

УДК 502/504:627.8

Р. Р. АЧИКАСОВ, В. В. ГРИЦАН

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», г. Москва

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МГЭС С ОРТОГОНАЛЬНОЙ ТУРБИНОЙ И РЕГУЛИРУЮЩИМ БАССЕЙНОМ

Рассматриваются особенности конструкции МГЭС с обратимой ортогональной турбиной и регулирующим бассейном, ее параметры и возможность использования. Рассмотрены отличительные особенности МГЭС с обратимой турбиной от других типов ГЭС. Представлены схемы работы и схема напоров на МГЭС. В статье так же представлены формулы для определения основных параметров работы МГЭС с обратимой ортогональной турбиной. Отмечается, что одной из возможностей описанного в тексте режима работы ортогональной ГЭС с обратимым регулирующим бассейном является сокращение бассейнов недельного и сезонного регулирования, но в таком случае МГЭС может работать только в базовом режиме. Так как имеющиеся бассейны не позволяют ей покрывать пики потребления из-за отсутствия дополнительных объемов для маневрирования. Показано, что выходом из этой ситуации, может стать строительство второй ветки напорного водовода на весь напор с собственной гидротурбиной, а также расширение верхнего бассейна до объемов, позволяющих покрывать пиковые мощности потребления.

Регулирующий бассейн, МГЭС с обратимой ортогональной турбиной, верхний и нижний контур сработки.

There are discussed design features of a small HPP with a reversible orthogonal turbine and regulating pool, its parameters and possibility of usage. There are considered distinctive features of a small hydropower plant with a reversible turbine from other types of hydro power plants. There are presented schemes of work and the scheme of pressures at SHPP. The article also presents formulas for determining the basic parameters of the SHPP with a reversible orthogonal turbine. It is noted that one of the possibilities of the described operational mode of the orthogonal hydropower plant with a reversible regulating pool is the reduction of pools of weekly and seasonal regulation, but in this case, SHPP can only work in basic mode as the available pools do not allow it to cover peaks of consumption due to the lack of additional volumes for maneuvering. It is shown that the solution of this situation can be building of the second branch of pressure conduit for the whole head with its own hydro turbine, as well as the extension of the upper basin to the volumes allowing covering peak power consumption.

Regulating pool, a small HPP with a reversible orthogonal turbine, upper and lower contour of drawdown.

Гидроэнергетика входит в линейку возобновляемых источников энергии. Являясь локомотивом мировой энергетики, покрывая 20 % от мировой потребности в электроэнергии, она полностью удовлетворяет требования потребителя по качеству поставляемого электричества и в необходимом объеме. Но для использования энергии воды, должны быть природные условия. Из этих условий формируются основные признаки, определяющие удобство строительства того или иного типа гидростанции, а именно, возможность создания требуемого напора, объема водохранилища, требуемого расхода в турбинной камере, КПД гидравлического оборудования, и выражается следующей

формулой:

$$N_{\text{общ}} = 9,8\alpha QH\eta \quad (1)$$

где $N_{\text{общ}}$ – общая мощность ГЭС, МВт; α – ожидаемый коэффициент суточной неравномерности нагрузок; Q – расход воды, м³/с; H – напор, м; η – КПД агрегата гидростанции.

При выполнении вышеуказанных условий (с учетом гидравлических потерь и др.) можно с определенной вероятностью заключить о целесообразности выбранной схемы гидростанции или ее групп. Проведенный условный анализ существующих схем гидростанций в целях поиска не выявленных потенциалов показывает следующее:

1. ГЭС для покрытия пиковой мощности. К таким может относиться

деривационная МГЭС, имеющая бассейн суточного регулирования, необходимость которого оправдывается временем работы МГЭС в режиме пиковой мощности и ограничивается объемом бассейна суточного регулирования и расходом естественного притока реки. Но, при необходимости, деривационные МГЭС, можно использовать для выработки электроэнергии в постоянном режиме, т. е. круглосуточно, для этого строятся выравнивающие водохранилища. Как правило, такие водохранилища имеют плотины, представляющие собой гидросооружения повышенной сложности и, как правило, превышающие бассейн суточного регулирования в несколько раз. Для ГЭС с малым расходом воды и небольшой выработкой, строительство таких плотин не рентабельно из-за высокой стоимости строительства и обслуживания.

2. *Аккумуляционные ГЭС.* Назначение аккумуляционных гидроэлектростанций, заключается в компенсации реактивной мощности возникающих в энергосети и оперативной подачи мощности при ее нехватке. Такой тип гидроэлектростанций условно подразделяется на три вида: ГАЭС простого аккумулярования; ГАЭС смешанного аккумулярования; ГАЭС по схеме переброски стока. Наиболее интересна для рассматриваемой темы может быть ГАЭС смешанного аккумулярования. ГАЭС такого вида может иметь бассейн суточного, недельного и сезонного регулирования с естественным притоком. Такая особенность, позволяет ГАЭС покрывать и компенсировать не только пиковые нагрузки энергосети, но и работать в обычном режиме ГЭС. Гидроэлектростанции такого вида имеют два бассейна, но при этом назначение нижнего бассейна оправданно только необходимостью компенсации реактивной мощности возникающей в энергосети.

3. *Русловые ГЭС.* Наилучшей эффективности русловые ГЭС достигают в группе или в каскаде, где гидроэлектростанции расположены одна за другой на одной реке. Преимущества каскада ГЭС, очевидны: высокая энергетическая мощность таких систем позволяет создавать энергосети, способные охватывать огромные территории потребителей. Поэтапная сработка бассейнов, позволяет обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии в любое

время суток.

Из проведенного анализа выясняется, что любой тип и вид рассмотренных нами гидроэлектростанций, может работать только на расходах, не превышающих приток реки. Если это условие не выполняется, то мощность гидроэлектростанции со временем начнет снижаться, из-за недостатка объема воды в водохранилище и как следствие возникнет недостаток рабочего напора и снижение энергетического потенциала ГЭС (пример: деривационная МГЭС). Для сохранения объемов выработки и планирования расходов при малом водотоке реки, без аккумуляционных водохранилищ не обойтись, проблема только в их размерах, цель которых, удерживать необходимый объем воды, для достижения отметок рабочего уровня, обеспечение бесперебойной подачи электроэнергии потребителю. Водохранилища, при малом притоке реки, представляют собой бассейны недельного и сезонного регулирования с технически сложными плотинами. Гидроэлектростанции и гидросистемы с такими бассейнами способны вырабатывать большие объемы электроэнергии, ограничиваемые только объемами потребления и гидроресурсами региона, могут покрывать пиковые нагрузки, компенсировать реактивную мощность. И как результат – потребитель получает качественное электричество. Но для небольших объемов потребления, такие гидросооружения экономически нецелесообразны.

Возникает вопрос: есть ли возможность у гидроэлектростанции поддерживать постоянную выработку электроэнергии при рабочих расходах в турбинной камере, превышающих расход притока (реки), допустимо ли при этом, снижение экономических показателей строительства?

Исследования показывают, что гидроэлектростанции с такими характеристиками могут иметь место, способные обеспечить постоянную выработку электроэнергии на низких расходах реки, но, как отмечалось ранее, такие гидроэлектростанции должны иметь водохранилище, размер которого в схеме предлагаемой гидроэлектростанции определяется объемом регулирующего бассейна. Такой тип гидроэлектростанций называется, «гидроэлектростанция с регулирующим бассейном» или «обратимая гидроэлектростанция с ортогональной турбиной» (рис. 1).

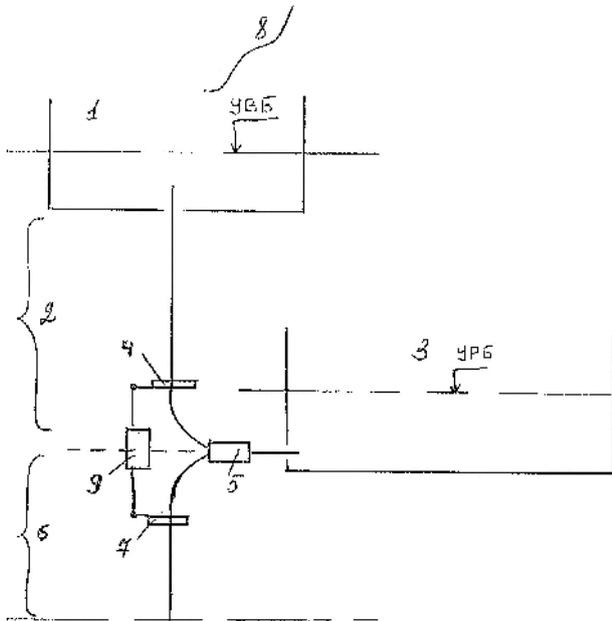


Рис. 1. Схема МГЭС с ортогональной турбиной: 1 – верхний головной бассейн аккумуляции; 2 – верхний контур сработки; 3 – регулирующий бассейн; 4 – затвор верхнего контура; 5 – ортогональная гидротурбина; 6 – нижний контур сработки; 7 – затвор нижнего контура; 8 – русло реки; 9 – механизм управления затворами

Отличительной особенностью МГЭС с обратимой турбиной от других типов ГЭС является то, что общий рабочий напор срабатывается через промежуточный бассейн двойного действия или обратимый регулирующий бассейн. Принцип работы: промежуточный бассейн двойного действия МГЭС, напоминает работу сообщающихся сосудов, внутреннего бассейна приливной ГЭС, бассейна суточного регулирования или верхний бассейн ГАЭС, где через верхний контур 2 вода под напором стекает из верхнего головного бассейна 1 в обратимый регулирующий бассейн 3, вращая гидротурбину 5. В результате вырабатывается электроэнергия. По окончании режима сработки верхнего контура затвор 4 опускается. Работа верхнего контура прекращается и в верхнем головном бассейне начинается процесс аккумуляции воды от расхода реки 8. При закрытии затвора 4 открывается затвор 5. Вода вытекает из обратимого бассейна через обратимую турбину 5, в результате выработка электроэнергии возобновляется. Сток воды в верхнем кон-

туре, осуществляется через напорный водовод, а сток воды нижнего контура через отсасывающую трубу, до нижнего уровня напора или русла реки. Как можно заметить, процесс аккумуляции воды в верхний головной бассейн не нарушает общую выработку мощности МГЭС с обратимой ортогональной турбиной (рис. 2).

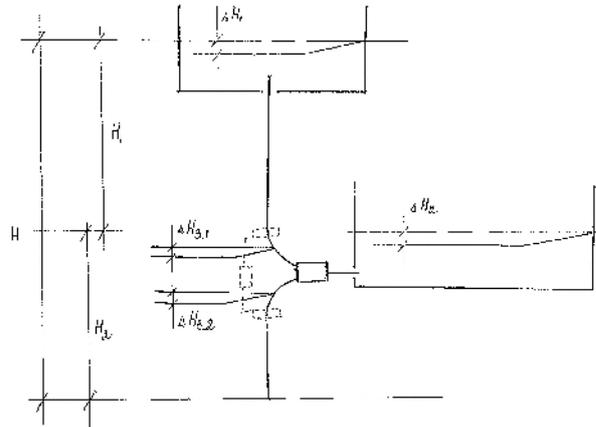


Рис. 2. Схема напоров на МГЭС с ортогональной турбиной: H – общий напор; H_1 – напор верхнего контура; H_2 – напор нижнего контура; ΔH_1 – потери напора в верхнем контуре; ΔH_2 – потери напора в нижнем контуре; $\Delta H_{3.1}$, $\Delta H_{3.2}$ – местные потери напора

В зоне слияния входного и выходного коллектора устанавливается одна обратимая гидротурбина. При необходимости, можно использовать две прямоходные гидротурбины.

Общая установленная мощность гидростанции определяется по формуле (1):

установленная мощность обратимой МГЭС

$$N_1 = 9,8\alpha 2QH_1\eta, \tag{2}$$

где N_1 – мощность верхнего контура, МВт; H_1 – напор верхнего контура, м;

установленная мощность второго контура

$$N_2 = 9,8\alpha 2QH_2\eta, \tag{3}$$

где N_2 – установленная мощность нижнего контура; H_2 – напор нижнего контура.

Здесь необходимо понимать, что использование отсасывающей трубы для реактивных турбин имеет граничные условия использования. Несоблюдение этих зависимостей в работе второго контура может привести к срыву потока. И как следствие – резкое, неконтролируемое

падение мощности обратимой МГЭС. Соответственно имеется ограничение мощности по рабочему напору.

Сумма мощностей каждого контура определяет среднюю мощность обратимой МГЭС:

$$N_{\text{ср}} = N_1 + N_2/2 \quad (4)$$

где $N_{\text{ср}}$ – средняя установленная мощность, МВт.

Сумма гидравлических потерь (рис. 2), будет выше, из-за местных потерь входного и выходного коллектора гидротурбины

$$H_p = H - (\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3) \quad (5)$$

где ΔH_1 – потери верхнего контура, м; ΔH_2 – потери нижнего контура, м; ΔH_3 – местные потери, м.

Причина неполных данных по гидравлическим потерям объясняется отсутствием полноценных лабораторных исследований гидравлической системы обратимой МГЭС, необходимость проведения которых очевидна.

Объем сработки верхнего контура определяется по формуле:

$$W_{\text{в.б}} = Q_{\text{реки}} t = W_{\text{аккум}}; \quad (6)$$

$$Q_{\text{в.к}} = Q_{\text{реки}} + W_{\text{аккум}}; \quad (7)$$

$$Q_{\text{в.к}} - W_{\text{нр.б}} \quad (8)$$

Отсюда следует, что общий объем сработки верхнего контура $Q_{\text{в.к}}$ формируется из постоянного расхода $Q_{\text{реки}}$ и объема аккумулированной воды в головном бассейне $W_{\text{аккум}}$ обратимой МГЭС.

Для определения времени сработки контуров, приведем расход $Q_{\text{реки}}$ и рабочий расход $Q_{\text{рабочий}}$ обратимой МГЭС к значениям:

$$Q_{\text{реки}} = 1 \text{ м}^3/\text{с}; \quad (9)$$

$$Q_{\text{рабочий}} = 2 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (10)$$

где рабочий объем сработки $Q_{\text{в.к}}$ верхнего контура составит:

$$W_{\text{в.б}} = W_{\text{аккум}} = 43200 \text{ м}^3; \quad (11)$$

$$Q_{\text{в.к}} = W_{\text{аккум}} + Q_{\text{реки}} = 86400 \text{ м}^3; \quad (12)$$

$$W_{\text{нр.б}} \rightarrow Q_{\text{в.к}} = Q_{\text{в.к}} = 86400 \text{ м}^3, \quad (13)$$

где $Q_{\text{н.к}}$ – расход нижнего контура.

Как видно из приведенных формул, объем верхнего головного бассейна формируется по формуле (11), а объем нижнего бассейна состоит из сложения расходов реки $Q_{\text{реки}}$ и объема аккумулированной воды $W_{\text{аккум}}$ и составит 86400 м^3 (8, 12). При внимательном изучении объемов сработки верхнего и нижнего бассейнов, можно заметить, что объем верхнего бассейна составляет 1/2 объема нижнего бассейна, т. е. верхний головной бассейн аккумулирования 2 раза меньше объема рабочего бассейна в данном случае обратимого бассейна регулирования (11). Отсюда можно предположить, что капитальные затраты на строительство водохранилищ для обратимой МГЭС будут стоить на 25 % меньше. Установленное время сработки одного контура $t = 12 \text{ ч.}$ (рис. 3).

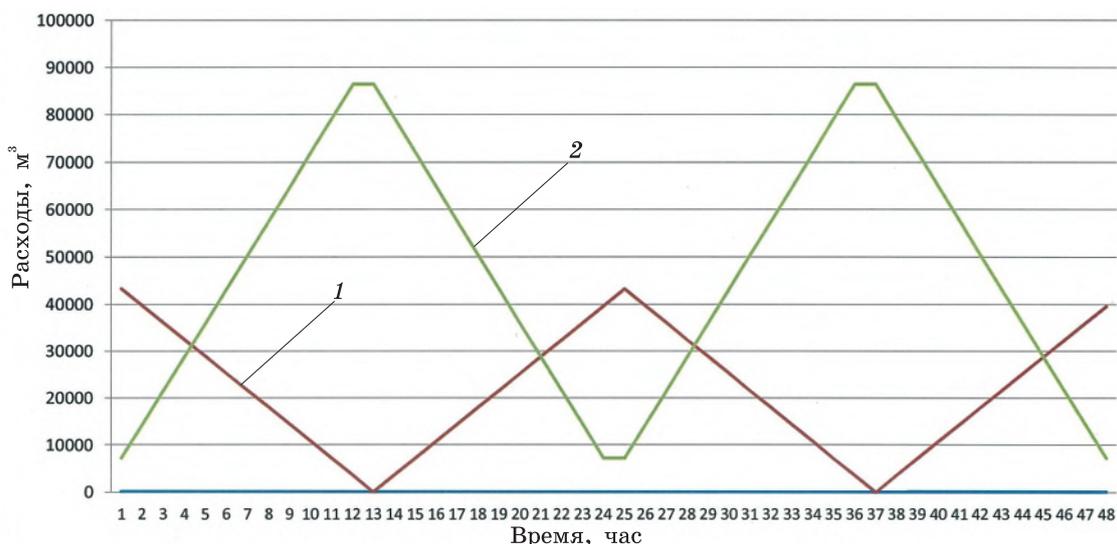


Рис. 3 Расходы, для определения времени сработки объемов верхнего головного бассейна 1 через верхний контур МГЭС с обратимой ортогональной турбиной (12) и время сработки нижнего регулирующего бассейна 2 через нижний контур с расходами (13)

При анализе приведенного графика расходов, установлено, что время сработки каждого контура МГЭС составляет 12 ч., без учета гидравлических потерь.

Возникает естественная закономерность, что при сработке нижнего контура (при неработающем верхнем контуре) на протяжении 12 ч. в верхнем головном бассейне восстанав-

ливается объем воды до значений 43200 м^3 (1), устанавливается и рабочий напор. Рабочий цикл МГЭС с обратимой гидротурбиной замыкается. Возникновение аккумулярованного объема в верхнем бассейне является следствием работы нижнего контура.

Для достижения технических требований по качеству вырабатываемой электроэнергии, МГЭС с обратимым регулирующим бассейном, затворы верхнего и нижнего контуров должны работать синхронно, т. е. при закрытии одних другие должны открываться. От плавности этого процесса зависит не только качество электроэнергии, но и долговечность электрооборудования МГЭС.

Помимо указанных показателей целесообразности строительства ГЭС важным служит КПД гидротурбины η из формулы (1). В классической компоновке ГЭС на каждый каскад устанавливается прямоточная гидротурбина. Исключением являются ГАЭС с обратимой гидротурбиной, но его обратимость применима только в насосном режиме. Мощность МГЭС определяется КПД обратимой ортогональной гидротурбины, а ее особенность заключается в способности вырабатывать электроэнергию независимо от направления потока. Данная МГЭС работает в режиме пиковой мощности и ограничено по времени работы (в данном случае не более 12 ч.). В схеме приведенной обратимой МГЭС (см. рис. 1) четко просматриваются следующие особенности:

1. Обеспечение плановой подачи электроэнергии потребителю, на протяжении суток. При этом расход реки может быть ниже рабочих расходов в турбинной камере гидроэлектростанции.

2. Возможность самовосстановления напора и рабочих расходов без потери вырабатываемой мощности высокая аккумуляющая способность. Особенно актуально для изолированных сельских энергосистем, где, как правило, преобладают осветительные нагрузки, колебания графика потребления здесь могут достигать значения до $\alpha = 2,5$ по формуле (1) где α – коэффициент суточной неравномерности.

3. Появляется возможность разнонапорного режима работы обратимой МГЭС, но эта схема не позволяет получить большее количество энергии, так как общий рабочий напор остается неизменным.

Выводы

На основании предварительного анализа МГЭС с обратимой ортогональной

гидротурбиной и обратимым регулирующим бассейном, изложенной ранее, видно, что МГЭС полностью подчиняется закону сохранения энергии.

Одним из возможностей описанного в тексте режима работы ортогональной ГЭС с обратимым регулирующим бассейном (рис. 4), является сокращение бассейнов недельного и сезонного регулирования, но в таком случае МГЭС может работать только в базовом режиме. Так как имеющиеся бассейны не позволят ей покрывать пики потребления из-за отсутствия дополнительных объемов для маневрирования. Выходом из этой ситуации, может стать строительство второй ветки напорного водовода 4, причем, на весь напор с собственной гидротурбиной, а также расширение верхнего бассейна 1 до объемов, позволяющих покрывать пиковые мощности потребления.

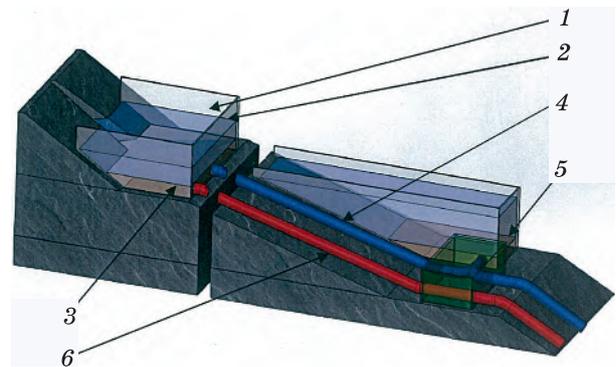


Рис. 4. Схема работы МГЭС с обратимой ортогональной гидротурбиной и обратимым регулирующим бассейном: 1 – объем пиковой нагрузки; 2 – объем базовой нагрузки; 3 – «мертвый» объем; 4 – водовод базового режима; 5 – обратимый бассейн регулирования; 6 – водовод пиковой нагрузки

Представляет собой каскад, но на обычных каскадах ГЭС применяется две турбины. В рассматриваемой нами компоновке МГЭС применяется одна гидротурбина (см. рис. 2). В этом случае изменяется режим сработки бассейнов. Т. е. при сработке напора верхнего рабочего бассейна 1, напор нижнего бассейна 3 только начинает формироваться. На русловых, каскадных ГЭС такой режим может встречаться, но крайне редко и вероятность возникновения его необходимости крайне низка.

электростанции. – М.: Сельхозиздат, 1956.

2. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И. Гидравлика: учебник. – М.: Энергия, 1964. – 352 с.

3. Киселев П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам. – М.: Госэнергоиздат, 1957. – 352 с.

4. Волшаник В. В., Орехов Г. В. Низконапорные гидравлические двигатели. – М.: Изд. АСВ, МГСУ, 2009. – 392 с.

5. Разработка типового ряда оборудования низконапорных мини-ГЭС с ортогональными гидроагрегатами: научно-тех-

нический отчет: Основные характеристики энергоблоков для мини-ГЭС с ортогональными гидроагрегатами. – М.: ОАО НИИЭС, 2012.

Материал поступил в редакцию 16.06.2014.

Ачикасов Ростислав Романович,
инженер

Тел. +7-925-327-12-80

E-mail: 017-2@mail.ru

Грицан Виталий Викторович, ведущий инженер

Тел. +7-967-049-10-39

E-mail: vugritsan@bk.ru

УДК 502/504:628.13

Т. К. КСЕНОФОНТОВА, С. В. ЗАСОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

РАСЧЕТ МОНОЛИТНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ВОДЫ С УЧЕТОМ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Расчет прямоугольных резервуаров для воды, как правило, выполняется без учета перераспределения усилий вследствие образования трещин в стенах, покрытии и днище. Как показали исследования, этот фактор существенно влияет на внутренние усилия и расход арматуры. В статье приведена методика расчета с учетом перераспределения усилий, связанного с образованием трещин. Расчет проводился методом конечных элементов с использованием итерационного подхода на программном комплексе «ЛИРА-САПР 2013». На первой итерации рассматривается работа резервуара, когда в нем трещин нет. После выполнения статического расчета определяются области в стенах, покрытии и днище, где трещины образовались. Для этих областей производится уточнение характеристик жесткости сечений, вычисленных с учетом того, что в этих сечениях трещины образовались. Производится повторный расчет резервуара при новом распределении жесткостей. Так расчет выполняется, пока результаты расчетной итерации будут практически не отличаться от результатов предыдущей итерации. Приведен пример расчета, который выполнен для монолитного прямоугольного резервуара высотой 4,8 м.

Железобетонные резервуары для воды, стеновые панели, жесткость сечений, метод конечных элементов, перераспределение усилий, изгибающие моменты, трещиностойкость сечений, ширина раскрытия трещин, расход арматуры.

Calculation of rectangular water tanks is usually performed without consideration of redistribution of stresses as a result of cracks formation in the walls, coating and bottom. As investigations have shown, this factor significantly affects the internal stresses and consumption of armature. The article describes the method of calculation taking into account redistribution of stresses connected with formation of cracks. The calculation was performed using a method of finite elements using the iterative approach on the software system «LIRA-CAD 2013». The first iteration refers to the tank work when it is not cracked. After performing of the static calculation there are identified the areas in the walls, covering and bottom where cracks were formed. For these fields clarification of the cross sections rigidity is performed calculated with consideration of the formed cracks. There is fulfilled a second calculation of the tank under a new distribution of rigidities. So the calculation is performed until the results of the calculation iterations are practically identical to the results of the previous iteration. There is given an example of the calculation which is performed for a monolithic rectangular tank of height 4,8 m.

Reinforced concrete water tanks, wall panels, rigidity of cross-sections, finite elements method, redistribution of stresses, bending moments, crack resistance of cross-sections, crack widths, consumption of armature.