

6. Аликова Л.А., Якубова И.Ш., Рыжков А.Л., Лавринова А.А., Сидоров А.А. Гигиеническая оценка условий эксплуатации сооружений городской системы водоотведения Hygiene&Sanitation (Russian Journal) 2016(12).

7. Сайт Мосводоканала [Электронный ресурс]. – М.: ОАО Мосводоканал, – Режим доступа: <http://www.mosvodokanal.ru/>, свободный.

8. Сайт Мосводоканала [Электронный ресурс]. – М.: ОАО Мосводоканал, – Режим доступа: <http://www.mosvodokanal.ru/sewage/newtechnologies/emissions/>, свободный.

9. Луков С.А. Совершенствование технологии обработки осадков сточных вод крупных городов: дисс. канд. техн. наук. Нижний Новгород, – 2007. – 204 с.

10. Воробьев А.А. Медицинская и санитарная микробиология: Учеб. пособие для студ. высш. мед. учеб. заведений – М.: Издательский центр «Академия», – 2003. – 464 с.

11. Сайт TehTab.ru [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehtab.ru/Guide/GuideTechnologyDrawings/WaterSupplyWasteWater/Sewage/SewageGas/>, свободный.

12. Нормативы проведения основных санитарно-бактериологических исследований объектов окружающей среды. Утверждено Заместителем Главного Государственного Санитарного врача СССР В.Е.Ковшило 24 февраля 1983 года N 2671-83.

13. Сайт Канализация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kanalizaciya.online/analiz/mikrobiologicheskij-analiz.html>, свободный.

14. Основы санитарной микробиологии. Учебно-методическое пособие для студентов медицинских вузов. Авторы: Н.А. Правосудова, В.Л. Мельников/ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный Университет» (ПГУ). – Пенза, – 2013г.

15. Сайт Перхим [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://perhim.ru/trubl-on-credstvo-dlya-prochistki-kanalizatsii-20-1/>, свободный.

16. Сайт Оптэкс [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://pk-optex.ru/catalog/professionalnaya-himiya/dlya-udaleniya-pleseni-i-gribka/medesk-pg-10-1/>, свободный.

© В.А. Орлов, Е.А. Королева, О.В. Мельник

**Ссылка для цитирования:**

В.А. Орлов, Е.А. Королева, О.В. Мельник. Образование и нейтрализация запахов в водоотводящих сетях как в важнейших артериях жизнеобеспечения // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 4 (34). С. 89–92.

УДК 614.7: 546.13.001.6

**МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ  
(НА ПРИМЕРЕ АЛЕКСАНДРОВСКОГО ВОДОЗАБОРА НА Р. ДОН)**

**Е.Д. Хецуриани**

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,*

*г. Новочеркасск, Россия*

*Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

Водозабор является первым и важным звеном сложной системы водоснабжения, обеспечивающим питание всех водопотребителей. Занимая головное положение в системе, водозабор имеет определяющую роль в ее функционировании. Современный водозабор для снабжения крупного города представляет собой сложный комплекс инженерных сооружений, оснащенных энергетическим и механическим оборудованием, системой автоматического и телемеханического управления. Такой водозабор должен работать бесперебойно при любых условиях забора воды, существенно изменяющихся по сезонам года.

Город Ростов-на-Дону осуществляет забор воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения при помощи руслового водозабора из р. Дон. В настоящее время возникла необходимость выбора и обоснования метода защиты водозаборных сооружений от донных наносов с проведением экспериментальных исследований. Целью лабораторных исследований являлось изучение минимального задержания донных наносов у водозабора с помощью двойного донного направляющего порога. В статье рассмотрено планирование эксперимента для определения минимального задержания донных наносов у водозабора.

**Ключевые слова:** Александровский водозабор, Дон, русловой водозабор, экспериментальная установка, донные направляющие пороги, водоприёмный оголовок, доля донных наносов, метод планирование эксперимента, уровни варьирования факторов, линейная модель, уравнение регрессии, критерий Фишера.

**MATHEMATICAL MODELING FOR SEARCHING OPTIMAL SOLUTIONS (ON THE EXAMPLE  
OF ALEXANDROVSK WATER INTAKE ON THE RIVER OF DON)**

**E.D. Khetsuriani**

*South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platova, Novocherkassk, Russia*

*Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia*

Water intake is the first and important part of a complex water supply system that provides power to all water users. Occupying the head position in the system, the water intake has a decisive role in its functioning. A modern water intake for supplying a large city is a complex complex of engineering structures equipped with power and mechanical equipment, an automatic and telemechanical control system. Such a water intake must work smoothly under any conditions of water intake that significantly change by season.

The city of Rostov - on-don draws water for domestic drinking water supply using a channel water intake from the don river. Currently, there is a need to choose and justify the method of protecting water intake structures from bottom sediments with experimental studies. The purpose of laboratory research was to study the minimum retention of bottom sediments at the water intake using a double bottom guide threshold.

**Key words:** Aleksandrovsky water intake, Don, channel water intake, experimental setup, bottom guiding sills, water intake head, proportion of bottom sediments, method of experiment planning, levels of variation of factors, linear model, regression equation, Fisher's criterion.

Все исследования проводились на экспериментальной установке в лаборатории кафедры гидротехнических сооружений НИМИ имени А.К.Кортунова ФГБОУ ВО Донской ГАУ (рис. 1).

Установка включает в себя: приёмный бак, оборудованный треугольным водосливом с тонкой стенкой, с помощью которого измерялся подаваемый на установку расход; гидравлический лоток прямоугольной формы (длиной – 1,3 м, шириной – 0,15 м); водоотводящий элемент, обеспечивающий сброс воды после проведения опытов.



Рис. 1. Экспериментальная установка

Исследования проводились при расходах на модели  $Q = 5,0; 8,2; 14,3 \text{ л/сек}$ . Глубины и скорости на модели были  $H = 4,8; 6,0; 5,9 \text{ см}$  и  $V_{cp} = 6,94; 9,1; 16,1 \text{ см/сек}$ .

Вода поступала из приемного бака, оборудованного треугольным водосливом с тонкой стенкой, с помощью которого измерялся подаваемый на установку расход, поступала в гидравлический лоток прямоугольной формы, в котором была установлена модель оголовка. Расходы воды измерялись с помощью пьезометрической трубки установленной в начале установки.

Исследования работы донных направляющих порогов велись путем наблюдения за характером движения потока. Так, для выявления режима потока применялись донные и поверхностные поплавки, фотографирование.

Был принят следующий порядок проведения исследований. Вначале исследовался режим потока в районе установки донного водозаборного оголовка без направляющих порогов. Затем исследовался режим потока при тех же расходах, глубинах и средних скоростях, но после установки двойных донных направляющих порогов. В исследовании на модели в качестве

направляющего порога устанавливался металлический уголок с длиной основания 230 мм и высотой стенки 25 мм. Участок модели с водоприёмным оголовком без порогов представлен на рис. 2.

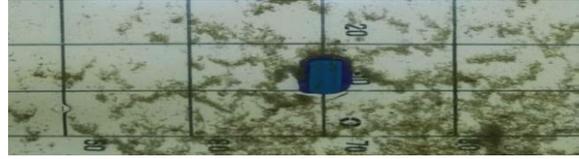


Рис. 2. Участок модели с водоприёмным оголовком без порогов

На рис. 2 заснят участок модели с оголовком. Здесь виден характер распределения донных наносов. Исследования направления донных токов показал, что донные наносы обычно откладываются в непосредственной близости перед оголовком и за ним.

Парные пороги представляют собой два направляющих порога, установленных под определенным углом к направлению движения потока в непосредственной близости один от другого (угол между осью порога и направлением движения потока в опытах принимался равным  $15^\circ$ ).

В процессе исследований наблюдалась следующая картина. Поток, подходя к двойному донному порогу, расслаивался. Донный слой, насыщенный наносами, встречаясь с порогами, отклонялся, разбиваясь на два потока, и направлялся вдоль порогов. Верхний слой переливался через пороги, причем между порогами образовывалось винтовое движение, так что, попадая туда, часть донных наносов быстро выносилась.

На рис. 2 показана зафиксированная фотосъёмкой картина движения донных наносов в районе водозаборного оголовка. Как видно из рис. 2а и 2б применение парных донных направляющих порогов позволило расслоить поток.



Рис. 2. Участок модели с водоприёмным оголовком с рекомендуемым положением порогов

Основная масса наносов выносится вдоль порогов как с наружи, так и с внутренней стороны, однако при таком (проектном) положении порогов некоторое количество наносов, задерживается непосредственно перед оголовком. Поэтому в лаборатории был проведен еще ряд опытов с различными положениями порогов (изменялось в основном расстояние между порогами при постоянном угле между осями порогов и направлением течения воды).

В результате проведенных исследований было найдено положение двойных донных порогов, при котором получается наилучший эффект отклонения и выноса наносов из зоны расположения водоприемного оголовка. Угол между продольной осью порога и направлением течения потока принимался  $15^\circ$ , между осями порогов –  $30^\circ$ . Расстояние между порогами (у входа) 10 мм.

На основе полученных данных в лабораторных исследованиях, находим долю донных наносов, осевших у водозабора, используя планирование эксперимента и оптимизацию.

Исследуемые факторы: угол между направляющими стенками  $\varphi$ , средняя скорость  $V_{cp}$ , глубина  $h$ . Они соответствуют условиям управляемости, независимости и совместимости.

Для получения расчётных зависимостей был использован метод планирования эксперимента [1].

#### Уровни варьирования факторов

Первый фактор – угол между направляющими стенками – варьируется от  $\varphi=30^\circ$  (нижний предел) до  $\varphi=60^\circ$  (верхний предел).

Второй фактор – средняя скорость – варьируется от  $V_{cp} 6,94$  см/с (нижний предел) до  $V_{cp} =16,1$  см/с (верхний предел).

Третий фактор – глубина – варьируется от  $h=4,8$  см (нижний предел) до  $h =6,8$  см (верхний предел).

#### Построение линейной модели

На первом этапе исследования была сформулирована гипотеза о линейном характере влияния факторов на долю донных наносов, осевших

около направляющих стенок. Для проверки этой гипотезы был поставлен полный факторный эксперимент, в котором факторы варьировались на трех уровнях. Такой план позволяет построить линейную модель первого порядка и проверить гипотезу о линейном характере влияния факторов на исследуемый процесс.

В табл. 1 представлен план эксперимента в кодированном виде, значения факторов в некодированном виде и значения исследуемого параметра полученные в результате проведения эксперимента. Эти опыты соответствуют в факторном пространстве вершинам куба с центром в начале координат.

Графическая интерпретация трехфакторного эксперимента представлена на рис. 3.

Строим матрицу планирования с учётом всех взаимодействий и средних значений отклика (табл. 2).

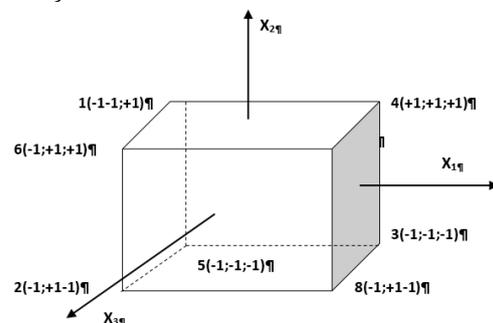


Рис. 3. Графическая интерпретация трёхфакторного эксперимента

Таблица 1

План эксперимента в кодированном виде

№ опыта	Уровни факторов кодированные			Уровни факторов некодированные			Значения функции отклика		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\varphi (X_1)$ град.	$V_{cp} (X_2)$ см/с	$h (X_3)$ см	$Y_1$ ( $\omega$ )%	$Y_2$ ( $\omega$ )%	$Y_3$ ( $\omega$ )%
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	-	+	30	6,94	6,8	0,4	0,5	0,3
2	-	+	-	30	16,1	4,8	5,6	4,0	4,8
3	+	-	-	60	6,94	4,8	4,0	0,7	1,0
4	+	+	+	60	16,1	6,8	3,8	3,8	3,7
5	-	-	-	30	6,94	4,8	6,8	5,0	3,2
6	-	+	+	30	16,1	6,8	10,0	10,0	7,6
7	+	-	+	60	6,94	6,8	9,6	4,8	7,2
8	+	+	-	60	16,1	4,8	1,8	0,9	1,22

Таблица 2

Матрица планирования для обработки результатов

№ опыта	Факторы			Взаимодействия				Результаты опытов			Среднее результатов
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{y}_j$
1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	0,4	0,5	0,3	0,4
2	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	5,6	4,0	4,8	4,8
3	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	4,0	0,7	1,0	1,9
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	3,8	3,8	3,7	3,76
5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	6,8	5,0	3,2	5,0
6	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	10,0	10,0	7,6	9,2
7	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	9,6	4,8	7,2	7,2
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	1,8	0,9	1,22	1,3

Коэффициенты такой модели рассчитываются по формуле:

$$b = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 x_m \bar{y}_n \quad (1)$$

$$b_1 = \frac{(-1) \cdot 0,4 + (-1) \cdot 4,8 + 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + (-1) \cdot 9,2 + 7,2 + 1,3}{8} = -0,65 \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{(-1) \cdot 0,4 + 4,8 + (-1) \cdot 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + 9,2 + (-1) \cdot 7,2 + 1,3}{8} = 2,045 \quad (3)$$

$$b_3 = \frac{0,4 + (-1) \cdot 4,8 + (-1) \cdot 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + 9,2 + 7,2 + (-1) \cdot 1,3}{8} = 0,945 \quad (4)$$

$$b_{1,2} = \frac{0,4 + (-1) \cdot 4,8 + (-1) \cdot 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + (-1) \cdot 9,2 + (-1) \cdot 7,2 + 1,3}{8} = -2,83 \quad (5)$$

$$b_{1,3} = \frac{(-1) \cdot 0,4 + 4,8 + (-1) \cdot 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + (-1) \cdot 9,2 + 7,2 + (-1) \cdot 1,3}{8} = -0,255 \quad (6)$$

$$b_{2,3} = \frac{(-1) \cdot 0,4 + (-1) \cdot 4,8 + 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + 9,2 + (-1) \cdot 7,2 + (-1) \cdot 1,3}{8} = -0,48 \quad (7)$$

$$b_{1,2,3} = \frac{(-1) \cdot 0,4 + (-1) \cdot 4,8 + (-1) \cdot 1,9 + 3,76 + (-1) \cdot 5,0 + 9,2 + 7,2 + 1,3}{8} = 1,17 \quad (8)$$

Коэффициент  $b_0$  рассчитывается как среднеарифметическое значение функций отклика, полученных в эксперименте:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_n = \frac{0,4 + 4,8 + 1,9 + 3,76 + 5 + 9,2 + 7,2 + 1,3}{8} = 4,195 \quad (9)$$

Составляем для наглядности таблицу 3, в которую заносим найденные коэффициенты уравнения регрессии.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии

b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>1,2</sub>	b <sub>1,3</sub>	b <sub>2,3</sub>	b <sub>1,2,3</sub>
4,195	-0,65	2,045	0,945	-2,83	-0,255	-0,48	1,17

Находим дисперсию воспроизводимости по формуле

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 \quad (10)$$

здесь внутренние суммы являются выборочными дисперсиями результатов опытов для j-го эксперимента (j=1,..., n). Для удобства оформляем расчеты в виде табл. 4.

Таблица 4

Расчёт выборочных дисперсий

j	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	$\bar{y}_j$	$(y_{j1} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j2} - \bar{y}_j)^2$	$(y_{j3} - \bar{y}_j)^2$	S <sub>j</sub> <sup>2</sup>
1	0,4	0,5	0,3	0,4	0	0,01	0,01	0,01
2	5,6	4,0	4,8	4,8	0,64	0,64	0	0,64
3	4,0	0,7	1,0	1,9	4,41	1,44	0,81	3,33
4	3,8	3,8	3,7	3,76	0,0016	0,0016	0,0036	0,0034
5	6,8	5,0	3,2	5,0	3,24	0	3,24	3,24
6	10,0	10,0	7,6	9,2	0,64	0,64	2,56	1,92
7	9,6	4,8	7,2	7,2	5,76	5,76	0	5,76
8	1,8	0,9	1,22	1,3	0,25	0,16	0,01	0,21

Суммируя элементы последнего столбца таблицы 4, получаем:

$$\sum_{j=1}^8 S_j^2 = 15,113 \quad (11)$$

Отсюда получаем дисперсию воспроизводимости:

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2 = \frac{1}{8} \cdot 15,113 = 1,89 \quad (12)$$

По формуле определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{коэф} = \sqrt{\frac{S_{(y)}^2}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,89}{8 \cdot 3}} = 0,28 \quad (13)$$

Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы n(m-1)=8\*2=16 при

уровне значимости α = 0,05 находим  $t_{кр} = 2,12$ .

Следовательно,

$$t_{кр} \cdot S_{коэф} = 2,12 \cdot 0,28 = 0,59 \quad (14)$$

Сравнивая полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии, представленными в таблице 3, видим, что все коэффициенты кроме  $b_{1,3}, b_{2,3}$  больше по абсолютной величине 0,59. Следовательно, все коэффициенты кроме  $b_{1,3}, b_{2,3}$  значимы. Полагая  $b_{1,3} = 0, b_{2,3} = 0$ , получаем

уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 4.195 - 0.65x_1 + 2.045x_2 + 0.945x_3 - 2.83x_1x_2 + 1.17x_1x_2x_3 \quad (15)$$

Проверим полученное уравнение на адекватность по критерию Фишера. Так как дисперсия воспроизводимости найдена в предыдущем пункте, то для определения расчетного значения критерия Фрасч. необходимо вычислить остаточную дисперсию  $S_{ост}^2$  [3].

Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии  $\tilde{y}_j$  ( $j=1, \dots, 8$ ), подставляя +1 или -1 вместо  $x_i$  в соответствии с номером  $j$  эксперимента из табл. 2:

$$y_1 = 4.195 - 0.65(-1) + 2.045(-1) + 0.945 - 2.83 + 1.17(-1) = -0.255 \quad (16)$$

$$y_2 = 4.195 - 0.65(-1) + 2.045 + 0.945(-1) - 2.83(-1) + 1.17(-1) = 7.605 \quad (17)$$

$$y_3 = 4.195 - 0.65 + 2.045(-1) + 0.945(-1) - 2.83(-1) + 1.17(-1) = 2.215 \quad (18)$$

$$y_4 = 4.195 - 0.65 + 2.045 + 0.945 - 2.83 + 1.17 = 4.875 \quad (19)$$

$$y_5 = 4.195 - 0.65(-1) + 2.045(-1) + 0.945(-1) - 2.83(-1) + 1.17(-1) = 3.515 \quad (20)$$

$$y_6 = 4.195 - 0.65(-1) + 2.045 + 0.945 - 2.83(-1) + 1.17 = 11.835 \quad (21)$$

$$y_7 = 4.195 - 0.65 + 2.045(-1) + 0.945 - 2.83(-1) + 1.17 = 6.445 \quad (22)$$

$$y_8 = 4.195 - 0.65 + 2.045 + 0.945(-1) - 2.83 + 1.17 = 2.985 \quad (23)$$

Остаточную дисперсию  $S_{ост}^2$  вычисляем по формуле:

$$S_{ост}^2 = \frac{3}{8-7} \sum_{j=1}^8 \left( \frac{y_j - \bar{y}}{y_j - \bar{y}} \right)^2 = 3 \cdot \left[ \frac{(-0.255-4.4)^2 + (7.605-4.8)^2 + (2.215-4.8)^2 + (4.875-4.8)^2 + (3.515-4.8)^2 + (11.835-4.8)^2 + (6.445-4.8)^2 + (2.985-4.8)^2}{8} \right] = 66.2 \quad (24)$$

Расчётное значение критерия Фишера Фрасч. определяем по формуле:

$$F_{расч} = \frac{S_{ост}^2}{S_{(y)}^2} = \frac{66.2}{1.89} = 35.03 \quad (25)$$

Табличное значение критерия  $F_{табл.}$  находим из таблиц критических точек распределения Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  по соответствующим степеням свободы:

$F_{табл.} = 233,4$ .

Т. к.  $F_{расч.} = 35,03 < F_{табл.} = 233,4$ , то уравнение регрессии считается адекватным.

#### Список литературы

1. Питерский А.М. Основы математического планирования эксперимента: учеб. пособие для обучающихся по программе магистра, бакалавриата и послевузовского образования / А.М.Питерский; Новочерк. гос. мелиор. акад.; каф. строит.дела, осн. и фундаментов. – Новочеркасск, – 2012. – 165 с.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, – 1981. – 263с. ил. – (Мат. статистика для экономистов).
3. Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент: метод. указ. для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГАВТ, – 2010. – 36 с.
4. Родин Я.С. Труды ВНИИГиМ, т. XLIII «Гидротехника» / Я.С. Родин, Т.П. Панова. – М. 1965.

© Е.Д. Хицуриан

#### Ссылка для цитирования:

Е.Д. Хицуриан. Математическое моделирование для поиска оптимальных решений (на примере александровского водозабора на р. Дон) // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 4 (34). С. 92–97.