

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ РЕЗЕРВУАРНОГО ХРАНЕНИЯ НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Бабичев Д.А., Земенкова М.Ю.

Тюменский государственный нефтегазовый университет

Работа посвящена изучению возможности применения гибких оболочек для хранения больших объемов жидкого углеводородного сырья. Предложена принципиальная конструкция резервуара переменного внутреннего объема, оснащенного мягкой полимерной оболочкой. Разработаны конечно-элементная математическая и вычислительная модели гибкой цилиндрической оболочки, позволяющие определять ее форму и напряженное состояние.

Как известно, Западная Сибирь является крупнейшим поставщиком нефти в Российской Федерации. На ее территории находятся магистральные нефтепроводы общей протяженностью около 17 тыс. км, из них в Тюменской области 8 тыс. км, 83 нефтеперекачивающие станции и резервуарные парки общей вместимостью более 2,5 млн. м³.

При осуществлении транспортного процесса от мест добычи до мест потребления нефть теряет до 3 % по объему, а общие потери легких фракций нефтепродуктов ежегодно только в Тюменской области достигают 600 тыс. тонн, причем с тенденцией роста.

Озабоченность сложившейся ситуацией не раз высказывалась на заседаниях правительства РФ: «...Нельзя закрывать глаза на болевые точки российского ТЭК... Основные фонды изношены, что влечет за собой не только отставание в эффективности производства, но и увеличивает риск аварий в энергетическом секторе. Наш производственный потенциал не всегда соответствует мировому научно-техническому уровню... Подводя итог, можно сформулировать несколько ключевых задач, стоящих перед российским ТЭК, это... рациональное использование энергоресурсов; минимизация отрицательного воздействия энергетики на окружающую среду за счет внедрения новых технологий;...» - говорил в своем выступлении Валерий Язев - Председатель Комитета Государственной думы РФ по энергетике, транспорту и связи.

Испарения нефти и нефтепродуктов являются причиной ряда серьезных проблем, возникающих при эксплуатации резервуарных парков:

1. Относительный учет нефти и нефтепродуктов. Учет потерь углеводородов на предприятиях, связанных с хранением и распределением нефти и нефтепродуктов ведется, как правило, в соответствии с «Нормами естественной убыли нефти и нефтепродуктов при приеме, отпуске, хранении и транспортировании», основные положения которых далеко не всегда корректно оценивают действительный объем испарившихся углеводородных фракций и носят, скорее, рекомендательный, нежели оценочный характер. Например, потери бензинов из резервуаров со стационарной крышей объемом более 3000 м³ при хранении составляют, согласно, порядка 0,83 и 1,16 кг на 1 тонну принятого продукта в осеннее-зимний и весеннее-летний периоды соответственно. Как показывает практика, в реальности эти потери гораздо больше и составляют в зависимости от условий эксплуатации, порядка 1,1 – 2,3 кг на 1 тонну принятого продукта. Однако на производстве для оценки потерь нефтепродуктов за отчетный период используют данные, изложенные в «Нормах», что, естественно, пагубно влияет на точность учета поступившего и отпущенного нефтепродукта по предприятию в целом.

2. Ухудшение экологической ситуации в районе размещения объектов сбора, подготовки, транспортировки, хранения и распределения нефти и ее производных. Не секрет, что пары углеводородов, попадая в атмосферу, оседают в низинах и создают так называемые «газовые купола» или «смог». Выброс в атмосферу многих газов: угарного (CO), углекислого (CO₂), метана (CH₄), этана (C₂H₆) и др., которые накапливаются в результате сжигания горючих ископаемых и других производственных процессов, а также работы транспорта, вызывает поглощение молекулами этих газов отражённой тепловой энергии, поступившей в атмосферу от Солнца. Из-за этого происходит более интенсивное тепловое движение молекул и повышение атмосферной температуры. Более того, загрязнения переносятся по воздуху от источников появления к местам их разрушающего воздействия; в атмосфере они могут претерпевать изменения, включая химические превращения одних загрязнений в другие, еще более опасные вещества. Попавшие в атмосферный воздух и частично изменившие в

результате химических реакций свои свойства углеводороды оказывают разрушающее воздействие и на озоновый слой, находящийся на высоте 20-50 км. Озон образуется в стратосфере за счет молекул обычного, двухатомного кислорода O_2 , который поглощает жесткое ультрафиолетовое излучение. В районах появления так называемых «озоновых дыр» медики констатируют значительное повышение количества заболеваний, обусловленных увеличенным ультрафиолетовым фоном, таких, как рак кожи, катаракта глаз и др. Содержание углеводородных компонентов в низких слоях атмосферы вызывает ряд психоневрологических заболеваний и даже смерть живых существ, причем смертельная доза токсичных веществ колеблется от 0,5 до 15 мгм на 1 кг. Более того, глобальное потепление вызывает сокращение продолжительности жизни. Учёные из Всемирной организации здравоохранения (WHO) и Лондонской школы гигиены и тропической медицины (London School of Hygiene and Tropical Medicine) объявили, что от побочных эффектов глобального потепления ежегодно погибает около 160 тысяч человек. К 2020 году это количество может удвоиться.

3. Существенное снижение качества нефти и нефтепродуктов при осуществлении транспортного цикла. Транспорт нефти и продуктов ее переработки осуществляется, как правило, по магистральным нефтепродуктопроводам, имеющим в своем составе нефтеперекачивающие станции, оборудованные, зачастую, резервуарными парками. Резервуары резервуарных парков НПС предназначены для учета поступившей и отпущенной нефти (нефтепродукта), аварийного хранения (объем РП НПС рассчитывается исходя из 2-3 суточной производительности трубопровода [3]) и работы в качестве буферной емкости. При использовании постанционной схемы перекачки, сливо-наливные операции в резервуарных парках протекают непрерывно и, поэтому сопровождаются интенсивными испарениями углеводородов, происходящих, главным образом, в процессе «больших» и «малых» дыханий.

«Большие» дыхания происходят при заполнении резервуара нефтью, в результате чего из газового пространства вытесняется в атмосферу паровоздушная смесь. В процессе «больших» дыханий объем паровоздушной смеси приблизительно равен объему закаченной в резервуар нефти.

«Малые» дыхания возникают за счет ежесуточных колебаний температуры и барометрического давления наружного воздуха, а, следовательно, и колебаний давления в газовом пространстве резервуара. Степень испаряемости нефтепродукта определяется давлением насыщенных паров – парциальным давлением над поверхностью жидкости, при котором пары находятся в равновесии с жидкостью.

В результате испарения из нефти уходят главным образом наиболее легкие компоненты, являющиеся основным и ценнейшим сырьем для нефтеперерабатывающих производств. Потери же легких фракций бензина приводят к ухудшению товарных качеств, понижению октанового числа, повышению температуры кипения, а иногда и к переводу нефтепродукта в более низкие сорта.

4. Повышенный уровень пожаро- и взрывоопасности резервуарных парков.

При эксплуатации резервуарных парков весьма велик риск возникновения аварийных ситуаций, которые, в свою очередь, могут спровоцировать повреждение или разрушение резервуара и розлив и возгорание нефти. Это связано с наличием газовой фазы в резервуарах РВС, являющихся основным оборудованием резервуарных парков нефтеперекачивающих станций и нефтебаз (только на предприятиях ОАО «АК «Транснефть» эксплуатируется около 1000 резервуаров, из них порядка 700 – вертикальных стальных номинальным объемом от 5 до 50 тыс. м³). В газовой фазе - пространстве между стационарной крышей резервуара и зеркалом нефтепродукта – образуется взрывоопасная смесь из выделившихся из хранимого продукта углеводородов и атмосферного воздуха, попадающего в резервуар через дыхательный клапан. Попадание в насыщенное паровоздушное пространство искры может спровоцировать взрыв, сопровождающийся повреждением или разрушением резервуара, а также розливом и возгоранием нефти (нефтепродукта). Кроме того, при эксплуатации резервуаров смесью интенсивно насыщается и пространство около дыхательного клапана с внешней стороны стенки и крыши, что также повышает риск возгорания или взрыва емкости.

В связи с этим, актуальными являются задачи ликвидации вредных выбросов в атмосферу из резервуаров, что позволит существенно повысить

общий уровень экологической и пожарной безопасности, а также сохранить качество продукта на протяжении всего транспортного цикла. Одним из перспективных направлений в решении озвученной проблемы является разработка конструкции резервуара, обеспечивающей надежность и экологичность эксплуатации, а также сохранение качества хранимой нефти или нефтепродукта. В основу предлагаемой в работе конструкции (РПВО) положен принцип хранения продуктов под избыточным давлением. Резервуар переменного внутреннего объема (РПВО) (рис. 1) состоит из железобетонного бассейна прямоугольной формы, заполненного технической жидкостью, необходимой для создания избыточного давления над хранимым продуктом и гибкой цилиндрической оболочкой.

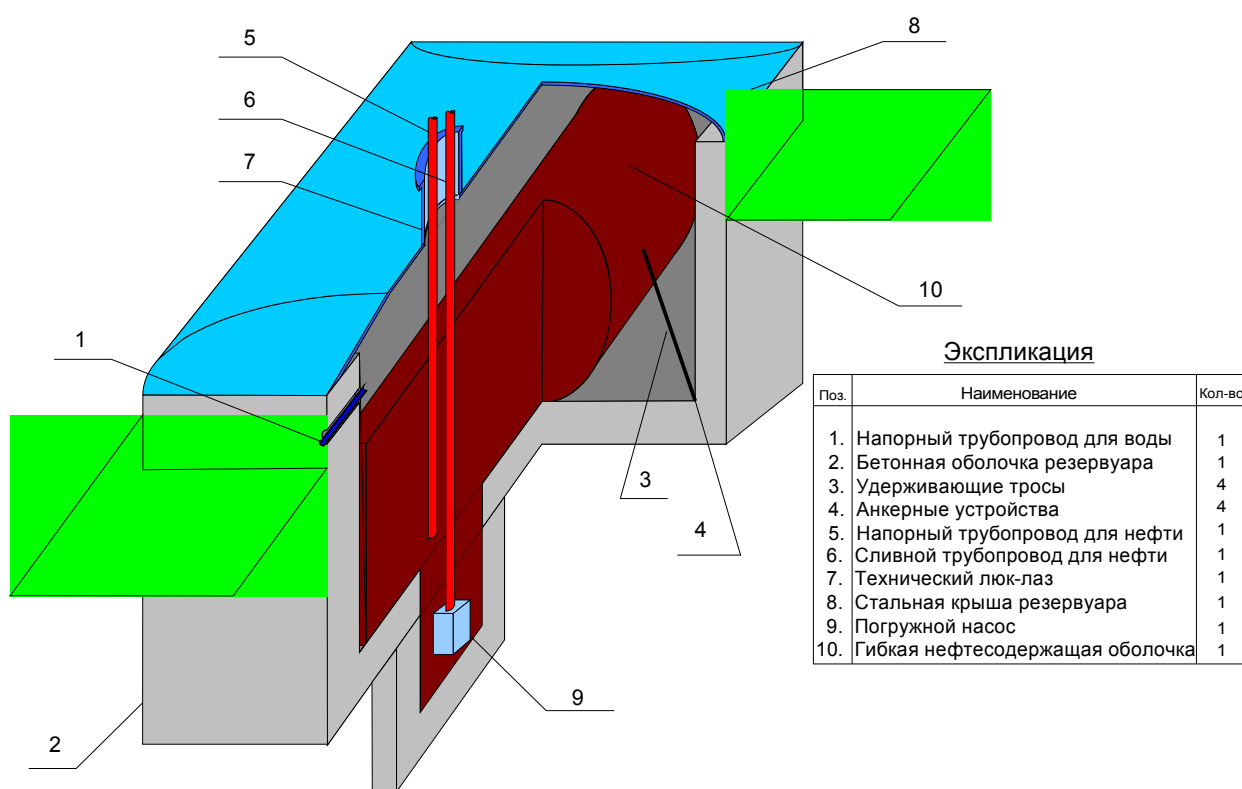
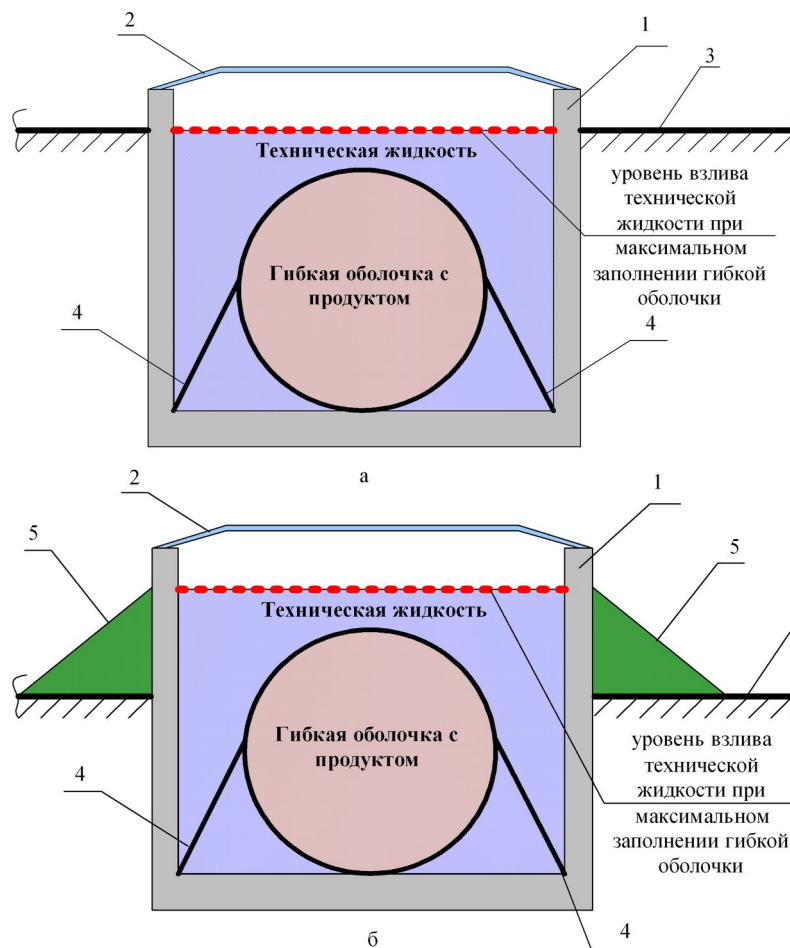


Рисунок. 1 Общий вид резервуара переменного внутреннего объема

Бетонные стенки и пол резервуара внутри и снаружи изолируются битумной мастикой для предотвращения попадания грунтовых вод внутрь резервуара, а также выхода технической жидкости за пределы бассейна. Непосредственно нефть хранится в гибкой цилиндрической оболочке, которая в порожнем состоянии приплюснута к дну резервуара давлением воды, а при заполнении нефтью постепенно приобретает цилиндрическую форму. Учитывая опыт эксплуатации железобетонных резервуаров, а также преследуя цель создания режима хранения близкого к изотермическому, предполагается заглубление резервуара предлагаемой конструкции до уровня вливания технической жидкости при максимальном заполнении рабочего органа резервуара – гибкой оболочки (рис. 2а).



1 – бетонный бассейн, 2 – стальная крыша, 3 – уровень площадки строительства,
4 – удерживающие тросы, 5 – земляное обвалование.

Рисунок 2. Способы заглубления резервуара

В случае если, по тем или иным причинам, невозможно произвести заглубление резервуара до уровня взлива технической жидкости при максимальном заполнении гибкой оболочкой, необходимо устройство обвалования по периметру резервуара (рис. 2б). Для предотвращения повышения давления в пространстве между крышей резервуара и зеркалом технической жидкости на крыше резервуара устанавливается дыхательная арматура.

Для определения профиля гибкой оболочкой с продуктом, а также нагрузок, действующих на нее, была разработана прикладная программа, позволяющая профилировать оболочку, содержащей до трех сред внутри себя и находящейся при этом в разнофазной среде. Программа базируется на методике расчета, в основу которой положен принцип конечных элементов. Это вызвано тем, что для расчета такой сложной многофазной системы, какой является заполненная гибкая оболочка, неприменимы традиционные методы расчета. У каждого отдельно взятого конечного элемента оболочки будет свой радиус кривизны, и профиль гибкой оболочки будет определяться векторной суммой радиусов кривизны конечных элементов.

Тонкостенную конструкцию, способную существенно изменять свою форму, принято называть гибкой оболочкой. Считается, что при изменении своей формы эта тонкостенная (пленочная) конструкция испытывает столь малые изгибные напряжения, что ими можно пренебречь. Таким образом, гибкая оболочка - пленка бесконечно малой толщины – т.е. двумерный геометрический объект, являющийся, поверхностью.

Форму поверхности в дифференциальной окрестности любой её точки определяет, прежде всего, её кривизна. При этом различают:

- кривизну поверхности в нормальном сечении $k = \frac{1}{R}$ и кривизну поверхности в произвольном сечении $k_s = \frac{1}{R_s}$;
- главные кривизны поверхности $(k_1 = \frac{1}{R_1}, k_2 = \frac{1}{R_2})$ и главные направления на поверхности;
- среднюю кривизну поверхности $k_{cp} = \frac{1}{R_{cp}}$ и Гауссову кривизну поверхности $k_G = \frac{1}{R_G}$.

Основные закономерности, связывающие названные кривизны, известны в дифференциальной геометрии как теоремы Менье и Родрига, а также формулы Эйлера и Гаусса. Важнейшим локальным показателем формы поверхности является Гауссова кривизна, равная произведению главных кривизн и являющаяся внутренним свойством поверхности. При изгибании значение Гауссовой кривизны не меняется, т.е. конечный кусок поверхности можно изгибать без образования разрывов или складок, а также без растяжения или сжатия поверхности, только в том случае, если во всех точках этого куска поверхности Гауссова кривизна равна нулю. Поверхности, отвечающие этому требованию, называют развертывающимися. Любую такую поверхность можно выкроить из плоскости и, изгибая выкройку, “выгнуть” цилиндр, конус или иную развертывающуюся поверхность.

Анализ приведенных теорем и формул позволил сделать ряд выводов, учтенных при разработке конечно-элементарной модели гибкой цилиндрической оболочки:

1. Гибкую оболочку, которая образует замкнутый объём и которую можно было бы изгибать без образования разрывов и складок или без деформаций растяжения-сжатия получить невозможно в принципе.

2. Наиболее перспективными поверхностями для получения замкнутых пространств переменного объёма следует признать цилиндрические и конические, т.к.:

- допускается возможность выкройки их из пленочных материалов;
- существует возможность изгибания при небольших величинах растяжения поверхностей на участках, удаленных от мест стыковки с изломами.

3. Чтобы деформации растяжения и опасность появления складок были меньше, отношение диаметров цилиндров и конусов к длине их образующих следует брать, как можно меньше, т.е. применять “длинные трубы” и “мелкие конические тарелки”.

Вопросу построения математических моделей гибких оболочек посвящено значительное количество работ различных авторов.

В данной области широко известны работы: Аксельрада Э.Л., Болотина В. В., Винокурова С. Г., Вольмира А.С., Галимова К.З., Гольденвейзер А. Л., являющихся ведущими учеными в области исследования деформации формы поверхностей. Анализ работ этих и других авторов показал, что:

1. применяемые методы и получаемые математические модели сложны;
2. при реализации на компьютерах получаемых математических моделей необходимо использовать численные методы, требующие нередко тонких оценок: сходимости, устойчивости и точности решения, что под силу лишь высококвалифицированным математикам;
3. трудоемкость исследования конкретных конструкций весьма высока (вывод расчетных уравнений, выбор численных методов, разработка алгоритмов, отладка программ, численные расчеты, анализ достоверности и т.п.);
4. методы мало пригодны при поисковых исследованиях, когда структура конструкции ещё не устоялась и может изменяться. Тем более что поиск конструкции требует решения оптимизационной задачи, которая в общем случае имеет нелинейную целевую функцию и нелинейные ограничения. А при вычислении целевой функции на каждом шаге оптимизации необходимо проводить анализ напряженного и деформированного состояния оболочки, удовлетворяя при этом ещё и краевые условия.

Поэтому на начальных этапах исследования, когда ведется поиск структуры и основных параметров конструкции гибких резервуаров, разумно использовать более простые и менее трудоёмкие методы, хотя, возможно, и менее точные, т.е. при проведении поисковых и первоначальных исследований применимости гибких оболочек в области транспорта и хранения жидкостей и газов, следует для анализа напряженного состояния гибких оболочек разработать математические и вычислительные модели, которые:

1. относятся к типовому геометрическому элементу, составляющему основу большинства (или даже всех) видов замкнутых гибких оболочек, пригодных для применения при хранении и транспортировке жидкостей и газов;
2. органично учитывают существенные изменения геометрической формы оболочки (и прежде всего, за счет изгибания поверхностей), позволяя находить

форму поверхности при учете переменности внутреннего и внешнего давлений в различных точках оболочки;

3. является достаточно простой и не требующей ни тонких математических исследований, ни чрезмерно больших затрат труда и времени на компьютерную реализацию;

Проанализировав разнообразные виды замкнутых гибких резервуаров, пришли к выводу, что в качестве типового геометрического объекта следует взять гибкую разворачивающуюся оболочку в виде бесконечной трубы. Оболочка нагружена двумя симметричными силами T_T , касательными к оболочке и может быть погружена во внешнюю среду полностью или частично, находясь при этом частично на дне или не касаться его.

Методология разработки математических и вычислительных моделей основана на следующих положениях:

1. в основу построения моделей положен метод конечных элементов;
2. в качестве конечного элемента берётся отрезок сечения цилиндрического резервуара, то есть конечный элемент одномерный – это отрезок кривой плоской линии;
3. радиус кривизны конечного элемента в любой его точке находится исходя из величин внешнего и внутреннего давлений на оболочку (полагая оболочку безмоментной);
4. форму сечения, а также усилия в различных точках оболочки предложено находить, построив итерационный вычислительный процесс по решению системы четырёх трансцендентных уравнений с четырьмя неизвестными.

Уравнения составляются исходя из следующих условий:

- оболочка находится в равновесии при действии на неё внешних сил – условие равновесия оболочки (это условие порождает два уравнения);
- в средней (верхней) точке оболочки вектор касательной к ней должен быть горизонтален – условие гладкости оболочки;
- x -координата этой средней верхней точки оболочки равна нулю – условие неразрывности оболочки.

Управляющими параметрами при итерациях являются:

– L_0 или y_0 – длина соприкосновения оболочки с грунтом или расстояние оболочки от грунта (для всплывающей или всплывшей оболочки $L_0 = 0$; для затопленной и притопленной оболочки $y_0 = 0$).

– T_0 – удельное усилие растяжения в нижней точке оболочки;

– $P_{в0}$ – избыточное давление внутри оболочки в её нижней точке;

– T_{TP} – удельное усилие натяжения крепёжного троса.

Рассмотрев дифференциальный элемент гибкой разворачивающейся оболочки, получили основную расчетную зависимость, связывающую в расчетной точке радиус кривизны оболочки, давления на неё и удельное усилие растяжения (1):

$$R_{\text{крив}} = \frac{T}{P_{\text{вн}} - P_{\text{сн}}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{крив}}$ – главный радиус кривизны оболочки, м;

T – удельное усилие растяжения в расчетной точке, МН/м;

$P_{\text{вн}}$ – давление внутри гибкой оболочки в расчетной точке, МПа;

$P_{\text{сн}}$ – давление снаружи гибкой оболочки в расчетной точке, МПа.

Нахождение формы, которую примет цилиндрическая оболочка, заполненная слоями жидкости – процесс итерационный. Его неотъемлемая составная часть – многократное использование базового уравнения (1) для вычисления радиусов кривизны в расчетных точках. Для этого оболочку вдоль своего периметра разбиваем на конечные элементы – рис. 3.

Отметим, что с номером i конечного элемента совпадают номера трёх точек: A_i – начала элемента, A_{Si} – расчетной точки на элементе и B_i – средней точки на хорде элемента. Конечные элементы нумеруются начиная с нуля, от начала координат, против часовой стрелки. Все конечные элементы рассматриваются как дуги окружностей, радиусы которых равны радиусам кривизны оболочки в расчетных точках каждого из конечных элементов. Число конечных элементов выбирается четным – в этом случае конечная точка $A_{N/2}$ элемента с номером $(N/2-1)$ окажется самой верхней точкой оболочки, находящейся на её оси симметрии (её координата $x = 0$), и касательная к оболочке в этой точке станет горизонтальной (её угол наклона $\alpha = 180^\circ$), что важно, т.к. по условиям $x = 0$ и $\alpha = 180^\circ$ будет строиться целевая функция для обеспечения замкнутости и гладкости оболочки – аналог выполнения краевых условий.

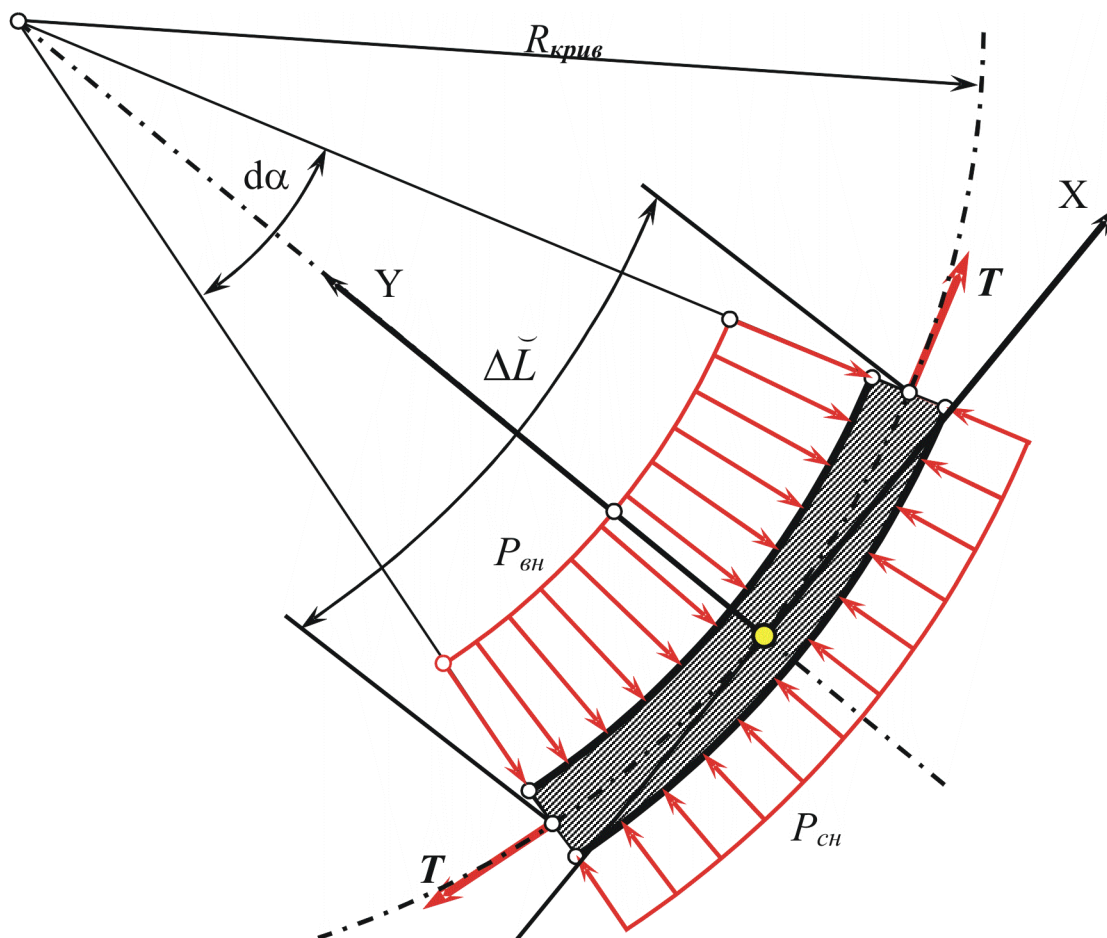


Рисунок 3. Схема сил, действующих на дифференциальный элемент гибкой оболочки

Все основные расчетные формулы, приводимые ниже, были получены, опираясь на рисунок 3.

Угол поворота касательной на длине i -того конечного элемента для правой половины оболочки:

$$\Delta\alpha_0=0; \quad \Delta\alpha_i=\frac{\Delta L}{R_{крив\ i}}, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2}-1\right) \quad (2)$$

Угол наклона касательной в начале i -того конечного элемента (очевидно, одновременно это и угол наклона касательной в конце $(i-1)$ -го элемента):

$$\alpha_0=0; \quad \alpha_i=\alpha_{i-1}+\Delta\alpha_{i-1}, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2}\right) \quad (3)$$

Угол наклона касательной в расчетной точке i -того конечного элемента:

$$\beta_0=0; \quad \beta_i=\alpha_i+\frac{\Delta\alpha_i}{2}, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2}-1\right) \quad (4)$$

Длина конечных элементов по хорде:

$$\Delta L_0 = \frac{L_0}{2}; \quad \Delta L_i = 2 \cdot R_{криві} \cdot \frac{\sin \Delta \alpha_i}{2}, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2} - 1 \right) \quad (5)$$

Перепад высот на длине i -того конечного элемента:

$$\Delta H_0 = 0; \quad \Delta H_i = \Delta L_i \cdot \sin \beta_i, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2} - 1 \right) \quad (6)$$

Координаты начальных точек нулевого и первого конечных элементов:

$$x_{A0} = 0, \quad y_{A0} = y_0. \quad (7)$$

$$x_{A1} = \frac{L_0}{2}, \quad y_{A1} = y_0. \quad (8)$$

где y_0 – заданное расстояние нижней точки оболочки от грунта.

Координаты последующих конечных элементов правой половины оболочки:

$$x_{Ai} = x_{A_{i-1}} + \Delta L \cdot \cos \beta_i, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2} \right) \quad (9)$$

$$y_{Ai} = y_{A_{i-1}} + \Delta H_i, \quad \left(i=1 \dots \frac{N}{2} \right). \quad (10)$$

Координаты средних точек B_i конечных элементов правой половины оболочки:

$$x_{Bi} = \frac{x_{Ai} + x_{A_{i+1}}}{2}, \quad y_{Bi} = \frac{y_{Ai} + y_{A_{i+1}}}{2}; \quad \left(i=0 \dots \frac{N}{2} - 1 \right). \quad (11)$$

Координаты расчетных точек A_{Si} конечных элементов:

$$x_{Asi} = x_{Bi} + \frac{\Delta L}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta \alpha_i}{2} \cdot \sin \beta_i, \quad \left(i=0 \dots \frac{N}{2} - 1 \right) \quad (12)$$

$$y_{Asi} = y_{Bi} - \frac{\Delta L}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\Delta \alpha_i}{2} \cdot \cos \beta_i, \quad \left(i=0 \dots \frac{N}{2} - 1 \right). \quad (13)$$

Координаты начальных точек A_i и расчетных точек A_{Si} конечных элементов **левой** половины оболочки (они нужны, в частности, для её отрисовки):

$$x_{A(K_{вн} - i)} = -x_{Ai}, \quad y_{A(K_{вн} - i)} = y_{Ai}; \quad \left(i=0 \dots \frac{N}{2} - 1 \right) \quad (14)$$

$$x_{As(K_{вн} - i - 1)} = -x_{Asi}, \quad y_{As(K_{вн} - i - 1)} = y_{Asi}; \quad \left(i=0 \dots \frac{N}{2} - 1 \right). \quad (15)$$

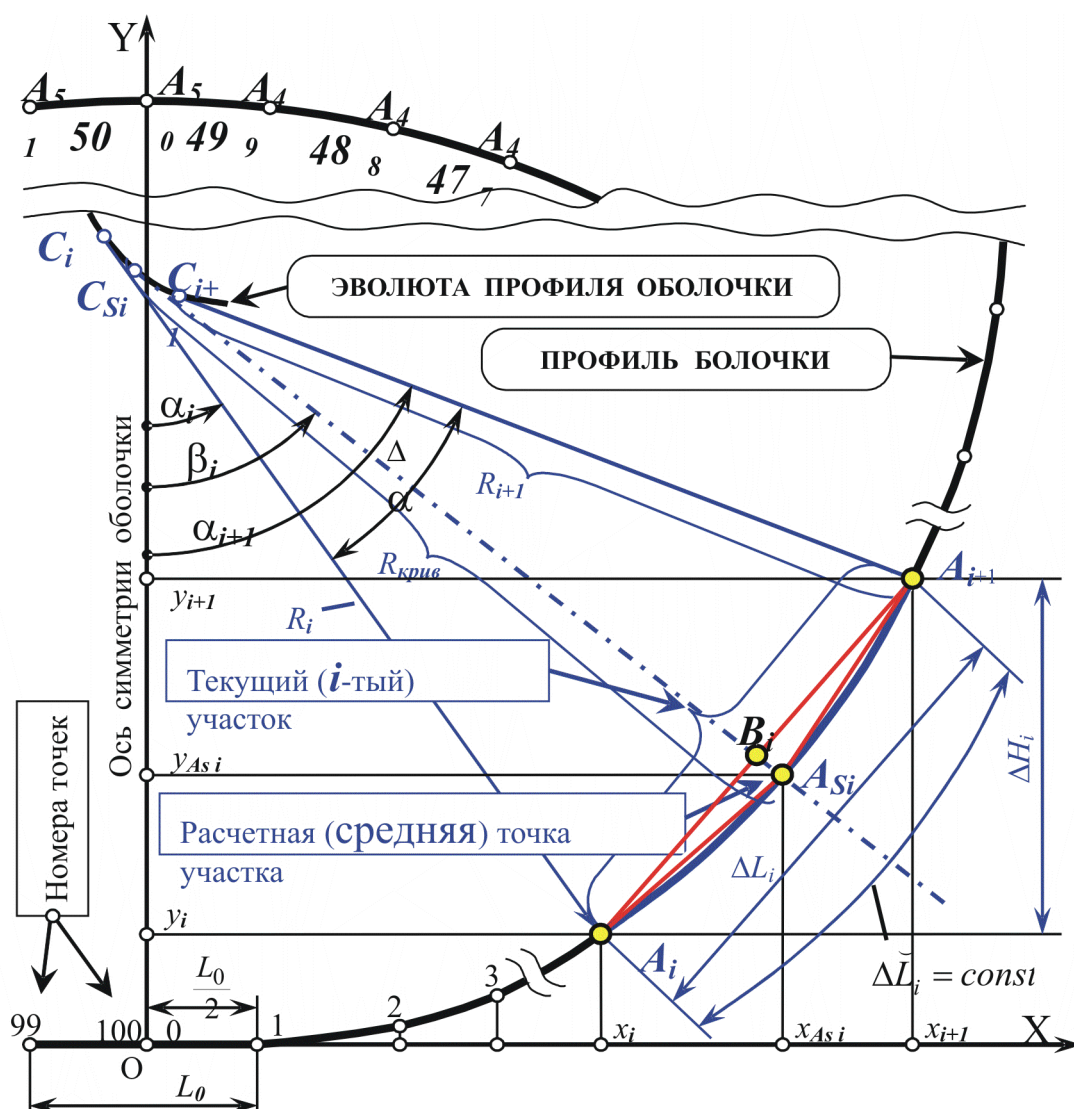


Рисунок 4. Расчетная схема определения формы гибкой оболочки

Разработанная методика геометрического расчета конечных элементов обеспечивает то, что каждый из рассчитываемых элементов находится в однородных средах, т.е. внутри него нет границ двух сред, имеющих различную плотность. Взяв расчетную точку конечного элемента в середине длины дугового конечного элемента, имеется возможность аппроксимировать рассматриваемый элемент дугой окружности радиуса $R_{крив}$, зависящий от разности давлений внутри и снаружи оболочки в расчетной точке.

При обосновании выбранной методологии анализа формы и напряженного состояния гибких резервуаров, отмечалось, что форму сечения цилиндрической оболочки и усилия в ней находим, построив итерационный вычислительный процесс, в основе которого лежит решение на каждом шаге итерации системы трех трансцендентных уравнений. При этом: одно из уравнений было получено из условия равновесия оболочки; другое – из условия замкнутости оболочки; третье – из условия её гладкости.

Спроецировав все действующие на оболочку силы на вертикальную ось ОУ, получаем:

$$P_{B0} \cdot L_0 - 2 \cdot T_{TP} \cdot \sin \alpha + F_{\text{подъем}} - G_{\text{продукт}} = 0, \quad (16)$$

где P_{B0} – давление оболочки на грунт (оно же есть давление внутри оболочки в её нижней точке – избыточное по отношению к атмосферному P_{ATM}), МПа;

T_{TP} – удельное усилие натяжения крепежного троса (при $T_{TP} < 0$ оболочка не притягивается ко дну, а висит на двух тросах, уходящих вверх от подвешенного на них резервуара), МН/м;

α – угол наклона тросов;

$F_{\text{подъем}}$ – удельная подъемная сила резервуара, складывающаяся из трёх сил, соответствующих трём слоям внешней среды, МН/м:

$G_{\text{продукт}}$ – вес жидкостей, находящихся внутри ёмкости и приходящихся на единицу длины резервуара, МН/м.

Спроецировав на горизонтальную ось ОХ все силы, действующие на правую половину оболочки, получим, с учетом внутренних и внешних давлений на оболочку:

$$\int_{y_0}^{y_{\text{верх}}} (p_{\text{вн}} - p_{\text{сн}}) dy - 2 \cdot T_0 - T_{TP} \cdot \cos \alpha = 0, \quad (17)$$

где y_0 и $y_{\text{верх}}$ – у-координаты нижней и верхней точек оболочки, м;

$p_{\text{вн}}$ и $p_{\text{сн}}$ – давления на оболочку изнутри её и снаружи, являющиеся функциями у-координаты текущей точки, МПа;

T_0 – удельное усилие растяжения в нижней точке оболочки, МН/м;

Рассматриваемые цилиндрические оболочки являются симметричными относительно вертикальной оси ОУ.

Поэтому:

– длины правой и левой половин оболочек равны, т.е. $L_{лев} = L_{прав} = \frac{L}{2}$;

– у самой верхней точки оболочки, разграничивающей правую и левую половины, координата x равна нулю, т.е.

$$x_{верх} = 0 \quad (18)$$

Это и есть уравнение замкнутости цилиндрической оболочки.

Уравнение гладкости оболочки выражается формулой (23):

$$\alpha_{верх} = 180^0 \quad (19)$$

Все рассмотренные в работе цилиндрические оболочки являются гладкими – на них нет точек излома. В связи с этим, что в конечных точках прямолинейного участка L_0 также нет изломов: в этих точках скачкообразно изменяется кривизна линии, т.е. прямая касается кривой. Условием отсутствия излома в сечении оболочки является горизонтальность касательной в её верхней точке. Это и есть уравнение гладкости цилиндрической оболочки.

Реализация предложенной методики осуществлялась в виде программы для ЭВМ по разработанным алгоритмам, представленным на рис. 5, 6.

Для подтверждения адекватности полученных математических зависимостей, а также выбора наиболее оптимальной конструкции гибкой оболочки был спланирован и проведен комплекс экспериментальных исследований, в процессе которого заполнялись водой три предложенных типа оболочки.

Физические модели оболочки были изготовлены из полиэтиленовой пленки в виде цилиндров с торцевыми стенками различной конфигурации (рис. 7). Заполнение оболочки производилось через шланг, выполненный из маслбензостойкого материала, сопряженный со стальным патрубком, вваренным в оболочку резервуара. Жидкость для заполнения оболочки отбиралась из металлической емкости посредством насоса.

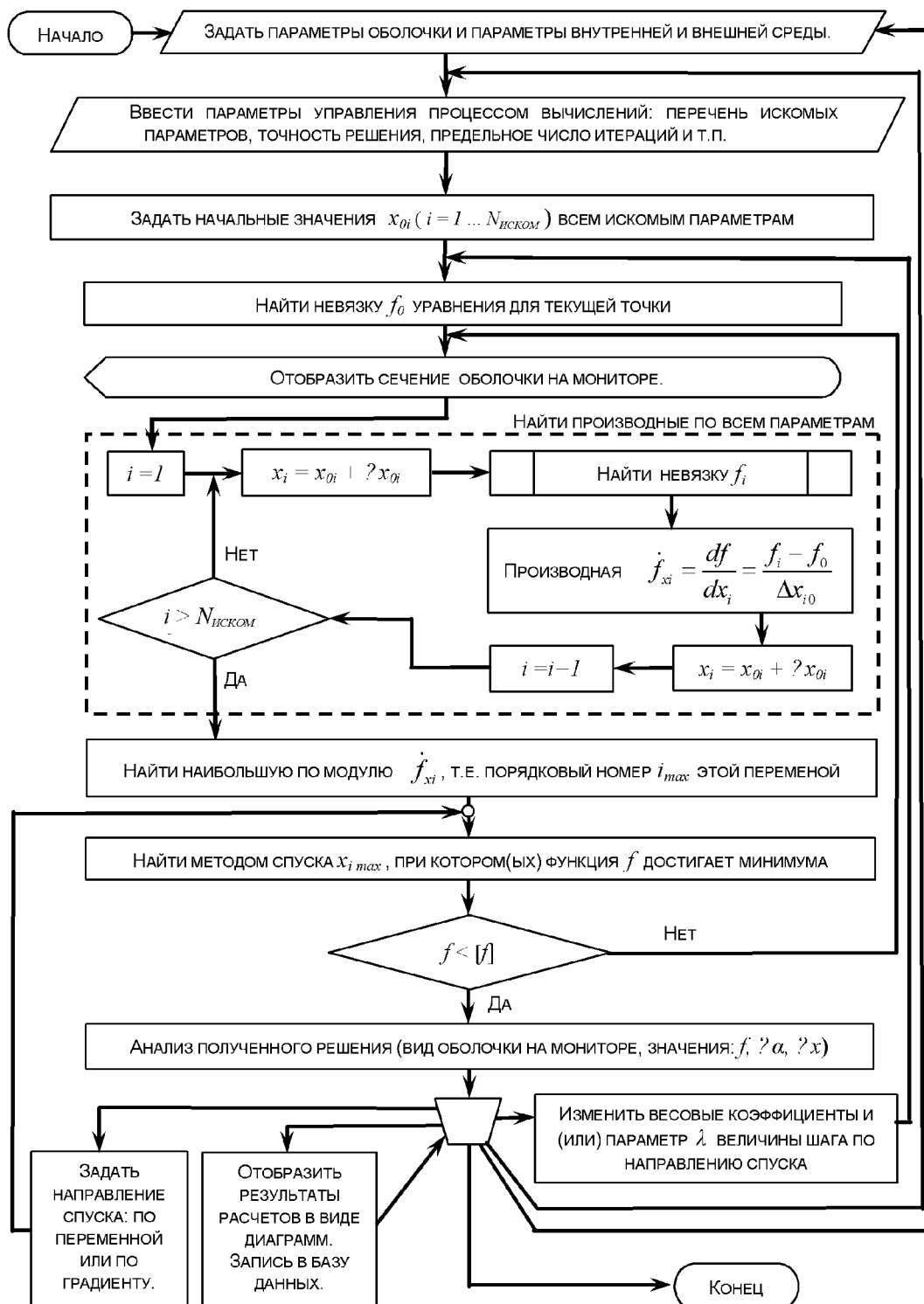


Рисунок 5. Алгоритм решения общего уравнения равновесия, неразрывности и гладкости оболочки релаксационным методом по координатного спуска

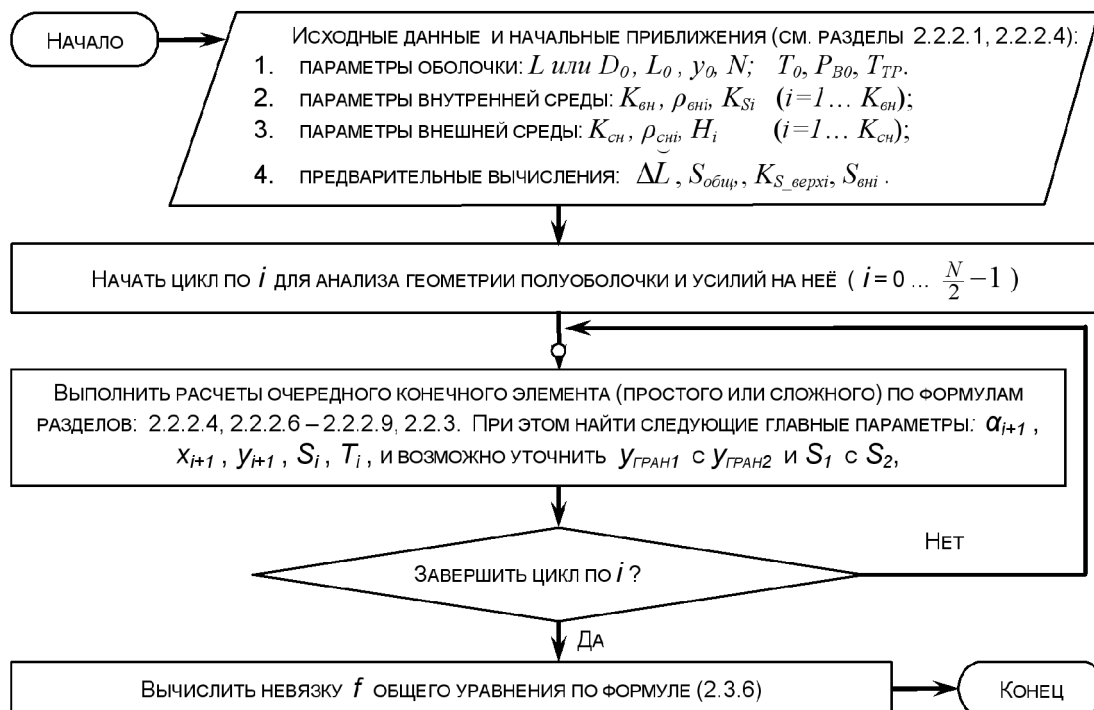


Рисунок 6. Алгоритм вычисления невязки общего уравнения равновесия, неразрывности и гладкости оболочки

Полученный при лабораторных испытаниях профиль оболочки наносился на профиль, полученный с использованием прикладной программы «Труба_гибкая». Сходимость экспериментальных и расчетных данных составляет порядка 93 %. Значения расчетных точек снимались с физической модели с помощью мерного штатива. Необходимо сказать, что все типы исследованных оболочек имеют (с учетом погрешности измерений) одинаковый профиль. Однако, наиболее перспективной для компоновки резервуара была признана оболочка с конусообразными торцевыми стенками. Это объясняется наличием минимального количества складок и смятий при заполнении и опорожнении оболочки, являющихся потенциальными местами скопления воздуха, наличие которого в оболочке с нефтью недопустимо.

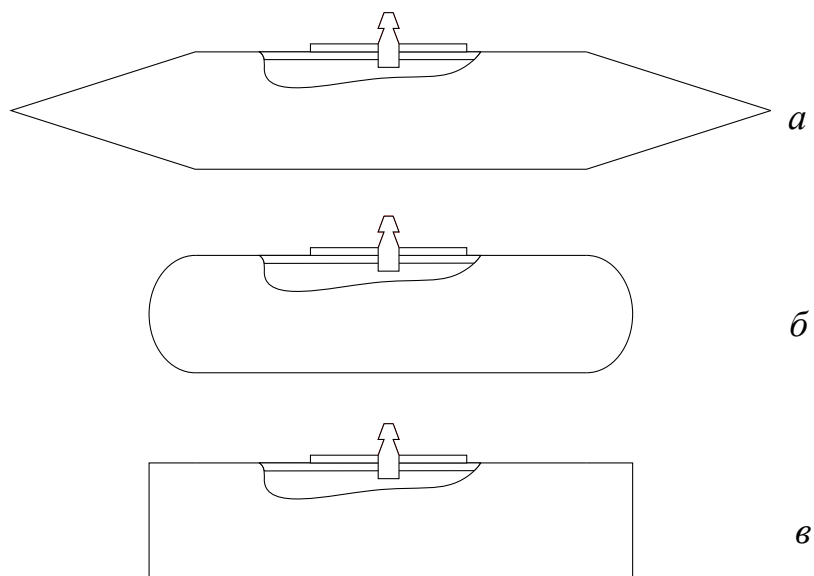


Рисунок 7. Схема физической модели
гибкой оболочки

- а – с конусообразными торцевыми стенками;
б – со сферическими торцевыми стенками;
в – с прямыми торцевыми стенками.

Обобщая результаты работы, можно отметить, что:

1. Разработана методика расчета для определения динамических нагрузок на гибкую оболочку с нефтью (нефтепродуктом).
2. Разработан алгоритм расчета нагрузок гибкую оболочку.
3. Разработанные методика и алгоритм положены в основу программы для определения нагрузок на гибкую нефтесодержащую оболочку и построения ее профиля. Программа позволяет определять профиль гибкой оболочки, содержащей до трех разнофазных сред внутри и трех разнофазных сред снаружи.
4. Применение программы позволяет оперативно оценивать состояние действующего резервуара, а также, на стадии проектирования, моделировать поведение основного рабочего органа – гибкой оболочки.
5. Спланирован и проведен комплекс экспериментальных исследований, результаты которого подтверждают адекватность уравнений разработанной методики.
6. Оформлены заявки на авторское свидетельство программы и методики расчета.