
КАПЛЕВИДНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ В АРХИТЕКТУРЕ ЗДАНИЙ, РЕЗЕРВУАРОВ И ИЗДЕЛИЙ

С.Н. Кривошапко, И.А. Мамиева

Кафедра прочности материалов и конструкций
Российский университет дружбы народов
ул. Орджоникидзе, 3, Москва, Россия, 115419

В обзорной статье обобщены все известные на сегодняшний день материалы по расчету каплевидных оболочек на прочность, устойчивость и применению их в строительстве и технике. Обширный библиографический материал даст возможность наметить пути дальнейших исследований в этой области.

Ключевые слова: каплевидные сооружения, каплевидные резервуары, прочность, применение каплевидных поверхностей.

Природа сама создает рациональные с точки зрения прочности конструкций формы. Примерами могут служить формы раковин моллюсков, скелетов морских ежей и др. Одна из совершенных природных форм — скорлупа яйца. В качестве математической модели каплевидных оболочек принимается форма капли жидкости, спокойно лежащей на плоскости (рис. 1). Срединные поверхности этой группы оболочек относятся к классу поверхностей вращения.

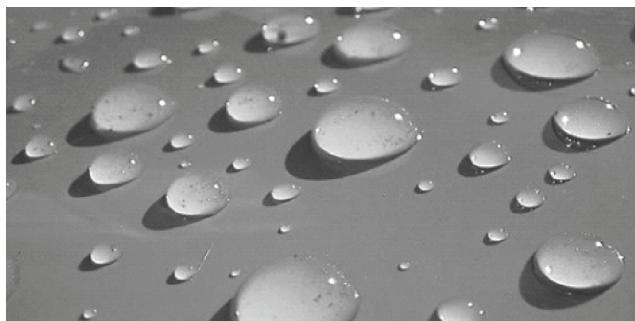


Рис. 1. Капли жидкости на горизонтальной плоскости

В середине XX в. в основу выбора формы каплевидного резервуара для жидкости положено условие равнопрочности оболочки, т.е. геометрия оболочки выбрана таким образом, чтобы под воздействием основной расчетной нагрузки p в меридиональном и кольцевом направлениях растягивающие усилия N_0 были равны между собой и постоянны. Значение расчетной нагрузки записывается в виде [1]

$$p = \gamma(h + z) = p_0 + \gamma z,$$

где γ — плотность жидкости; h — высота расчетного столба жидкости; $p_0 = h\gamma$ — избыточное давление в резервуаре; z — расстояние по вертикали от вершины до рассматриваемой точки оболочки.

Вследствие симметрии нагрузки форма резервуара будет телом вращения. Тогда первые два уравнения равновесия безмоментной теории оболочек удовлетворяются тождественно, а третье уравнение равновесия примет вид

$$(1/R_1 + 1/R_2)N_0 = p_0 + z\gamma, \quad (1)$$

используя его, можно получить [2] два нелинейных однородных обыкновенных дифференциальных уравнения для нахождения формы меридиана оболочки верхней и нижней частей резервуара каплевидной формы. Эти два уравнения могут быть проинтегрированы лишь приближенно. Форма резервуара совпадает с формой покоящейся капли (см. рис. 1). Ввиду этого полученные уравнения по существу являются уравнениями теории капиллярности [3]. Уравнение (1) было получено Лапласом.

Графоаналитический метод определения формы капли предложил Кельвин. Описание метода дано в книге [2]. Понижение сверхдавления p_0 в верхней точке резервуара ведет к уменьшению его высоты по сравнению с шириной. Сверхдавление в верхней части резервуара каплевидной формы должно поддерживаться постоянным и равным расчетному, так как в противном случае на нем могут появиться складки [2]. В справочнике [4] приведены эпюры меридиональных и кольцевых усилий в каплевидной оболочке с опорным кольцом и с экваториальной опорой. В работах Г.М. Чичко [4; 5] подробно изложена теория расчета каплевидных резервуаров.

Первые испытания каплевидных резервуаров проведены в США в 1936 г. [6]. В 1944 г. институт Гидроспецнефть впервые в практике СССР разработал проект каплевидного резервуара объемом 2000 м³ (авторы проекта С.И. Верёвкин и Г.М. Чичко [4]). По этому проекту в 1947 г. в г. Грозном был построен первый каплевидный резервуар. Принцип работы такого резервуара и процесс сборки сварного резервуара описаны в статье С.И. Верёвкина [7]. Монтаж резервуара проводила бригада в составе 14 человек. Г.М. Чичко [4], занимавшийся выбором системы опирания каплевидных оболочек, считает, что каркас резервуара не принимает заметного участия в работе оболочки. В 1948 г. этими же авторами был разработан новый проект облегченной конструкции, по которому в 1951—1953 гг. под Москвой построены четыре резервуара объемом 2000 м³ каждый с опорным кольцом. Один из этих резервуаров был испытан ВНИИСтройнефть в 1953 г. Результаты испытаний подтвердили выводы Г.М. Чичко. Подробное описание конструкции испытанного резервуара и результаты его экспериментального исследования приведены в работах [8; 9]. Исследованиями, проведенными в СССР [9], установлено, что потери нефтепродуктов в каплевидных резервуарах значительно меньше, чем в вертикальных цилиндрических. Их преимущества проявляются особенно при длительном хранении жидкости.

При внутреннем избыточном давлении эта оболочка только работает на расширение, т.е. в самых выгодных для стали условиях. Этим обеспечивается применение минимально тонких оболочек. Недостатком этого резервуара является то, что в условиях отрицательного давления (вакуума), возникающего при сливе жидкости, сейсмических нагрузках и снижении температуры, работа оболочки каплевидного резервуара резко ухудшается, т.е. при преобладании внешнего дав-

ления тонкая оболочка теряет устойчивость. Каплевидный резервуар, предложенный авторами изобретения [10], включает металлическую оболочку из соединенных между собой сегментных листов, обращенных выпуклостью наружу, и отличается тем, что с целью повышения сейсмостойкости он снабжен не менее чем двумя расположенными с внутренней его стороны по спирали затяжками и втулками, каждая из которых на внутренней поверхности в средней части имеет сужение и расположена в месте сопряжения листов, причем затяжки пропущены через втулки и имеют в местах пропуска опрессованные клиновидные обоймы.

В 1950-е гг. широкое распространение в США и Канаде получило строительство каплевидных резервуаров для воды, входящих в конструкцию водонапорных башен (рис. 2). Их достоинство в совершенной статической форме, минимальной поверхности ограждающих конструкций, а также в относительной простоте изготовления.

В технических сооружениях типа каплевидных резервуаров форма капли функционально целесообразна, но, по мнению И.Г. Гохарь-Хармандаряна, в гражданских сооружениях применение этих форм будет не всегда оправданно. Однако имеются примеры, где форма капли, лежащая в основе формообразования оболочки покрытия общественных зданий, дает поразительный эффект. Например, огромная капля из титана и стекла покоится посреди неглубокого пруда (рис. 3).



Рис. 2. Водонапорная башня, Канада [11]

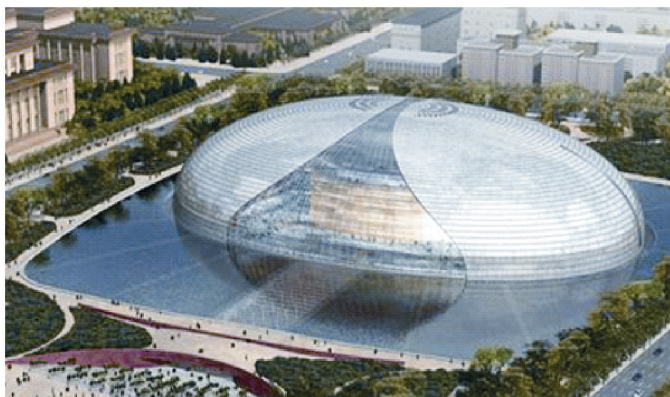


Рис. 3. «Капля» цвета металл, комплекс Большого народного театра — новый символ Китая [12]

Необычный гигантский комплекс Большого народного театра, успевший стать новым символом Китая, спроектировал известный французский архитектор Поль Андрё. Принятая форма воспринимается абсолютно ненавязчиво и гармонирует со старыми зданиями, становится интересным и выигрышным фоном. По сумме зрительских мест Большой народный театр Пекина уже признан самым крупным культурным комплексом в мире: в длину здание театра достигает 212 м, в ширину 143 м, в высоту 46 м.

Проект Группы АБВ, 8-этажное здание «Галактика», скрывающее транспортную развязку железнодорожных путей, напоминает лежащую каплю, обдуваемую воздушным потоком (рис. 4). В 2010 г. здание «зависнет» над землей на пересечении Мичуринского проспекта и улицы Лобачевского.



Рис. 4. Проект 8-этажного здания «Галактика», Москва

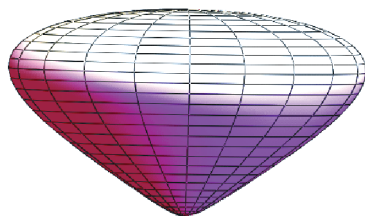


Рис. 5. Всплывающая пневмочемкость (Piriform surface)

Наполнение — трехуровневая парковка, торговые точки, гостиница и офисы. С соседними микрорайонами «Галактику» свяжет пешеходный мост, идущий от первого торгового этажа.

Форма капли лежала в основе проекта здания главного испытательного стенда Всесоюзного электротехнического института в г. Истра Московской области. Возведенное сооружение имело диаметр 234 м и высоту 112 м. Экватор сооружения располагался на 23 м выше отметки пола. Здание главного испытательного центра ВЭИ сразу после возведения в 1984 г. разрушилось.

Первый числовой расчет безмоментного каплевидного резервуара провели Ж. Рунге и Х. Кениг [13]. Описание рациональных форм каплевидных оболочек приведено также в работах К.М. Хуберяна [14] и М.К. Сафаряна [8; 15]. Статическая работа каплевидной оболочки на несколько видов нагрузок рассмотрена в статье [16]. Приведены основные зависимости теории оболочек вращения применительно к методу конечных элементов (МКЭ). Поведение каплевидной оболочки под действием симметричного давления изучается в работе [17]. В этой статье резервуар каплевидной формы моделируется тонкостенной однородной оболочкой вращения. Расчет выполнен на основе безмоментной теории оболочек. Полученные результаты сравниваются с результатами более точного анализа, основанного на уравнениях моментной теории оболочек. Отмечено, что использование безмоментной теории вполне приемлемо.

Статья [18] содержит приближенные методы интегрирования нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка, описывающей форму меридиана безмоментной оболочки вращения равного сопротивления (каплевидной оболочки) в условиях внутреннего гидростатического давления. В ней изложен аналитический подход, использующий допущение о слабой изменяемости нелинейного слагаемого в расчетном интервале. Численные результаты основаны на различных разностных аппроксимациях исходной задачи. Те же авторы в статье [19] на основе сравнения результатов расчета формы подобных оболочек с помощью трех численных методов показали, что модифицированный метод Эйлера требует для вычислений меньших затрат машинного времени.

И.Б. Друзь [20] приводит расчетные формулы и графики, с помощью которых можно исследовать осесимметричные мягкие емкости, лежащие на плоской горизонтальной поверхности, заполненные жидкостью без учета веса оболочки, а также воздухом с учетом веса оболочки, равномерно распределенной по ее поверхности.

В статье [21] составлен алгоритм расчета бака при несимметричном нагружении. Оценка нормальных и касательных сил, вызванных действием системы несимметричных нагрузок, достигается применением рядов Фурье. Рассмотрена каплевидная форма бака в целом. Для учета влияния отверстий на деформации и напряжения необходимо разработать дополнительный алгоритм, основанный на МКЭ. Новая форма дифференциальных уравнений, позволяющая упростить расчет геометрии бака каплевидной формы, предложена в работе [22]. С помощью МКЭ изучено влияние гидростатической нагрузки на распределение напряжений.

Возможность применения каплевидных резервуаров в подводных сооружениях обсуждается в статьях [23; 24], причем в статье [23] описаны экспериментальные и теоретические исследования оптимальных форм подводных хранилищ, для которых прототипом основных геометрических параметров была выбрана форма морского ежа. Проведенные по безмоментной теории расчеты показали рациональность оболочек такой формы, а экспериментальные исследования подтвердили основные выводы.

И.Б. Друзь [25] рассматривает осесимметричные пневмоёмкости, предназначенные для подъема грузов на поверхность воды (рис. 5). Такая ёмкость имеет три режима работы: статический подводный, динамический при подъеме и статический при плавании на поверхности воды. Распределение усилий по оболочке ёмкости во всех режимах разное, поэтому параметры ёмкости меняются. Для всех трех режимов работы ёмкости построены расчетные графики, по которым можно определить ее параметры. Каплевидная ёмкость может быть заполнена сжатым газом или жидкостью, более легкой, чем жидкость, в которой она находится. И.Б. Друзь показал, что параметры всплывающей ёмкости изменяются благодаря изменению нагрузки на оболочку. Высота ёмкости уменьшается, ширина и объем ее увеличиваются, а напряжения в ней фактически не изменяются.

Впервые обзорная информация о методах расчета каплевидных оболочек была приведена в статье [26], затем появилась информация о реальных сооружениях в форме этих оболочек [27].

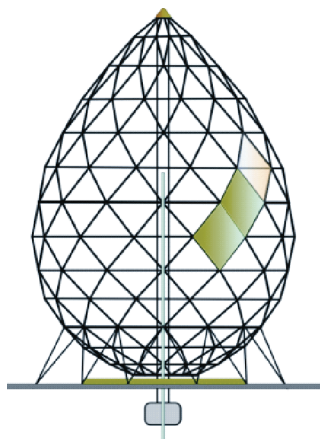


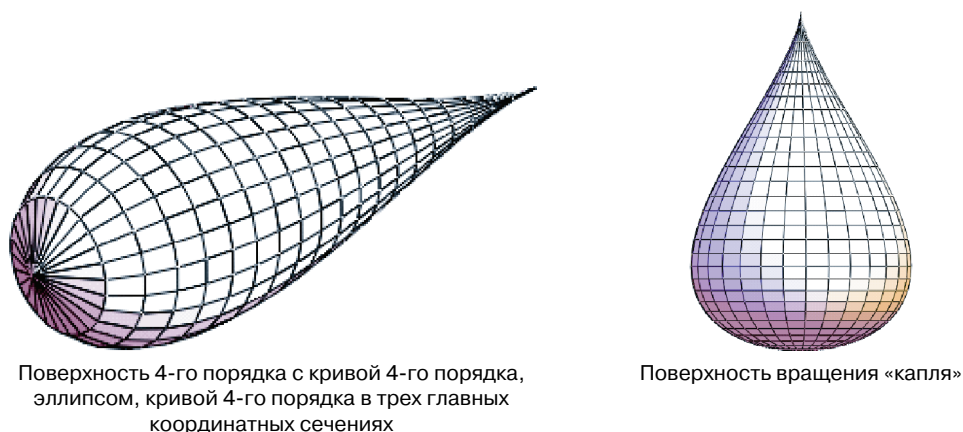
Рис. 6. Дом-капля Ю.В. Шевнина
 Источник: [Стройся.ру]



Рис. 7. Курорт Water Droplet Resort (Капля)
 URL: <http://air.ucoz.de>



Рис. 8. Бутылка в форме капли(дизайн от Landor)
Источник: [28]



Поверхность 4-го порядка с кривой 4-го порядка, эллипсом, кривой 4-го порядка в трех главных координатных сечениях

Поверхность вращения «капля»

Рис. 9. Аэрогидродинамические поверхности

Фонд художника М. Шемякина и автор инженер Ю.В. Шевнин разработали проект конструкции дома-капли (рис. 6), имеющего многофункциональное назначение и применение для строительства в труднодоступных районах. Технология изготовления дома имеет в своей основе разработки В.Г. Шухова, структурную топологию молекулы ДНК и генов человека. Имеется много других изделий и сооружений в форме падающей капли (рис. 7, 8). Однако эта форма относится к аэродинамическим поверхностям (рис. 9) и в статье она рассматриваться не будет, так как в ней за каплевидные поверхности принимается форма капли, лежащей на горизонтальной поверхности (см. рис. 1).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Металлические конструкции. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Н.П. Мельникова. — М.: Стройиздат, 1980.
- [2] Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. Линейная теория тонких оболочек. — Л.: Политехника, 1991.
- [3] Bachforth F., Adams I.C. An attempt to test the theory of capillary action // Cambridge at the University Press, 1883.

- [4] *Чичко Г.М.* Расчет каплевидных резервуаров и выбор системы опирания корпуса. — М.: Гостоптехиздат, 1951.
- [5] *Чичко Г.М.* Эксперимент. и теорет. исследование оболочек нового типа: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — М., 1959.
- [6] *Рекач В.Г.* Основная библиография по строительной механике. — М.: Изд-во УДН, 1966.
- [7] *Верёвкин С.И.* Каплевидные резервуары // Бюллетень строительной техники. — 1947. — № 16. — С. 1—5.
- [8] *Сафарян М.К.* Стальные резервуары для хранения нефтепродуктов. — М.: ОНТИ, 1958.
- [9] *Сафарян М.К., Чичко Г.М.* Уточнение методики расчета каплевидных резервуаров // Нефтяное хозяйство. — 1955. — № 4. — С. 78—83.
- [10] *Стороженко Л.И., Борута В.А., Рубановский М.Л.* Каплевидный резервуар. — Патент РФ № 2038455. — Дата подачи заявки 01.04.1991.
- [11] URL: www.bestroman.com
- [12] URL: <http://sob.ru/issue-24-2202.html>
- [13] *Runge G., König H.* Vorlesungen über numerisches Rechnen. — Berlin, 1924. — S. 320.
- [14] *Хуберян К.М.* Рациональные формы трубопроводов, резервуаров и напорных перекрытий. — М.: Изд. ГСИ, 1956.
- [15] *Сафарян М.К.* Современное состояние резервуаростроения и перспективы его развития. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1972.
- [16] *Bramski C.* Obrotomo-symetryczne zbiorniki kroplokstaltne. Analiza pracy powloki // Zesz. nauk. Bialostock. Nauki techn. — 1981. — № 35. — 50 с. (польск.).
- [17] *Royles R. and Sofoluwe A.B.* Membrane approximation of the behaviour of the drop shaped tank under symmetrical loading // Int. J. Comput. Structures. — 1981. — № 14. — С. 423—425.
- [18] *Ibidapo-Obe O., Royles R., Sofoluwe A.B.* Echinodome: Some approaches to the analysis of the drop-shaped tank // Mech. Res. Commun. — 1981. — Vol. 8. — № 1. — С. 47—54.
- [19] *Sofoluwe A.B., Royles R., Ibidapo-Obe.* An improved numerical approach to the analysis of the echinodome // Mech. Res. Commun. — 1981. — Vol. 8. — № 4. — С. 237—243.
- [20] *Друзь И.Б.* Осесимметричная меридионально напряженная мягкая емкость, лежащая на плоской поверхности // Судовые мягкие и гибкие конструкции. — Владивосток: ДВИМУ, 1989. — С. 96—101.
- [21] *Sofoluwe A.B.* The behaviour of the drop shaped tank under unsymmetrical loading // Comput. and Struct. — 1982. — Vol. 15. — № 4. — С. 489—490.
- [22] *Sofoluwe A.B.* Determination of the meridian and stresses of the drop-shaped tank // Int. J. Numer. Meth. Eng. — 1983. — Vol. 19. — № 5. — С. 757—764.
- [23] *Royles R., Sofoluwe A.B., Baig M.M. and Currie A.J.* Behaviour of underwater enclosures of optimum design // Strain. — 1980. — Vol. 16. — № 1. — С. 12—20.
- [24] *Yasuzawa Y.* Structural response of underwater half drop shaped shell // Proc. 3rd Int. Offshore and Polar. Eng. Conf., Singapore, June 6—11, 1993. — Vol. 4. — Colden (Colo), 1993. — P. 475—481.
- [25] *Друзь И.Б.* Расчет параметров всплывающей с грузом осесимметричной меридионально напряженной мягкой емкости // Судовые мягкие и гибкие конструкции. — Владивосток: ДВИМУ, 1989. — С. 71—90.
- [26] *Кривошапко С.Н.* Каплевидные, катеноидальные и псевдосферические оболочки // Монтажные и специальные работы в строительстве. — 1998. — № 11—12. — С. 28—31.
- [27] *Кривошапко С.Н., Алборова Л.А.* Формообразование оболочек в архитектуре: Уч. пособие. — М.: Изд-во РУДН, 2008. — 48 с.
- [28] URL: <http://www.adme.ru/kreativnyj-obzor/udovolstviya-radi-i-polzy-dlya-reklamamineralnoj-vody-26041/>

**THE DROP SHAPED SURFACES
IN THE ARCHITECTURE OF BUILDINGS,
TANKS, AND FACTORY-MADE GOODS**

S.N. Krivoshapko, I.A. Mamiyeva

Peoples' Friendship University of Russia
Ordzhonikidze, 3, Moscow, Russia, 115419

The review paper contains all known for today information on strength analysis, stability, and applications of drop shaped shells in construction and technics. The voluminous references containing 28 titles give an opportunity to lay down subsequent investigations in this field.

Key words: drop shaped shell, tank, strength analysis, application of drop shaped surfaces.