

**Ахмедов Гамал Махмудович, обучающийся второго курса магистратуры,
специальность - проектирование и эксплуатация оборудования нефтяных
и газовых месторождений**

УГНТУ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РВС ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТОДОМ ПОДМАЩИВАНИЯ

Аннотация

Вертикальные стальные резервуары относятся к числу наиболее критически важных сооружений нефтегазовой отрасли, поскольку используются для хранения нефти, нефтепродуктов и иных технологических жидкостей, их повреждение может привести к значительному материальному ущербу, авариям, загрязнению окружающей среды и угрозе безопасности персонала. Особую сложность представляет оценка напряженно-деформированного состояния РВС не только в эксплуатационной стадии, но и на промежуточных этапах строительства, когда конструкция еще не приобрела окончательную проектную жесткость. В статье рассматривается метод подмащивания, при котором сначала собираются верхние пояса, элементы опорного кольца и крыши, после чего смонтированная часть резервуара поднимается специальными подъемными устройствами для установки нижележащих поясов. Данный метод позволяет снизить объем высотных работ и уменьшить потребность в тяжелой грузоподъемной технике, однако одновременно формирует сложную временную расчетную схему. На стадии подъема возникают локальные реакции от подъемных устройств, возможна неравномерность подъема, появляются дополнительные изгибные напряжения, концентрации напряжений в зонах крепления монтажной оснастки и риск потери устойчивости тонкостенной оболочки. В статье обоснована необходимость применения конечно-элементного моделирования для анализа НДС РВС при строительстве методом подмащивания, поскольку традиционные нормативные расчеты в большей

степени ориентированы на эксплуатационное состояние готового резервуара и недостаточно подробно учитывают последовательность монтажа. Сделан вывод о необходимости оценки прочности и устойчивости РВС на каждом этапе подъема с учетом собственного веса, веса покрытия, ветрового воздействия, временных граничных условий, начальных геометрических несовершенств и неравномерной работы подъемных устройств.

Ключевые слова: метод подмащивания, тонкостенная оболочка, конечно-элементное моделирование, устойчивость стенки, монтажные нагрузки, неравномерность подъема.

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A VERTICAL STEEL TANK DURING CONSTRUCTION BY THE JACKING-UP METHOD

Annotation

Vertical steel storage tanks are among the most critical structures in the oil and gas industry, as they are used to store oil, petroleum products, and other process fluids. Damage to them can lead to significant property damage, accidents, environmental pollution, and personnel safety risks. Assessing the stress-strain state of vertical steel storage tanks is particularly challenging, not only during the operational phase but also during intermediate construction stages, when the structure has not yet achieved its final design rigidity. This article discusses a scaffolding method, which involves first assembling the upper chords, support ring elements, and roof, after which the assembled portion of the tank is lifted using specialized lifting devices to install the lower chords. This method reduces the amount of work at height and the need for heavy lifting equipment, but it also creates a complex temporary design scheme. During the lifting phase, localized reactions from the lifting devices occur, uneven lifting may occur, additional bending stresses arise, stress concentrations occur in the attachment areas of the mounting equipment, and the risk of loss of stability of the thin-walled shell. This article substantiates the need to use finite element modeling to analyze the stress-strain state of vertical steel tanks (VSTs) during scaffolding construction, as traditional standard calculations focus primarily on the operational condition of the

finished tank and do not sufficiently consider the installation sequence. It is concluded that it is necessary to assess the strength and stability of the VST at each stage of lifting, taking into account its own weight, the weight of the roof, wind effects, temporary boundary conditions, initial geometric imperfections, and uneven operation of the lifting devices.

Keywords: scaffolding method, thin-walled shell, finite element modeling, wall stability, installation loads, uneven lifting.

Введение

Вертикальные стальные резервуары рассматриваются как конструктивно-функциональные элементы, широко эксплуатируемые в нефтяной и нефтехимической отраслях, для которых функциональное назначение, заключающееся в накоплении и хранении жидкостей, сопряжено с конструктивной характеристикой тонкостенной оболочки, при которой эксплуатационная эффективность определяется совокупностью воздействий, включающих гидростатическое давление, собственный вес, ветровые и снеговые нагрузки, температурные воздействия, условия опирания, сварочные деформации, геометрические несовершенства и технологические факторы.

Актуальность исследования напряженно-деформированного состояния РВС при строительстве методом подмащивания обосновывается наличием этапов монтажных работ, в которые вовлекается конструкция в виде временных расчетных состояний, отличающихся от последующего эксплуатационного состояния. Вследствие чего формирование внутренних усилий и изменение граничных условий являются факторами, способствующими перераспределению нагрузок и усилению локальных деформаций. В готовой конструкции стенка, днище, крыша, уторный узел, кольца жесткости и фундамент образуют единую систему, функционирующую по проектной схеме, тогда как при осуществлении монтажа методом подмащивания указанная проектная схема модифицируется путем последовательной сборки верхней части с последующим подъемом и установкой нижележащих поясов, при которой характеризуются локальный

характер реакций подъемных устройств, временный характер опирания, неполнота жесткости корпуса и возможность работы элементов в режимах изгиба, перекоса и локального сжатия.

Традиционные методы расчета РВС в нормативной практике преимущественно направлены на проверку готовой конструкции в эксплуатационной стадии, однако порядок детального анализа напряженно-деформированного состояния на промежуточных стадиях подмащивания в данных документах не регламентирован (например, в СП 365.1325800.2017 отсутствуют указания по расчету на неравномерность подъема), что в наибольшей степени проявляется в аспекте учета технологических нагрузок, неравномерности подъема, временных граничных условий, начальных геометрических несовершенств, локальных напряжений в зонах крепления монтажной оснастки и риска потери устойчивости стенки, поэтому исследование напряженно-деформированного состояния РВС при строительстве методом подмащивания рассматривается как актуальная задача, направленная на повышение безопасности монтажных работ и обеспечение надежности резервуарных конструкций.

В настоящей статье осуществляется постановка задачи, представляющая собой проведение системного исследования особенностей формирования напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара в условиях возведения, осуществляемого методом подмащивания, а также представление обоснования необходимости применения метода конечно-элементного моделирования в качестве инструментальной методики для проведения оценки прочностных характеристик и параметров устойчивости конструктивной системы на промежуточных этапах монтажного процесса.

Анализ современных публикаций

Теоретическая основа исследования напряженно-деформированного состояния РВС представляется как совокупность положений теории тонкостенных оболочек и теории устойчивости деформируемых систем, при этом в работах В. З. Власова тонкостенные конструкции рассматриваются как

системы, поведение которых определяется не только прочностными характеристиками материала, но и геометрией элементов, условиями опирания, взаимодействием конструктивных элементов и природой приложенных нагрузок [1], что для вертикальных стальных резервуаров приобретает критическое значение ввиду формирования единой конструктивной системы, включающей стенку, днище, крышу и опорные кольца, следствием чего является необходимость исполнения расчета в объеме, выходящем за пределы определения толщины стенки по гидростатическому давлению и предусматривающем учет локальных изгибных напряжений, краевых эффектов и временных, в том числе монтажных, нагрузок.

А. С. Вольмир акцентировал высокую чувствительность тонкостенных конструкций к начальным несовершенствам формы и закрепления, что при применении метода подмащивания проявляется в особо острой форме ввиду того, что даже незначительные расхождения в ходе домкратов способны вызывать перекося оболочку, перераспределение внутренних усилий и увеличение напряжений, а при наличии овальности либо остаточных деформаций наблюдается возрастание риска потери устойчивости, вследствие чего проектная проработка монтажной стадии подлежит включению процедур прочностной проверки и анализа устойчивости оболочки.

В. В. Новожилов демонстрировал, что в оболочечных конструкциях даже при малой толщине стенки возникают сложные сочетания мембранных и изгибных напряжений [4], для РВС данное положение получает выражение в том, что в эксплуатационной стадии стенка воспринимает кольцевые растягивающие напряжения, обусловленные гидростатическим давлением, при этом в зонах сопряжения фиксируются локальные изгибные напряжения, а на стадии подмащивания роль локальных эффектов усиливается вследствие неравномерной передачи нагрузок от подъемных устройств.

В работах П. В. Чепура, А. А. Тарасенко, З. С. Кутруновой и др. осуществляется систематическое рассмотрение воздействия дефектов формы стенки на несущую способность вертикальных стальных резервуаров [12; 14],

при этом наблюдается изменение распределения напряжений и снижение запаса устойчивости оболочки, что является прямым следствием наличия геометрических несовершенств, вследствие чего обосновывается необходимость сочетания нормативных методов расчета с численным моделированием методом конечных элементов, поскольку аналитические зависимости, как правило опирающиеся на идеализированную геометрию, не обеспечивают адекватного учета реальных дефектов.

В работах Ф. Ш. Забирова, М. Ю. Праховой и С. С. Хайрудиновой акцентируется значимость применения численных методов при расчете резервуарных конструкций, что обусловлено необходимостью анализа монтажных состояний РВС, поскольку метод конечных элементов обеспечивает учет реальной геометрии резервуара, переменной толщины поясов, конфигурации крыши, опорного кольца, временного опирания, собственного веса, ветрового воздействия, локальных реакций подъемных устройств и последовательности сборки, а также предоставляет возможность определения распределения эквивалентных напряжений, радиальных и вертикальных перемещений, зон концентрации усилий и участков, представляющих опасность с точки зрения устойчивости в отличие от укрупненных расчетных схем.

Нормативная база предполагает комплексный подход к оценке РВС, при этом ГОСТ 31385-2023 устанавливает требования к вертикальным цилиндрическим стальным резервуарам для нефти и нефтепродуктов, включая проектирование, изготовление, монтаж и испытания [3], СП 16.13330.2017 регламентирует порядок расчетов стальных конструкций по прочности и устойчивости [7], СП 20.13330.2016 определяет порядок назначения нагрузок и воздействий [8], а СП 365.1325800.2017 содержит положения по проектированию и монтажу стальных резервуарных конструкций [9], однако указанные документы не предлагают исчерпывающую методику расчета НДС РВС на всех промежуточных стадиях подмачивания, что обуславливает актуальность применения уточненных расчетных моделей и численного анализа.

Вертикальный стальной резервуар, возводимый методом подмащивания, подлежит рассмотрению как тонкостенная цилиндрическая оболочка, функционирование которой сопровождается поэтапным изменением расчетной схемы и что обуславливает необходимость учета эволюции статического состояния конструкции при проведении расчетов. В противоположность традиционной полистовой сборке, при которой нижний пояс устанавливается первичным, а последующая последовательность монтажа реализуется снизу вверх посредством наложения вышележащих поясов, при подмащивании практикуется предварительная сборка верхнего пояса совместно с элементами крыши и опорного кольца, после чего осуществляется поднятие собранной секции и под ней производится установка нижележащих поясов, что обеспечивает сокращение объема работ на высоте, упрощение доступа к сварным соединениям и уменьшение потребности в применении тяжелых крановых механизмов. Одновременно отмечается усложнение расчетных задач, поскольку тонкие верхние пояса, воспринимающие меньшие гидростатические нагрузки, первыми вовлекаются в работу и принимают на себя массу крыши, опорного кольца, временной оснастки и реакции подъемных устройств, что детерминирует необходимость учета перераспределения усилий и изменения напряженно-деформированного состояния конструкции.

Критериальная характеристика наиболее опасных факторов при возведении РВС методом подмащивания сформулирована через три взаимосвязанных основания риска, а именно через локальность приложения нагрузок, неравномерность подъема и неполную пространственную жесткость монтажной системы, которые рассматриваются как детерминанты появления аварийных механизмов. В условиях синхронной работы подъемных устройств предполагается относительная равномерность распределения нагрузок по периметру, однако на практике регистрируются отклонения, обусловленные различиями скоростей домкратов, неточностью настройки гидравлической системы, неодинаковой жесткостью временных стоек, монтажными погрешностями и воздействием ветровых нагрузок, при этом даже небольшая

неравномерность подъема может вызвать перекос верхней секции, что получает выражение в появлении дополнительных меридиональных и кольцевых напряжений, локальном изгибе стенки и концентрации нагрузок в отдельных зонах крепления оснастки. При неблагоприятном сочетании указанных факторов наблюдается вероятность образования местных вмятин, волн, хлопунгов и утраты устойчивости отдельных участков стенки.

Зона крепления подъемных устройств выделяется как область, требующая специального внимания при проектировании и расчете, поскольку в идеализированных моделях вес поднимаемой части резервуара рассматривается как равномерно распределенная нагрузка, тогда как в реальных условиях передача усилий осуществляется через ограниченное число точек, что порождает концентрации напряжений в местах установки монтажных элементов. При недостаточной жесткости стенки указанные зоны могут стать критическими по критериям прочности и устойчивости, что обосновывает необходимость включения в расчет не только суммарной массы конструкции, но и фактической схемы передачи усилий от подъемных устройств к стенке и опорам, а также учета локальных деформаций и перераспределений напряжений.

При проведении аналитической проработки НДС РВС на стадии подмащивания подлежит выделению совокупность технологических этапов монтажа, каждый из которых определяет специфическую конфигурацию нагрузки и характер реакций конструктивных узлов, при этом на первом этапе реализуется операция сборки верхнего пояса, опорного кольца и кровли, при завершении которой конструкция приобретает способность воспринимать собственный вес покрытия и наблюдается исходный уровень распределения вертикальных нагрузок, на втором этапе осуществляется подъем ранее собранной верхней части с целью создания условия для установки нижележащего пояса, при этом в расчетном выражении выявляются локальные реакции подъемных устройств и может проявляться неравномерность подъема с соответствующими локализованными градиентами напряжений, на третьем этапе происходит установка и сварочная стыковка нового пояса с последующей

частичной перераспределенностью воспринимаемых нагрузок по элементам оболочки, и на последующих технологических ступенях регистрируется постепенное увеличение массы поднимаемой конструкции с вытекающим изменением уровня напряженности и характера деформационных проявлений конструкции.

Для обеспечения достоверности расчетных значений при выполнении расчета НДС следует применять методику конечно-элементного моделирования, при которой целесообразно использовать оболочечные конечные элементы ввиду соотношения геометрических параметров конструкции и малой толщины стенки, днища и крыши РВС, причем геометрическая модель обязана включать параметры диаметра резервуара, высоты стенки, количественной и толщинной характеристик поясов, наличия крыши и опорного кольца, наличие временных элементов и локализацию точек приложения усилий со стороны подъемных устройств, а материал стенки подлежит заданию через совокупность параметров, включающую модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, предел текучести и расчетное сопротивление стали, при этом в случае необходимости в модели вводятся начальные геометрические несовершенства в пределах нормативных допусков с целью учета влияния исходной отклоненности на распределение напряжений.

Назначение граничных условий рассматривается как фактор существенного влияния на адекватность моделирования, поскольку на эксплуатационной стадии нижняя часть резервуара взаимодействует с основанием, тогда как в монтажном режиме часть конструктивной системы может находиться во временном положении, в связи с чем в расчетной модели требуется поэтапное задание условий опирания с фиксацией временных закреплений в зонах приложения подъемных устройств, с учетом контакта с нижележащим поясом, с учетом частичной передачи нагрузки на днище и с введением ограничений радиальных либо вертикальных перемещений в пределах, соответствующих рассматриваемой фазе монтажа, при несоблюдении поэтапности задания граничных условий, в частности при использовании

условий, характерных для готового резервуара, наблюдается искажение представления монтажного состояния и возможное занижение локальных напряжений в расчетных результатах.

В расчетной модели осуществляется комплексный учет собственного веса стенки, крыши и опорного кольца, а также включается учет временной монтажной оснастки, реакций подъемных устройств, ветрового воздействия и неравномерности подъема, при этом ветровая нагрузка для незаполненного резервуара является критическим фактором потери устойчивости ввиду повышенной уязвимости тонкостенной оболочки к потере устойчивости. Моделирование неравномерности подъема производится посредством задания вертикальных перемещений в точках подъема или посредством задания распределения реакций между подъемными устройствами, что предоставляет возможность выявления уровней рассогласования перемещений, приводящих к формированию опасных зон напряжений и деформаций.

Критериями оценки расчетных результатов выступают эквивалентные напряжения по Мизесу, максимальные перемещения, радиальные отклонения стенки, локальные деформации в зонах крепления подъемных устройств и запас устойчивости оболочки, при этом напряжения сопоставляются с нормативно допустимыми значениями, а деформации – с требованиями к геометрической точности и монтажным допускам. Опасность при этом наблюдается не только в случаях превышения расчетного сопротивления стали, но и при приближении к критической форме потери устойчивости, которая для тонкостенной оболочки может реализовываться при уровнях напряжений, лежащих ниже предела текучести, что требует отдельного расчета на устойчивость, а не только проверки прочности по напряжениям, вследствие чего односторонняя проверка прочности признается недостаточной.

Практическая значимость исследования проявляется в обосновании безопасной схемы строительства РВС методом подмащивания, при этом по результатам расчета предоставляется возможность определения оптимального количества и расположения подъемных устройств, установления предельных

значений допустимой неравномерности подъема, обоснования необходимости временного усиления стенки, формулирования требований к контролю геометрии и регламента последовательности монтажных операций. В случаях концентрации напряжений в зонах крепления домкратов может быть обоснована рекомендация по установке дополнительных ребер или по изменению схемы крепления при сохранении исходной логики оценки безопасности. При повышенной чувствительности конструкции к перекосу рекомендуется усиление контроля синхронности подъема и ограничение разницы вертикальных перемещений между соседними точками, что рассматривается как мера по снижению риска возникновения опасных зон напряжений и деформаций.

В результате исследования напряженно-деформированного состояния РВС при осуществлении строительных работ методом подмащивания происходит переход от общего описания к расчетному обоснованию безопасности конструкции, при котором на уровне методологического анализа и нормативно-технической аргументации определяется необходимость количественного обеспечения показателей прочности и устойчивости стенки резервуара в условиях воздействия эксплуатационно-монтажных нагрузок. Метод подмащивания рассматривается как организационно-технологическая мера, характеризующаяся снижением объема высотных работ и уменьшением потребности в тяжелой технике, при этом применение указанного метода обуславливает требование осуществления расчетов временных монтажных состояний, поскольку в отсутствие таких расчетов исключается возможность достоверной оценки влияния локальных подъемных нагрузок, перекосов, начальных несовершенств и неполной жесткости конструкции на прочность и устойчивость стенки резервуара.

Выводы

Выполняемое исследование демонстрирует, что вертикальный стальной резервуар, сооруженный методом подмащивания, рассматривается как тонкостенная оболочка, для которой напряженно-деформированное состояние, регистрируемое в монтажной стадии, качественно отличается от напряженно-

деформированного состояния, характерного для эксплуатационной стадии, при этом в пределах данной смысловой связи на стадии монтажа критически значимыми детерминантами выступают собственная масса поднимаемой части, масса крыши, масса опорного кольца, локальные реакции подъемных устройств, временные условия производства работ, ветровое воздействие, начальные геометрические несовершенства и неравномерность подъема.

Метод подмащивания характеризуется преимуществами, проявляющимися в сокращении объема высотных работ и в уменьшении потребности в тяжелой технике, в то же время формирование сложных расчетных схем в рассматриваемом технологическом режиме обусловлено тем, что верхние пояса резервуара, которые в эксплуатационных условиях имеют пониженные уровни нагружения, в монтажной последовательности первыми воспринимают монтажные нагрузки от крыши и подъемных устройств, что, с учетом специфики рассматриваемого явления, предопределяет необходимость комплексной оценки прочностных и устойчивостных параметров конструкции на каждом этапе подъема.

Анализ публикационной информации показывает, что традиционные расчетные подходы к РВС преимущественно ориентированы на эксплуатационную стадию и не всегда обеспечивают адекватный учет технологической последовательности подмащивания, вследствие чего для исследования напряженно-деформированного состояния резервуара представляется целесообразным применение метода конечных элементов, позволяющего моделировать поэтапную сборку, локальные нагрузки, временные закрепления, неравномерность подъема и начальные геометрические несовершенства в рассматриваемой системе.

В качестве основных расчетных показателей при оценке НДС РВС представляют собой эквивалентные напряжения, радиальные и вертикальные перемещения, локальные деформации в зонах крепления подъемных устройств и запас устойчивости оболочки. Особое внимание подлежит сосредоточению на зонах концентрации напряжений, на участках, характеризующихся начальными

несовершенствами, на сварных соединениях и на местах передачи усилий от монтажной оснастки, поскольку в указанных элементах наблюдается повышенная вероятность формирования критических концентраций напряжений.

Исследование обосновывает необходимость осуществления расчетного сопровождения строительства РВС методом подмащивания. При использовании конечно-элементной модели осуществляется уточнение расстановки подъемных устройств, определяется допустимая неравномерность подъема, выявляются опасные зоны напряжений и разрабатываются рекомендации по снижению риска потери устойчивости стенки, при этом наблюдается повышение надежности резервуарных конструкций, снижение вероятности монтажных дефектов и обеспечение промышленной безопасности в процессе строительства.

Список литературы

1. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. — Москва ; Ленинград : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. — 784 с.
2. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем. — Москва : Наука, 1967. — 984 с.
3. ГОСТ 31385-2023. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия.
4. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. — Ленинград : Судпромгиз, 1962.
5. Коновалов П. А. Основания и фундаменты резервуаров. — Москва : Недра, 1989.
6. Забиров Ф. Ш. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния резервуарных конструкций // Нефтегазовое дело. — 2018.
7. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*.

8. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.
9. СП 365.1325800.2017. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила производства и приемки работ при монтаже.
10. Прахова М. Ю., Хайрудинова С. С. Расчет и моделирование напряженно-деформированного состояния резервуаров вертикальных стальных // Нефтегазовое дело. — 2020.
11. Тарасенко А. А., Чепур П. В. Особенности оценки технического состояния вертикальных стальных резервуаров с дефектами формы стенки // Промышленное и гражданское строительство. — 2016.
12. Чепур П. В., Тарасенко А. А., Кутрунова З. С., Тарасенко М. А., Колядко А. А. Оценка несущей способности резервуара с дефектами формы стенки методом конечных элементов // Нефтегазовое дело. — 2017.
13. Балух Л. И. Расчет тонкостенных оболочек. — Москва : Машиностроение, 1977.
14. API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute.
15. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. ANSYS Inc.