

Различные аспекты учета давления жидкости и газа в задачах статики гибких стержней

© Н.Т. Овчинников

ООО «Симойл», Москва, 125371, Россия

Стержневые объекты в ряде практических применений нагружены давлением жидкостей и газов. Работа таких объектов исследуется в большом количестве публикаций, в части которых, несмотря на полную изученность вопроса, встречаются неправомерные положения. Так, в уравнения равновесия трубопровода часто включают осевое усилие вместо эквивалентного усилия, что снижает точность оценки формы изгиба и действующих напряжений. Проблемность учета давления объективно обусловлена более сложным видом этого нагружения в сравнении с весом, а также недостаточным распространением в инженерной среде известных положений. В обзорно-методической статье рассмотрен комплекс вопросов, связанных с нагружением стержня давлением. Получены векторные и линейаризованные уравнения равновесия стержня с учетом нагрузки от давления на поверхность. Обоснована эквивалентность нагружения стержня давлением и весовой нагрузкой, определяемой законом Архимеда. Приведены положения по учету давления при исследовании равновесия, устойчивости, деформирования и прочности стержня. В качестве примера показано влияние давления в задачах укладки трубопровода на морское дно и оценки продольной устойчивости стержня.

Ключевые слова: *стержень, трубопровод, колонна, давление, эквивалентное нагружение, равновесие, устойчивость, деформирование, прочность, закон Архимеда*

Введение. При работе ряда стержневых объектов реализуются сложные и разнообразные условия нагружения давлением жидкостей и газов. В технологических процессах бурения и эксплуатации нефтегазовых скважин применяют бурильные, обсадные, насосно-компрессорные (лифтовые) и штанговые колонны. Трубопроводы различного назначения находятся под давлением транспортируемого продукта, а на пересечении водных преград на трубопровод действует также и наружное давление.

Существующая неоднозначность в учете действия давления стала причиной подготовки обзорной публикации с изложением концепции по данному вопросу. Статья ориентирована на отечественную аудиторию, за рубежом учету влияния давления посвящен ряд статей, из которых ясен факт как проработанности вопроса, так и его проблемности.

Цель работы — показать, каким образом давление жидкости и/или газа влияет на равновесие и параметры состояния гибкого стержня, подтвердить необходимость применения уравнений равновесия с эквивалентными характеристиками стержня — эквивалентным весом единицы длины и эквивалентным осевым усилием.

Учет влияния давления в различных работах. Влияние давления на равновесие и устойчивость стержневых объектов различного назначения рассматривается в ряде работ. Поскольку в задачи данной статьи не входит подготовка полного ретроспективного обзора, отметим отдельные работы, подтверждающие приведенные в статье положения.

В работах [1, 2] применены уравнения равновесия трубопровода с эквивалентным продольным (осевым) усилием при действии внутреннего давления. Для обозначения усилия в [2, с. 221] используется также термин «полное продольное усилие».

В работе [3, § 5] при выводе уравнений равновесия стержня с движущейся жидкостью рассматривают элемент стержня и элемент жидкости в нем, что позволяет получить внутреннюю нагрузку от действия давления (формула (5.1)) и эквивалентное осевое усилие, называемое полным осевым усилием в стержне (формула (5.7)).

В работе [4] применяются уравнения равновесия с эквивалентным осевым усилием при наличии внутреннего давления.

Проблема двойственности вида применяемых уравнений равновесия трубопровода, учитывающих как осевое, так и эквивалентное осевое усилие, отмечена в статье [5].

В монографии [6] плотность материала бурильной и обсадной колонн уменьшается на значение плотности жидкости. В книге [7] используется понятие «плавучесть трубопровода», учитывающее уменьшение веса единицы длины трубопровода в жидкости. Применяемые подходы означают использование эквивалентного нагружения стержневых объектов.

В работе [8] эквивалентными предложено считать силы, работа которых одинакова на любом возможном перемещении точек тела. Сделан вывод, что при изучении изгиба стержня давление на поверхность можно заменить объемными «архимедовыми» силами.

В книге [9] исследуется равновесие стержня в жидкости (см. также [10, задача 118]). Результаты нагружения с «детальным учетом внешних сил» и с применением «архимедовой силы» совпадают.

В учебном пособии [10, задача 121] показана возможность потери продольной устойчивости трубчатого стержня под действием внутреннего давления жидкости, создаваемого нагружением поршневой пробки без передачи усилия на стержень.

В статье [11] на основе анализа энергетического состояния объекта колонна — жидкость делается вывод, что колонна теряет устойчивость, если плотность жидкости превышает плотность материала колонны. К такому же выводу приходят авторы работы [12].

Выражение для нагрузки от действия давления приведено в книге [13, с. 121] при решении задачи о потере устойчивости стержня с жидкостью при нагружении через поршень.

В эксперименте из работы [14] стержень с жидкостью, закрытый поршневыми заглушками, теряет устойчивость при действии на заглушки усилия, при котором под нагрузкой теряет устойчивость стержень.

В статье [15] получена распределенная по длине нагрузка на стержень от действия давления. Изменение давления в пределах элемента стержня не учтено вследствие его малости, что приводит к потере одной из составляющих нагрузки давления, учитывающей градиент давления.

Нагрузка от действия давления в статье [16] получена интегрированием давления по поверхности изогнутого трубного элемента.

В работе [17, формула (11.7)] рассматривается равновесие участка трубопровода при изгибе с учетом нагрузки от действия давления.

В лифтовых колоннах в процессе эксплуатации скважин штанговыми насосами при ходе плунжера вверх вес столба жидкости в колонне воспринимается плунжером, и колонна под воздействием гидростатического давления на внутреннюю боковую поверхность может потерять продольную устойчивость. В работах [18, 19] при анализе изгиба учитывается составляющая (fictitious force) эквивалентного осевого усилия от действия давления. Для объяснения причин изгиба рассматривается трубчатый стержень с заглушками в виде соединенных стержнем поршней.

Потеря устойчивости зафиксированного на границах трубопровода при внутреннем давлении получена экспериментально на модели в [20].

Необходимость применения эффективного осевого усилия effective axial force (в данной статье — эквивалентное осевое усилие) показана в работах [21–27], содержащих примеры практических расчетов.

В работе [28] уточняется необходимость учета закрепления границ стержневых объектов при изменении условий нагружения давлением.

Вопрос эквивалентности нагружения колонны труб давлением жидкости и объемными силами в различных задачах исследовался в работах [29, 30]. Векторные уравнения равновесия стержня с эквивалентными характеристиками и соответствующие линеаризованные уравнения получены и применены при решении прикладных задач в [31], в частности, в расчете центрирования обсадных колонн при цементировании с учетом положения цементного раствора и продавленной жидкости в колонне и кольцевом пространстве.

Для описания состояния стержня применяем термины «нагрузка от действия давления», «эквивалентное осевое усилие», «эквивалентный вес единицы длины», «эквивалентная плотность материала», «эквивалентное нагружение», «объемные выталкивающие силы».