

5. Никитина А.В., Сухинов А.И., Гармаш А.Н., Гузик В.Ф. Математический анализ. Ч. I: Учебное пособие. – Таганрог, Изд-во ТРТУ, 2005. – 96 с.
6. Самолет-амфибия Бе-200ЧС-Е. Руководство по летной эксплуатации.
7. Никитина А.В., Левченко М.И. Элементы дискретной математики: Учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2008. – 150 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.П. Асовский.

Крееренко Ольга Дмитриевна – ОАО «Таганрогский авиационный научно-технический комплекс им. Г.М. Бериева» (ТАНТК); e-mail: olgadm@yandex.ru; 347923, г. Таганрог, пл. Авиаторов, 1; тел.: 89034397446; отдел аэродинамики; ведущий инженер-конструктор.

Крееренко Евгений Сергеевич – ООО «АВИАОК Интернейшенел»; e-mail: olgadm@yandex.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Греческая, 74; тел.: 89064526211; проектно-конструкторский отдел; инженер-конструктор.

Kreerenko Olga Dmitrievna – Beriev Aircraft Company; e-mail: olgadm@yandex.ru; 1, Aviatorov square, Taganrog, 347923, Russia; phone: 89034397446; aerodynamics department; lead design engineer.

Kreerenko Evgeniy Sergeevich – AVIAOK Internacional; e-mail: olgadm@yandex.ru; 74, Grecheskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: 89064526211; RD department; design engineer.

УДК 519.876.5: 532.53

В.И. Ольгаренко, Н.С. Захарченко, О.П. Кисаров, И.В. Ольгаренко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В МИУССКОЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрены вопросы создания и внедрения имитационных моделей в процесс разработки оперативных планов водораспределения в оросительных системах (ОС) при регулировании по принципу расчетного приращения объемов. Показано, что для обоснования применимости этого способа диспетчерского управления необходимы численные исследования течений в каналах ОС. Выполнено моделирование течений в Миусской ОС (Ростовская область) на основе одномерных уравнений Сен-Венана. Исследование течений на имитационной модели позволило обосновать допущения, принимаемые при указанном способе регулирования, и определить спектр допустимых для данной ОС режимов управления.

Течение; канал; система уравнений Сен-Венана; оперативное водораспределение; коэффициент разбаланса; цикл управления.

V.I. Olgarenko, N.S. Zakharchenko, O.P. Kisarov, I.V. Olgarenko

MATHEMATICAL MODELLING AND STUDY OF FLOWS ON THE MIUSSKAYA IRRIGATION SYSTEM SIMULATION MODEL

The problems of design and implementation of simulation models in the development of operational plans of water distribution in irrigation systems (IS) when regulating by estimated volume increment are described. It is shown that to justify the applicability of this method of dispatching management the numerical study of flows in channels is required. Simulation of flows in Miusskaya IS (Rostov region) channels based on one-dimensional Sen-Venan equations is done. Numerical study of flows made it possible to justify the assumptions made in the operational management of water distribution by selected method and to define the acceptable range for this management regimes.

Flow; channel; system of Sen-Venan equations; operational water distribution; the coefficient unbalance; cycle of management.

Диспетчеризация водораспределения на оросительных системах является последним исполнительным звеном, реализующим политику обеспечения водопотребителей оросительной водой. Из существующих способов регулирования водораспределения регулирование по расчётному приращению объёмов является самым перспективным. К его преимуществам относится возможность проводить с большой вероятностью безбросовое регулирование, обеспечивающее заявки потребителей, и максимальное использование динамических резервных ёмкостей каналов. Внедрение указанного способа регулирования актуально для большинства оросительных систем, так как способствует существенному повышению качества управления.

Регулирование по расчётному приращению объёмов требует составления оперативных планов, учитывающих изменение водохозяйственной обстановки за короткие промежутки времени. Разработку планов рекомендуется выполнять с помощью созданной авторами имитационной модели: в соответствии с поступающими в динамике заявками водопотребителей и задаваемыми уровнями воды в нижних бьефах каналов вычисляются важные характеристики управления (уровни воды, напоры и расходы через гидротехнические сооружения, приращения объёмов воды на участках каналов).

При планировании водораспределения по расчётному приращению объёмов считаем, что регулирование на участках каналов осуществляется от одного стационарного (квазистационарного) режима течения к другому. Новый режим следует задавать на перегораживающих сооружениях (ПС) в момент, когда объём воды на участке достигнет величины, соответствующей этому режиму при установившемся течении. Течение должно быть медленноменяющимся.

Для обоснования применимости данного способа регулирования и корректного задания режимов работы каналов Миусской ОС (Ростовская область) потребовались предварительные численные исследования.

Оросительная система имеет механический водозабор из Миусского лимана с проектным расходом $5,6 \text{ м}^3/\text{с}$. Вода по сети каналов с трапецидальным сечением и лоткам, выполненным в бетонной облицовке, движется самотёком. Участки трапецидальных каналов имеют ширину дна $1,5 \text{ м}$ и длину до 3100 м , уклоны дна находятся в интервале $0,00016\text{--}0,00023$. Лотки, диаметром $1,60 \text{ м}$ и длиной $400\text{--}900 \text{ м}$, имеют уклоны дна от $0,00072$ до $0,0011$. Участки каналов соединяют перегораживающие сооружения (ПС), способные создавать подпор и пропускать заданный расход. Диспетчерское регулирование водораспределения по системе каналов выполняется по циклам, продолжительностью 2 часа .

Моделирование течений в Миусской ОС выполнено на основе одномерных уравнений Сен-Венана. Использована четырехточечная неявная конечно-разностная схема, предложенная С.К. Годуновым. Для обоснования допущений управления по расчётному приращению объёмов были проведены серии расчетов течений для характерных участков Миусской ОС. Исследовались течения, возникающие при наиболее «жестких» режимах регулирования, характеризующихся высокими значениями коэффициента разбаланса расходов (r) через ПС в начале очередного цикла управления:

$$r = \left| \frac{Q(t) - Q(t + \Delta t)}{Q(t)} \right|,$$

где $Q(t)$, $Q(t + \Delta t)$ — расходы воды через ПС до и после перерегулирования; $\Delta t = 2 \text{ мин}$ (время установки заданного расхода через ПС, расчетный шаг).

Расчетный период составил три цикла управления (360 мин). Характер течений в циклах *I* и *III* задают постоянные во времени граничные условия:

$$QI_{\text{вх}} = QI_{\text{вых}}; \quad QIII_{\text{вх}} = QIII_{\text{вых}}$$

здесь $QI_{вх}$, $QI_{вых}$, $QIII_{вх}$, $QIII_{вых}$ – расходы на входе и выходе участка канала в циклах *I* и *III*.

В течение цикла *II* реализуется переходной режим: осуществляется набор (сброс) воды для исполнения стационарного режима цикла *III*. Считаем, что величину наполнения определяет глубина воды в конечном створе участка.

Требовалось выяснить: будет ли течение между перерегулировками соответствовать нормам эксплуатации канала и насколько быстро после изменения расхода через ПС наступит стационарный (квазистационарный) режим течения в цикле *III*. Значения разбаланса расходов варьировались в пределах от 0,6 до 1,5. Для цикла *II* задавались условия перехода от стационарного режима цикла *I* к расходам цикла *III*:

- ◆ без изменения наполнения канала;
- ◆ уменьшение наполнения (сброс до 8 % первоначального объема воды);
- ◆ увеличение наполнения (набор воды до 16 % первоначального объема).

В таблице приведены результаты расчета течения для варианта с увеличением наполнения и объема воды на 16 % в. Разбалансы расходов на границе циклов *II-III*: $r_{вх}=1,38$; $r_{вых}=0,8$.

Таблиц

Динамика течения в трапецидальном канале (длина 2950 м, уклон дна 0,00023)

Время, мин	Показатель	Створ 1	Створ 2	Створ 3	Створ 4
Цикл I – стационарный					
0	Уровень (м БС)	38,0390	38,0250	38,0120	37,9980
	Расход (м ³ /с)	0,3500	0,3500	0,3500	0,3500
.....
120	Уровень (м БС)	38,0465	38,0204	38,0110	38,0071
	Расход (м ³ /с)	0,3500	0,3500	0,3500	0,3500
Цикл II – переходной					
122	Уровень (м БС)	38,0786	38,0209	38,0109	38,0043
	Расход (м ³ /с)	0,5700	0,3554	0,3515	0,3880
.....
240	Уровень (м БС)	38,1565	38,1194	38,1074	38,1035
	Расход (м ³ /с)	0,5700	0,5219	0,4604	0,3880
Цикл III – стационарный					
142	Уровень (м БС)	38,2111	38,1221	38,1071	38,0643
	Расход (м ³ /с)	1,000	0,5349	0,4839	1,000
.....
254	Уровень (м БС)	38,2440	38,1448	38,0818	38,0551
	Расход (м ³ /с)	1,000	0,9824	1,0139	1,000
.....
360	Уровень (м БС)	38,2381	38,1379	38,0860	38,0605
	Расход (м ³ /с)	1,000	0,9999	0,9999	1,000

Сходимость к стационарному режиму течения в цикле *III* устанавливали по максимальному по продольной координате отклонению расхода/глубины потока от установившегося значения. Расчеты показали, что с ошибкой 5 % схождение к установившемуся режиму течения происходит в течение 8–12 мин после перерегулирования расходов через ПС. Этот период существенно меньше цикла управления и будет еще меньше при более «плавных», т.е. имеющих меньшие значения коэффициента разбаланса, регулировках расходов. На каждом временном шаге,

согласно числу Фруда, течение оставалось медленноменяющимся. Таким образом, допущения о характере течений в Миусской ОС при регулировании по расчетному приращению объемов можно принять как достаточно обоснованные.

Анализ стационарных течений и выявление допустимых границ характеристик управления удобно проводить с использованием отдельной компьютерной программы, реализующей стационарные уравнения Сен-Венана. Для каждого участка ОС рассчитаны продольные кривые водной поверхности, площади живых сечений в створах, таблицы функций:

$$H(Qn, hl) \text{ и } W(Qn, hl),$$

где H – глубина потока в начальном створе участка; Qn – расход воды на участке при стационарном режиме; hl регулируемых ПС глубины в конце участка; W – объем воды на участке.

Расчеты проводились последовательно по уровням расхода в интервале от минимального до форсированного и широкого набора глубин hl .

Совокупность этих функций для системы каналов оформлена в виде базы данных диспетчера. Действительно, чтобы управлять работой ПС во время перехода от одного квазистационарного режима течения к другому, надо знать соответствующее такому изменению приращение объема воды на участке канала. Это приращение объема должно быть реализовано в течение переходного цикла

$$(Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}) \cdot \tau = \Delta V,$$

где ΔV – приращение объема воды на участке при переходе от одного стационарного режима к другому; τ – продолжительность цикла регулирования; $Q_{\text{вх}}$, $Q_{\text{вых}}$ – расходы в начальном и конечном створах.

По мере снижения регулируемой глубины на выходе участка, кривая водной поверхности в трапецидальных каналах преобразуется из кривой подпора в кривую спада. Водная поверхность участков-лотков практически всегда представляет собой кривую спада с «зависанием» глубины на входе участка. Это значит, что при задании любой глубины на выходе участка глубина на входе та же, с точностью до долей сантиметра. Эффект «зависания» глубин обусловлен тем сочетанием актуальных расходов и уклонов дна, которые характерны для участков-лотков в Миусской ОС. Это обстоятельство важно учитывать при оперативном управлении водораспределением. При задании в качестве граничного условия на выходе участка глубины, близкой к критической, нарушается условие Фруда, имеет место разрыв решения стационарных уравнений. Это происходит при скорости течения в конечном створе 1,03–1,92 м³/с.

Знание особенностей динамики потоков в сети каналов конкретной ОС важно для эффективной работы с имитационной моделью управления водораспределением, так как характеристики перерегулирования зависят от параметров предшествующего и последующего установившихся режимов. Численные исследования течений позволили выявить диапазон допустимых режимов управления в сети каналов Миусской ОС, включающий и «непривычные», что открывает новые возможности для повышения качества управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ольгаренко В.И., Захарченко Н.С., Кисаров О.П., Ольгаренко И.В.* Оперативное водораспределение в системах оросительных каналов // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 3. – С. 34-36.
2. *Кучмент Л.С.* Математическое моделирование речного стока. – Л.: Гидрометеониздат, 1972. – 180 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Л. Бондаренко.

Ольгаренко Владимир Иванович – Новочеркасская государственная мелиоративная академия; e-mail: rekngma@magnet.ru; 346411, г. Новочеркасск, ул. Щорса, 125; тел.: +786352243020; кафедра мелиорации земель; д.т.н.; профессор, член-корреспондент Россельхозакадемии.

Захарченко Наталья Степановна – e-mail: zaharchenko.n.s@mail.ru; 346410, г. Новочеркасск, пер. Тузловский, 56; тел.: +79198826516; кафедра менеджмента и математического моделирования; к.т.н.; доцент.

Кисаров Олег Петрович – 346421, г. Новочеркасск, пр-т. Баклановский, 95, кв. 70; тел.: +786352265427; кафедра менеджмента и математического моделирования; д.т.н.; профессор.

Ольгаренко Игорь Владимирович – 346428, г. Новочеркасск, ул. Первомайская, 164, кв. 161; тел.: +79515044819; кафедра мелиорации земель; к.т.н.; доцент.

Ol'garenko Vladimir Ivanovich – Novochoerkassk State-governmental meliorative Academy; e-mail: rekngma@magnet.ru; 125, Schorsa street, Novochoerkassk, 346411, Russia; phone: +786352243020; the department of land reclamation; dr. of eng. sc.; professor; corresponding member of the Russian Academy of agricultural sciences.

Zakharchenko Natalia Stepanovna – e-mail: zaharchenko.n.s@mail.ru; 56, Tuzlovsky street, Novochoerkassk, 346410, Russia; phone: +79198826516; the department of management and mathematical modeling; cand. of eng. sc.; associate professor.

Kisarov Oleg Petrovich – 95, Baklanovsky street, ap. 70, Novochoerkassk, 346421, Russia; phone: +786352265427; the department of management and mathematical modeling; dr. of eng. sc.; professor.

Ol'garenko Igor Vladimirovich – 164, Pervomaiskaya street, ap. 164, Novochoerkassk, 346428, Russia; phone: +79515044819; the department of land reclamation; cand. of eng. sc.; associate professor.