

## О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ\*

Г.Н. Гусев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.В. Епин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.В. Цветков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Рассмотрены некоторые аспекты применения метода гидростатического нивелирования при долговременных измерениях в системах мониторинга. Предложены подходы на основе математического моделирования, позволяющие оценивать уровень погрешности для реальных конфигураций гидронивелиров, а также варианты ее снижения.

**Ключевые слова:** деформационный мониторинг, уровень жидкости, гидростатический нивелир.

Контроль (мониторинг) за сооружениями, технологическими процессами и природными явлениями играет важную роль в жизни современного общества. Основным ядром систем мониторинга является измерительная подсистема, состоящая из сенсоров (датчиков), которые регистрируют те или иные интересующие параметры. Измерительные подсистемы основываются на различных физических принципах, которые определяют их возможности и накладывают определенные ограничения на использование в системах мониторинга.

Долговременные измерения механических характеристик исследуемого объекта позволяют надежно производить оценки его механического состояния, а также осуществлять прогноз. Как правило, датчики производят локальные измерения в местах их установки, и для обеспечения необходимого пространственного разрешения требуется увеличение количества сенсоров. Поэтому важно, чтобы измерительная подсистема сохраняла долговременную стабильность, имела возможность масшта-

бирования и трансформирования под различные объекты исследования.

Рассмотрим ситуации, возникающие при долговременных измерениях с помощью метода гидростатического нивелирования. Измерительные подсистемы на основе данного метода применяются в системах деформационного мониторинга различных зданий и конструкций, поскольку обладают такими преимуществами, как, например, отсутствие прямой видимости между ее элементами.

Однако есть и ограничения. В частности, система позволяет контролировать квазистатические вертикальные перемещения объектов, характерное время протекания которых выше, чем время установления жидкости в сообщающихся сосудах системы. Практика показывает, что процессы осаживания сооружений, возникающие при подвижках грунтов, происходят медленнее, чем время установления, и «быстродействия» системы гидростатического нивелирования оказывается достаточно для контроля деформацион-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-48-590025).

ного состояния конструкций.

Способ построения плоскости равного уровня с помощью метода гидростатического нивелирования известен еще с древних времен и применялся многими поколениями при строительстве сооружений. Если под воздействием силы тяжести частично (наполовину) погрузить исследуемое тело в жидкость (рис. 1, а), то граница между погруженной и непогруженной частью и будет плоскостью равного уровня. Этот способ не является удобным для практического применения в мониторинге, хотя и позволяет осуществлять контроль непрерывно по пространству.

Для практических целей целесообразно применять вариант с дискретным количеством сообщающихся сосудов (рис. 1, б). В этом случае верхний край жидкости в сосудах под воздействием силы тяжести также будет находиться на равных высотах. То есть по верхнему краю жидкости в сосудах будет определена та же самая плоскость, что и в предыдущем случае. Подвижки конструкции изменят положение уровня жидкости в сосудах. Разность между начальным и конечным положением уровня жидкости в сосудах соответствует его вертикальным перемещениям. Выбор количества датчиков и мест их установки позволяет получить необходимое пространственное разрешение поля вертикальных перемещений. При этом соединительные трубки можно прокладывать произвольным образом, например, для удобства вместе с другими коммуникациями в здании. Таким образом, измерительную систему на основе данного метода можно адаптировать под различные как новые, так и уже существующие сооружения.

Научное объяснение положения уровня жидкости в сообщающихся сосудах дает закон Паскаля, сформулированный еще

в XVII веке. К настоящему времени аспектам построения гидростатических систем нивелирования посвящено достаточное количество работ как за рубежом [8–12], так и в нашей стране [1–6]. Еще пятьдесят лет назад Пелисье в работе [11] показал преимущества данного метода при контроле протяженных объектов перед оптическими методами, а также отметил ряд важных факторов, которые оказывают существенное влияние на погрешность измерения: градиент температуры жидкости, градиент атмосферного давления, поверхностное натяжение и др. Другими словами, из-за изменения внешних факторов уровень жидкости в сообщающихся сосудах находится не на одном постоянном уровне и может изменяться в зависимости от условий в разных сосудах.

Для ученых, изучающих поведение и свойства жидкостей, это очевидно, тогда как специалисты в смежных областях науки зачастую полагают, что жидкость – это идеальная отсчетная база для оценки положения твердых тел. Нередко наблюдается и обратная ситуация, когда при изучении жидкостей окружающие их твердые тела полагают абсолютно жесткими и поэтому получают не совсем верные результаты. В связи с этим современному исследователю нужно видеть проблему целиком и учитывать опыт коллег не только в своей области науки.

Способы регистрации уровня жидкости в нивелире могут быть различными и иметь свои особенности, однако в рамках данной статьи рассмотрим только проблемы, связанные с самим методом гидростатического нивелирования. Основные способы повышения точности для измерительных систем на его основе [2, 11] заключаются в выравнивании давления атмосферного воздуха, уменьшении гра-

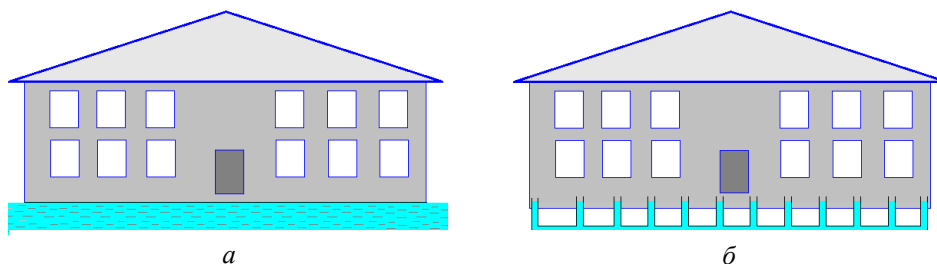


Рис. 1. Метод гидростатического нивелирования

диента температур и высот столбов жидкости, а также снижении сил поверхностного натяжения. Например, для выравнивания давления атмосферного воздуха в датчиках можно использовать герметичную воздушную трубку, связывающую все датчики. А влияние сил поверхностного натяжения можно снизить за счет правильного выбора диаметра измерительного сосуда или применения ПАВ (поверхностно-активных веществ).

При невозможности устранения градиента температуры его влияние можно снизить за счет уменьшения высот столбов жидкости в датчиках. Самым экстремальным способом уменьшения перепада высот трубки является «полузаполненный» (half-filled) нивелир [9], соединительные трубки которого располагаются в одном уровне по всей длине таким образом, что нижняя часть сечения трубки заполнена жидкостью, а верхняя – воздухом. Такой нивелир должен располагаться на идеально подготовленных поверхностях, и благодаря отсутствию перепада высот обеспечивается микронная точность измерения. Поэтому данный тип нивелира применяется только на особо ответственных сооружениях, таких как ускорители заряженных частиц.

Можно отметить и другие варианты компенсации влияния температуры измерительного сосуда: с помощью фиксации погружения поплавка [1], применения жидкостей с различной плотностью и специального измерительного модуля с перераспределением объемов этих жидкостей. Например, в работе [6] предлагается вариант с тремя жидкостями. Однако, во-первых, это требует тщательного подбора параметров жидкостей и усложнения конструкции измерительного модуля, а во-вторых, в работе [3] показано, что в приборах с перераспределением объемов жидкостей остаются проблемы с температурной зависимостью материала сосудов и соединительных шлангов, что может и превосходить компенсируемые значения.

На реальных зданиях и конструкциях, как уже отмечалось, очень сложно обеспечить идеальные условия для измерений – соединительные трубки располагаются не

в одной плоскости, периодически возникает неустранимый градиент температур, который может изменяться со временем. Нередко геометрия расположения датчиков, соединительных трубок и температурные поля оказываются уникальными в каждом конкретном случае. Поэтому важно оценивать, с какой погрешностью производятся измерения, каким образом и какой ценой можно ее уменьшить. В связи с этим можно рассмотреть различные подходы к решению данной проблемы для реальных конфигураций гидронивелиров. На первом этапе на основе математического моделирования необходимо оценивать механические процессы, происходящие в гидронивелире, а также их вклад в погрешность измерительной системы, а затем с использованием модели рассматривать различные сценарии ее уменьшения и выбирать наиболее подходящие варианты.

#### ***Подходы к построению моделей гидростатических нивелиров***

Жидкость и газ – это агрегатные состояния веществ, поведение которых подчиняется определенным физическим законам, некоторым образом отличающиеся друг от друга и сильно отличающиеся от твердых тел. На положение границы между жидкостью и газом в отдельном измерительном сосуде, называемой уровнем жидкости и регистрируемой датчиком, оказывают влияние различные силы: со стороны газа, жидкости, а также силы поверхностного натяжения. В случае нескольких измерительных сосудов, соединенных между собой трубками, положение равновесия уровней жидкости будет зависеть от очень многих факторов.

Исторически так сложилось, что переходные процессы в гидронивелирах авторами определяются с помощью аналитических формул в гидравлическом приближении [8, 10]. С их помощью для случая длинного нивелира [5], состоящего из двух датчиков, можно оценивать период колебаний, декремент затухания, а также неблагоприятное влияние внешних факторов, таких как градиент температуры по длине нивелира. При этом влияние температуры учитывается только в виде

изменения плотности жидкости за счет ее теплового расширения. Для нивелиров, состоящих из нескольких сообщающихся сосудов, предлагается производить оценки переходных процессов с помощью аналогии с электрическими цепями: путем замены измерительных и соединительных сосудов на электрическую цепь с элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$  [12]. Но оценки влияния негативных факторов на различные варианты соединения (топологий) нивелиров не рассматриваются.

Известно, что движение вязкой жидкости в сосудах можно описать уравнениями Навье–Стокса, дополнив их при необходимости соотношениями для теплопереноса. Современные вычислительные алгоритмы и аппаратные комплексы позволяют рассчитать такие задачи для произвольной геометрии. Однако опыт решения нестационарных задач со свободной поверхностью (между жидкостью и воздухом) для простых нивелиров показал, что требуются значительные вычислительные ресурсы для приемлемой пространственной и временной дискретизации.

В настоящее время для нивелиров реальных конфигураций (сотни метров длиной и десятки датчиков) такие расчеты не представляются целесообразными. Поэтому для них была создана гидравлическая модель, описанная в [13]. Гидронивелир рассматривается как совокупность соединительных и измерительных сосудов, каждый из которых характеризуется длиной и площадью поперечного сечения, а жидкость в нем – скоростью, плотностью и вязкостью. С помощью модели производятся вычисления высот уровней жидкости в измерительных сосудах со временем, то есть того параметра, который и регистрируется измерительной системой.

Также можно производить оценки влияния различных факторов на показания гидронивелира произвольных топологий: изменение плотности жидкости в сегментах, изменение давления воздуха над измерительными сосудами или вибрационное воздействие на жидкость. Для проверки представленной модели проводились натурные эксперименты, включавшие исследование свободных колебаний в нивелирах

разных конфигураций, состоявших из 2 и 4 датчиков [7]. По результатам экспериментов можно сделать вывод о том, что предложенная гидравлическая модель при использовании справочных значений параметров удовлетворительно оценивает характер переходных процессов и времена затухания в многосегментных гидростатических нивелирах. Полного совпадения с экспериментом можно достичь с помощью подбора коэффициентов при инерционных слагаемых в гидравлической модели.

Также была произведена численная оценка влияния учета жесткостных свойств соединительной трубки на динамические свойства длинных нивелиров – а именно на собственные частоты свободных колебаний жидкости в нивелире. В описанных выше моделях предполагается, что соединительная трубка является абсолютно жесткой, тогда как в реальности это не совсем так. Более того, нередко применяются гибкие шланги из полимерных материалов. При свободных колебаниях жидкости в «мягком» нивелире под воздействием силы тяжести происходит следующее: во время одного полупериода колебания давление жидкости в одной части нивелира становится чуть выше, чем в другом и за счет этого сечение трубки в одной ее части немного увеличивается, а в другой – уменьшается.

Таким образом, жидкость не только перетекает при свободных колебаниях из одного измерительного сосуда в другой, но и перераспределяется по нивелиру. Если нивелир достаточно длинный, то эти два фактора могут оказаться сопоставимыми, за счет чего характер переходных процессов и, как следствие, период свободных колебаний жидкости может измениться. Созданная модель позволяет оценивать этот вклад для разных значений жесткостей трубок и других параметров нивелира (длина, площадь сечения трубки и измерительного сосуда). Численные эксперименты позволили определить границы применимости представленных выше гидравлических моделей нивелиров, не учитывающих податливость трубки. Следует отметить, что для коротких нивелиров данный эффект мал.

**Пример возникновения ошибки  
нивелира**

Рассмотрим в качестве примера ситуацию, возникающую в реальных условиях эксплуатации гидронивелира, при которой соединительная трубка вследствие конструктивных особенностей проходит на разной высоте, периодически поднимаясь и опускаясь (рис. 2). При этом жидкость в разных частях может иметь различную температуру, а значит, и плотность. Варьируя значения плотностей в различных вертикальных и горизонтальных сегментах с помощью модели можно оценить изменения уровня жидкости от начального значения, то есть вклад в погрешность измерения уровня.

Результаты этого тестового примера представлены в работе [13]. Основной вывод заключается в том, что изменение плотности (вызванное температурой) горизонтальных участков не приводит к изменению уровня жидкости, в отличие от вертикальных. Причем вклад в изменение уровня жидкости от каждого вертикального сегмента имеет разный знак в зависимости от его направления (стрелочками на рис. 2 условно выбрано направление в нивелире, и вертикальные сегменты таким образом могут быть 2 типов: стрелочкой вверх или вниз). Соответственно при разных сочетаниях плотностей (температур) вертикальных сегментов ошибка может как накапливаться, так и компенсироваться.

На основе данного простого примера очевидны и способы уменьшения погрешности: если обеспечить одинаковый температурный режим во всем помещении не удастся, то нужно попытаться реализовать его для соседних вертикальных участков (одинаковой высоты, но с разным направлением стрелки), и в этом случае ошибка будет компенсироваться. Другой вариант заключается в выборе жидкости, плотность которой в нужном температурном

диапазоне слабо изменяется. Как известно, плотность воды в диапазоне температур 0–10°C изменяется всего на 0,03%, а в диапазоне 20–30°C уже на 0,25%. Третий способ уменьшения погрешности заключается в измерении температуры каждого вертикального участка, программного вычисления плотности жидкости в нем и компенсации значений показаний нивелира.

Однако не всегда возможно проведение таких мероприятий – участков с подъемами и спусками может быть большое количество, а температурное поле неоднородным. Что делать в этом случае? Необходимо выравнять температуру (плотность) жидкости по всему нивелиру. Перемешивание жидкости – вот, казалось бы, идеальное решение проблемы. Замкнуть нивелир в контур, перемешать жидкость, подождать пока она перестанет двигаться и произвести измерения. Но все не так просто. Длина трубки реального объекта может составлять не одну сотню метров, и жидкость даже при многократном протекании по трубке может не достичь одинаковой температуры по всей длине.

Проиллюстрируем это на эксперименте, в ходе которого в двухслойный армированный шланг (0,32МТ) диаметром 12,5 мм и толщиной стенки 3 мм подавалась вода с температурой 8°C и постоянным расходом 4,4 л/мин. Шланг имел длину 72 м и располагался в помещении с температурой 28°C. В ходе эксперимента фиксировались температура на входе и выходе, а также контролировался расход жидкости.

На рис. 3 представлен график разности между выходной и входной температурой жидкости. Через 120 секунд холодная жидкость дотекает до конца шланга, и после этого начинается процесс его охлаждения. Из эксперимента можно оценить время, которое необходимо для охлаждения материала шланга, а также следует отметить, что однородное распреде-

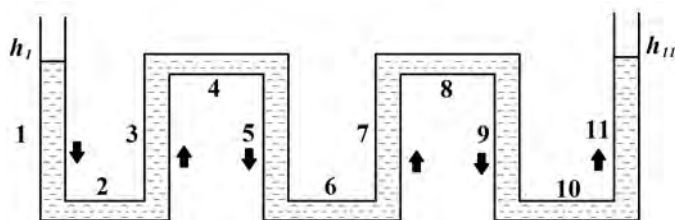


Рис. 2. Схема нивелира из 11 сегментов

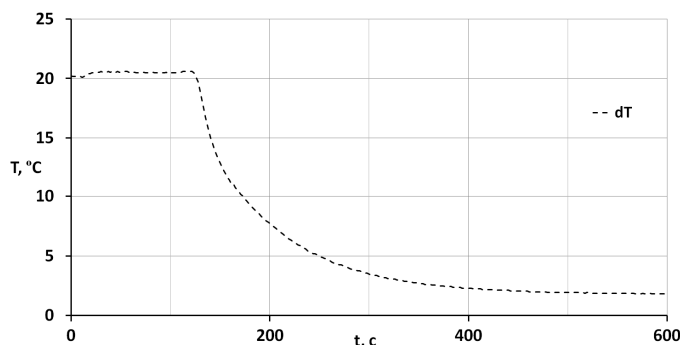


Рис. 3. Разность температур при течении воды на входе и выходе шланга

ление температур жидкости в шланге так и не достигается. Разность между входной и выходной температурой для указанного эксперимента составляет около 2°C. Теплоизоляция трубки и увеличение расхода воды способно уменьшить эту разность, но она никогда не станет нулевой. Аналогичная ситуация будет и при перемешивании жидкости в длинном нивелире. Другими словами, с помощью перемешивания можно выровнять температуру (а значит, и плотность) жидкости только до определенной степени.

Для оценки параметров перемешивания была создана математическая модель, описывающая связанный процесс распространения тепла в системе «текущая жидкость – трубка» с учетом теплоотдачи в окружающую среду. С помощью установочных экспериментов, подобно представленному выше, были идентифицированы параметры модели. На их основе могут быть произведены оценки необходимого времени перемешивания жидкости в кольцевом нивелире, в том числе и с учетом использования расширительных баков разной емкости. С помощью этой математической модели можно также проследить дальнейшую эволюцию температуры жидкости после прекращения процесса перемешивания, поскольку требуется время, необходимое для завершения переходных процессов движения жидкости в нивелире. Это время оценивается по представленной выше гидравлической модели. Температура жидкости после завершения процесса перемешивания будет стремиться вернуться к предыдущим значениям, следовательно, будут меняться и показания нивелира. Процеду-

ра перемешивания жидкости не позволяет получить истинное значение положения жидкости в датчиках гидронивелира, но может существенно снизить погрешность измерения, которая, возможно, будет приемлема для решаемой задачи.

Ну и, наконец, есть еще один вариант уменьшения погрешности, являющийся комбинацией предыдущих. Можно поместить измерительный нивелир в трубку большего диаметра, где будет периодически циркулировать жидкость-теплоноситель, которая будет поддерживать температуру нивелира в определенном интервале. В измерительном нивелире в таком случае можно использовать жидкость (воду), плотность которой слабее зависит от температуры, чем у теплоносителя. Кроме того, при использовании подогрева данная схема позволит осуществлять измерения также и в диапазоне отрицательных температур.

В работе рассмотрена только часть проблем, возникающих при долговременных измерениях методом гидростатического нивелирования. Но существуют еще и другие аспекты (как, например, образование пузырей газа в соединительных трубках или появление конденсата в воздушных трубках), которые тоже могут привести к возрастанию измерительной погрешности. Подобные явления также требуют тщательного изучения и анализа.

### Заключение

Несмотря на активное развитие технологий, для многих практических случаев альтернативы системам измерения на основе метода гидростатического нивелирования нет. При длительных измерениях

на объектах со сложной конфигурацией могут возникать ситуации, приводящие к погрешности, уровень которой неприемлем для исследований. Математическое моделирование механических процессов, происходящих в нивелире, помогает произвести не только оценки этих погрешно-

стей, но и анализ возможных сценариев ее уменьшения с наименьшими затратами. Дальнейшее развитие измерительных систем на основе этого метода будет неразрывно связано с использованием математических моделей механических процессов, происходящих в гидронивелире.

**Библиографический список**

1. *Амбарцумян П.В., Паликян Ф.А.* Способ измерения уровня жидкости в нивелирах // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 137–144.
2. *Васютинский И.Ю.* Гидронивелирование. – М.: Недра, 1983. – 124 с.
3. *Жуков Б.Н.* Влияние температурных факторов на точность измерений превышений гидростатическими приборами и системами // Вест. Сибирской государственной геодезической академии. – 1999. – № 4. – С. 42–47.
4. *Криворучко В.Т.* Разработка пространственной автоматизированной системы гидростатического нивелирования: дис. ... канд. тех. наук: 05.24.01. – Киев, 1983. – 160 с.
5. *Манукин А.Б., Казанцева О.С., Бехтерев С.В., Матюнин В.П., Калинин И.И.* Длиннобазисный гидростатический нивелир // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49. – № 4. – С. 26–34.
6. *Таймазов Д.Г.* Трехжидкостный гидростатический нивелир // Тр. Ин-та геологии Дагестанского научного центра РАН. – 2002. – № 48. – С. 191–193.
7. *Цветков Р.В., Епин В.В.* Экспериментальное исследование переходных процессов в многосегментном гидронивелире // Науч.-техн. вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 109–111.
8. *D'Oreye N., Zurn W.* Very high resolution long-baseline water-tube tiltmeter to record small signals from Earth free oscillations up to secular tilts // Rev. Sci. Instrum. – 2005. – Vol. 76. – 024501.
9. *Meier E., Geiger A., Ingensand H., Limpach P., Steiger A., Zwysig R.* Hydrostatic Levelling System: measuring at the system limits // J. of Applied Geodesy. – 2010. – Vol. 4. – Is. 2. – P. 91–102.
10. *Meier E., Ingensand H.* Multipoint Hydrostatic System for Permanent Deformation Monitoring // FIG Kongress, Brighton, England, 1998. – P. 369–381.
11. *Pellissier P.F.* Hydrostatic Leveling Systems // IEEE Transactions. – 1965. – Vol. 12. – Is. 3. – P. 19–20.
12. *Singatulin S., Volk J., Shiltsev V., Chupyra A., Medvedko A., Kondaurov M.* High precision double tubed hydrostatic leveling system for accelerator alignment application // Proceedings of 9th IWAAA06, Menlo Park, California, 2006. – FR005.
13. *Tsvetkov R.V., Yepin V.V., Shestakov A.P.* Numerical estimation of various influence factors on a multipoint hydrostatic leveling system // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2017. – Vol. 208. – 012046.

**ON SOME PROBLEMS OF MEASURING SYSTEMS BASED ON HYDROSTATIC LEVELING FOR LONG-TERM MEASUREMENTS**

G.N. Gusev, V.V. Yepin, R.V. Tsvetkov

*Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS*

Some aspects of the application of the hydrostatic leveling method for long-term measurements in monitoring systems are considered. Some approaches based on mathematical modeling are proposed, which allow estimating the level of error for real configurations of hydrostatic levels, as well as options for its reduction.

*Keywords:* deformation monitoring, liquid level, hydrostatic leveling.

**Сведения об авторах**

*Гусев Георгий Николаевич*, кандидат технических наук, заведующий лабораторией строительной механики, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail:

*Епин Валерий Валерьевич*, инженер-исследователь отдела комплексных проблем механики деформируемых твердых тел, ИМСС УрО РАН; e-mail: epin.v@icmm.ru

*Цветков Роман Валерьевич*, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела комплексных проблем механики деформируемых твердых тел, ИМСС УрО РАН; e-mail: flower@icmm.ru

*Материал поступил в редакцию 07.11.2017 г.*