

shows that in flows with different resistance laws various «mechanisms» of turbulence take place. The content of the article makes it possible to expand the knowledge and understanding of some hydraulics fundamentals by specialists.

Dissipation, entropy, minimum, maximum, transition, resistance.

References

1. **Klimontovich Yu.L.** Turbulentnoe dvizhenie i struktura haosa. – M.: Nauka, 1990. – 320 s.

2. **Zegzhda A.P.** Gidravlicheskie poteri na trenie v kanalah i truboprovodah. – L.M.: Gosstrojizdat. 1957, 278 s.

3. **Lyutikov A.V.** Propusknaya sposobnost i ustojchivost rusel krupnyh kanalov pri malyh uklonah. Avtoreferat cand. Diss. VNIIGiM. 1987.

4. **Verbitskiy V.S., Hodzinskaya A.G.** Uchet form dvizheniya nanosov pri opredele-

nii gidravlicheskih soprotivlenij ruslovyh potokov. // Gidrotehnicheskoe stroiteljstvo. – 2005. – № 8. – S. 46-50.

The material was received at the editorial office
15.08.2017

Information about the author

Vladimir Saulovich Verbitskiy, senior researcher FSRBI VNIIGiM named after A.N. Kostyakov; Moscow, ul. Boljshaya Akademicheskaya, d. 44, cor. 2, tel.: 8(499)9770816, e-mail: asher5@mail.ru

УДК 502/504:532.5:626.4

Ю.Г. БУРКОВА, В.А. ФАРТУКОВ

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

Л.Б. БЕКИШЕВА

Акционерное общество «Концерн «Моринсис – Агат», г. Москва, Российская Федерация

ИМИТАЦИЯ ОТКАЗОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НАПОРНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Представлены результаты имитационного моделирования работы напорной гидравлической системы, представляющей собой разветвленную (кольцевую) схему водоподачи. В основе имитационной модели лежит анализ многомерной случайной величины, базирующийся на методах теории временных рядов. Полученные результаты имитационного моделирования показали хорошее согласование с натурными экспериментами напорной гидравлической системы (НГС). При проектировании и реконструкции НГС необходимо учитывать фактор риска. Учет этого фактора может существенно снизить стоимость всей системы в целом. Имитационное моделирование НГС позволяет получить интервальные оценки надежности с учетом влияния отключения участков, снижения напоров в системе в расчетный час и часы максимального водопотребления, числа отказов за период эксплуатации. Полученные результаты могут служить основой оптимизации как вновь создаваемой, так и реконструируемой НГС с целью обеспечения заданной надежности подачи воды.

Напорная гидравлическая система, имитационное моделирование, факторный анализ, надежность водоподачи, оптимизация работы напорной гидравлической системы.

Введение. Процесс функционирования напорной гидравлической системы (НГС) можно представить в виде смены различных состояний, характеризующихся величиной водопотребления и техническим состоянием входящих в нее элементов. При этом имеющая место стохастичность ха-

рактеризуется не регулируемым случайным процессом отбора воды потребителями, процессами износа и старения, аварийностью, отказами работы оборудования.

При моделировании гидравлических режимов водопроводных сетей в условиях аварийных отключений отдельных участков

необходимо учитывать сокращение водопотребления, вызванное снижением напоров у ряда абонентов.

Целью работы является определение метода решения поставленной проблемы и частных задач работы и проектирования напорной гидравлической системы на основе проведения имитационного моделирования, основанного на теории надежности и учета влияния отключения каждого участка системы.

В соответствии с оценками, приведенными в [5] можно заключить, что при напорах у потребителей H_i , равных или больших требуемого $H_{i \text{ треб}}$, водопотребление i – го узла Q_i равно нормативному значению $Q_{i \text{ треб}}$, а при снижении напора H_i водопотребление уменьшается по закону:

$$Q_i = \begin{cases} Q_{i \text{ треб}}, & \text{при } H_i \geq H_{i \text{ треб}} \\ Q_{i \text{ треб}} \cdot \sqrt{H_i / H_{i \text{ треб}}}, & \text{при } H_{i \text{ крит}} \leq H_i \leq H_{i \text{ треб}} \\ 0 & \text{при } H_i \leq H_{i \text{ крит}} \end{cases}$$

где $H_{i \text{ крит}}$ – критический напор, соответствующий полному прекращению водоразбора.

Метод решения. При такой постановке задачи, обычные методы контурной увязки работают неустойчиво, что приводит к тому, что итерационный процесс расходится. Для устранения этого недостатка в аварийных ситуациях (при отключении отдельных участков), НГС моделируется системой линейных и нелинейных уравнений [3]:

$$\begin{cases} \sum_{p \in i} q_{pn} + Q_i \varphi_i(H_i) = 0, \quad i = 1, \dots, m; \\ (Z_i + H_i) - (Z_j + H_j) - \text{sign}(q_{ij}) \cdot S_{ij} \cdot |q_{ij}|^\beta = 0, \quad i, j = 1, \dots, m \in I - I_{cn} - I_{3d}; \\ H_j + h_{ej} - H_{Hj} + \frac{S_{Hj}}{k_j^2} \cdot q_{ej} \cdot |q_{ej}| = 0, \quad j = 1, \dots, k; \\ H_{i2} - H_{i1} - H_{cni} + \frac{S_{cni}}{k_{cni}^2} \cdot q_{iy} \cdot |q_{iy}| = 0, \quad iy \in I_{cn}; \\ H_{i1} - H_{i2} - \frac{8\xi_{iy}}{g \cdot \pi \cdot d_{iy}^4} \cdot q_{iy} \cdot |q_{iy}| = 0, \quad iy \in I_{3d}. \end{cases}$$

Решение этой системы уравнений осуществляется методом Ньютона. При моделировании случая отключения участка НГС от водопотребления, диаметр отключаемого участка при расчете снижается до величины, близкой к нулю, или увеличивается его гидравлическое сопротивление, что приводит к уменьшению пропускной способности моделируемого участка практически до нуля.

В качестве имитируемых были выбраны случайные факторы, оказывающие наибольшее воздействие на систему: – вектор узловых расходов водопотребления; – отказы и восстановления участков водопроводной сети. Узловые расходы имитируются с шагом квантования в 60 минут. По полученным результатам имитационного моделирования можно оценить возможность системы к саморегулированию, её резервы и “узкие места”, скорректировать отдельные параметры и повторить имитацию.

Напорная гидравлическая система является восстанавливаемым объектом, работоспособность которого, в случае возникновения отказа, подлежит восстановлению. Рассмотрим процесс отказа и восстановления отдельных участков НГС. Процесс функционирования восстанавливаемого элемента представляет собой чередование периодов: исправной работы, отказа и восстановления, после чего снова наступает период исправной работы [4]. Продолжительность ремонта зависит от ряда операций, определяемых различными причинами, и считается случайной величиной.

На рисунке 1 приведен фактический временной ряд водопотребления жилого дома. Из него видно, что отбор воды имеет вид случайных периодических колебаний. В отдельные моменты времени он достигает нулевых значений, что соответствует полным отказным состояниям.

Процесс восстановления продолжается несколько часов, в течение которых водопотребление постоянно изменяется в соответствии с суточными колебаниями и стохастичностью процесса. Таким образом, при отключении участков в одних случаях будет происходить отказ узлов из-за нехватки напоров в них, в других случаях при уменьшении водопотребления отказа узлов не будет. Для уменьшения негативных явлений в послеаварийный период (до включения участка) можно управлять параметрами водопотребителей, например, путем включения дополнительных насосов или частотным регулированием оборотов электродвигателя насосной установки.

Исследования показали [1], [2] и др., что как процесс отказов, так и процесс восстановлений участков, подчиняются экспоненциальному закону распределения. В работе использовались величины удельных интенсивностей отказов и восстановлений, как функции диаметров и материалов труб, приведенные в таблице:



Рис. 1. Изменение водопотребления жилого дома по часам суток

Таблица

Основные свойства случайных величин для имитации НГС [5]

Распределение	M^{ξ}	D^{ξ}	Функция распределения	Плотность вероятности	Генерирование случайных чисел
Экспоненциальное	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\lambda e^{-\lambda t}$	$ti = \frac{-1}{\lambda} \ln ri$
Нормальное	m	σ^2	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}} dt$	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-m)^2}{2\sigma^2}}$	$ti = \sigma \sum_{i=1}^k r_i - \frac{k}{2} + m$ $(k/12)^{\frac{1}{2}}$ $k \geq 12$
Вейбулла	$b\Gamma[(1+c)/c]$	$b^2\Gamma[(c+2)/c] - \{\Gamma[(c+1)/c]\}^2$	$1 - e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}$	$c \times t^{c-1} / b^c \cdot e^{-\left(\frac{t}{b}\right)^c}$	$ti = b(-\ln ri)^{1/c}$

В результате приходим к следующей последовательности расчета:

- в начальный момент времени все участки считаются исправными. Формируются массивы времени отказа и восстановления каждого участка. Определяется время ближайшего отказа, которое переводится в календарную дату и час суток. По ним находятся номер графика водопотребления и расчетный час. По другой программной реализации алгоритма, выбирается наиболее неблагоприятный случай – час с максимальным в течение суток расходом.

Осуществляется имитация случайного вектора водопотребления и производится гидравлический расчет системы при отключенном аварийном участке по схеме с нефиксированными отборами. Определяется возможность включения дополнительных насосов и частотного регулирования.

Определяются узлы с напорами, меньше требуемых величин, а результаты сохраняются в файле вывода. Производится переход к следующему часу суток и сравнение времени после аварии с заданным временем восстановления. В случае продолжения ремонта для нового часа разыгрывается вектор водопотребления и производится увязка сети. Расчет повторяется до истечения времени ликвидации ава-

рии, после чего участок считается работающим и для него определяются новое время отказа и восстановления. Моделируется время ближайшей аварии и расчет повторяется до окончания имитации. Производится обработка полученных данных, в результате чего для каждого узла определяется суммарное время отказа за период имитации и вклад аварий отдельных участков в отказ выбранного узла.

При разработке алгоритма были сделаны следующие допущения:

- отказы участков независимы между собой, при имитации узловых расходов не учитывалось изменение характера водопотребления при аварии, связанное с перераспределением времени разбора воды. Узловые расходы подчиняются нормальному закону распределения.

В качестве примера рассмотрим кольцевую систему подачи и распределения воды с контррезервуаром. По существующим методикам строился ступенчатый график водопотребления. Часом максимального водопотребления является час (21-22). В утренние часы максимум разбора приходится на час (7-8). На них мы и будем ориентироваться при оценке надежности. При аварии узел с минимальным напором может сместиться и ориентироваться необходимо на узлы,

в которых снижение напора наиболее критично (например, крупные предприятия с непрерывным технологическим процессом). Кольцевая структура сети повышает ее надежность, но не гарантирует отсутствия отказов. На первом этапе проводился детерминированный расчет сети, и определялись параметры критического узла в час макси-

мального водопотребления при отключении каждого участка. Величина свободного напора в критическом узле в зависимости от отключаемого участка приведена на рисунке 2. Подобные расчеты могут служить основой для оптимизации системы с целью обеспечения снижения напоров в отдельных узлах, не ниже заданной величины.

Аварийный напор в узле 9 от отказавших участков в Час Q_{max}

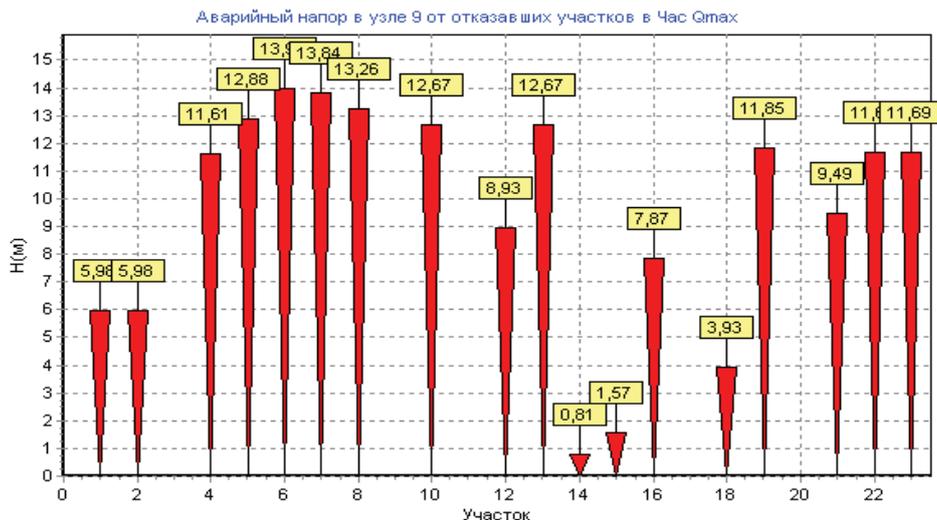


Рис. 2. Влияние отключения участков на напор в час Q_{max} (21-22), $Q_{треб} = 14$ м.
(Гидравлическая имитация)

Для этой системы был проведен имитационный расчет по алгоритму имитационного моделирования [3] в течение 20 лет. В результате определялось число часов отказов каждого узла, а также число отказов критического узла в зависимости от отключаемого участка за весь период расчета, который принят равным нормативному времени эксплуатации. Результаты фикси-

ровались либо в час аварии с последующим изменением водопотребления за период ремонта, либо аварии приводились к часу максимального водопотребления по принципу наименее благоприятного случая. Результаты приведены на рисунке 3. Анализ подобных графиков может быть основанием для корректировки параметров системы и режимов ее эксплуатации.

Число часов отказа каждого узла за период расчёта



Рис. 3. Число часов отказов узлов за 20 лет эксплуатации (расчет в часы аварии).
(Гидравлическая имитация)

Выводы

Результаты имитационного моделирования хорошо согласуются с натурными экспериментами НГС, при анализе, как с помощью многомерной случайной величины, так и методов теории временных рядов.

При проектировании и реконструкции НГС необходимо учитывать фактор риска, что может существенно снизить стоимость системы.

На основе теории надежности, гидравлических расчетов и имитационного моделирования для НГС получены оценки:

- влияния отключения каждого участка на уменьшение напора выбранного узла в заданный час;
- числа часов отказов каждого узла за период эксплуатации;
- числа отказов выбранного узла за период эксплуатации;
- проведение расчетов в час аварии и час максимального водопотребления, что позволяет получить интервальные оценки надежности.

Полученные результаты могут служить основой оптимизации как вновь создаваемой, так и реконструируемой НГС с целью обеспечения заданной надежности подачи воды.

Имитационное моделирование является эффективным методом расчета динамики функционирования гидравлических систем, включающих насосные станции и напорно-регулирующие емкости.

При проектировании гидравлической системы необходимо учитывать выбранную схему эксплуатации и процесс управления.

Библиографический список

1. **Абрамов Н.Н.** Надежность систем водоснабжения: (Надежность и качество) – М.: Стройиздат, 1979. – 231 с.
2. Эксплуатация систем водоснабжения, канализации и газоснабжения: Справочник / В.Д. Дмитриев, Д.А. Коровин, А.И. Кораблев и др. – Л.: Стройиздат, 1988. – 383с.; ил.
3. **Карамбиров С.Н.** Математическое моделирование систем подачи и распределения воды в условиях многорежимности и неопределенности: Монография. – М.: МГУП, 2004. – 197с.
4. **Карамбиров С.Н., Манукьян Д.А., Бекишева Л.Б.** Оценка надежности подачи воды системами водоснабжения. / Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук. – 2013. – № 6. – С. 63-65.
5. **Эгильский И.С.** Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды. – Л.: Стройиздат, 1988. – 216 с.: ил.

Материал поступил в редакцию 22.07.2017 г.

Сведения об авторах

Буркова Юлия Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Б. Академическая ул., д.44; тел.: 8(499)1539766; e-mail: burkova.msuee@mail.ru

Фартуков Василий Александрович, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, Прянишникова ул., д.19; тел.: 8(916)6531759, e-mail: vasfar@mail.ru

Бекишева Лаура Борисовна, аспирантка, менеджер АО «Концерн «Моринсис – Агат», 105275, г. Москва, шоссе Энтузиастов, 29; тел.: 8(917)5425746; e-mail: laura.lora@list.ru

YU.G. BURKOVA, V.A. FARTUKOV

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Russian State Agrarian University-MAA named after C.A. Timiryazev", Moscow, Russian Federation

L.B. BEKISHEVA

JSC "Concern "Sea information systems – Agat", Moscow, Russian Federation

SIMULATION OF FAILURES OF PRESSURE HYDRAULIC SYSTEM FUNCTIONING

The paper presents the results of simulation modeling of the operation of the pressure hydraulic system which is a branched (ring) water supply scheme. The simulation model is based on the analysis of a multidimensional random variable based on the methods of the theory of time series. The obtained results of the simulation modeling showed a good agreement with the field experiments of the pressure hydraulic system (PHS). When designing and reconstructing PHSs, it is necessary to take into account the risk factor. Accounting for this factor can significantly reduce the cost of the entire system as a whole. Simulation modeling of PHS allows obtaining interval

reliability estimates taking into consideration the effect of disconnection of sections, reduction of pressure in the system at the calculated hour and hours of maximum water consumption, number of failures during the operation period. The obtained results can serve as a basis for optimization of both newly created and reconstructed PHS in order to ensure a given reliability of water supply.

Pressure hydraulic system, simulation modeling, factor analysis, reliability of water supply, optimization of pressure hydraulic system.

References

1. **Abramov N.N.** Nadezhnostj system vodosnabzheniya: (Nadezhnostj i kachestvo) – M.: Strojizdat, 1979. – 231 s.
2. **Expluatatsiya system vodosnabzheniya, kanalizatsii i gazosnabzheniya: Spravochnik / V.D. Dmitriev, D.A. Korovin, A.I. Korablev I dr.** – L.: Stroyizdat. 1988-383; il.
3. **Karambirov S.N.** Matematicheskoe modelirovanie system podachi i raspredeleniya vody v usloviyah mnogorezhimnosti i neopredelennosti: Monografiya. – M.: MGUP, 2004-197s.
4. **Karambirov S.N., Manukyan D.A., Bekisheva L.B.** Otsenka nadezhnosti podachi vody sistemami vodosnabzheniya. // Doklady Rossijskoj Akademii sel'skokozyajstvennyh nauk. – 2013. – № 6. – S. 63-65.
5. **Egilsky I. S** Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tehnologicheskimi protsessami podachi i raspredeleniya vody. – L.: Stroyizdat, 1988. – 216 s. : ill.

The material was received at the editorial office
22.07.2017

Information about the authors

Fartukov Vasilij Alexandrovich, associate professor, candidate of technical sciences, Federal state budgetary educational institution of higher education “Russian state agrarian University-MAA named after C.A. Timiryazev”, Moscow, 125550, ul. Pryanishnikova, d. 19 tel.: 8(916)6531759; e-mail: vasfar@mail.ru

Burkova Yulia Gennadjevna, associate professor, candidate of technical sciences, Federal state budgetary educational institution of higher education “Russian state agrarian University-MAA named after C.A. Timiryazev”, Moscow, 125550, ul. Pryanishnikova, d. 19 tel.: 8(499)1539766; e-mail: burkova.msuee@mail.ru

Bekisheva Laura Borisovna, post graduate student, manager of JSC “Concern “Sea information system – Agat”, Moscow, 105275, Enthusiasts highway, 29 tel.: 8(917)5425746; e-mail: laura.lora@list.ru

УДК 502/504:627.8

DOI 10/26897/1997-6011/2018-1-18-24

В.А. ВОЛОСУХИН, Е.Н. БЕЛОКОНЕВ

Институт безопасности гидротехнических сооружений (ИБГТС), Ростовская область, г. Новочеркасск, Российская Федерация

М.А. ВОЛЫНОВ

Государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации им. А.Н. Костякова (ВНИИГиМ), г. Москва, Российская Федерация

ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ГАЭС

Целью исследований являлось экспериментальное подтверждение того факта, что интенсивность воронкообразования в усовершенствованном варианте водоприемника и входного оголовка существенно ниже, чем в проектном и разработка рекомендаций по внесению изменений в проект. В статье изложены результаты физического моделирования водоприемника и входного – выходного оголовка верхнего бассейна (ВБ) второй очереди Загорской гидроаккумулирующей станции ЗаГАЭС-2. Исследовались проектный и реконструированный варианты водоприемника и оголовка. Реконструкция водоприемника и оголовка была предложена с целью сведения до минимума интенсивности воронкообразования в акватории сооружений по результатам выполненного ранее 2D и 3D моделирования движения водного потока. В новой конструкции верхний бассейн переходит в водоприемник с уклоном дна 1:7. Перед входным оголовком дно водоприемника запроектировано с нулевым уклоном. Входные отверстия имеют раструбное очертание с вертикальными стенками, достигающими верха входного оголовка. Бычки короче по длине,