих конструктивных решений типовых цилиндрических резервуаров при использовании стального понтона с одной направляющей стойкой разрушение уплотняющего затвора неизбежно.

Заключение.

При расчетах остойчивости покрытий с устройствами для обеспечения остойчивости для стальных понтонов было выявлено, что эффект повышения остойчивости проявляется в меньшей степени, чем при использовании успокоителей алюминиевых понтонов, что обусловлено большей массой стальных понтонов.

Применение успокоителей приводит к значительному увеличению выдерживаемых кренящих моментов. Применение успокоителей для стальных понтонов приведет к увеличению восстанавливающего момента на 18–20% в зависимости от расположения кренящего момента.

Для улучшения характеристик остойчивости применение успокоителей эффективнее увеличения массы понтона. При той же дополнительной массе восстанавливающий момент алюминиевого понтона с устройством для обеспечения остойчивости увеличивается на 9%, но материалоемкость и глубина погружения понтона увеличиваются незначительно.

Разработана математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния синтетических понтонов, установленных на опорную конструкцию в форме многолучевой звезды. Показано, что полученные формулы применимы для расчета понтонов из ячеистых полимеров и армированных сеткой вспененных полимеров, что позволяет обоснованно назначать конструктивные параметры плавающих покрытий: толщину, марку вспененного полимера, характеристики сетки, используемой в качестве арматуры. Сравнительный анализ расчетов в сопоставимых условиях по предлагаемой методике и по предложенной академиком Б.Г. Галеркиным формуле для определения прогибов тонких упругих изотропных пластинок в виде кругового сектора со свободным дуговым краем доказал, что разработанные формулы не противоречат полученным ранее результатам.

Изучение модели РВС-50000 с плавающим покрытием при заполнении нефтепродуктом показало, что для существующих конструктивных решений типовых цилиндрических резервуаров при использовании стального понтона с одной направляющей стойкой разрушение уплотняющего затвора неизбежно. Для уменьшения влияния течения продукта и, соответственно, вероятности повреждения уплотняющего затвора для типовых проектов резервуаров большой вместимости были разработаны рекомендации, предусматривающие более равномерное заполнение резервуара нефтью по его периметру и размещение направляющей стойки на линии симметрии между прямо-раздаточными патрубками.

Список литературы.

1. Коршак А. А. Современные средства сокращения потерь бензинов от испарения. - Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2001. - 144с.
2. Гадельшин Р.З., И.Э. Лукьянова. Повышение надежности плавающих покрытий резервуаров. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 1999. – 239 с.
3. ГОСТ Р 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Издание официальное. – М.: Стандартинформ, 2008.
4. Мустафин Ф.М., Лукьянова И.Э., Рябинин В.П. Плавающее покрытие для резервуара / Пат. № 2302365 РФ. Опубл. 10.07.2007 // Бюл. №19. – 7с.
5. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластины и оболочки. - М.: Наука, 1966. - 636 с.
6. Кондранин Т.В., Ткаченко Б.К., Березникова М.В. и др. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учебное пособие. – М.: МФТИ, 2005. – 104с.
7. Huber M.T. Teorya Plyt.- We Lwowie Nakladem towarzystwa naukowego drukarnia uniwersytetu Jagiellonskiego pod zarz dem J.Fillpowskiego,1922.-249 с.
8. Лукьянова И.Э., Шмелев В.В. Методические вопросы построения моделей в среде FlowVision для комплексного исследования процессов удаления отложений в нефтяных резервуарах. / Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сб. науч.ст. - Уфа, УГНТУ, 2005. – №18. - С.25-37.
9. Лукьянова И.Э. Исследование работоспособности резервуара РВС для хранения нефти и нефтепродуктов в программном пакете FLOWVISION // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. Вып. 3, 2009. - Уфа: ГУП ИПТЭР, 2009. - С. 63-66.