

УДК 627.844

С. С. Ананьев, С. А. Тарасьянц, А. Г. Кондратьев (ФГБОУ ВПО «НГМА»)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУЙНОГО УСТРОЙСТВА, УСТАНОВЛЕННОГО ПЕРЕД РАБОЧИМ КОЛЕСОМ ОСЕВОГО НАСОСА

В приведенной статье рассмотрены окончательные экспериментальные исследования струйного устройства, осевого насоса с линией рециркуляции. Указаны факторы, оказывающие существенное влияние на выход процесса. Приведена план-матрица окончательного эксперимента, изложена методика обработки результатов исследований. Проведен анализ поверхностей отклика методом двумерных сечений, который позволил оценить влияние каждого фактора на эффективность происходящих в установке процессов, то есть на величину подпора. Для изучения комплексного влияния факторов на вид поверхностей отклика, построенных по уравнению при фиксированных значениях одного из факторов, получено уравнение, адекватно описывающее процесс в изученных пределах и представляющее его модель. Использование настоящего предложения для активации потока воды во всасывающей линии насоса совместно с линией рециркуляции основного насоса найдет широкое применение на водозаборах с колеблющимся в межсезонье уровнем воды.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, матрица-план, метод двумерных сечений, комплексный анализ, линия рециркуляции, насос, подача, напор, факторы, модель.

S. S. Ananyev, S. A. Tarasyants, A. G. Kondratyev (FSBEE HPE “NSMA”)

EXPERIMENTAL RESULTS OF JET DEVICE SET UP BEFORE WORK WHEEL OF AXIAL FLOW PUMP

The experimental research of jet device, axial flow pump with recirculation line is considered in this article. The factors that have significant influence on process outcome are pointed out. The plan-matrix of final experiment is given, the method of processing the results of research are presented. Response surfaces analysis using two-dimensional cross-sections method to estimate the impact of each factor on the efficiency of processes in the installation is done. To study the complex influence of factors on the type of response surfaces developed by equation with fixed values of one of the factors the equation describing the process within the examined limits and representing its model adequately is obtained. The usage of this proposal to activate the water flow into the pump suction line with the recirculation line of the main pump will have a wide application in water intakes with fluctuating water levels in the offseason period.

Key words: experimental research, matrix-plan, method of two-dimensional cross-sections, complex analysis, recirculation line, pump, supply, pressure, factors, model.

Повышение высоты всасывания осевого насоса достигается путем установки линии рециркуляции, увеличивающей скорость потока перед рабочим колесом насоса. Линия рециркуляции позволяет повысить кинетическую энергию потока воды за счет отбора основного потока и подачи

его в насос. Нужно отметить, что наибольший эффект достигается в межсезонье (при уменьшении уровня воды в подводящем канале).

В процессе проведения первой серии экспериментов по оптимизации параметров насосной установки [1] доказано, что из шести параметров три оказывают малоэффективное действие. Это диаметр входа в сопло $d_{\text{вх}}(X_4)$, расстояние до дна приемной камеры $l(X_5)$ и диаметр линии рециркуляции $d_p(X_6)$. Остальные три параметра – подача $Q_0(X_1)$, расстояние до обтекателя $L(X_2)$ и диаметр наружного сопла $d_0(X_3)$ – имеют определяющее влияние. Их оптимальное сочетание должно обеспечивать максимальный подпор, создаваемый устройством. Между значениями параметров $Q_0(X_1)$, $L(X_2)$ и $d_0(X_3)$ наблюдается корреляционная связь, которая установлена нами экспериментально. Эксперименты проводили в межсезонье при понижении уровня воды в подводящем канале, что создавало очень тяжелую обстановку на насосной станции. Станция включалась периодически по мере отбора воды и повышения ее уровня в аванкамере насоса. Возникла необходимость прекращения эксперимента при недостаточном уровне воды. Для снижения затрат времени на проведение экспериментальных исследований использовали методику оптимального планирования многофакторного эксперимента.

В качестве факторов, оказывающих наибольшее существенное влияние на выход процесса, были приняты:

- подача Q_0 , закодированная как X_1 ;
- расстояние до обтекателя l_0 , закодированное как X_2 ;
- диаметр наружного сопла d_0 , закодированный как X_3 .

В качестве критерия оптимизации была принята величина подпора $\Delta h(y)$, создаваемого насосом [2]. Остальные перечисленные факторы не принимались во внимание, так как они не оказывали существенного влияния на выход процесса. Для сокращения затрат времени и средств реа-

лизовали трехфакторный эксперимент на двух уровнях. В таблице 1 представлены факторы и интервалы варьирования в эксперименте.

Таблица 1 – Факторы и интервалы варьирования окончательного эксперимента

Уровни факторов	Кодированные значения факторов	Факторы и их натуральные значения		
		$X_1(Q_0)$, м ³ /ч	$X_2(L)$, мм	$X_3(d_0)$, мм
Верхний	+ 1	2000	1300	500
Средний	0	1600	900	400
Нижний	– 1	1200	500	300
Интервал	1	400	400	100

Матрица-план окончательного эксперимента (таблица 2) были использованы применительно к схеме экспериментальной установки (рисунок 1).

Результаты трехфакторного эксперимента на двух уровнях приведены в таблице 2.

После обработки результатов исследований по стандартной методике [3] для описания поверхности отклика получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 352 + 60,5x_1 + 49,25x_2 + 37,29x_3 + 0,75x_1x_2 + 1,25x_1x_3 + 0,5x_2x_3 - 1,5x_1x_2x_3. \quad (1)$$

В таблице 2 и ниже представлены результаты расчета дисперсии воспроизводимости опытов, число степеней свободы, стандартное отклонение, доверительный интервал для коэффициентов уравнения, варианты 1, 2, 3 и средний вариант экспериментальных данных.

Значимость коэффициентов регрессии проверяли по критерию Стьюдента. Коэффициенты признавались значимы при $|b| > |t|$.

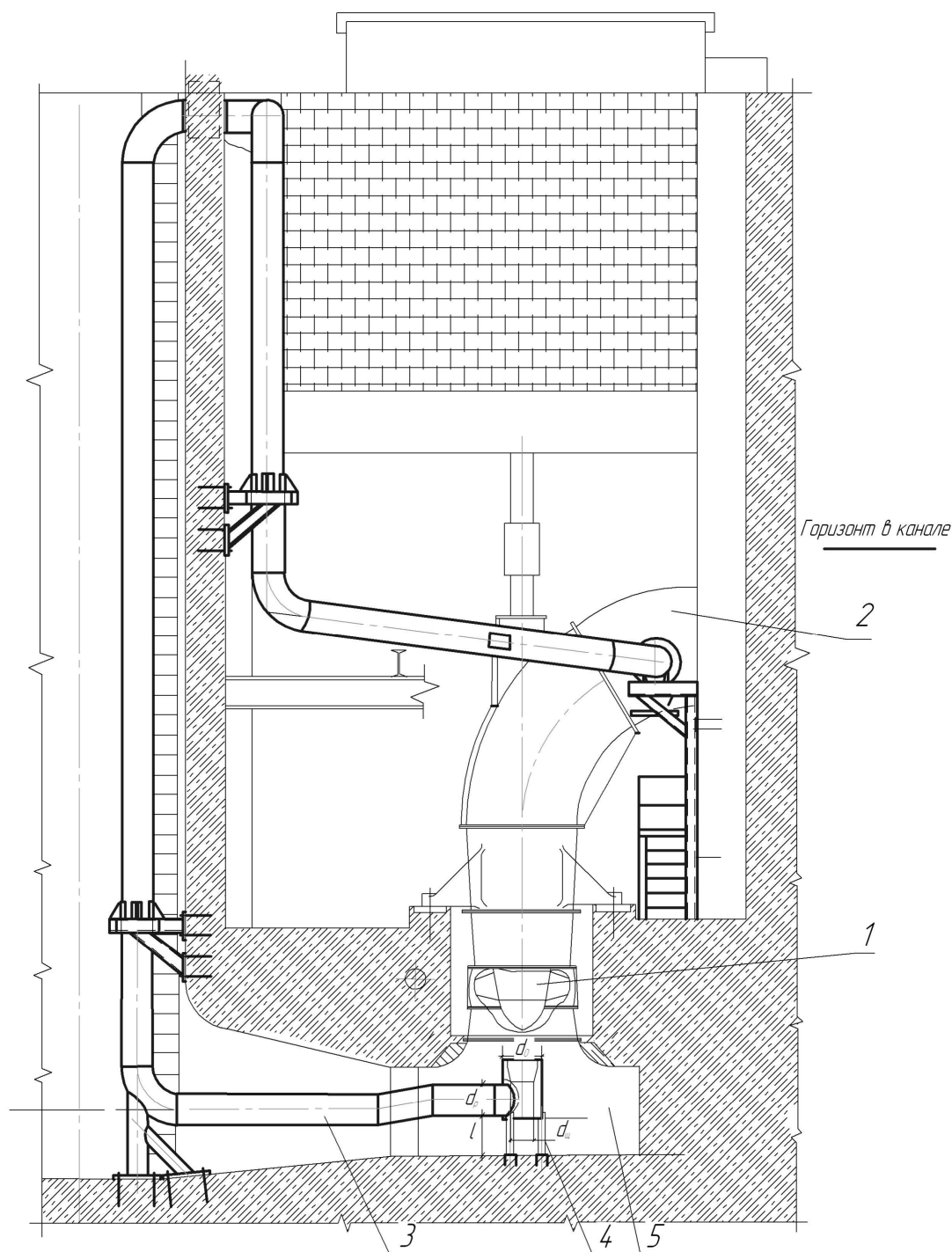
Так как коэффициенты уравнения регрессии $b_4 = 0,75$; $b_5 = 1,25$; $b_6 = 0,5$; $b_7 = -1,5$ имеют меньшие значения, чем допустимое значение критерия Стьюдента, то члены уравнения с указанными коэффициентами во внимание не принимаются.

Таблица 2 – Матрица планирования и результаты окончательных экспериментов

Факторы				Парное взаимодействие			Тройное взаимодействие	Критерий оптимизации подпор $y_i(\Delta h)$, мм вод. ст.			
№ экс-перимента	Подача Q , м ³ /ч (X_1) ϑ_1	Расстояние до об-текателя L , мм (X_2) ϑ_2	Диаметр на-ружного со-пла d_0 , мм (X_3) ϑ_3	X_1X_2 ϑ_4	X_1X_3 ϑ_5	X_2X_3 ϑ_6	$X_1X_2X_3$ ϑ_7	Экспериментальные данные			
								1 серия	2 серия	3 серия	средние
								y_1	y_2	y_3	y_c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+	+	+	+	+	+	+	502	500	498	500
2	+	+	–	+	–	–	–	420	427	428	425
3	+	–	+	–	+	–	–	402	402	402	402
4	+	–	–	–	–	+	+	325	320	324	323
5	–	+	+	–	–	+	–	375	385	374	378
6	–	+	–	–	+	–	+	305	303	298	302
7	–	–	+	+	–	–	+	278	279	274	277
8	–	–	–	+	+	+	–	213	210	204	209

Продолжение таблицы 2

№ экс- пери- мента	Расчет дисперсии воспроизводимости						Подпор теоретиче- ских $(\Delta h)y_T$	Дисперсия адекватности	
	$y_{i1}-y_C$	$y_{i2}-y_C$	$y_{i3}-y_C$	$(y_{i1}-y_C)^2$	$(y_{i2}-y_C)^2$	$(y_{i3}-y_C)^2$	y_{T_i}	$(y_{T_i}-y_C)$	$(y_{T_i}-y_C)^2$
1	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	2	0	-2	4	0	4	499,04	0,96	0,9216
2	-5	2	3	25	4	9	424,46	0,54	0,2916
3	0	0	0	0	0	0	400,54	-1,54	2,3716
4	2	-3	1	4	9	1	325,86	1,14	1,2996
5	-3	-7	-4	9	49	16	378,14	-0,84	0,7396
6	3	1	-4	9	1	16	303,36	1,36	1,88496
7	1	2	-3	1	4	9	279,64	2,64	6,9696
8	4	1	-5	16	1	25	204,86	-4,14	17,1396
				$\sum (y_{i1}-y_C)^2=68$	$\sum (y_{i2}-y_C)^2=68$	$\sum (y_{i3}-y_C)^2=80$			
				$\sum_{i=1}^8 \sum_{j=1}^3 (y_i-y_C)^2=216$					



1 – осевой центробежный насос; 2 – напорный трубопровод; 3 – линия рециркуляции;
4 – эжектор; 5 – приемная камера

Рисунок 1 – Схема осевого насоса с линией рециркуляции и струйным насосом, установленным перед рабочим колесом

Так как все коэффициенты уравнения регрессии первой степени во много раз превышают табличное значение критерия Фишера, то все указанные коэффициенты значимы, поэтому для дальнейшего использования уравнение рекомендуется в виде:

$$y=352+60,5X_1+49,25X_2+37,29X_3. \quad (2)$$

Данное уравнение использовано для расчета теоретических значений подпора $\Delta h(y_T)$, занесенных в таблицу 2.

Предварительный анализ поверхностей отклика проводили с помощью двумерных сечений, что позволило оценить влияние каждого фактора в отдельности на выход процесса, то есть величину подпора на выходе установки. На рисунках 2-4 показаны линии уровня подпора $\Delta h(y)$ при изменении факторов X_1 , X_2 , X_3 . В процессе построения сечений один из факторов варьировал в диапазоне от -1 до $+1$, а двум остальным задавали постоянные значения на трех уровнях (-1 ; 0 ; $+1$).

При этом необходимо отметить, что интенсивность роста расхода Q_1 определяется сочетанием факторов X_2 и X_3 .

Наименьший рост интенсивности расхода Q_1 наблюдается при $X_2 = -1$ и $X_3 = -1$ (кривая 1 на рисунке 2), при $X_2 = -1$ и $X_3 = 0$ (кривая 9 на рисунке 2), а также $X_2 = -1$ и $X_3 = 1$ (кривая 8 на рисунке 2). Для названных линий характерно неизменное значение фактора $X_2 = -1$ (напор H_2). По сравнению с постоянным значением фактора X_2 изменение фактора X_3 (напор H_3) во всем принятом диапазоне варьирования от $X_3 = -1$ до $X_3 = 1$ увеличивает интенсивность расхода Q_1 всего на $0,24$ л/с. Линии параллельны.

На рисунке 3 показаны линии сечения при $X_1 = \text{var}$. Характер линий показывает, что в исследуемом факторном пространстве во всем диапазоне из линий параметров (факторы X_2 и X_3 от $X_2 = 0$ и $X_3 = 0$ до значений $X_2 = 1$ и $X_3 = 1$) наблюдается равномерный рост фактора X_1 от -1 до $+1$. Причем, область максимальных значений подпора $\Delta h(y)$ определяется прямой 6 при значениях $X_1 = +1$. Минимальное значение подпора обнаружено при $X_1 = -1$.

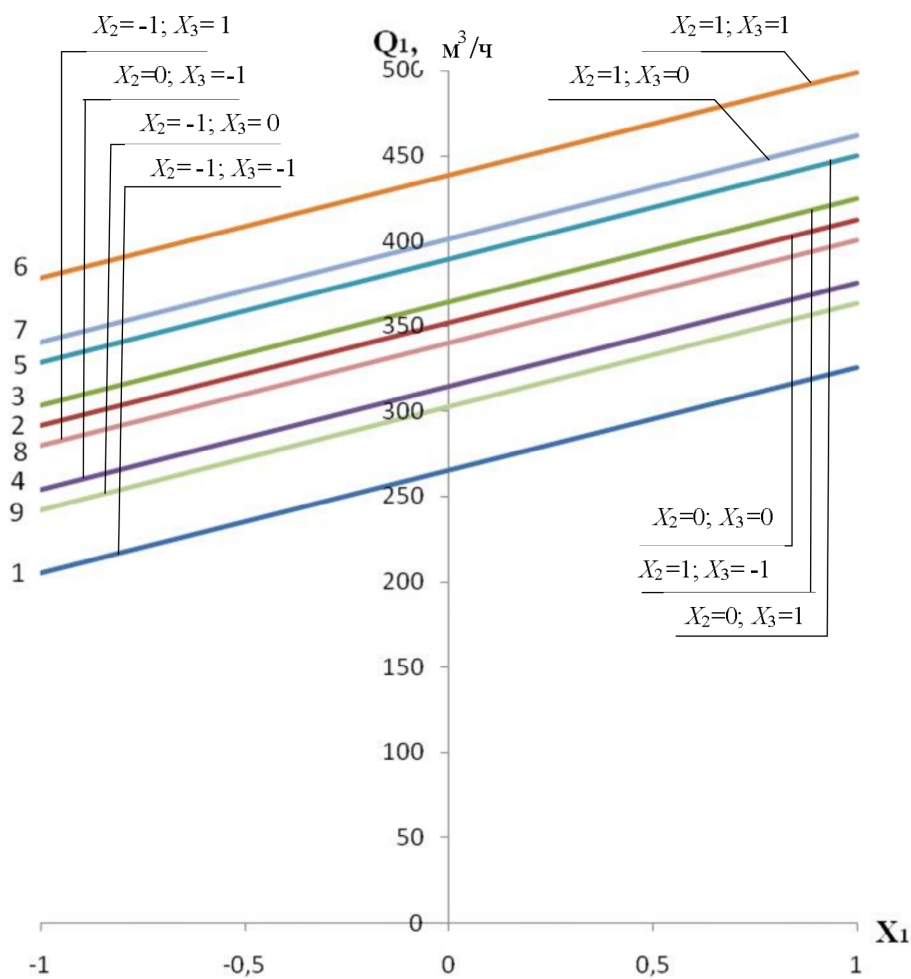


Рисунок 2 – Двумерные сечения поверхностей отклика при фиксированных значениях X_2 и X_3

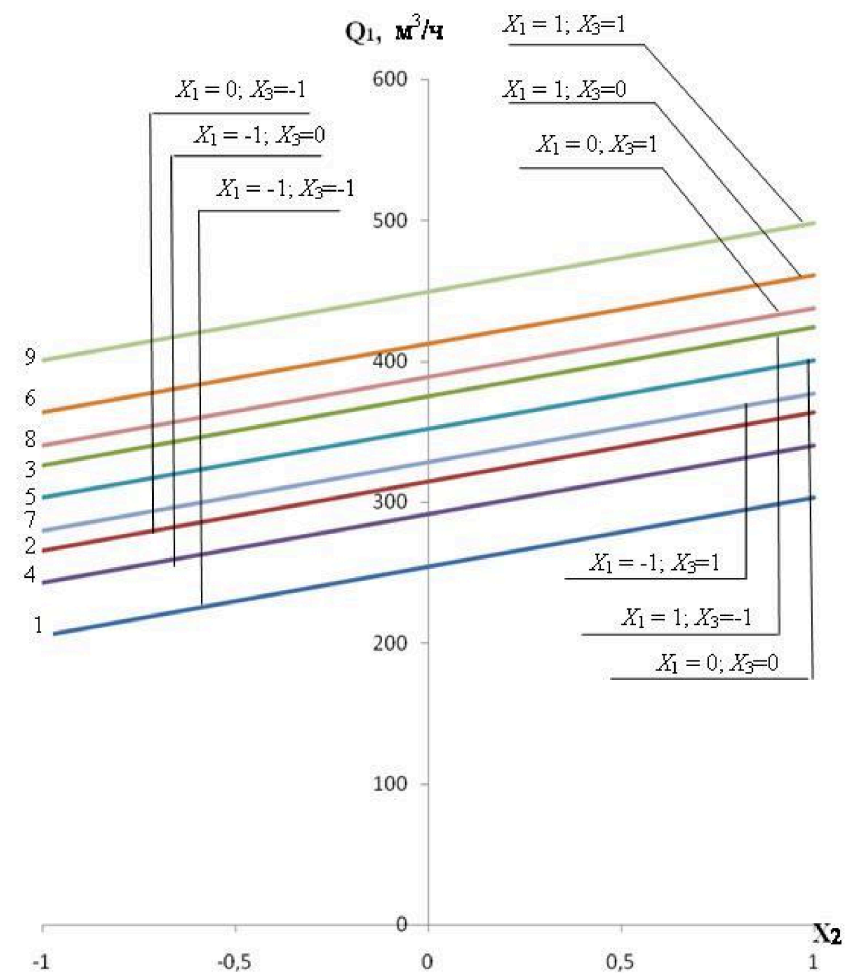


Рисунок 3 – Двумерные сечения поверхностей отклика при фиксированных значениях X_1 и X_3

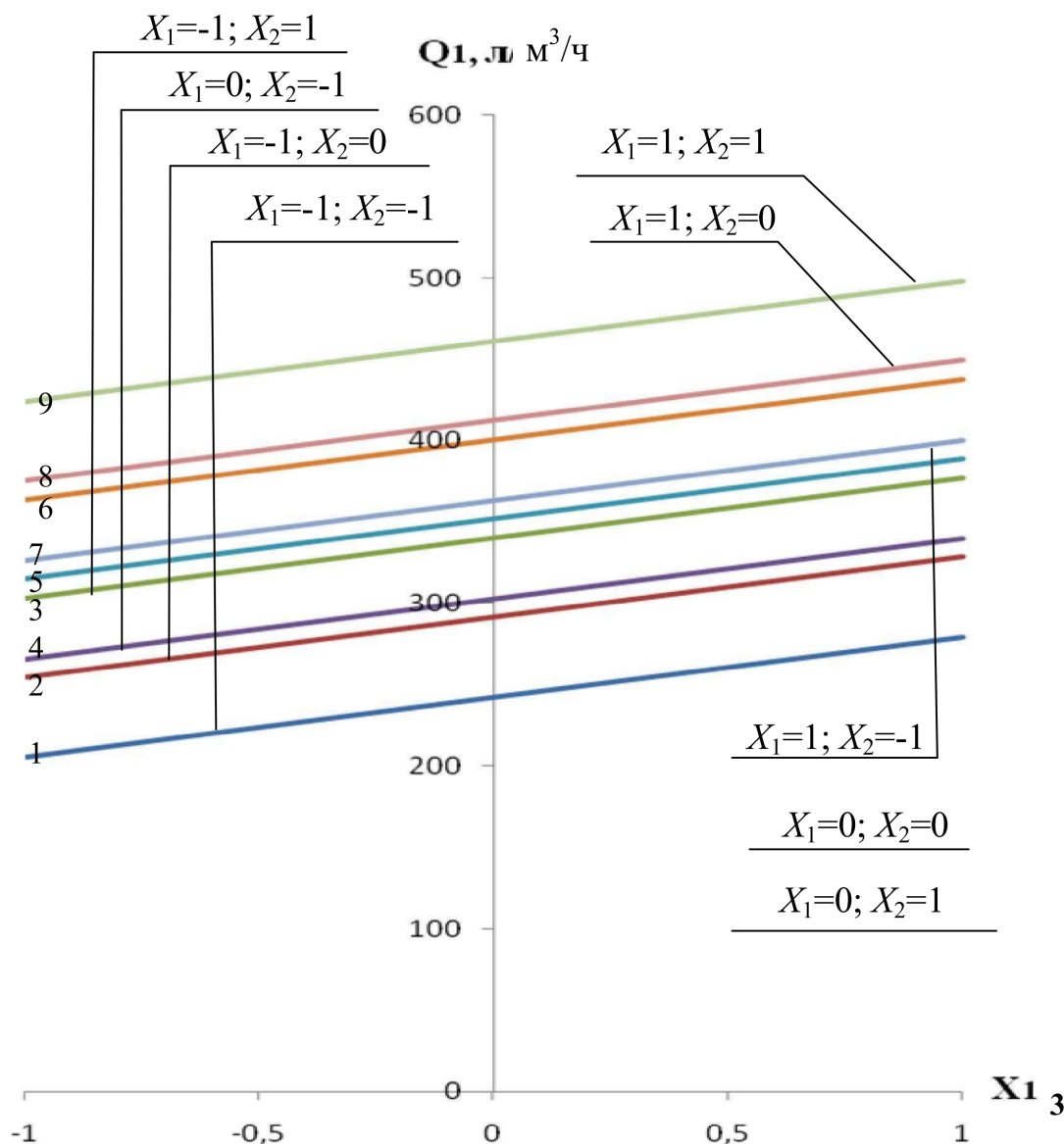


Рисунок 4 – Двумерные сечения поверхностей отклика при фиксированных значениях X_1 и X_2

Таким образом, можно отметить, что на рисунке 3 показаны линии сечения поверхности отклика при $X_2 = \text{var}$. Значения фактора X_2 играют ведущую роль, но опять на фоне положительных значений остальных двух факторов $X_1 = 1$ и $X_3 = 1$. Наибольший подпор обнаружен при $X_2 = 1$. Минимальные значения подпора обнаружены во всем диапазоне изменения факторов при значениях X_2 менее 1.

На рисунке 4 показано двумерное сечение поверхности отклика исследуемой модели. Как и во всех предыдущих случаях, максимальное значение подпора обнаружено при различном сочетании трех факторов при значении $X_3 = 1$.

Таким образом, методом двумерных сечений поочередно удалось проанализировать влияние каждого фактора на эффективность происходящих в установке процессов, то есть на величину подпора, но окончательно оптимизировать параметры не удалось.

Положительное значение метода двумерных сечений заключается в том, что удалось найти дальнейшее направление совершенствования установки через конструктивное усовершенствование.

Для изучения комплексного влияния факторов на выход параметров оптимизации рассмотрим вид поверхностей отклика, построенных по уравнению 2 при фиксированных значениях одного из факторов.

Задавая численные значения факторам, моделирующим процесс, который отражает процесс активации воды в пределах факторного пространства, оценивается влияние каждого из них на эффективность происходящих в установке процессов, то есть на величину подпора.

На рисунке 5 представлен вид поверхностей отклика, построенных по математической модели (2) при фиксированных значениях одного из факторов (X_3). Как видно из рисунка 5, в исследованном факторном пространстве минимальные значения колеблются от 205,5 м водного столба и достигают максимальных значений 498,5 м водного столба. Характерно, что максимальные значения подпора (Δh) наблюдаются при сочетании всех трех факторов на верхнем уровне. Это хорошо видно из таблицы 4, в которую сведены результаты численной реализации математической модели (2).

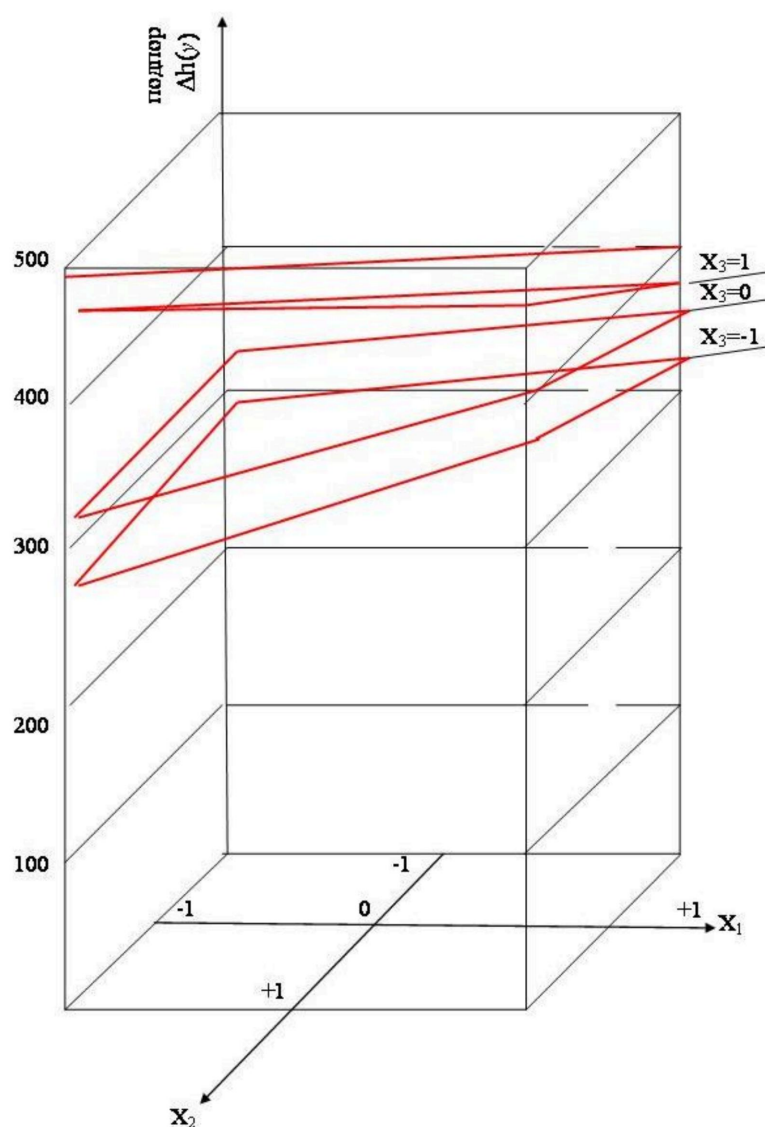


Рисунок 5 – Поверхности отклика

Таблица 4 – Численная реализация математической модели

№	X_1	X_2	X_3	y
1	-1	-1	-1	205,5
2	1	-1	-1	326,5
3	-1	+1	-1	303,5
4	+1	+1	-1	424,5
5	-1	-1	0	242,5
6	+1	-1	0	363,5
7	-1	+1	0	340,5
8	+1	+1	0	461,5
9	-1	-1	1	283,5
10	-1	+1	1	377,5
11	1	-1	1	400,5
12	1	1	1	498,5

Характерно, что с увеличением уровня фактора X_3 (диаметра сопла d_0 от 300 мм до 500 мм), что соответствует значению $X_3 = -1$ до значения $X_3 = 1$, равномерно повышается выход процесса от 300 мм водного столба до максимально возможного 500 мм водного столба при численных значениях $X_1 = 1$ и $X_2 = 1$. Следовательно, сочетания факторов $X_1 = 1$; $X_2 = 1$; $X_3 = 1$ обеспечивают оптимальные условия активации водного потока в исследованной установке, то есть максимальное значение подпора Δh .

При всех других сочетаниях факторов в исследуемом пространстве значение создаваемого подпора ниже.

Проведенные исследования позволили сделать заключение, что натурная установка позволила произвести увеличение подпора на насосной станции и, прежде всего, активировать поток воды, поступающий к насосу.

Использование настоящего предложения для активации воды во всасывающей линии насоса совместно с линией рециркуляции основного насоса найдет широкое применение на водозаборах с колеблющимся в межсезонье уровнем забора воды.

Основные положения:

- линии рециркуляции как система обратной связи насоса с поступающим потоком и восполняющим его энергетический поток повышает высоту всасывания осевого насоса;

- эжекторное устройство, установленное на входе в насос и форсирующее работу насоса, создавая возможность повышения его расхода, увеличивает скорость потока воды;

- выражение для определения подпора имеет вид:

$$y = 352 + 60,5 X_1 + 49,25 X_2 + 37,29 X_3.$$

Выводы.

1 По результатам исследований получено уравнение регрессии, которое было использовано для построения и анализа двумерных сечений

поверхности отклика, и комплексная оптимизация параметров указанной поверхности.

2 Правомерность принятых решений была исследована экспериментальным путем, что проверило выдвинутые предпосылки.

Список использованных источников

1 Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в техно-экологических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Статистика, 1981. – 283 с.

2 Брандт, В. Э. Натурные испытания кольцевого гидроземлесоса / В. Э. Брандт, Г. Е. Мускевич, С. А. Тарасьянц // Труды НИМИ. – Новочеркасск, 1976. – 16 с.

3 Головина, И. И. Линейная алгебра и некоторые ее приложения / И. И. Головина. – М.: Наука, 1971. – 352 с.

Ананьев Сергей Сергеевич – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия» (ФГБОУ ВПО «НГМА»), старший преподаватель кафедры «Машины природообустройства».

Контактный телефон: 8-928-757-78-35.

E-mail: ansser@mail.ru

Ananyev Sergey Sergeyevich – Federal State Budget Educational Establishment of Higher Professional Education “Novocherkassk State Meliorative Academy” (FSBEE HPE “NSMA”), Senior Lecturer of the Chair “Machinery for Environmental Engineering”.

Contact telephone number: 8-928-757-78-35.

E-mail: ansser@mail.ru

Тарасьянц Сергей Андреевич – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия» (ФГБОУ ВПО «НГМА»), профессор.

Контактный телефон: 8-918-585-84-69.

E-mail: ngma_meh@mail.ru

Tarasyants Sergey Andreyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budget Educational Establishment of Higher Professional Education “Novocherkassk State Meliorative Academy” (FSBEE HPE “NSMA”), Professor.

Contact telephone number: 8-918-585-84-69.

E-mail: ngma_meh@mail.ru

Кондратьев Анатолий Георгиевич – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия» (ФГБОУ ВПО

«НГМА»), доцент кафедры «Машины природообустройства».

Контактный телефон: 8(8635)-27-96-19.

E-mail: ngma_meh@mail.ru

Kondratyev Anatoliy Georgiyevich – Candidate of Technical Sciences, Federal State Budget Educational Establishment of Higher Professional Education “Novocherkassk State Meliorative Academy” (FSBEE HPE “NSMA”), Associate Professor of the Chair “Machinery for Environmental Engineering”.

Contact telephone number: 8(8635)-27-96-19.

E-mail: ngma_meh@mail.ru