

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК: 556.16 (556.51)

**В. В. Сахаров,
А. А. Чертков,
С. В. Сабуров**

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДОВ ВОДЫ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ ВОДНЫХ КОММУНИКАЦИЙ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ

Решение проблемы потокораспределения в многоконтурных электрических и гидравлических сетях и системах составляет основу создания современных технологий моделирования гомогенных и гетерогенных сред в установившихся и переходных режимах. С учетом широкого спектра приложений проблемы потокораспределения на объектах водного транспорта и в различных сферах производства важной технической задачей является развитие и создание новых эффективных способов анализа и синтеза многоконтурных сетей с использованием численных методов оптимизации, идентификации и параметрической оценки. В этой связи в работе рассматривается модель и алгоритм расчета расходов воды в рукавах разветвленного участка водной коммуникации, основанный на принципе наименьшего действия Максвелла. Минимизация потерь мощности потока, расходуемой на перемещение жидкости по руслу, оценивается с помощью алгоритма открытого поиска, относящегося к классу генетических алгоритмов. В основу разработки алгоритма анализа и синтеза нелинейных гидравлических сетей со сложной структурой положены технологии термодинамического моделирования, базирующиеся на топологической общности электрических и гидравлических схем, а также на фундаментальном положении о движении транспортных сред по единым законам течения, сохранения массы и энергии. Современные водные транспортные сети с многорукавными разветвлениями русел характеризуются высокой размерностью, сложной зависимостью технологических параметров от структуры и параметров сетей, а также внешних условий, что значительно усложняет разработку моделей многорукавных разветвлений и проведение машинных экспериментов для получения оценок расходов воды на стадии проектирования и эксплуатации. Предложенные способы расчета потокораспределения применены для решения конкретных задач. Приведены примеры для подтверждения корректности выполненных решений.

Ключевые слова: расходы воды, водные транспортные сети, многорукавные разветвления реки, технологии термодинамического моделирования, потокораспределение, принцип наименьшего действия.

Вводная часть

Выполнение дноуглубительных работ и планирование мероприятий по улучшению судоходных условий на реках определяют необходимость оценки расходов воды в многорукавных разветвлениях русел и отметок уровней воды в узлах разветвлений расчетным путем. Оценки могут быть многовариантными, относящимися к различным полным расходам воды в реке и варьируемым модулям сопротивления рукавов. Использование математических моделей многорукавных разветвлений русла для выполнения расчетов рабочих параметров способствует существенному ускорению процесса поиска эффективных решений по поддержанию гарантированных глубин на отдельных участках водного пути. Модели многорукавных разветвлений являются нелинейными, обладающими высокой чувствительностью к вариации параметров, поэтому решение задачи и получение количественных оценок рабочих параметров должны базироваться на использовании эффективных вычислительных процедур, обеспечивающих высокую скорость сходимости итерационных процессов.

Река является открытой гидравлической сетью, поэтому процессы в ней могут анализироваться на основе общей теории сетей различного назначения, допускающих оценки параметров в установившихся режимах по обобщенным показателям, например приведенным в [1] – [4].

Для расчета распределения расходов воды по рукавам разветвления реки допустимо применение квазистатических моделей, рассмотренных подробно в [5] и рекомендованных для использования в линейных организациях водных путей. Специфика моделирования, состоящая в допущении унимодальности характеристик отдельных элементов (ветвей) сети, определяет возможность получения единственности и обеспечения устойчивости решения. Как и любая другая сеть со сложной топологией, многорукавное разветвление русла в общем случае имеет n узлов и m рукавов. Для каждого i -го рукава, $i = 1, \dots, m$, предварительно рассчитываются модули сопротивлений b_i . Модули сопротивлений являются нелинейными функциями длины отдельных участков i -го рукава, площадей их живого сечения, глубин, коэффициента шероховатости и др. При составлении модели принимается, что расход воды Q_i в i -м рукаве связан с отметками свободной поверхности на его концах Z_{iH} и Z_{iK} с помощью нелинейного уравнения, имеющего вид

$$Z_i = b_i \cdot Q_i^{p_i}, \quad (1)$$

где $Z_i = Z_{iH} - Z_{iK}$; b_i — модуль сопротивления i -го рукава; p_i — постоянное число (показатель степени).

Уравнения вида (1), по существу, являются уравнениями движения жидкости, Z_i — падение свободной поверхности в i -м рукаве. Для k -го узла, к которому по S рукавам подводится вода, а по R — отводится, можно записать уравнение неразрывности потока, согласно которому сумма расходов в узле равна нулю, т. е.

$$\sum_{j=1}^S Q_{jk} - \sum_{z=1}^R Q_{zk} = 0. \quad (2)$$

Заметим, что в принятой модели узел не является буфером (накопителем). Обычно показатель степени p_i в уравнении (1) для турбулентных потоков принимается равным двум. В других случаях его значение можно оценить по эксперименту методом наименьших квадратов либо использовать иные методы оптимальных оценок. Таким образом, при заданном значении полного расхода воды в реке Q , заданной структуре разветвления русла (топологии сети), известных b_i и p_i необходимо определить Q_i и Z_i для всех $i = 1, \dots, m$ путем совместного решения уравнений (1) и (2). Уравнения вида (1) являются составляющими замкнутых независимых контуров, определяемых топологическими свойствами конкретного многорукавного участка водной коммуникации.

Из соотношений (1) и (2) видно, что каждый рукав, обладающий соответствующим модулем сопротивления, является аналогом ветви в электрической цепи, активное сопротивление которой численно равно этому модулю. Расход Q_i есть аналог тока в i -й ветви, а величина Z_i аналогична падению напряжения на i -й ветви. Что касается отметок уровней в узлах разветвления, то эти понятия эквивалентны потенциалам узлов.

Если расчетная схема разветвления реки содержит n узлов и d независимых контуров, то число уравнений, подлежащих решению, равно

$$(n + d - 1).$$

Уравнение (2) аналогично первому закону Кирхгофа для электрической цепи, согласно которому алгебраическая сумма токов, подтекающих к любому узлу схемы, равна нулю.

С помощью уравнений (1) для каждого замкнутого независимого контура можно составить уравнения вида

$$\sum_{i=1}^v b_i Q_i^{p_i} = \sum_{i=1}^v Z_i, \quad (3)$$

где v — число рукавов, входящих в контур.

Уравнение (3) аналогично второму закону Кирхгофа в электрической цепи, согласно которому алгебраическая сумма напряжений вдоль любого замкнутого контура равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^v Z_i = 0, \quad (4)$$

что справедливо для контура, не содержащего источников ЭДС.

Несмотря на кажущуюся простоту приведенных уравнений (2) – (4), их решение при высокой размерности задачи и различных p_i представляет собой непростую задачу. Метод аналогий позволяет применить любой из известных методов расчета электрических цепей непосредственно для расчета многорукавных разветвлений рек и других сетей. В частности, для анализа процессов потокораспределения в сложных гидравлических сетях можно применять принцип наименьшего действия Д. К. Максвелла, рассмотренный в [6], [7]. Широко используемый в электрических цепях и сетях, этот принцип позволяет выполнять расчеты на базе современных численных методов оптимизации и исследовать сложные энергетические процессы в сетях на качественно новом уровне. Он определяет взаимную связь задач математического программирования в электротехнике с аналогичными задачами потокораспределения в других средах, обладающих экстремальными свойствами расхода энергии на транспортирование жидкости.

Основная часть

Принцип наименьшего действия является одним из наиболее общих физических принципов, определяемых природными свойствами большого класса физических систем. Он практически соблюдается во всех сетях и сетевых системах самого различного назначения. Согласно принципу наименьшего действия, в транспортной сети, в частности в открытой гидравлической сети, существует физическая величина, называемая *действием*, которая при совершении транспортной работы принимает наименьшее значение. Эта величина имеет размерность произведения времени и работы. Применительно к стационарному течению жидкости в открытых руслах действие не зависит от времени. Поэтому минимум действия должен определяться непосредственно минимумом энергии, рассеиваемой системой (в виде тепла) за каждую единицу времени.

Основанный на работах Максвелла и Кирхгофа экстремальный принцип потокораспределения в открытых гидравлических сетях может быть сформулирован в следующей форме: потоки в открытой гидравлической сети распределяются по ветвям (рукавам) таким образом, что этими потоками производится наименьшее количество теплоты. Следовательно, энергия, затрачиваемая на транспортирование жидкости по сети в единицу времени, является величиной минимальной, что справедливо при условии соблюдения материального баланса во всех узлах цепи.

При моделировании процессов в пассивных сетях, для которых строго не фиксируются условия взаимодействия с окружающей средой (притоки и стоки в узлах, изменяющийся вектор расходов и отметки уровней в узлах, вызванные внешними условиями, и др.), стационарный процесс может не соблюдаться. Если же в каждом сечении сети эти параметры поддерживаются постоянными, т. е. соблюдается равенство отметок уровней во всех точках внутри выделенного сечения реки, равенство расходов по сечениям, то транспортируемый поток проходит через последовательность равновесных состояний и его движение подчиняется принципу наименьшего действия.

Если в уравнении (1) показатель степени $p_i = 2$, каждое значение Z_i является квадратичной функцией расхода Q_i в i -м рукаве. Тогда мощность сети, потребляемую на транспортирование полного расхода реки Q через участок водной коммуникации, состоящий из m ветвей, можно представить суммой кубических парабол:

$$F = \sum_{i=1}^m b_i Q_i^3, \quad (5)$$

где b_i — модуль сопротивления i -го рукава.

В математической постановке, согласно исследованиям [6] – [8], задача потокораспределения в разветвленной коммуникационной сети формулируется следующим образом:

найти

$$J = \min F = \min \sum_{i=1}^m b_i Q_i^3 \quad (6)$$

при соблюдении условий (2) для всех k , $k = 1, \dots, n$, и (3). Линейные и нелинейные ограничения принято представлять в векторно-матричной форме:

$$A_{eq} \cdot q = b_{eq} \quad (7)$$

$$f(q) = 0, \quad (8)$$

где $q = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_m]$ — вектор расходов рукавов; A_{eq} — матрица размерности $(n \times m)$, состоящая из элементов, равных 1, либо -1 , и соответствующая первому закону Кирхгофа; b_{eq} — вектор, содержащий численные значения расходов воды, подводимых и отводимых от сети в узлах (полный расход реки, сбросы воды за пределы сети и др.); $f(q)$ — нелинейная вектор-функция, подлежащая «обнулению» и соответствующая ограничениям, определяемым вторым законом Кирхгофа.

Для решения экстремальной задачи (6) – (8), сформулированной в терминах принципа наименьшего действия, воспользуемся алгоритмом открытого поиска из класса генетических алгоритмов. Алгоритм отличается простотой, универсальностью и высокой степенью адаптации к поиску экстремумов функций со сложной формой гиперповерхности. Для него не требуется информация о значении градиентов или высших производных непрерывных функций, обычно используемых в итерационных процессах для оценки шага и скорости приближения к точке оптимума. Оценка критерия качества производится по множеству точек, расположенных вокруг текущей точки, путем выбора одной из них, где критерий принимает наименьшее из всех оцениваемых значений. В вычислительной среде MatLAB алгоритм открытого поиска реализуется с помощью функции `patternsearch` [9].

Применение алгоритма рассмотрим на конкретном примере, приведенном в [5, с. 87–89]. Структура и параметры многорукавного разветвления водной коммуникации представлены на рис. 1. Разветвление состоит из семи ветвей и шести узлов, обозначенных на рисунке соответствующими индексами.

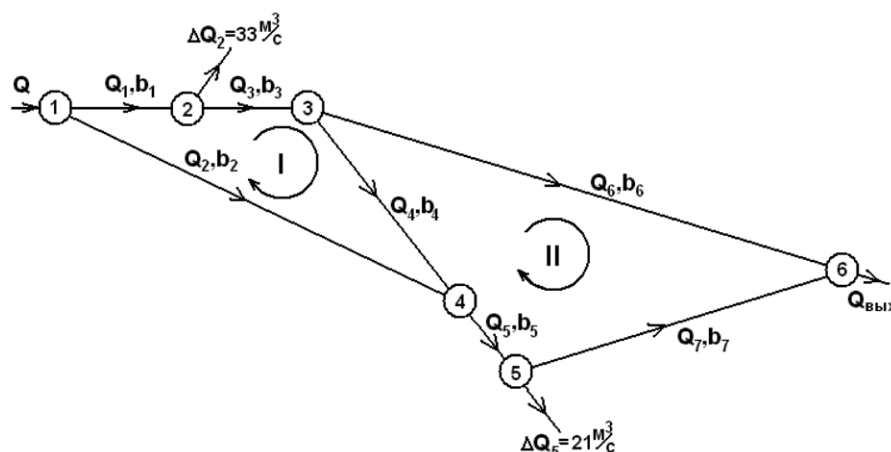


Рис. 1. Схема многорукавного разветвления русла реки

Приток к первому узлу равен Q . Он представляет собой полный расход воды в реке. В узлах 2 и 3 производится отвод воды с фиксированными расходами. Расходы и модули сопротивлений соответствующих рукавов обозначены символами Q_i и b_i , $i = 1, 2, \dots, 7$. $Q_{\text{вых}}$ — расход на выходе разветвления, являющийся функцией Q . Математическая модель (6) – (8) применительно к разветвлению (рис. 1) имеет следующий вид.

1. Критерий качества

$$J = \min \sum_{i=1}^7 b_i Q_i^3.$$

2. Ограничение-равенство, согласно первому закону Кирхгофа, содержит составляющие:

$$b_{eq} = [Q \ \Delta Q_2 \ 0 \ 0 \ \Delta Q_5]; \quad A_{eq} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Ограничения приведены для первых пяти узлов. Шестой узел не учтен, поскольку при этом образуется линейно зависима система уравнений.

3. Нелинейные ограничения составлены для двух контуров (см. обозначения на рис. 1 контуров I и II):

$$f(q) = \begin{bmatrix} b_1 \cdot Q_1^2 + b_3 \cdot Q_3^2 + b_4 \cdot Q_4^2 - b_2 \cdot Q_2^2 \\ b_6 \cdot Q_6^2 - b_7 \cdot Q_7^2 - b_5 \cdot Q_5^2 - b_4 \cdot Q_4^2 \end{bmatrix}.$$

Поиск расходов воды в рукавах выполним на базе вычислительного алгоритма с помощью файла sah374.m. В нем сохранены численные значения параметров из примера, приведенного в [5]. В данном файле кроме расчетов, выполненных в цикле с шагом дискретности 20 м³/с для полного расхода воды в реке $Q = 819$ м³/с, получены решения при вариации полного расхода в диапазоне $500 \leq Q \leq 1500$. Из полученных численных значений сформирована матрица Q_r размерности (7×51), которая использована для графических построений.

Фрагмент программы оптимизации расходов воды в рукавах реки по алгоритму открытого поиска приведен далее.

% ОПТИМИЗАЦИЯ ПО АЛГОРИТМУ ОТКРЫТОГО ПОИСКА.

% Определение целевой функции:

```
lpr=@(q) b1*q(1).^3+b2*q(2).^3+b3*q(3).^3+b4*q(4).^3+b5*q(5).^3+...  
        b6*q(6).^3+b7*q(7).^3;
```

% Реализация алгоритма открытого поиска:

```
[q,J]=patternsearch(lpr,q0,[],[],Aeq,beq,lb,ub);
```

```
Qr=[Qr q];
```

```
end
```

```
Qr;
```

% Графические построения:

```
Q=500:20:1500;
```

```
plot(Q,Qr),grid
```

% Проверка выполнения ограничений-равенств:

```
z=Aeq*q;
```

```
[z beq]
```

На рис. 2 приведены графики, представляющие зависимости расходов в рукавах от полного расхода воды, Q м³/с, в реке. Численные результаты расчета для $Q = 819$ м³/с представлены в таблице, помещенной в верхнем левом углу рис. 2.

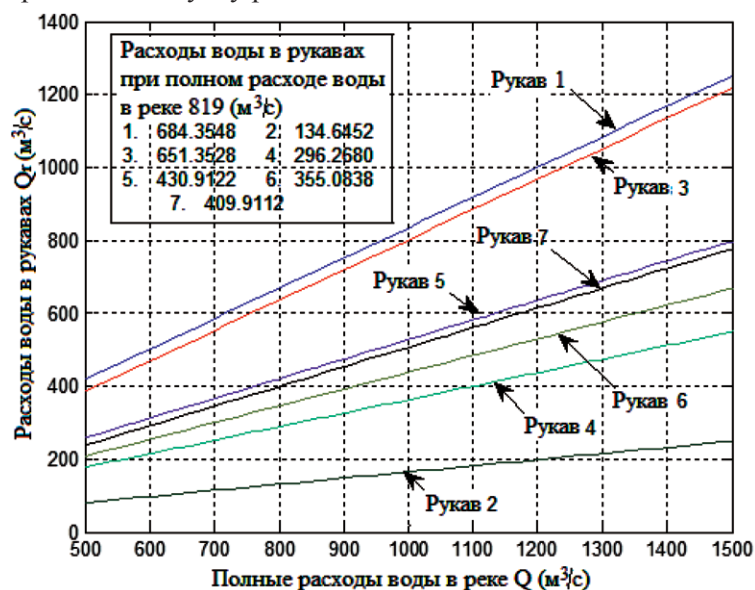


Рис. 2. Зависимость расходов воды в рукавах от наполнения русла

Теперь выполним расчет исходя из предположения, что показатели степени в модели (1) не обязательно равны двум. Это приведет к различным показателям степени в критерии качества (6).

Для определенности при прежних значениях модулей сопротивлений рукавов сформируем критерий следующим образом:

$$k=1.0e-08;$$

$$d=[4.61 \ 431.5 \ 5.67 \ 37.12 \ 12.8 \ 160.1 \ 86.6]*k;$$

$$J1=d*[q(1).^2.8 \ q(2).^3.1 \ q(3).^3.05 \ q(4).^2.6 \ q(5).^3 \ q(6).^2.78 \ q(7).^2.95]^.$$

Тогда для полного расхода $Q=819 \text{ м}^3/\text{с}$ получим следующее распределение расходов воды по рукавам:

```
q1 =
    735.8518
     83.1472
    702.8508
    250.6980
    333.8442
    452.1518
    312.8432
```

Критерий качества:

```
J1 = 99.9412
```

Проверка выполнения ограничений:

```
[Aeq*q1 beq]
ans =
    818.9990    819.0000
    33.0010    33.0000
     0.0010         0
     0.0010         0
    21.0010    21.0000
```

Контрольная сумма расходов в первом и втором рукавах, равная полному расходу в реке, $Q = 819 \text{ м}^3/\text{с}$:

```
q1(1)+q1(2)
ans =
    818.9990
```

Заключительная часть

Из текста файла следует, что нелинейные ограничения — равенства (п. 3), составленные по второму закону Кирхгофа, в явном виде не использованы. Они учтены в неявной форме в процессе минимизации критерия качества, характеризующего энергетику распределения расходов воды по рукавам.

Принцип наименьшего действия и алгоритм открытого поиска составляют эффективное средство моделирования расходов жидкости в сложных гидравлических сетях различного назначения и технических системах, используемых на объектах водного транспорта. Кроме того, метод и численные алгоритмы оптимизации, базирующиеся на принципе наименьшего действия, свидетельствуют о возможности их использования для расчетов параметров стационарных режимов в нелинейных электрических и гидравлических сетях. При высокой размерности сетей следует использовать в нелинейном программировании принципы декомпозиции. Приведенные примеры подтверждают корректность предложенных решений.

Повышение эффективности и качества моделирования стационарных процессов потоко-распределения в сетях и сетевых системах различного назначения экстремальными методами с использованием компьютерных технологий представляет собой самостоятельную научную проблему, получившую важные приложения [10] – [12] на водном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меренков А. П. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения / А. П. Меренков, Е. В. Сеннова, С. В. Сумароков [и др.]. — Новосибирск: Наука, 1992. — 405 с.
2. Kaganovich B. M. On the area of equilibrium thermodynamics application / B. M. Kaganovich, A. V. Kelko, V. A. Shamansky, I. A. Shirkalin // Proc. of ASME 2004 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. — Anaheim, California, USA, 2004. — С. 197–203. DOI:10.1115/IMECE2004-60775.
3. Ottinger H. C. Beyond Equilibrium Thermodynamics / H. S. Ottinger. — Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. — 635 p.
4. Каганович Б. М. Термодинамика теории цепей и их совместные применения в энергетических исследованиях / Б. М. Каганович, Н. И. Воропай, В. А. Стенников [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2014. — № 5. — С. 3–15.
5. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
6. Сахаров В. В. Балансовые модели и их применение в автоматизированных системах управления производством / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 46–53.
7. Сахаров В. В. Моделирование стационарных режимов в электрических и гидравлических сетях средствами нелинейного программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 156–164.
8. Мазур Г. С. Определение расходов воды речных потоков при минимуме полевых измерений / Г. С. Мазур // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Наука о Земле». — 2009. — Т. 1. — № 1. — С. 93–106.
9. Дьяконов В. П. Математические пакеты расширения MatLAB. Специальный справочник / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. — СПб.: Питер, 2001. — 480 с.
10. Магомедова А. В. Результаты компьютерного моделирования гидравлических процессов на устьевом участке русла реки Терек с использованием программного комплекса TEREKFLOODGIS / А. В. Магомедова, М. А. Гурьев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2008. — № 14. — С. 126–132.
11. Савичев О. Г. Метод определения характерных расходов воды рек гумидных областей Западной Сибири при отсутствии данных наблюдений / О. Г. Савичев, В. В. Паромов // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10 – 14. — С. 3157–3160.
12. Richter Brian D. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity / Brian D. Richter, M. Ruth, D. L. Harrison, R. Wigington // Ecological Applications. — 2003. — Vol. 13. — Issue 1. — Pp. 206–224. DOI: 10.1890/1051-0761(2003)013[0206:ESWMMR]2.0.CO;2.

MODELING COSTS WATER RIVER FLOWS OF WATER COMMUNICATIONS ON THE BASIS OF THE PRINCIPLE OF LEAST ACTION

The solution of the flow distribution in multi-loop electric and hydraulic networks and systems is the basis of creation for modern technologies modeling of homogeneous and heterogeneous media under steady state and transient conditions. Given the wide range of application problems of flow for the water transport units and in different spheres of production, an important technical challenge is the development and creation of new, effective methods of analysis and synthesis of multiple loop networks using numerical optimization methods, identification and parametric estimation. In this regard, the paper discusses the model and algorithm of calculation of water flow in the branched sleeves of the water utilities, based on the principle of least action Maxwell. Minimization of power loss of flow consumed for moving fluid through the channel, estimated using the open search algorithm belonging to the class of genetic algorithms. The basis for the development of algorithm analysis and synthesis of nonlinear hydraulic networks with complex structure technology based on thermodynamic modeling based on topological generality of the electrical and hydraulic circuits, and on the fundamental regulations on the movement of a vehicle by the same laws of flow, conservation of mass and energy. Modern water transport network with multi-hoses branching channels are characterized by high dimensionality and complex dependence of technological parameters of the structure and parameters of the networks, as well as external conditions, which greatly complicates the development of the suitability

models of the multi-sleeved branching and carrying out engine experiments to obtain estimates of water consumption at the stage of design and operation. The proposed model and algorithm of calculation of the power flows is applied to solve specific tasks. These examples confirm the correctness of the performed studies.

Keywords: costs water, water transportation networks, River with many sleeves, thermodynamic modeling, flow-distribution, principle of least action.

REFERENCES

1. Merenkov, A. P, E. V. Sennova, S. V. Sumarokov, et al. *Mathematical simulation and optimization of heat-, water-, oil-, and gas supply*. Novosibirsk: Nauka, 1992.
2. Kaganovich, B. M., A. V. Kelko, V. A. Shamansky, and I. A. Shirkalin. "On the area of equilibrium thermodynamics application." *Proc. of ASME 2004 International Mech. Eng. Congress. November, 13 – 19. Anaheim, California, USA, 2004*: 197–203. DOI:10.1115/IMECE2004-60775.
3. Ottinger, H. S. *Beyond Equilibrium Thermodynamics*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
4. Kaganovich, B. M., N. I. Voropai, V. A. Stennikov, and M. S. Zarodnyuk. "Thermodynamics and circuit theory, their joint application in energy research." *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika* 5 (2014): 3–15.
5. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tekhnologicheskikh prostesov na ob'ekтах vodnogo transporta v srede MATLAB. Monographiya*. Spb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2015.
6. Saharov, V. V., and A. A. Kuzmin. "Balance models and their application in automatic control systems for production management." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsiy* 1 (2013): 46–53.
7. Saharov, V. V., A. A. Chertkov, S. V. Saburov. "Simulation of stationary regimes in electric and hydraulic networks by means of nonlinear programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 3(31) (2015): 156–164.
8. Mazur, G. S. "Discharge determination river streams by minimum field work." *The Bulletin of Irkutsk State University. Series «Earth Sciences»* 1.1 (2009): 93–106.
9. D'konov, V. P., and V. V. Kruglov. *Matematicheskie pakety rasshireniya MATLAB. Spetsialny spravochnik*. Spb.: Piter, 2001.
10. Magomedova, A. V., and M. A. Ghuruyev. "The results of the computer modelling of hydraulic processes in the mouth section of the river Terek's bed with the use of the TerekFloodGIS programme complex." *Vestnik of Dagestan State Technical University. Technical Science* 14 (2008): 126–132.
11. Savichev, O. G., and V. V. Paromov. "Method of the estimation of characteristics of the runoff flow at absence of supervision." *Fundamental research* 10-14 (2013): 3157–3160.
12. Richter, Brian D., Mathews Ruth, David L. Harrison and Robert Wigington. "Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity." *Ecological Applications* 13.1 (2003): 206–224. DOI: 10.1890/1051-0761(2003)013[0206:ESWMMR]2.0.CO;2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
 доктор технических наук, профессор.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
 saharov_@rambler.ru
 Чертков Александр Александрович —
 кандидат технических наук, доцент.
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
 chertkov51@mail.ru, kaf_electricalautomatic@gumrf.ru
 Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант.
 Научный руководитель:
 Сахаров Владимир Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
 kfspguyk@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich —
 Dr. of Technical Sciences, professor.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 saharov_@rambler.ru
 Chertkov Alexandr Alexandrovich —
 PhD, associate professor.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 chertkov51@mail.ru
 Saburov Sergey Valerevich — Postgraduate.
 Supervisor:
 Saharov Vladimir Vasilevich.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 kfspguyk@mail.ru

Статья поступила в редакцию: 27 декабря 2015 г.