

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Гулин В.В., ассистент,

Донецкий государственный технический университет

Приведены результаты экспериментальной проверки имитационного моделирования рабочего процесса генератора импульсной водяной струи, обеспечивающего формирование импульсов со стабилизированными параметрами.

The outcomes of experimental check of simulation modeling of a working process of the generator of pulse water jets ensuring pulse-shaping with steady-state conditions are adduced.

При проектировании генератора импульсной струи для установок различного назначения возникает вопрос правильного выбора значений определяющих факторов. Сочетание факторов должно обеспечить оптимальный рабочий режим, допускать возможные отклонения значений факторов от установленных без срыва процесса генерации, и при этом не приводить к перегрузке или повреждению оборудования. Учитывая возможные большие затраты времени и средств на выполнение экспериментальных проверок, а также значительную сложность процессов, происходящих в гидросистеме, рациональным будет построение математической модели и определение на основе ее исследований базовых значений факторов и допустимых диапазонов их изменений. Решение подобной задачи применительно к генератору гидроимпульсной очистной машины для крутых пластов приведено в [1, 2].

Подтверждение правильности выводов, сделанных по результатам математического эксперимента, и доказательство правомочности использования модели в дальнейшем возможно только после проверки адекватности имитационной модели реальным процессам.

Для выполнения проверки, на основе полученных данных [2] были разработаны рабочие чертежи, и изготовленный генератор был смонтирован на испытательном стенде в шахтоуправлении "Комсомольское" ПО "Октябрьуголь". Внешний вид генератора во время испытаний показан на рисунке 1.

Испытательный стенд представлял собой полноразмерный образец генератора импульсной струи (ГИС), смонтированный из отдельных узлов на едином основании. Нагрузкой генератора являлся прямолинейный ствол с размещенными в нем крестообразным успокоителем потока и цилиндрическим насадком с диаметром выходной части 10 мм.

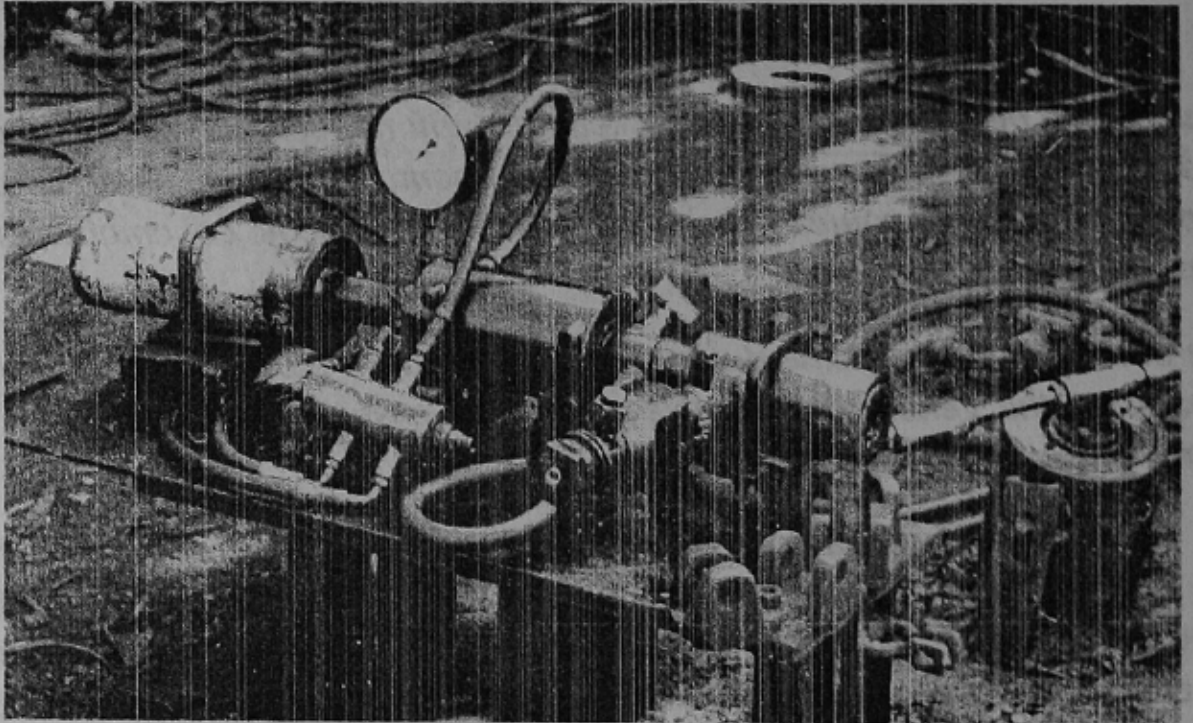


Рисунок 1 – Генератор импульсной водяной струи во время испытаний

Кроме ГИС в состав стенда входили: резервуар для воды, подпиточный насос типа 1В-20, высоконапорная насосная установка УНГ-5,4, регистрирующая и измерительная аппаратура. Набор оборудования стенда приведен на рисунке 2.

Цифрами на схеме обозначены: 1 - насосная установка УНГ-5,4; 2 - распределитель; 3 - рабочий гидропневмоаккумулятор (ГПА); 4 - накопитель; 5 - балластный ГПА, 6 - ствол с рабочим насадком; 7 - управляющий клапан; 8 - зарядный дроссель; 9 - струеуправляющий клапан; 10, 11 - мерные баки; 12 - усилитель-преобразователь ИД-2И; 13 - светолучевой осциллограф Н-117; 14 - индукционные датчики давления (типа ДДИ-10); 15 - клапан закачки масла.

Предварительная закачка масла в полости устройства осуществлялась при помощи ручного насоса или с применением вспомогательного гидроцилиндра, одна из полостей которого заполнялась маслом и соединялась через зарядное устройство с ГПА, а в другую подавалась вода под давлением от питающей насосной установки.

Вода, забираемая из резервуара подпиточным насосом, подавалась к высоконапорной насосной установке по резиноканевому рукаву с условным диаметром 32 мм, давление на входе установки УНГ-5,4 поддерживалось равным 1 МПа, что соответствует максимальному паспортному значению, и обеспечивало надежную работу основного насосного агрегата. На выходе установки УНГ давление потока изменялось в пределах 20-30 МПа в зависимости от выбора рабочего режима ГИС. Поток от УНГ к генератору подводился по гибкому высоконапорному рукаву с условным диаметром 16 мм. Вода, выстреливаемая через насадок ствола и сброс управляющего клапана поступала в струеулавливатели, а затем либо в мерные баки (при измерениях), либо отводилась в резервуар.

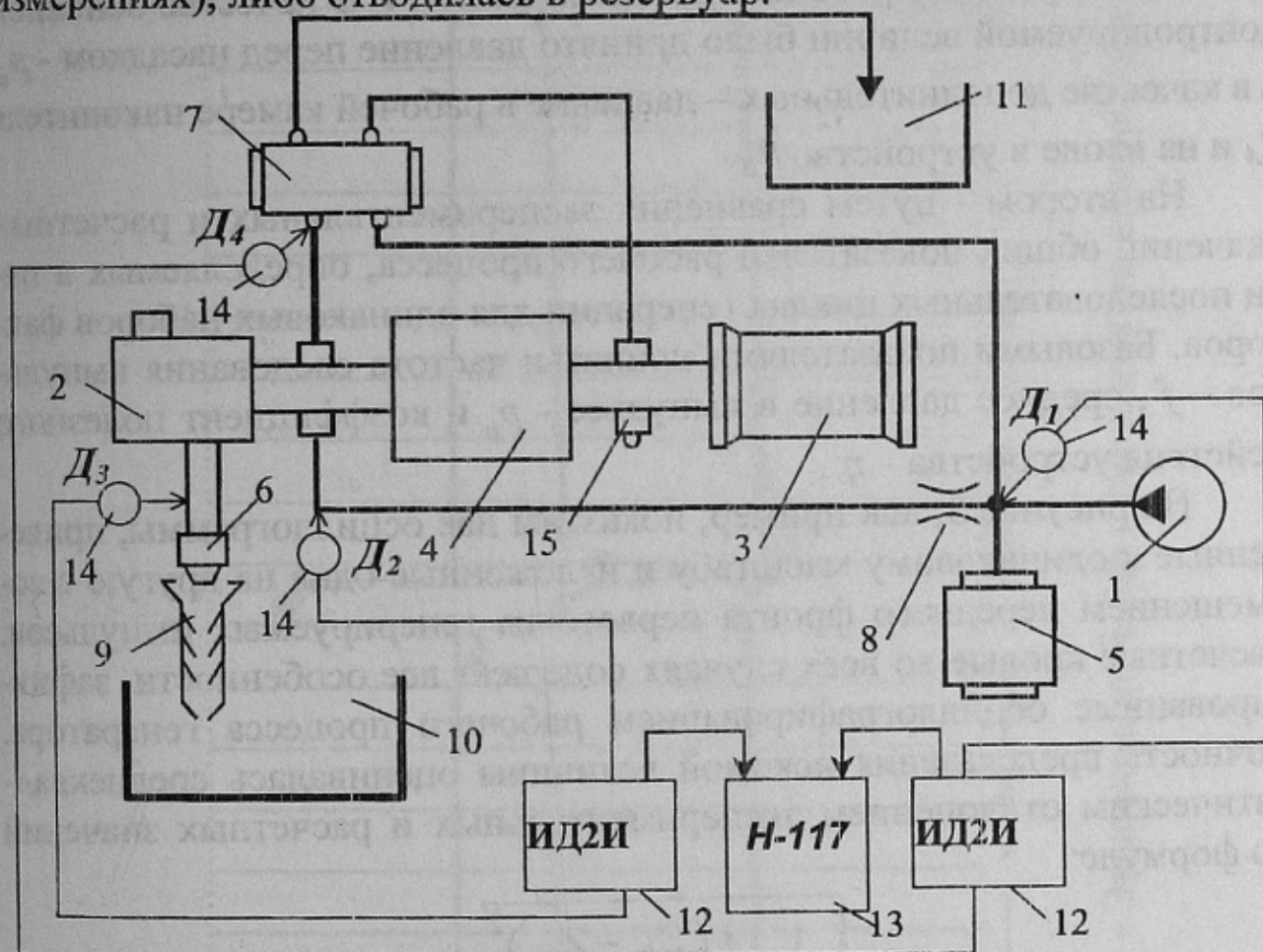


Рисунок 2- Схема станда для испытаний ГИС

Датчик D_1 фиксировал величину давления на входе - p_B .

Датчик D_2 фиксировал давление в рабочей камере накопителя - p_A , датчик D_3 - давление перед насадком устройства в момент выстрела - p_u (форму импульса).

При помощи датчика D_4 периодически измерялась временная задержка, формируемая линией связи между рабочей камерой нако-

пителя и открывающей камерой управляющего клапана, путем записи осциллограмм (с повышенной скоростью протяжки пленки) давлений в начале и конце линии.

Основным критерием адекватности модели реальному устройству является точность предсказания выходных параметров: давления в импульсе и частоты следования импульсов. Сравнение остальных параметров позволит наиболее полно оценить качество моделирования рабочего процесса, близость реальной и модельной осциллограмм.

Проверка проводилась в два этапа.

На первом - путем детального сравнения осциллограмм рабочего процесса, полученных во время стендовых испытаний и в результате моделирования рабочего процесса на ЭВМ. В качестве основной контролируемой величин было принято давление перед насадком - p_u , а в качестве дополнительных - давление в рабочей камере накопителя P_A и на входе в устройство P_B .

На втором - путем сравнения экспериментальных и расчетных значений общих показателей рабочего процесса, определяемых в пяти последовательных циклах генерации для одинаковых наборов факторов. Базовыми показателями приняты: частота следования импульсов - f , среднее давление в импульсе - p_u и коэффициент полезного действия устройства - η .

На рисунке 3, как пример, показаны две осциллограммы, приведенные к одинаковому масштабу и наложенные одна на другую с совмещением переднего фронта первого из генерируемых импульсов. Расчетные кривые во всех случаях содержат все особенности, зафиксированные осциллографированием рабочего процесса генератора. Точность предсказания искомой величины оценивалась среднеквадратическим отклонением экспериментальных и расчетных значений по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_{iэ} - Z_{ip}}{Z_{iэ}} \right)^2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $Z_{iэ}$ - i -ое контрольное значение величины, определенное в эксперименте;

Z_{ip} - контрольное значение, полученное расчетом;

n - количество контрольных точек.

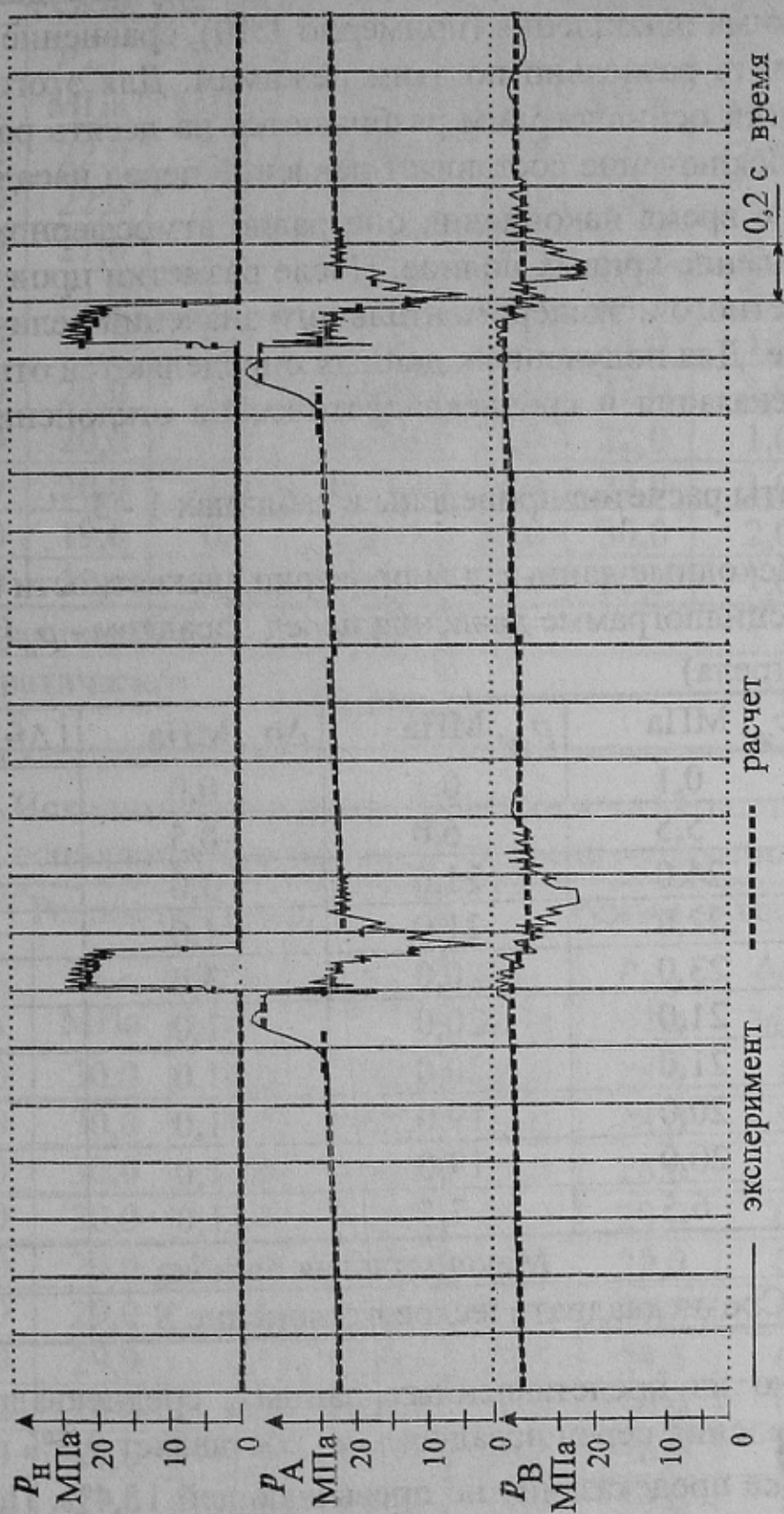


Рисунок 3 – Экспериментальная и расчетная осциллограммы рабочего процесса ГИС

Выбор контрольных точек осуществлялся следующим образом. Учитывая значительную разность в длительности двух основных режимов работы генератора: формирования импульса давления (выстрела) и режима накопления (примерно 1:10), сравнение кривых будем производить отдельно по этим режимам. Для этого соответствующие участки осциллограмм разбиваются на десять равновеликих интервалов. Исключение составляет давление перед насадком p_u , поскольку во все время накопления оно равно атмосферному и в этом режиме совпадение кривых полное. После разметки производятся измерения расчетного и экспериментального значений величины в каждом интервале. Для полученных данных определяются относительная ошибка предсказания и среднеквадратическое отклонение по выражению (1).

Результаты расчетов приведены в таблицах 1 - 3.

Таблица 1 – Исходные данные для проверки адекватности модели по осциллограмме давления перед насадком - p_u (режим выстрела)

№ точки	$p_{из}$, МПа	$p_{ир}$, МПа	Δp_u , МПа	$ \Delta p_u / p_{из}$
1	0,1	0,1	0,0	0,000
2	5,5	6,0	-0,5	0,091
3	24,0	21,0	3,0	0,125
4	22,0	21,0	1,0	0,045
5	23,0	20,0	3,0	0,130
6	21,0	20,0	1,0	0,048
7	21,0	20,0	1,0	0,048
8	20,0	19,0	1,0	0,050
9	20,0	19,0	1,0	0,050
10	6,5	7,5	-1,0	0,154
Максимальная ошибка				15,4 %
Среднеквадратическое отклонение S				9,2 %

Как видно из представленных данных, среднеквадратическое отклонение давления перед насадком - p_u составляет 9,2% при максимальной ошибке предсказания не превышающей 15,4%. По давлениям p_A и p_B в различных режимах (см. таблицы 2-3) среднеквадратическое отклонение находится в пределах 4,6 - 10,2%, максимальная ошибка (зафиксированная только в одной точке) - 25,0%.

Таблиця 2 – Исходные данные для проверки адекватности модели по осциллограмме давления в рабочей камере накопителя p_A

№ точки	Режим выстрела				Режим накопления			
	$p_{Aэ}$ МПа	p_{Ap} МПа	Δp_A МПа	$ \Delta p_A /p_{Aэ}$	$p_{Aэ}$ МПа	p_{Ap} МПа	Δp_A МПа	$ \Delta p_A /p_{Aэ}$
1	20,0	22,0	-2,0	0,100	2,0	1,5	0,5	0,250
2	21,0	22,0	1,0	0,043	20,0	19,0	1,0	0,050
3	18,0	21,0	-3,0	0,167	19,0	19,0	0,0	0,000
4	22,0	21,0	1,0	0,045	20,0	20,0	0,0	0,000
5	21,0	21,0	0,0	0,000	22,0	21,0	1,0	0,045
6	21,0	20,0	1,0	0,048	23,0	22,0	1,0	0,043
7	21,0	20,0	1,0	0,048	23,0	22,0	1,0	0,043
8	18,0	20,0	-2,0	0,111	23,0	22,0	1,0	0,043
9	19,0	19,0	0,0	0,000	32,0	30,0	2,0	0,063
10	16,0	19,0	-3,0	0,188	31,0	30,0	1,0	0,032
Максимальная ошибка				18,8%	25,0%			
Среднеквадратическое отклонение S				10,2%	9,3%			

Таблиця 3 – Исходные данные для проверки адекватности модели по осциллограмме давления на входе генератора p_B

№ точки	Режим выстрела				Режим накопления			
	$p_{Bэ}$ МПа	p_{Bp} МПа	Δp_B МПа	$ \Delta p_B /p_{Bэ}$	$p_{Bэ}$ МПа	p_{Bp} МПа	Δp_B МПа	$ \Delta p_B /p_{Bэ}$
1	30,0	30,0	0,0	0,000	29,0	28,0	1,0	0,034
2	31,0	30,0	1,0	0,032	23,0	28,0	-5,0	0,217
3	30,0	30,0	0,0	0,000	29,0	28,0	1,0	0,034
4	31,0	30,0	1,0	0,032	29,0	29,0	0,0	0,000
5	27,0	29,0	-2,0	0,074	29,0	29,0	0,0	0,000
6	31,0	29,0	2,0	0,065	29,0	29,0	0,0	0,000
7	30,0	29,9	0,1	0,003	29,5	29,5	0,0	0,000
8	28,0	28,0	0,0	0,000	30,0	30,0	0,0	0,000
9	26,0	27,0	-1,0	0,038	30,0	30,0	0,0	0,000
10	29,0	27,0	2,0	0,069	31,0	30,0	1,0	0,032
Максимальная ошибка				7,4%	21,7%			
Среднеквадратическое отклонение S				4,6%	7,5%			

Таким образом, по результатам первого этапа, можно сделать вывод о соответствии имитационной модели реальному устройству в части отражения всех особенностей протекания рабочего процесса.

На втором этапе проверки адекватности имитационной модели для оценки точности предсказания интегральных показателей процесса были получены пять экспериментальных осциллограмм - одна при запуске генератора с набором факторов соответствующим центральной точке области определения факторов и четыре на границах диапазонов изменения. Для тех же сочетаний факторов было выполнено моделирование рабочего процесса генератора на ЭВМ. Затем по двум группам осциллограмм определены значения частоты следования импульсов - f , среднего давления в импульсе - p_u и КПД генератора η в пяти последовательных циклах при установившемся рабочем процессе.

Процедура проверки соответствия экспериментального и расчетного материала на втором этапе состоит из трех стадий [3].

На первой стадии находятся дисперсии для каждой u -той группы (где u - номер режима работы ГИС) экспериментов и расчетов - $S_{uэ}^2$ и $S_{uр}^2$ соответственно, проверяется их однородность и затем определяются средневзвешенные дисперсии $S_{свэ}^2, S_{свр}^2$, являющиеся дисперсиями воспроизводимости опытов в эксперименте и расчете соответственно.

Дисперсии S_u^2 определяются по формуле

$$S_u^2 = \frac{\sum_{i=1}^5 (Y_{ui} - \bar{Y}_u)^2}{4}$$

где i - номер периода,

Y_{ui} - значение величины в i -ом периоде u -го режима,

\bar{Y}_u - выборочное среднее u -ой строки.

Так как мы располагаем набором 5 дисперсий, то с помощью F -критерия (критерия Фишера) [4, 5] проверяем однородность наименьшей и наибольшей. Если различие между ними оказывается незначимым, то остальные дисперсии тем более будут однородными.

Табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы проверяемых дисперсий $f_{св1} = f_{св2} = 4$, $F_{0,05}(4; 4) = 6,39$.

Таблица 5 – Данные для определения дисперсии воспроизводимости частоты следования импульсов (расчет)

Номер режима, u	Шифр осциллограммы	Номер периода, i					\bar{f}_{up}	S_{up}^2
		1	2	3	4	5		
		Частота следования импульсов, f_{up} , Гц					Гц	Гц ²
1	ГИД 06.02	4,3	4,5	4,2	4,2	4,3	4,3	0,015
2	ГИД 07.03	4,1	4,3	4,0	3,9	4,1	4,1	0,022
3	ГИД 07.05	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,3	0,013
4	ГИД 07.06	3,6	3,3	3,4	3,5	3,5	3,5	0,013
5	ГИД 07.14	3,9	4,2	4,1	4,0	4,3	4,1	0,025
Дисперсия: максимальная: $\max S_{up}^2$							0,025	
минимальная: $\min S_{up}^2$							0,013	
Расчетное значение F -критерия $\max S_{up}^2 / \min S_{up}^2$							1,923	
Дисперсия воспроизводимости $S_{свр}^2$							0,0176	

Таблица 6 – Итоговые данные по определению дисперсии воспроизводимости для КПД - η и давления - p_u

Показатель	КПД - η		давление - p_u	
	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
Дисперсия:				
максимальная: $\max S_{uэ}^2$	0,00070	0,00042	0,24 МПа ²	0,043 МПа ²
минимальная: $\min S_{uэ}^2$	0,00015	0,00010	0,047 МПа ²	0,023 МПа ²
Расчетное значение F -критерия $\max S_{uэ}^2 / \min S_{uэ}^2$	4,773	4,042	5,106	1,870
Дисперсия воспроизводимости $S_{свр}^2$	0,00040	0,00020	0,139 МПа ²	0,030 МПа ²

Значения найденных дисперсий воспроизводимости приведены в соответствующих таблицах.

На второй стадии находятся дисперсии адекватности по всем рассматриваемым величинам:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^5 (\bar{Y}_3 - \bar{Y}_p)^2}{4}.$$

Одновременно определяются средняя и максимальная ошибки предсказания рассматриваемой величины. Результаты вычислений приведены в таблицах 7 – 8. Причем в таблице 8 даны только итоговые данные по определению дисперсии адекватности для КПД η и давления p_u .

Таблица 7 – Данные для определения дисперсии адекватности и проверке однородности дисперсий по частоте следования импульсов f

Номер режима, u	\bar{f}_{up} , Гц	\bar{f}_{u3} , Гц	$\frac{ \bar{f}_{up} - \bar{f}_{u3} }{\bar{f}_{u3}}$	$\frac{(\bar{f}_{up} - \bar{f}_{u3})^2}{\Gamma_{ц}^2}$
1	4,30	4,40	0,0233	0,0100
2	4,10	4,04	0,0146	0,0036
3	3,30	3,48	0,0545	0,0324
4	3,50	3,72	0,0629	0,0484
5	4,10	4,30	0,0488	0,0400
Ошибка: наибольшая			6,3%	
средняя			4,1%	
Дисперсия: адекватности S_{ad}^2				0,0269
воспроизводимости $S_{св}^2$				0,0109
Расчетное значение F -критерия $S_{ad}^2 / S_{св}^2$				2,466

На третьей стадии проверяется однородность дисперсий адекватности и воспроизводимости. Если расчетное значение критерия Фишера (F -критерия, см. табл. 7 – 8) оказывается меньше табличного, то значения величин, полученные при имитационном моделировании рабочего процесса генератора, адекватны эксперименту.

Табличные значения F -критерия для рассматриваемых нами случаев равны:

$$F_{0,05}(20,4) = 5,80 \quad \text{и} \quad F_{0,05}(4,20) = 2,87; \quad [4].$$

Число степеней свободы для дисперсии воспроизводимости:

$$f_{свв} = \sum_{u=1}^5 (N_u - 1),$$

где N_u - число параллельных опытов, в нашем случае $N_u = 5$ для всех замеров, поэтому $f_{свв} = 20$.

Таблица 8 – Итоговые данные по определению дисперсии адекватности и проверке однородности дисперсий для КПД - η и давления - P_u

Показатель сравнения	Параметр процесса	кпд - η	давление - P_u
Ошибка:	наибольшая	6,9%	4,0%
	средняя	2,2%,	2,5%,
Дисперсия:	адекватности $S_{ад}^2$	0,00026	0,3520 МПа ²
	воспроизводимости $S_{св}^2$	0,0109	0,1386 МПа ²
Расчетное значение F -критерия $S_{ад}^2 / S_{св}^2$		1,547	2,540

Как видно из табл. 7 и 8, расчетные значения F -критерия не превышают табличного значения, следовательно дисперсии воспроизводимости и адекватности во всех случаях однородны. Это дает основание утверждать, что, с вероятностью 95%, разработанная имитационная модель адекватна эксперименту с точностью, достаточной для прикладных исследований. Следовательно, основные положения, изложенные в [2], справедливы, и величины, полученные в результате исследований математической модели, действительно отражают рабочий процесс в рассматриваемых условиях.

Предложенная методика проектирования генератора импульсной струи позволяет с минимальными затратами получить достоверные показатели рабочего процесса и на этой основе создавать эффективные генераторы для различных условий эксплуатации.

Список источников.

1. Гулин В.В. Имитационная модель генератора импульсной водяной струи. Наукові праці ДонДТУ. Вип. 7. - 1999. - с.75 - 84.
2. Гулин В.В. Оптимизация рабочего процесса генератора импульсной водяной струи. Наукові праці ДонДТУ. Вип. 16. - 2000. - с.71 - 75.
3. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. - Л.: Энергоатомиздат, 1990. - 288 с.
4. Тимошенко Г.М., Зима П.Ф. Теория инженерного эксперимента. - Киев: УМК ВО, 1991. 124 с.
5. Бондарь А.Г., Статюха Т.А. Планирование эксперимента в химической технологии. - К.: Вища школа, 1976. - 187 с.