

УДК 627.84

UDC 627.84

06.00.00 Сельскохозяйственные науки

Agricultural sciences

**ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
БЕЗРАЗМЕРНЫХ РАСХОДНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК РЕГУЛИРУЮЩЕГО  
ОРГАНА НАТУРНОГО ОБРАЗЦА  
ЛЕНТОЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ВОДЫ****HYDRAULIC RESEARCHES OF  
DIMENSIONLESS EXPENSE DESCRIPTIONS  
OF REGULATIVE ORGAN OF MODEL  
STANDARD OF BAND REGULATOR OF  
WATER**Коженко Наталья Владимировна  
соискательKozhenko Natalia Vladimirovna  
competitor for degree

SPIN-код: 6566-0120

RSCI SPIN-code: 6566-0120

er.folg@mail.ru

er.folg@mail.ru

*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия**Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Целью исследований явилось необходимость более углубленного изучения гидравлических безразмерных расходных характеристик регулирующего органа натурального образца ленточного регулятора воды, для рисовых чеков. Рис одна из наиболее влаголюбивых сельскохозяйственных культур. Его урожайность напрямую зависит от регулирования уровня воды в рисовых чеках на разных периодах развития данной культуры: период первичного затопления чека, борьба с сорняками, первичной вегетации, фазы кушения, вегетации молочной и восковой спелости. На каждом из рассмотренных периодов развития растения необходим управляемый уровень воды, что качественно может быть реализовано лишь при применении систем автоматического регулирования. В рисовых оросительных системах происходит достаточно большое количество потерь воды за счёт нерегулируемых протечек в регуляторах расхода и уровня воды в закрытом положении. Актуальной и значимой задачей является разработка, исследование и внедрение в практику надежных и высокоэффективных регуляторов расхода и уровня воды для рисовых чеков. В статье представлены результаты исследования гидравлических безразмерных расходных характеристик регулирующего органа натурального образца, разработанного нами. Исследована, на основе применения методов планирования эксперимента, взаимосвязь степени влияния на функцию отклика, за которую взята безразмерная расходная характеристика регулирующего органа натурального образца ленточного регулятора воды, отношения диаметров сливных отверстий, при различном отношении рабочих напоров. По оцененным экспериментальным данным построены аппроксимационные зависимости, которые в свою очередь были проанализированы на предметы корреляционной связи, детерминации, эластичности. Также в статье дана оценка статистической значимости построенной модели регрессии с использованием критерия F -

The purpose of the researches was the necessity of deep study of hydraulic dimensionless expense descriptions of regulative organ of model standard of band regulator of water, for rice checks. Rice is one of the most moisture-loving agricultural cultures. Its productivity straightly depends on adjusting of water level in rice cotter pins on the different periods of development of this culture: period of primary submergence of check, fight against weeds, primary vegetation, phases of bushing out, vegetations of suckling and cereous ripeness. On each of the considered periods of development of plant the guided water level is needed, that high-quality can be realized only at application of the systems of automatic control. In rice irrigation systems there is plenty enough of losses of water due to not managed leakage in regulator flow and water level in the closed position. An actual and meaningful task is development, research and introduction in practice of reliable and high-efficiency regulators expense and water level for rice checks. The article presents results of research of hydraulic dimensionless expense descriptions of regulative organ of model standard, developed by us. Intercommunication of degree of influence is investigational, on the basis of application of methods of planning of experiment, on the function of response, which dimensionless expense description of regulative organ of model standard of band regulator of water, relations of diameters of the downlow openings, is taken for, at the different relation of workers pressures. From appraised experimental data approximation dependences, which were in same queue analysed for the purpose cross-correlation connection, determination, elasticity, are built. Also, in the article there is an estimation of statistical meaningfulness of the built model of regression given with the use of criterion of F - Fishera and parameters of equalization of regression with the use of criterion of t - St'yudenta, at the set level of meaningfulness  $\alpha$ . At the permanent relations of workers pressures the analysis of sections of surface of response  $H/H_{max}$  0,6; 0,8; 1,0 shows that functions have extremums on

Фишера и параметров уравнения регрессии с использованием критерия  $t$  - Стьюдента, при заданном уровне значимости  $\alpha$ . Анализ сечений поверхности отклика при постоянных отношениях рабочих напоров  $H/H_{max}$  0,6; 0,8; 1,0 показывает, что функции имеют экстремумы по максимуму. При минимальном отношении рабочих напоров  $H/H_{max}$  равном 0,6 максимальное значение функции отклика равно 81% будет при отношении диаметров сливных отверстий  $d/d_{max}$  равном 0,9. С увеличением отношения рабочих напоров  $H/H_{max}$  до 0,8 имеем тренд максимума в сторону увеличения и здесь он наступает при значении функции отклика равном 94% и отношении диаметров сливных отверстий  $d/d_{max}$  равном 0,92. Дальнейшее увеличение отношения рабочих напоров  $H/H_{max}$  до 1,0 также приводит к тренду максимума функции отклика, который достигает значения 118%, при этом отношение диаметров сливных отверстий  $d/d_{max}$  равно 0,94. Совокупный анализ кривых показывает, что при любом отношении рабочих напоров, степень влияния на функцию отклика тем больше, чем больше отношение диаметров сливных отверстий

Ключевые слова: ЛЕНТОЧНЫЙ РЕГУЛЯТОР, РАСХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

a maximum. At minimum relations of workers pressures  $H/H_{max}$  equal 0,6 the maximal value of function of response is equal 81% it will be at the relation of diameters of the downlow openings of  $d/d_{max}$  equal 0,9. With the increase of relation of workers pressures  $H/H_{max}$  to 0,8 have a trend of maximum toward an increase and here he comes at the value of function of response equal 94% and relation of diameters of the downlow openings of  $d/d_{max}$  equal 0,92. Further increase of relation of workers pressures of  $H/H_{max}$  to 1,0 also results in the trend of a maximum of function of response which arrives at a value 118%, here the relation of diameters of the downlow openings of  $d/d_{max}$  is equal to 0,94. The combined analysis of curves shows that at any relation of workers pressures, the degree of influence on the function of response increases due to more relation of diameters of the downlow openings

Keywords: TAPE REGULATOR, ACCOUNT CHARACTERISTICS, SETTLEMENT FORMULAS

Производство риса неразрывно связано с водораспределением больших объемов воды. Именно правильное водораспределение - залог стабильности и долговечности рисовых систем. На сегодня практика складывается таким образом, что рассматриваются и решаются, в основном, задачи общего характера для магистральных участков систем. При этом непосредственно низовому звену, самому рисовому чеку, не уделяется должного внимания. А ведь именно через затопленные чеки осуществляется наибольший приток в грунтовые воды, именно от четкого регулирования уровня в чеке зависит урожайность. Таким образом, разработка, исследование и внедрение в практику надежных и высокоэффективных регуляторов расхода и уровня воды для рисовых чеков актуальная и значимая задача [1, 2].

Нами разработаны и исследованы теоретически и в лабораторных условиях конструктивные элементы и собственно ленточный регулятор

уровня воды для рисовых чеков [3, 4, 5] Лабораторные исследования показали хорошие результаты [6, 7], что предопределило необходимость исследования натурального образца.

Гидравлические исследования расходных характеристик регулирующего органа натурального образца ленточного регулятора осуществлялось на конструкции, представленной на рисунке 1.

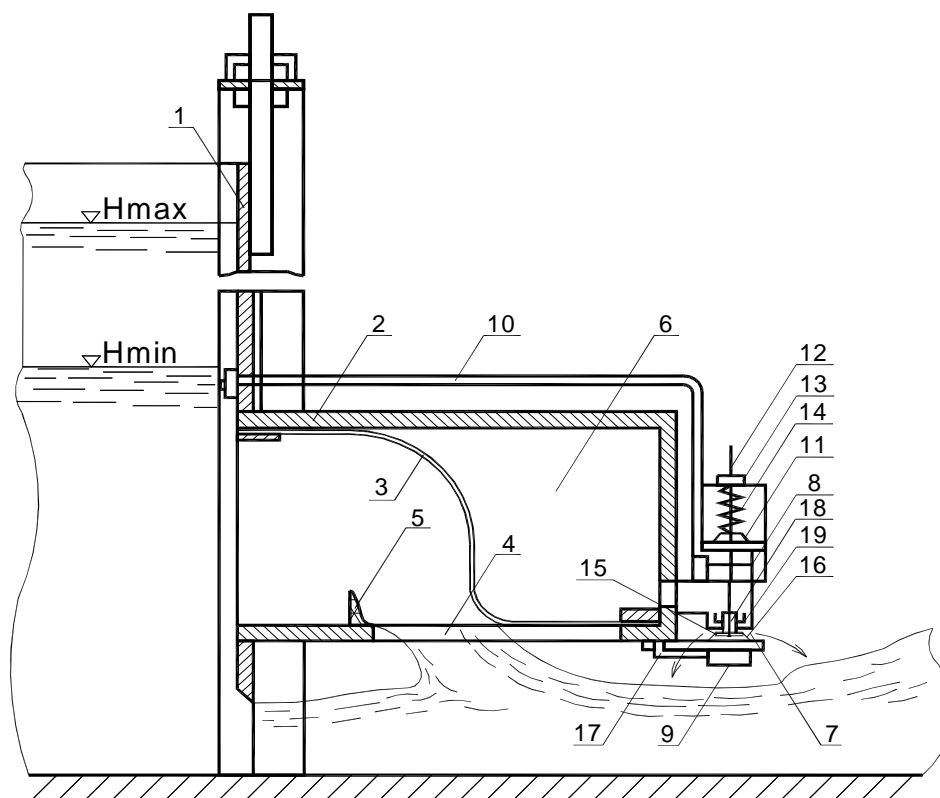


Рисунок 1. Экспериментальная модель натурального ленточного регулятора расхода

Регулятор расхода работает следующим образом. Первоначальной установкой плоского щита 1 задается степень открытия водовыпускного отверстия гидротехнического сооружения. При повышении уровня воды в верхнем бьефе, благодаря наличию трубопровода 10, давление в первом мембранном корпусе 8 возрастает, мембрана 11 прогибается, сжимая пружину 14 и перемещая шток 12. Вместе со штоком 12 перемещается жесткий центр 15, закрепленный на мембране 16 второго мембранного корпуса 9, сообщенного трубопроводом 17 с управляющей полостью 6. В

свою очередь втулка 18, имеющая профилированные вырезы 19, также перемещается. Данное действие приведет к уменьшению степени открытия сливного канала 7 и, как следствие, к уменьшению расхода воды, сбрасываемой из управляющей полости 6. Давление в последней начинает возрастать, равенство между расходом воды, поступающим в управляющую полость 6, через зазоры между корпусом водовыпускной трубы 2 и незакрепленными краями гибкой ленты 3, и сбрасываемым расходом нарушится, гибкая лента 3 приходит в движение и начинает перекрывать проходное отверстие в седле 4 в основании водовыпускной трубы 2. После окончания переходного процесса равенство между поступающим и сбрасываемым расходами восстанавливается и гибкая лента 3 занимает новое положение. При этом по мере перемещения жесткого центра 15, благодаря наличию втулки 18 с профилированными вырезами 19, площадь проходного сечения сливного канала 7 изменяется по закону, обеспечивающему такую расходную характеристику из управляющей полости 6, при которой новому положению гибкой ленты 3 соответствует степень открытия проходного сечения в седле 4 в основании водовыпускной трубы 2, позволяющая компенсировать увеличение расхода при повышении уровня воды в верхнем бьефе. При понижении уровня воды в верхнем бьефе цикл работы повторяется в обратном порядке. Настройка регулятора расхода на другой режим осуществляется винтом уставки 13.

При необходимости полностью перекрыть проходное отверстие в седле 4 в основании водовыпускной трубы 2 винт уставки 13 устанавливают в положение обеспечивающее закрытие сливного канала 7 и, как следствие, к исключению расхода воды, сбрасываемой из управляющей полости 6. Давление в последней начинает возрастать, гибкая лента 3 приходит в движение и начинает перекрывать проходное отверстие в седле 4. Однако на момент самого закрытия проходного

отверстия в седле 4, в основании водовыпускной трубы 2, давления со стороны верхнего бьефа перед лентой и за лентой, в управляющей полости 6, уравниваются и лента находится в безразличном состоянии. При этом жесткость самой ленты, необходимая при герметизации проходного отверстия в седле 4 по бокам, в данном случае будет препятствовать герметизации проходного отверстия, именно со стороны верхнего бьефа. Наличие порога 5, установленного со стороны верхнего бьефа, на грани седла, т.е. в месте, где лента 3, при закрытом положении, находится в безразличном состоянии, когда порог 5 выполнен в виде водослива с вакуумным криволинейным профилем, обеспечит герметичное перекрытие отверстия в седле 4. Высотой порога 5 "выбирают" жесткость ленты 3, обеспечивающей радиус ее поворота. Водослив практическим профилем повернут в сторону контакта с гибкой лентой, что способствует наиболее благоприятному гидравлическому режиму контакта гибкой ленты 3 и практического профиля порога 5, обеспечивая режим герметизации.

В работе была поставлена задача представить, гидравлические исследования в безразмерном виде, то есть определить относительный расход воды  $\frac{Q}{Q_{\max}} \cdot 100\%$ , пропускаемый ленточным регулирующим органом, с целью расширения области применения выполненных исследований. Задача решалась нахождением функции отклика на основе экспериментального исследования, практически используя опыт, представленный в работе [8].

В исследовании независимыми переменными приняты следующие факторы:  $\frac{H}{H_{\max}}$  – относительный уровень воды в верхнем бьефе;  $\frac{d}{d_{\max}}$  – относительный диаметр сливного отверстия из управляющей полости ленточного регулирующего органа.

Функцию отклика  $\frac{Q}{Q_{\max}} \cdot 100 = f\left(\frac{H}{H_{\max}}, \frac{d}{d_{\max}}\right)$  было решено аппроксимировать полиномом второй степени, на основе данных представленных в работе [9]. Эксперимент проведен по программе центрального композиционного планирования второго порядка. Принятые в исследовании уровни и интервалы варьирования факторов указаны в таблице 1.

Таблица 1. Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Кодовое обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
			Основной	Верхний +1	Нижний -1
$H/H_{\max}$	$x_1$	0.800	0.800	1.000	0.600
$d/d_{\max}$	$x_2$	0.875	0.875	1.000	0.750

Матрица планирования и результаты опытов приведены в таблице 2.

В центре плана, при использовании центрального композиционного плана второго порядка, необходимо выполнять серии из трех опытов, что и было выполнено посредством опытов № 9, 10 и 11.

Таблица 2. Центральный композиционный план второго порядка для двух факторов с тремя опытами в центре плана

Номер опыта	Факторы (кодированные значения)		Факторы (натуральные значения)		Отклик $\frac{Q}{Q_{\max}} \cdot 100$
	$x_1$	$x_2$	$\frac{H}{H_{\max}}$	$\frac{d}{d_{\max}}$	
Ядро плана	1	+1	+1	1,000	88,632
	2	-1	+1	0,600	53,946
	3	+1	-1	1,000	21,519
	4	-1	-1	0,600	14,514
Звездные точки	5	$\alpha = +1$	0	1,000	100,000
	6	$\alpha = -1$	0	0,600	78,410
	7	0	$\alpha = +1$	0,800	73,220
	8	0	$\alpha = -1$	0,800	19,714
Центр плана	9	0	0	0,800	91,380
	10	0	0	0,800	90,971
	11	0	0	0,800	91,073

В итоге матрица  $X$  плана эксперимента с фактическими результатами эксперимента  $y_j$ , полученными в ходе проведения опытов, выглядит образом представленным в таблице 3.

Таблица 3. Матрица  $X$  для центрального композиционного плана второго порядка

Номер опыта	Матрица $X$						Результат		
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$y_j$	$\bar{y}_j$	
Ядро плана	1	+1	+1	+1	+1	+1	88,632	88,776	
	2	+1	-1	+1	-1	+1	53,946	53,842	
	3	+1	+1	-1	-1	+1	21,519	21,585	
	4	+1	-1	-1	+1	+1	14,514	14,332	
Звездные точки	5	+1	$\alpha = +1$	0	0	$\alpha^2 = +1$	100,000	99,790	
	6	+1	$\alpha = -1$	0	0	$\alpha^2 = +1$	78,410	78,697	
	7	+1	0	$\alpha = +1$	0	0	$\alpha^2 = +1$	73,220	73,181
	8	+1	0	$\alpha = -1$	0	0	$\alpha^2 = +1$	19,714	19,830
Центр плана	9	+1	0	0	0	0	91,380	91,116	
	10	+1	0	0	0	0	90,971	91,116	
	11	+1	0	0	0	0	91,073	91,116	

Представленный центральный композиционный план второго порядка для двух факторов и результаты эксперимента позволяют оценить коэффициенты полинома следующего вида:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2. \quad (1)$$

Вводим следующие обозначения:

$$x_0 = 1; x_3 = x_1x_2; x_4 = x_1^2; x_5 = x_2^2.$$

С учетом принятых обозначений уравнение (1) примет вид:

$$y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения (2) находим по выражению:

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (3)$$

где  $B$  – вектор-столбец, состоящий из коэффициентов уравнения (2);

$X$  – матрица условий эксперимента;

$X^T$  – матрица, транспонированная к матрице  $X$  ;

$(X^T X)^{-1}$  – матрица, обратная матрице-произведению  $(X^T X)$ ;

Y – вектор-столбец результатов наблюдений.

Для вычисления коэффициентов  $b_0, b_1, \dots, b_5$  составим X-матрицу условий эксперимента и Y-матрицу наблюдений, перейдя в среду wxMaxima:

X:matrix ([1,1,1,1,1,1], [1,-1,1,-1,1,1], [1,1,-1,-1,1,1], [1,-1,-1,1,1,1], [1,1,0,0,1,0], [1,-1,0,0,1,0], [1,0,1,0,0,1], [1,0,-1,0,0,1], [1,0,0,0,0,0], [1,0,0,0,0,0], [1,0,0,0,0,0]);

Y:matrix ([88.632], [53.946], [21.519], [14.514], [100.0], [78.41], [73.22], [19.714], [91.38], [90.971], [91.073]),

или

88,6
53,9
21,5
14,5
100
78,4
73,2
19,7
91,3
90,9
91,0

Транспонируем X-матрицу

matrix ([1,1,1,1,1,1,1,1,1,1], [1,-1,1,-1,1,-1,0,0,0,0,0], [1,1,-1,-1,0,0,1,-1,0,0,0], [1,-1,-1,1,0,0,0,0,0,0,0], [1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0], [1,1,1,1,0,0,1,1,0,0,0])

или

■ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1@1 - 1 1 1 1- 1 0 0 0 0 0 0@1

Умножим слева X-матрицу и Y-матрицу на матрицу  $X^T$ :

matrix ([11,0,0,0,6,6], [0,6,0,0,0,0], [0,0,6,0,0,0], [0,0,0,4,0,0], [6,0,0,0,6,4], [6,0,0,0,4,6]);

matrix ([723.379], [63.281], [160.051], [27.681], [357.021], [271.545]),



или

$$\begin{bmatrix} 11 & 0 & 0 & 0 & 6 & 6 \\ 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 6 & 4 \\ 6 & 0 & 0 & 0 & 4 & 6 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} 723.379 \\ 63.281 \\ 160.051 \\ 27.681 \\ 357.021 \\ 271.545 \end{bmatrix}.$$

Находим матрицу  $(X^T X)^{-1}$ , обратную матрице  $(X^T X)$ :

$$\text{matrix} \quad ([0.263, 0, 0, 0, -0.157, -0.157], \quad [0, 0.166, 0, 0, 0, 0], \quad [0, 0, 0.166, 0, 0, 0], \\ [0, 0, 0, 0.25, 0, 0], [-0.157, 0, 0, 0, 0.394, -0.105], [-0.157, 0, 0, 0, -0.105, 0.394])$$

или

$$\begin{bmatrix} 0.263 & 0 & 0 & 0 & -0.157 & -0.157 \\ 0 & 0.166 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.166 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 & 0 & 0 \\ -0.157 & 0 & 0 & 0 & 0.394 & -0.105 \\ -0.157 & 0 & 0 & 0 & -0.105 & 0.394 \end{bmatrix}$$

Определяем коэффициенты  $b_0, b_1, \dots, b_5$  :

$$\text{matrix} \quad ([91.115], [10.546], [26.675], [6.920], [-1.872], [-44.610])$$

или

$$\begin{bmatrix} 91.115 \\ 10.546 \\ 26.675 \\ 6.920 \\ -1.872 \\ -44.610 \end{bmatrix}.$$

Дисперсию  $S_y^2$  воспроизводимости эксперимента определяем по результатам опытов в центре плана:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (Y_u - \bar{Y})^2}{n_0 - 1}, \quad (4)$$

где  $n_0$  – число параллельных опытов в центре плана;

$Y_u$  – значение функции отклика в  $u$ -м опыте;

$\bar{Y}$  – среднее арифметическое значение функции отклика в  $n_0$  опытах;

$n$  – номер параллельного опыта в центре плана.

Вычисления  $S_y^2$  наиболее рационально осуществить посредством расчета вспомогательных элементов, что и выполнено в таблице 4.

Номер опыта	$y_u$	$\bar{y}$	$y_u - \bar{y}$	$(y_u - \bar{y})^2$	$S_y^2$
1	91,380	$\bar{y} = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} y_u}{n_0} = \frac{273,424}{3} = 91,141$	0,239	0,057	$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1} = \frac{0,091}{3 - 1} = 0,0455$
2	90,971		-0,170	0,029	
3	91,073		-0,068	0,005	
	$\sum_{u=1}^{n_0} y_u = 273,424$			$\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2 = 0,091$	

Таблица 4. Определение вспомогательных элементов для расчета  $S_y^2$

Дисперсии  $S^2\{b_i\}$  коэффициентов регрессии находим по выражению:

$$S^2\{b_i\} = c_{ii} S_y^2, \quad (5)$$

где  $c_{ii}$  – диагональные элементы матрицы  $(X^T X)^{-1}$ ;

$$S^2\{b_0\} = 0,263 S_y^2 = 0,0120;$$

$$S^2\{b_1\} = S^2\{b_2\} = 0,167 S_y^2 = 0,0076;$$

$$S^2\{b_{12}\} = 0,250 S_y^2 = 0,0113;$$

$$S^2\{b_{11}\} = S^2\{b_{22}\} = 0,395 S_y^2 = 0,0180.$$

Статистическую значимость коэффициентов уравнения регрессии проверяем по t-критерию Стьюдента, для чего определяем наблюдаемые значения этого критерия:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{s\{b_0\}} = 831,7715; \quad t_1 = \frac{|b_1|}{s\{b_1\}} = 120,9824; \quad t_2 = \frac{|b_2|}{s\{b_2\}} = 305,983;$$

$$t_{12} = \frac{|b_{12}|}{s\{b_{12}\}} = 65,0979; \quad t_{11} = \frac{|b_{11}|}{s\{b_{11}\}} = 13,9531; \quad t_{22} = \frac{|b_{22}|}{s\{b_{22}\}} = 332,503.$$

При 5%-ном уровне значимости и числе степеней свободы 2 табличное значение критерия  $t_T=4,303$ . Оно меньше наблюдаемых значений критериев t для всех коэффициентов уравнения регрессии, следовательно, все они являются статистически значимыми.

Адекватность полученной модели проверяем с помощью F-критерия Фишера:

(6)

где – дисперсия адекватности;

$S_y$  – дисперсия воспроизводимости эксперимента.

Для определения  $S_R$  вычисляем сумму  $S_R$  квадратов отклонений расчетных  $\hat{y}_j$  значений функции отклика от экспериментальных  $y_j$  во всех точках плана, для чего перейдем в среду wxMaxima.

Вычислим матрицу расчетных значений:

matrix ([88.775], [53.841], [21.584], [14.331], [99.790], [78.696], [73.180], [19.830], [91.115], [91.115], [91.115])

или

```
[88.775
53.841
21.584
14.331
99.790
78.696
73.180
19.830
91.115
91.115
91.115]
```

Вычислим матрицу отклонений расчетных значений функции отклика от экспериментальных данных:

matrix ([-0.143], [0.104], [-0.065], [0.182], [0.209], [-0.286], [0.039], [-0.116], [0.264], [-0.144], [-0.042])

или

```
[-0.143
0.104
-0.065
0.182
0.209
-0.286
0.039
-0.116
0.264
-0.144
-0.042]
```

Одним из завершающих действий в обработке и представлении экспериментальных данных должно явиться вычисление суммы квадратов отклонений расчетных значений функции отклика от экспериментальных данных, которое в нашем случае равно значению: 0.302.

Из полученной суммы  $S_R$  вычитаем сумму  $S_E$ , использованную для определения дисперсии  $S_y^2$  по результатам опытов в центре плана, имеем:

$$S_E = \sum_{i=1}^{n_0} (y_i - \bar{y})^2 = 0,091.$$

Полученный результат  $(S_R - S_E) = 0,303 - 0,091 = 0,212$  делим на число степеней свободы  $f = N - k - (n_0 - 1) = 3$ , где  $N$  – число опытов в матрице планирования, а  $k$  – число статистически значимых коэффициентов регрессии. Таким образом, имеем

и отсюда:

Табличное значение  $F_T$ -критерия при 5%-ном уровне значимости и числа степеней свободы для числителя 3 и для знаменателя 2 равно 19, 16.

$$F_p < F_T.$$

Следовательно, модель адекватна.

В результате уравнение (2) с учетом выполненных оценок имеет вид:

$$y = 91,116x_0 + 10,547x_1 + 26,675x_2 + 6,920x_3 - 1,872x_4 - 44,610x_5.$$

Переходя от переменных  $x_3, x_4, x_5$  к  $x_1x_2, x_1^2, x_2^2$ , получим искомое уравнение в виде:

$$y = 91,116 + 10,547x_1 + 26,675x_2 + 6,920x_1x_2 - 1,872x_1^2 - 44,610x_2^2.$$

Кодированные значения факторов связаны с натуральными следующими зависимостями:

$$x_1 = \frac{\frac{H}{H_{\max} - H_0}}{\varepsilon_1} = \frac{H}{H_{\max} - 0,8}; \quad x_2 = \frac{\frac{d}{d_{\max} - d_0}}{\varepsilon_2} = \frac{d}{d_{\max} - 0,875},$$

где  $H_0, d_0$  – основные уровни факторов в натуральных выражениях;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – интервалы варьирования факторов.

Переходя от кодированных  $x_1, x_2$  значений факторов к натуральным

$\frac{H}{H_{\max \square}}, \frac{d}{d_{\max \square}}$ , получим функцию отклика  $\frac{Q}{Q_{\max \square} \square 100} \% = f\left(\frac{H}{H_{\max \square}}, \frac{d}{d_{\max \square}}\right)$ :

$$\begin{aligned} \frac{Q}{Q_{\max \square} \square 100} \% = & 91,116 + 10,547 \left( \frac{H}{H_{\max \square} - 0,8} \right) + 26,675 \left( \frac{d}{d_{\max \square} - 0,875} \right) + \\ & + 6,920 \left( \frac{H}{H_{\max \square} - 0,8} \right) \left( \frac{d}{d_{\max \square} - 0,875} \right) - 1,872 \left( \frac{H}{H_{\max \square} - 0,8} \right)^2 - 44,610 \left( \frac{d}{d_{\max \square} - 0,875} \right)^2. \end{aligned}$$

Осуществим ряд формальных преобразований и представим уравнение в виде:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{Q_{\max \square} \square 100} \% = & \frac{-2159,879 - 114,585 \frac{H}{H_{\max \square} + 4988,280d}}{d_{\max \square} + 276,800 \left( \frac{H}{H_{\max \square}} \right) \left( \frac{d}{d_{\max \square}} \right)} - \\ & - 46,800 \left( \frac{H}{H_{\max \square}} \right)^2 - 2855,040 \left( \frac{d}{d_{\max \square}} \right)^2. \end{aligned}$$

В связи с тем, что уравнение адекватно, его можно использовать как интерполяционную формулу для вычисления величины  $\frac{Q}{Q_{\max \square} \square 100} \%$  в области планирования эксперимента. Именно осуществленная констатация позволяет перейти к следующему этапу анализа экспериментальных данных, а именно к получению визуализированного материала. Для чего построим вначале график поверхности функции отклика в wxMaxima, представленный на рисунке 2.

Имеем по поверхности функции отклика: `plot3d(-2159.879-114.585*x+4988.280*y+276.800*x*y-46.800*x^2-2855.040*y^2, [x,0.600,1.000], [y,0.750,1.000], [xlabel, "H/Hmax"], [ylabel, "d/dmax"],`

[xlabel, "Q/Qmax100%"], [plot\_format,gnuplot]; [gnuplot\_preamble, "set hidden3d"])]\$.

График поверхности функции отклика

$\frac{Q}{Q_{\max}} \cdot 100 = f\left(\frac{H}{H_{\max}}, \frac{d}{d_{\max}}\right)$  показывает, что во всем диапазоне изменения аргументов сама функция изменяется плавно. Таким образом, можно утверждать, что конструкция натурального образца регулирующего органа ленточного регулятора воды работоспособна и устойчива, в исследуемом диапазоне.

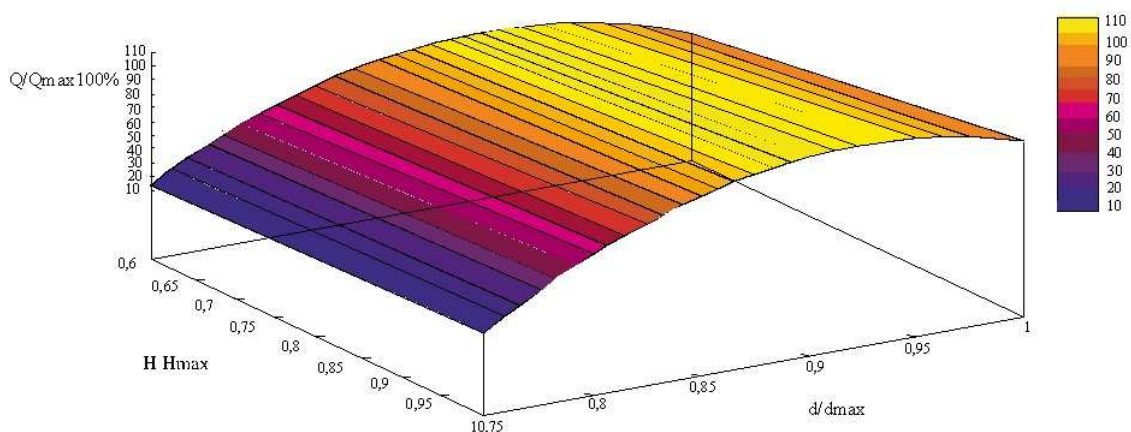


Рисунок 2. График поверхности функции отклика

$$\frac{Q}{Q_{\max}} \cdot 100 = f\left(\frac{H}{H_{\max}}, \frac{d}{d_{\max}}\right)$$

Далее осуществим построение графика линий уровня функции отклика в wxMaxima, представленного на рисунке 3.

По линиям уровня функции отклика имеем нижеследующие расчеты:

contour\_plot (-2159.879-114.585\*x+4988.280\*y+276.800\*x\*y-46.800\*x^2-2855.040\*y^2, [x,0.600,1.000], [y,0.750,1.000], [xlabel, "H/Hmax"], [ylabel, "d/dmax"], [gnuplot\_preamble, "set cntrparam levels 12"])]\$.

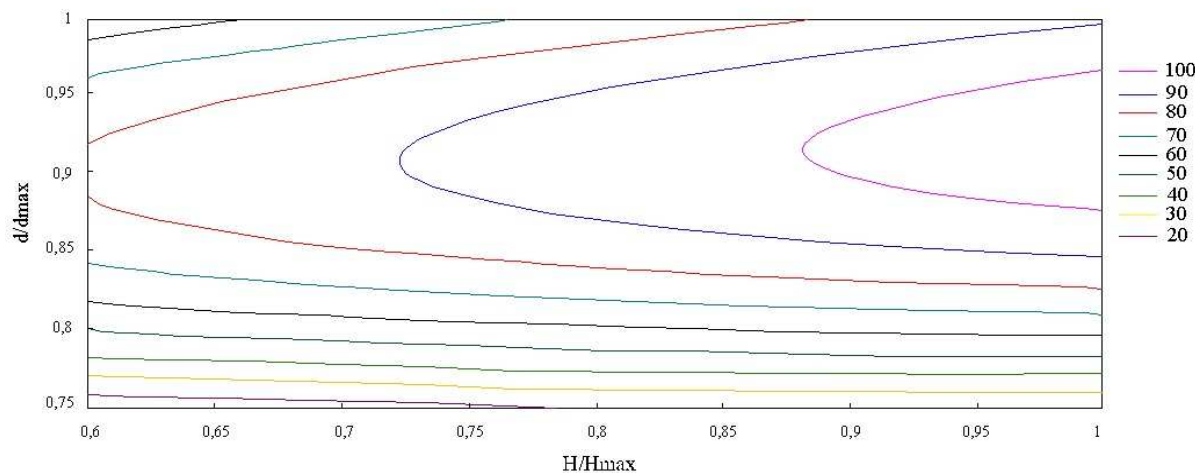


Рисунок 3. График линий уровня функции отклика

$$\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \% = f\left(\frac{H}{H_{\max}}, \frac{d}{d_{\max}}\right)$$

Анализ графика линий уровня функции отклика показывает, что во всем диапазоне изменения отношения рабочего номера  $H/H_{\max}$  от 0,6 до 1,0, при постоянном отношении диаметров сливных отверстий из управляющей полости  $d/d_{\max}$  ленточного регулирующего органа,

изменяющемся от 0,75 до 0,84, значение функции отклика  $\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \%$  практически неизменно, хотя и имеет незначительную тенденцию понижения, с увеличением отношения напоров. При этом, чем меньше отношение диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$ , тем больше степень

влияния данного фактора на функцию отклика  $\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \%$ . Дальнейшее увеличение отношения диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$  от 0,84 до 0,91 приводит к уменьшению влияния данного фактора на функцию отклика

$\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \%$  и при значении 0,91 имеем минимальное влияние отношения диаметров сливных отверстий на функцию отклика, во всем исследуемом диапазоне изменения отношений рабочих напоров. Дальнейшее увеличение отношения диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$  от 0,91 до 1,0

приводит опять к увеличению влияния данного фактора на функцию

$$\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \%.$$

Анализ рисунка 3 так же позволяет констатировать, что влияние отношения рабочих напоров  $H/H_{\max}$  на функцию отклика  $\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \%$ , наибольшее при значениях отношений рабочих напоров находящихся в диапазонах равных 0,91-0,92. Далее любое изменение отношения диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$ , как в сторону увеличения значений, так и в сторону его уменьшения, ведет к уменьшению влияния отношения рабочих напоров  $H/H_{\max}$  на функцию отклика  $\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \%$ , во всем диапазоне исследуемых значений.

Для построения сечений функции отклика введем обозначения:

$$\frac{Q}{Q_{\max} \cdot 100} \% = z; \quad \frac{H}{H_{\max}} = x; \quad \frac{d}{d_{\max}} = y.$$

Выполним необходимые расчеты для построения сечения

$$\text{поверхности отклика при } \frac{d}{d_{\max}} = 0,750; 0,875; 1,00;$$

$$F(x, y) := -2159.879 - 114.585 \cdot x + 4988.280 \cdot y + 276.800 \cdot x \cdot y - 46.800 \cdot x^2 - 2855.040 \cdot y^2; F(x, 0.750); F(x, 0.875); F(x, 1.000);$$

$$\text{plot2d}([F(x, 0.750), F(x, 0.875), F(x, 1.000)], [x, 0.600, 1.000], [y, 0, 120],$$

$$[xlabel, "H/H_{\max}], [ylabel, "Q/Q_{\max}100\%"], [plot\_format, gnuplot],$$

$$[gnuplot\_preamble, "set grid;"])\$.$$



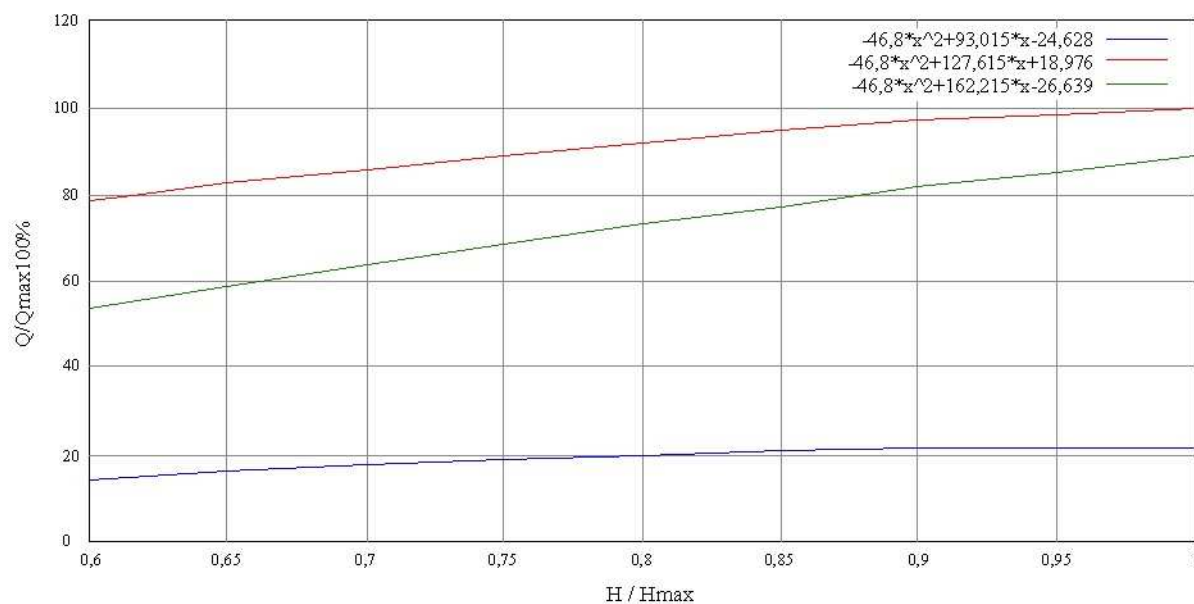


Рисунок 4. Сечения поверхности отклика при  $\frac{d}{d_{max}} = 0,750; 0,875; 1,00$

Анализ сечений поверхности отклика при постоянных отношениях диаметров сливных отверстий  $d/d_{max}$ , показывает, что функция отклика

$\frac{Q}{Q_{max}} \cdot 100\%$  постоянно возрастает во всем диапазоне изменения отношений рабочих напоров  $H/H_{max}$  от 0,6 до 1,0. Однако на рисунке 4

можно видеть, что наименьшее влияние на функцию отклика  $\frac{Q}{Q_{max}} \cdot 100\%$  оказывает наименьшее отношение диаметров сливных отверстий  $d/d_{max} = 0,75$  когда отношение расходов изменяется лишь с 14,3 до 21,5% во всем диапазоне изменения отношений рабочих напоров  $H/H_{max}$  от 0,6 до 1,0. При отношении диаметров сливных отверстий  $d/d_{max} = 0,875$  имеем максимальное влияние данного отношения на функцию отклика, когда она изменяется от 79,6 до 100,0%, во всем диапазоне изменения отношений рабочих напоров  $H/H_{max}$  от 0,6 до 1,0. При максимальном отношении диаметров сливных отверстий  $d/d_{max} = 1,0$  видим, что влияние данного фактора в целом уменьшается, а функция отклика изменяется от 53,87 до 89,7%, во всем диапазоне изменения отношений рабочих напоров  $H/H_{max}$

от 0,6 до 1,0, однако в абсолютном приращении по влиянию на функцию отклика, как показывают приведенные цифры, влияние на функцию отклика наибольшее.

Выполним необходимые расчеты для построения сечения

поверхности отклика при  $\frac{H}{H_{max}} = 0,6; 0,8; 1,0$  :

$F(0.600,y); F(0.800,y); F(1.000,y);$

$F1(x)=-2855.04*x^2+5154.36*x-2245.478;$

$F2(x)=-2855.04*x^2+5209.719999999999*x-2281.499;$

$F3(x)=-2855.04*x^2+5265.08*x-2321.264;$

`plot2d ([F1(x),F2(x),F3(x)], [x,0.750,1.000], [y,0,120], [xlabel, "d/dmax"],`

`[ylabel, "Q/Qmax100%"], [plot_format, gnuplot],`

`[gnuplot_preamble, "set grid;"])$.`

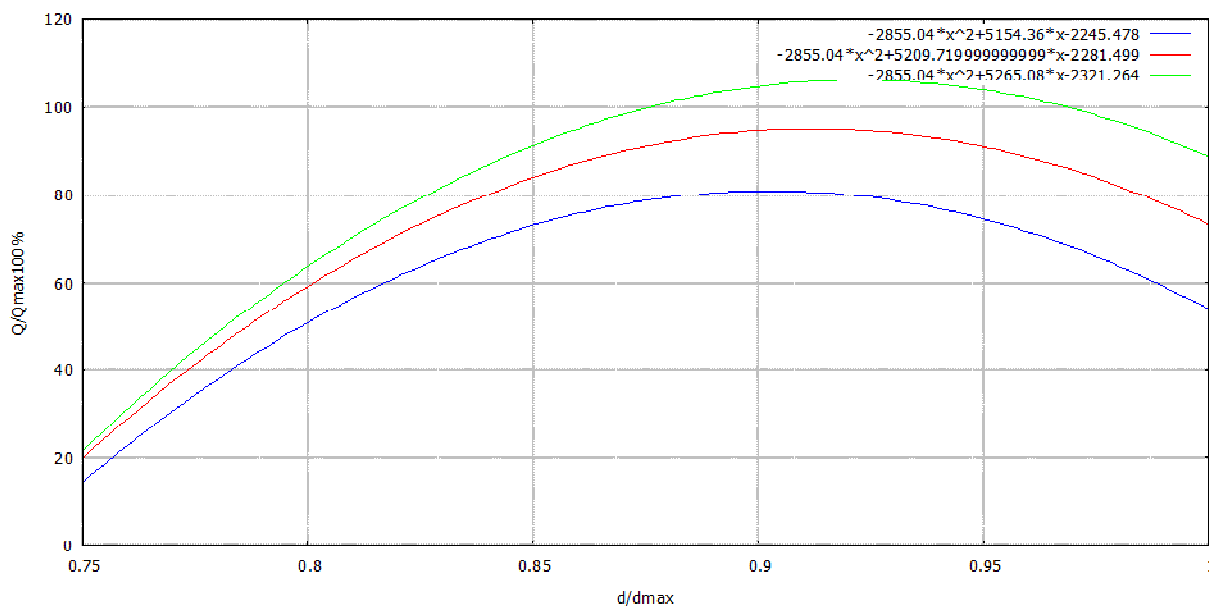


Рисунок 5. Сечения поверхности отклика при  $\frac{H}{H_{max}} = 0,6; 0,8; 1,0$

Анализ сечений поверхности отклика при постоянных отношениях рабочих напоров  $H/H_{max}$  0,6; 0,8; 1,0 показывает, что функции имеют экстремумы по максимуму. При минимальном отношении рабочих

напоров  $H/H_{\max}$  равном 0,6 максимальное значение функции отклика равное 81% будет при отношении диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$  равном 0,9. С увеличением отношения рабочих напоров  $H/H_{\max}$  до 0,8 имеем тренд максимума в сторону увеличения и здесь он наступает при значении функции отклика равном 94% и отношении диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$  равном 0,92.

Дальнейшее увеличение отношения рабочих напоров  $H/H_{\max}$  до 1,0 также приводит к тренду максимума функции отклика, который достигает значения 118%, при этом отношение диаметров сливных отверстий  $d/d_{\max}$  равно 0,94. Совокупный анализ кривых на рисунке 5 показывает, что при любом отношении рабочих напоров, степень влияния на функцию отклика тем больше, чем больше отношение диаметров сливных отверстий.

#### Литература

1. *Дегтярев, Г.В.* Теоретические основы характеристик системы автоматического регулирования рисового чека и регулятора уровня/ Г.В. Дегтярев, Н. В. Коженко // Труды Кубанского государственного аграрного университета.- Краснодар, 2013.- Вып.5(44).- С. 252-255.
2. *Дегтярев, В.Г.* Технологические аспекты систем автоматического регулирования (САР) уровня, для трубчатых водовыпусков рисовых чеков / В.Г. Дегтярев, Г.В. Дегтярев // Труды Кубанского государственного аграрного университета.- Краснодар, 2012.- Вып.3(36).- С. 315-318.
3. Пат. 2519508 Российская Федерация, МПК G05D7/01. Регулятор расхода воды/ Дегтярев В.Г., Дегтярев Г.В.; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). - № 2012149515; заявл. 20.11.2012; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
4. Пат. 2520068 Российская Федерация, МПК G05D7/01. Стабилизатор расхода воды/ Дегтярев В.Г., Дегтярев Г.В.; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). - № 2012148643; заявл. 15.11.2012; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17.
5. *Дегтярев, Г.В.* Обоснование мембранного чувствительного элемента для ленточных регуляторов расхода воды/ Г.В. Дегтярев, Н. В. Коженко., Дегтярева О.Г. // Труды Кубанского государственного аграрного университета.- Краснодар, 2013.- Вып.5(44).- С. 256-262.
6. *Дегтярев, В.Г.* Теоретический анализ и экспериментальные исследования адаптивного датчика регулятора расхода воды/ В.Г. Дегтярев, Г.В. Дегтярев // Труды Кубанского государственного аграрного университета.- Краснодар, 2012.- Вып.3(36).- С. 300-303.

7. Дегтярев, В.Г. Ленточный регулятор расхода с адаптивными характеристиками для рисовых чеков / В.Г. Дегтярев, Г.В. Дегтярев // Труды Кубанского государственного аграрного университета.- Краснодар, 2012.- Вып.3(36).- С. 336-340.
8. Дегтярев, Г.В. Исследование расходных характеристик регулирующего органа ленточного регулятора расхода воды, методом планирования эксперимента/ Г.В. Дегтярев, Н. В. Коженко // Труды Кубанского государственного аграрного университета.- Краснодар, 2014. - Вып.1(46).- С. 212-218.
9. Коженко Н.В. Исследование расходных характеристик задатчика ленточного регулятора расхода, для рисовых чеков /Н.В. Коженко //Труды Кубанского государственного аграрного университета. – Краснодар, 2014г – Вып. №3(48).- С.158-163.
10. Пат. 2549396 Российская Федерация, МПК G05D7/01. Регулятор расхода воды/ Коженко Н.В.; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет (RU). - № 2014112846; заявл. 02.04.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 12.

#### References

1. Degtjarev, G.V. Teoreticheskie osnovy harakteristik sistemy avtomaticheskogo regulirovanija risovogo cheka i reguljatora urovnja/ G.V. Degtjarev, N. V. Kozhenko // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.- Krasnodar, 2013.- Vyp.5(44).- S. 252-255.
2. Degtjarev, V.G. Tehnologicheskie aspekty sistem avtomaticheskogo regulirovanija (SAR) urovnja, dlja trubchatyh vodovypuskov risovyh chekov / V.G. Degtjarev, G.V. Degtjarev // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.- Krasnodar, 2012.- Vyp.3(36).- S. 315-318.
3. Pat. 2519508 Rossijskaja Federacija, MPK G05D7/01. Reguljator rashoda vody/ Degtjarev V.G., Degtjarev G.V.; zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet (RU). - № 2012149515; zajavl. 20.11.2012; opubl. 10.06.2014, Bjul. № 16.
4. Pat. 2520068 Rossijskaja Federacija, MPK G05D7/01. Stabilizator rashoda vody/ Degtjarev V.G., Degtjarev G.V.; zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet (RU). - № 2012148643; zajavl. 15.11.2012; opubl. 20.06.2014, Bjul. № 17.
5. Degtjarev, G.V. Obosnovanie membrannogo chuvstvitelnogo jelementa dlja lentochnyh reguljatorov rashoda vody/ G.V. Degtjarev, N. V. Kozhenko., Degtjareva O.G. // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.- Krasnodar, 2013.- Vyp.5(44).- S. 256-262.
6. Degtjarev, V.G. Teoreticheskij analiz i jeksperimental'nye issledovanija adaptivnogo datchika reguljatora rashoda vody/ V.G. Degtjarev, G.V. Degtjarev // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.- Krasnodar, 2012.- Vyp.3(36).- S. 300-303.
7. Degtjarev, V.G. Lentochnyj reguljator rashoda s adaptivnymi harakteristikami dlja risovyh chekov / V.G. Degtjarev, G.V. Degtjarev // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.- Krasnodar, 2012.- Vyp.3(36).- S. 336-340.
8. Degtjarev, G.V. Issledovanie rashodnyh harakteristik regulirujushhego organa lentochnogo reguljatora rashoda vody, metodom planirovanija jeksperimenta/ G.V. Degtjarev, N. V. Kozhenko // Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta.- Krasnodar, 2014. - Vyp.1(46).- S. 212-218.
9. Kozhenko N.V. Issledovanie rashodnyh harakteristik zadatchika lentochnogo reguljatora rashoda, dlja risovyh chekov /N.V. Kozhenko //Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – Krasnodar, 2014g – Vyp. №3(48).- S.158-163.

10. Pat. 2549396 Rossijskaja Federacija, MPK G05D7/01. Reguljator rashoda vody/ Kozhenko N.V.; zajavitel' i patentoobladatel' Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet (RU). - № 2014112846; zajavl. 02.04.2014; opubl. 27.04.2015, Bjul. № 12.