

УДК 502/504:626.823.6

А. С. ОВЧИННИКОВ, А. А. ПАХОМОВ, Н. А. КОЛОБАНОВА

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградская государственная сельскохозяйственная академия»

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ ВОДОУЧЕТА НА ОТКРЫТЫХ КАНАЛАХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Проведен анализ современных методов и средств водоучета. Определены технические требования, предъявляемые к средствам измерения расхода воды в современных условиях водопользования, а также пути совершенствования водоучета в каналах оросительных систем.

Расходомер, водоучет, чувствительный элемент, решетка, оптимизация, оросительный канал.

The analysis of modern methods and means of water accounting is carried out. Technical requirements are defined to the means of water consumption means under the present conditions of water usage as well as ways of improvement of water accounting in the canals of irrigation systems.

Water flow meter, water accounting, sensing element, rack, optimization, irrigation canal.

В современных условиях развития сельского хозяйства особая роль отводится гидромелиорации – одному из основных факторов, гарантирующих получение высоких стабильных урожаев сельскохозяйственных культур. В настоящее время, когда вода стала дорогостоящим товаром, для рациональной и эффективной эксплуатации оросительных систем должен производиться оперативный и объективный учет воды, а гидротехнические сооружения на каналах – обеспечивать подачу заданных расходов.

По данным ФГНУ «РосНИИПМ», в последние годы наблюдалось снижение количества и уровня технического состояния пунктов водоучета (ПВ). Из-за длительного недофинансирования и ряда других организационно-технических причин не выполнялся даже минимально необходимый перечень работ по поддержанию пунктов водоучета в требуемом состоянии. За период с 1995 по 2006 год число пунктов водоучета уменьшилось в 11,5 раза, с 13 086 до 1 136 единиц.

По результатам инвентаризации 2007 года число пунктов водоучета по Российской Федерации составило 4 302 единицы, что в 3,8 раза больше, чем в 2006 году. Однако из всех средств водоучета, имеющих на каналах, доминируют гидротехнические рейки и всего 4 % приборов, причем устаревшего

образца. Разумеется, в ситуации, когда пункты водоучета не соответствуют даже примитивному уровню водоучета, никакой речи о введении платного водопользования в РФ не может и быть.

В ходе изучения процесса водораспределения на оросительных системах было установлено, что основные противоречия между потребителем и поставщиком возникают по вопросам водоучета. Преодоление этих противоречий возможно путем использования в оросительной системе такой технологии водоучета, которая обеспечила бы высокую объективность и независимость учета воды, и таких средств водоучета, точность измерений которых могла бы удовлетворить потребителя и поставщика [1].

По результатам обследования каналов можно отметить, что каналы имеют малые уклоны дна, невысокую скорость потока, большую протяженность, значительную длину кривых подпора и спада. Движение воды в каналах спокойное, трассы каналов проходят в основном в полувыемке – полунасыпи. Гидравлические и гидротехнические особенности каналов:

в процессе эксплуатации оросительные каналы работают в подпорных режимах при максимальном наполнении;

водомерных сооружений нет, а тарирование имеющихся на каналах сооружений, как правило, удовлетворительных

результатов не дает, так как по установленным рейкам в бьефах трудно судить о расходах при работе каналов в подпорных режимах;

расход воды в каналах определяют с помощью гидрометрических вертушек, что достаточно трудоемко и неоперативно, поэтому информация о расходах поступает с большим опозданием от требований потребителя;

на каналах младшего порядка расход воды, как правило, вообще не определяется.

Выявленные при обследовании особенности оросительных каналов определяют следующие требования и технологические условия к средствам водоучета:

водомерные устройства должны быть просты по конструкции, устойчивы к атмосферным воздействиям и надежно работать, не должны требовать специальной высококвалифицированной подготовки обслуживающего персонала и значительных затрат времени на проведение гидрометрических работ, что очень важно для частного водопользования;

на оросительных системах, как правило, отсутствует электроснабжение, поэтому здесь целесообразно применять водомерные устройства, работающие на гидравлической энергии;

применение водомерных устройств не должно изменять эксплуатационный гидравлический режим в каналах, но обязательно устойчиво вписываться в технологический процесс водораспределения;

погрешность измерения приборов водоучета на каналах оросительных систем при коммерческом водоучете должна быть не более 4 %.

Существующие устройства и приборы измерения расхода воды отечественных и зарубежных производителей имеют ограниченное применение на оросительных каналах по следующим причинам: низкой точности измерения, отсутствия на постах водоучета электроснабжения, высокой стоимости приборов и сложности в эксплуатации.

Введение платного водопользования требует от водохозяйственных организаций оснащения ПВ техническими средствами, обеспечивающими современный уровень коммерческого водоучета, внедрения простых, надежных и энергонезависимых средств измерения [2].

Предлагаемое водомерное устройство включает чувствительный элемент в виде решетки, состоящей из плоских продольных и поперечных планок (рис. 1а) [3]. Чувствительный элемент 1 жестко закреплен на нижней части рычага 2, он установлен на оси вращения 3. В верхнем плече рычага 2 имеется отверстие, к которому крепится пружинный динамометр 4, установленный в защитном коробе 5. Короб 5 жестко зафиксирован в центре гидрометрического мостика 6 канала 7.

Работа предлагаемого устройства осуществляется следующим образом (рис. 1б) [3]. Первоначальное, исходное положение чувствительного элемента 1 – вертикальное. Динамометр 4 показывает нулевое усилие. Под воздействием потока воды в канале на чувствительный элемент 1 воздействует гидродинамическое давление, которое отклоняет рычаг 2 в сторону направления течения. Находящийся на другом конце рычага 2 динамометр 4 показывает величину усилия, переданного через рычаг 2. По величине замеренного усилия устанавливается расход воды в канале.

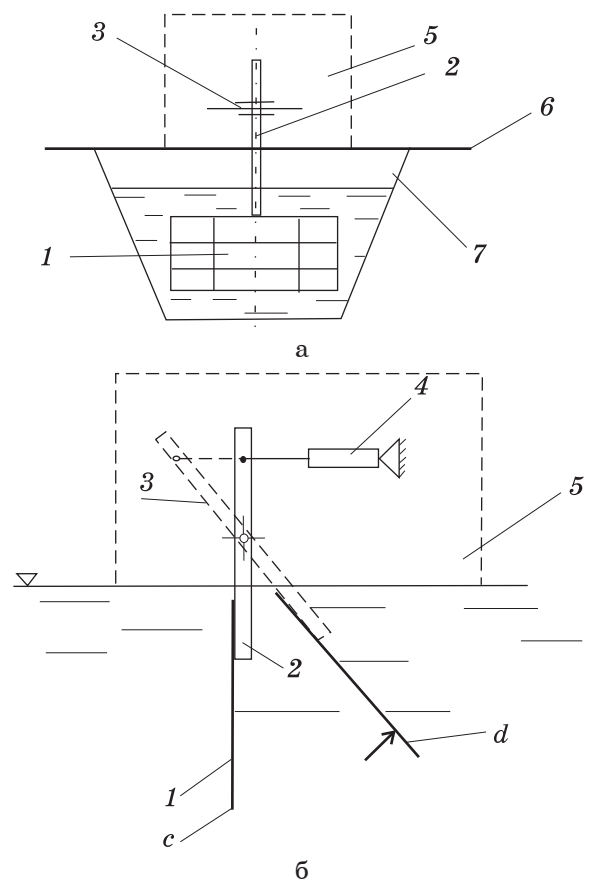


Рис. 1. Общий вид расположения расходомера на канале (а) и принципиальная схема работы (б): с – первоначальное положение, d – рабочее положение

В качестве чувствительных элементов для измерения расходов воды решетки не использовались. Особенность гидравлического расчета решетчатых элементов – необходимость учета следующих потерь напора: от степени стеснения живого сечения потока, от отношения ширины стержня к величине прозора, от ширины стержня, от толщины стержня, от формы поперечного сечения стержня.

В ходе исследований было проведено математическое описание процесса работы предлагаемого расходомера. Конструкция содержит поворотную лопасть 1, двухплечий рычаг 2 с плечами l_2 и l_1 , цилиндрический шарнир в точке O , упругий элемент 3, L-образную стойку 4, зафиксированную в опоре 5, ограничитель 6 поворота верхнего плеча l_1 рычага 2, чувствительный элемент 7 в виде индикаторной головки, ограничитель 8 поворота двухплечего рычага 2 в цилиндрическом шарнире (рис. 2).

Один конец упругого элемента 3 размещен на верхнем плече (точка В) двухплечего рычага 2, а его другой конец на стойке 4 (точка А). Опора 5 позволяет вертикально перемещать стойку 4, а следовательно, шарнир в точке O и лопасть 1 на любую глубину $H_{ств}$ канала.

При нарастании скорости v водного потока возрастает усилие P на поверхность лопасти 1. Под воздействием этой силы P двухплечий рычаг 2 поворачивается в цилиндрическом шарнире в точке O , растягивая витки упругого элемента 3. Поскольку верхнее плечо l_1 рычага 2 поворачивается в точке O , то точка В при повороте лопасти 1 на угол α переместится по дуге окружности размером l_1 в точку В'. Для выявления закономерности усилия R_{bx} – силы натяжения витков упругого элемента 3 – было установлено аналитическое выражение изменения угла β при нарастании величины угла α – поворота рычага 2 лопастью 1.

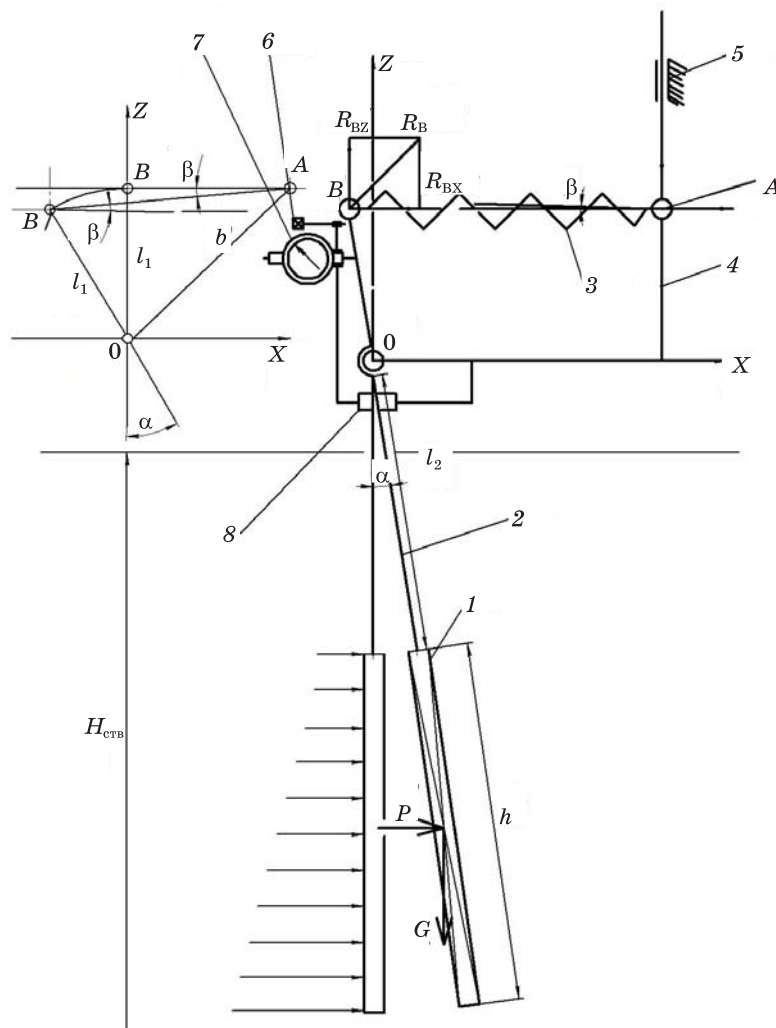


Рис. 2. Расчетная схема расходомера

При расчете были получены следующие зависимости и выражения.

Аналитическая зависимость изменения величины угла β от угла α :

$$\beta = \arctg \frac{l_1}{d} - \arccos \left\{ \frac{b^2 + (l_1 \sin \alpha)^2 + l_1^2(1 - \cos \alpha)^2 - l_1^2}{2b\sqrt{(d + l_1 \cdot \sin \alpha)^2 + l_1^2(1 - \cos \alpha)^2}} \right\}, \quad (1)$$

где величины отрезков обозначены через параметры: $AB = d$; $OA = b$; $OB' = OB = l_2$ (см. рис. 2).

Из аналитической зависимости (1) установлено, что при существенном изменении угла α величина угла β возрастает на 1...3 % от номинального положения, следовательно, усилие $R_{\text{вх}}$ остается постоянным.

Функциональная зависимость между углами β и α :

$$\angle \beta = \arctg [l_1(1 - \cos \alpha) / (d + l_1 \sin \alpha)]. \quad (2)$$

Уравнение моментов сил, действующих на систему относительно точки O:

$$\sum M_{(O)} = R_{\text{вз}} l_1 \sin \alpha + R_{\text{вх}} l_1 \cos \alpha + G(l_2 + h/2) \sin \alpha - P(l_2 + h/2) \cos \alpha, \quad (3)$$

где $R_{\text{вз}} = R_{\text{в}} \sin \beta$; $R_{\text{вх}} = R_{\text{в}} \cos \beta$; $G = mg$ ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Реакция $R_{\text{в}}$ в точке B от упругих сил растяжения пружины:

$$R_{\text{вх}} = c \cdot A\bar{B} = cd, \quad (4)$$

где c – калибр (жесткость) упругого элемента, Н/мм; d – расстояние между точками AB, мм.

Значение реакции при работе расходомера:

$$R_{\text{в}} = c\sqrt{(d + l_1 \sin \alpha)^2 + [l_1(1 - \cos \alpha)]^2}. \quad (5)$$

Гидродинамическое усилие потока:

$$P = \zeta_p \rho v^2 F_p = \zeta_p \rho Q^2 F_p / \omega_{\text{ж.с.}}, \quad (6)$$

где ζ_p – коэффициент гидродинамического сопротивления решетки; ρ – плотность жидкости; v – скорость движения жидкости, м/с; F_p – активная площадь решетки, м²; Q – расход потока, м³/с; $\omega_{\text{ж.с.}}$ – площадь живого сечения потока, м².

Из уравнения моментов гидродинамическое усилие потока:

$$P = \frac{R_{\text{в}} \sin \beta l_1 \sin \alpha + R_{\text{в}} \cos \beta l_1 \cos \alpha + mg(l_2 + h/2) \sin \alpha}{(l_2 + h/2) \cos \alpha}. \quad (7)$$

Аналитическое выражение скорости потока воды v :

$$v = \sqrt{\frac{R_{\text{в}} \sin \beta l_1 \sin \alpha + R_{\text{в}} \cos \beta l_1 \cos \alpha + mg(l_2 + h/2) \sin \alpha}{(l_2 + h/2) \cos \alpha \cdot |\zeta_p \rho F_p|}}. \quad (8)$$

Выражение (8) учитывает как конструктивные параметры расходомера,

так и динамические параметры потока воды в канале.

Для проведения лабораторных исследований была изготовлена экспериментальная лабораторная установка. Выбран геометрический масштаб моделирования: $\lambda = 3$. Моделирование проводили по закону гравитационного подобия Фруда с учетом автомодельности изучаемых закономерностей по числу Рейнольдса. Для лабораторных исследований были изготовлены решетки со следующими параметрами: при ширине планок 0,04 м площадь чувствительного элемента составила 0,052 м²; при ширине планок 0,025 м площадь составила 0,082 м².

Были проведены три серии опытов, результаты которых легли в основу расчетов по оптимизации параметров чувствительного элемента расходомера.

Для описания работы чувствительного элемента (решетки) как объекта исследования были учтены все наиболее существенные факторы [4]. Наименование факторов, их уровни и интервалы варьирования приведены в табл. 1.

В качестве выходного показателя на этапе лабораторно-полевых исследований были принят выходной фактор, учитывающий разницу показаний эталонного и экспериментального измерителя – квадрат разности давления.

В соответствии с принятой методикой для исследования области оптимума был реализован план Рехтшафнера для трехфакторного эксперимента. В результате расчетов получены уравнения регрессии в кодированном виде:

$$\Delta p^2 = 0,15 - 0,35x_1 + 0,03x_2 + 0,02x_3 - 0,025x_1x_2 - 0,05x_1x_3 + 0,005x_2x_3 + 0,36x_1^2 + 0,25x_2^2 + 0,24x_3^2. \quad (9)$$

Адекватность полученных математических моделей проверялась по критерию Фишера: $F_{\text{н}} = 0,003$. Поскольку $F_{0,05} > F_{\text{н}}$ ($F_{0,05} = 2,1646$ – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 5%), то математические модели адекватны результатам эксперимента.

Уравнение регрессии в канонической форме:

$$y - 0,04 = 0,37x_1^2 + 0,25x_2^2 + 0,24x_3^2. \quad (10)$$

Были определены оптимальные значения факторов: $x_1 = 0,49$, $x_2 = -0,04$,

Факторы, их уровни и интервалы варьирования

Фактор	Уровень фактора			Интервал варьирования ε
	0	-1	+1	
x_1 – толщина рейки, мм	15	5	25	10
x_2 – высота ячейки, мм	100	70	130	30
x_3 – ширина ячейки, мм	100	70	130	30

$x_3 = 0,01$. В раскодированном виде $x_1 = 20,1$ мм, $x_2 = 98,8$ мм, $x_3 = 100,3$ мм.

Поскольку все коэффициенты при квадратных членах имеют положительные знаки, то поверхности откликов представляют собой трехмерный параболоид с координатами центров поверхностей в оптимальных значениях факторов.

После проведенной оптимизации был изготовлен опытный образец, геометрические параметры которого были сделаны с учетом выполненных расчетов.

Для изучения взаимодействия потока с оптимизированным чувствительным элементом расходомера были проведены лабораторные опыты, вследствие обработки результатов которых установлены следующие зависимости: зависимость усилия P_1 , замеренного динамометром, от относительного угла отклонения чувствительного элемента $\alpha/90^\circ$; зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления ζ от относительного угла отклонения чувствительного элемента $\alpha/90^\circ$; зависимость расхода Q от относительного угла отклонения чувствительного элемента $\alpha/90^\circ$; зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления ζ от усилия P_1 , замеренного динамометром; зависимость коэффициента гидродинамического сопро-

тивления ζ от коэффициента живого сечения \bar{f} .

С учетом зависимости $\zeta = f(\bar{f})$ получается, что коэффициент гидродинамического сопротивления меняется от 6,32 до 10,7 при изменении коэффициента живого сечения от 0,43 до 0,53. Интервалы измерений достигнутых результатов исследований попадают в полученные ранее интервалы результатов исследования решеток (сеток) И. Е. Идельчика. По его данным, коэффициент гидродинамического сопротивления ζ меняется в интервале от 4,37 до 11,8 при изменении коэффициента живого сечения f в интервале от 0,36 до 0,52, что подтверждает достоверность проведенных исследований.

Тарировочные зависимости расходной характеристики устройства представлены от двух величин: от усилия на динамометре и от угла отклонения чувствительного элемента (рис. 3, 4). Погрешность измерений в лабораторных условиях составила 2,0 % по сравнению с объемным способом.

Основные геометрические размеры чувствительного элемента расходомера, с учетом параметров типового внутрихозяйственного канала и установки на канале, можно вычислить по следующим формулам:

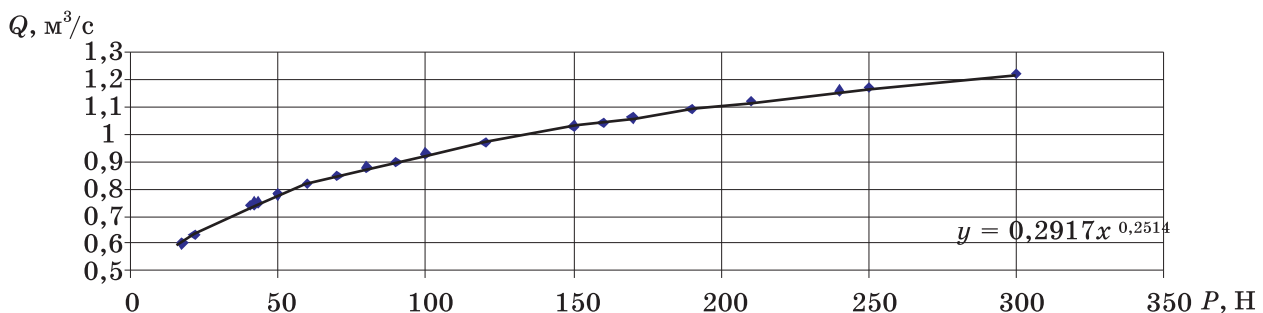


Рис. 3. Зависимость расхода воды от усилия, замеренного динамометром, для натуральных условий

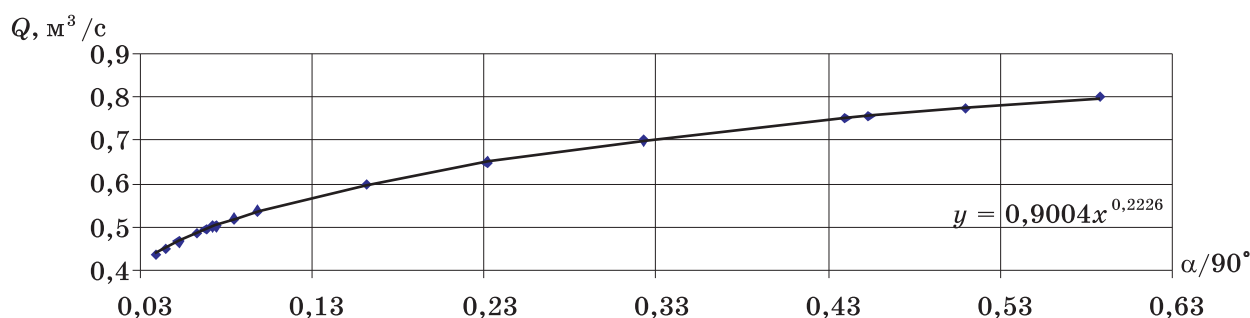


Рис. 4. Зависимость расхода воды от относительного угла отклонения чувствительного элемента $\alpha/90^\circ$ для натуральных условий

$$A = (h_{\text{ств}} - \Delta - 0,02) / 0,118; \quad (11)$$

$$X = A0,118 + 0,02; \quad (12)$$

$$B = (r - 0,02) / 0,121; \quad (13)$$

$$Y = B0,121 + 0,02, \quad (14)$$

где Δ – величина запаса на установку по вертикали, $\Delta = h_{\text{ств}} - x$ (устанавливают, основываясь на правилах гидрометрии для одно- и двухточечного способа измерений: для $h_{\text{ств}} > 0,75$ м $\Delta = 0,1$ м; для $h_{\text{ств}} > 0,75$ м $< 1,5$ м $\Delta = 0,2...0,3$ м); A – число ячеек по вертикали (округляем до целого в меньшую сторону при большом Δ , округля-

ем до целого при малом Δ); $0,02$ – толщина планки с учетом проведенной оптимизации, м; $0,118$ – длина ячейки + толщина планки, с учетом оптимизации, м; X – высота решетки, м; B – количество ячеек по горизонтали (округляем до целого в меньшую сторону); r – ширина канала по дну, м; Y – ширина решетки, м; $0,121$ – ширина ячейки + толщина планки с учетом оптимизации, м.

Согласно разработанной методике инженерного расчета, к внедрению предлагаются три исполнения расходомера, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Технические показатели штангового расходомера с решетчатым чувствительным элементом

Показатели	Тип расходомера		
	РШ-0,5	РШ-0,8	РШ-1,0
Предельный расход канала, м ³ /с	0,5	0,75	1,2
Предельная глубина в створе измерения, м	0,7	0,9	1,2
Ширина канала по дну, м	0,5	0,8	1,0
Геометрические параметры решетки:			
длина горизонтальных планок, м	0,504	0,746	0,988
длина вертикальных планок, м	0,492	0,61	0,846
толщина планки, мм	2	2	2
ширина планки, м	0,02	0,02	0,02
число ячеек по горизонтали, шт.	4	6	8
число ячеек по вертикали, шт.	4	5	7
Активная площадь решетки, м ²	0,0404	0,16084	0,2844
Масса чувствительного элемента (решетки), кг	0,620	2,471	4,368
Погрешность измерения, %	2,5	2,5	2,5

Выводы

Существующие устройства измерения расхода воды отечественных и зарубежных производителей имеют ограниченное применение на каналах внутрихозяйственной оросительной сети по причинам высокой стоимости и отсутствия постоянного электроснабжения на сети, сложностей в эксплуатации и метрологической поверке, поэтому считаем целесообразным применение

расходомеров, работающих на гидравлической энергии потока.

Натурные исследования на внутрихозяйственной оросительной сети показали, что каналы имеют пропускную способность до 1,5 м³/с, малые уклоны дна (от 0,00006 до 0,0001), при которых наблюдается установившееся равномерное движение потока со скоростью 0,4...0,7 м/с. Использование средств водоучета не

должно изменять гидравлический режим в каналах.

Обоснована возможность применения чувствительного элемента в виде подвижной решетки, гидравлическое сопротивление которой зависит от величины гидродинамического давления, геометрических параметров ячейки решетки, угла отклонения, степени перекрытия живого сечения потока и его турбулентности.

В ходе проведенной оптимизации конструктивных параметров решетки был реализован план Рехтшафнера для трехфакторного эксперимента, определены геометрические размеры ячейки чувствительного элемента, которые составили 0,1×0,1 м при толщине планки 0,02 м.

Предлагаемая конструкция расходомера, отличительной особенностью которой, по сравнению с существующими аналогами, является применение решетчатого чувствительного элемента, охватывающего активную зону живого сечения канала, рекомендуется для использования на каналах внутрихозяйственной сети с пропускной способностью до 1,5 м³/с, шириной канала по дну до 1 м и глубиной наполнения не более 1,5 м.

1. Щедрин В. Н., Бочкарев В. Я., Клишин И. В., Варичев М. А. О состоянии приборного обеспечения и возможности совершенствования водоучета на оросительных системах // Вопросы

мелиорации. – 2008. – № 1–2. – С. 14–23.

2. Пахомов А. А., Тронев С. В., Мелихов К. М., Колобанова Н. А. Устройство для измерения расходов воды в открытых каналах // Мелиорация и водное хозяйство. – 2009. – № 4. – С. 29–31.

3. Расходомер жидких сред в открытых каналах: пат. на пол. модель № 86300 Рос. Федерация: МПК G 01 F 1/00 / А. С. Овчинников, А. А. Пахомов, К. М. Мелихов, Н. А. Колобанова; заявитель и патентообладатель Волгоградская гос. сельскохозяйственная академия. – № 2009109482/22; заявл. 16.03.09; опубл. 20.08.09. – Бюл. № 23. – 5 с.

4. Овчинников А. С., Пахомов А. А., Колобанова Н. А. Исследование рабочих параметров штангового расходомера / Повышение эффективности мелиорации и сельскохозяйственного использования мелиорированных земель: тезисы докладов. – Минск: Национальная академия наук Беларуси, 2009. – С. 135–139.

Материал поступил в редакцию 26.11.10.

Овчинников Алексей Семенович, член-корреспондент РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Тел. 8 (844) 241-17-84

Пахомов Александр Алексеевич, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8 (844) 243-90-72

Колобанова Нина Александровна, ст. преподаватель

E-mail: kolobanova.nina@yandex.ru