



6. Бессмертный В.С. Плазменное глазурование стеновых строительных материалов из бетона / Бессмертный В.С., Дюмина П.С., Бондаренко Н.И. – Белгород, 2014. – 129 с.
7. Волокитин О.Г. Анализ процессов традиционного и плазменного плавления золы ТЭЦ / О.Г. Волокитин, В.И. Верещагин, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов // Техника и технология силикатов, 2016. – Т. 23. – № 3. – С. 2 – 5.
8. Волокитин Г.Г., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В., Маслов Е.А., Малюга Н.В. Распределение температурных полей при плазменной обработке поверхности древесины / Г.Г. Волокитин, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов, Е.А. Маслов, Н.В. Малюга // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, 2013. – № 3. – С. 220 – 227.
9. Wallenberger F. T., Bingham P. A. Fiberglass and Glass Technology: EnergyFriendly Compositions and Applications. Springer. 2009. 474 p.
10. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы : монография / Г. Ю. Даутов Г.Ю., А. Н. Тимошевский, А. С. Аньшаков. – : Новосибирск: «Наука», Сиб. предпр. РАН, 2004. - 466 с.
11. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759с.
12. Каренгин А.Г. Плазменные процессы и технологии: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 160 с.
13. Волокитин О.Г., Шеремет М.А., Шеховцов В.В., Бондарева Н.С., Кузьмин В.И. Исследование режимов конвективного теплопереноса при получении высокотемпературных силикатных расплавов / О.Г. Волокитин, М.А. Шеремет, В.В. Шеховцов, Н.С. Бондарева, В.И. Кузьмин // Теплофизика и аэромеханика, 2016. – Т. 23. – № 5. – С. 789 – 800.
14. Шеховцов В.В. Использование низкотемпературной плазмы для получения зольных микросфер / В.В. Шеховцов, В.А. Власов, Г.Г. Волокитин, О.Г. Волокитин // Известия высших учебных заведений. Физика, 2016. – Т. 59. – № 9-3. – С. 305 – 308.

УДК 519.233.5

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДИСПЕРСИИ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ В ОТСУТСТВИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н.А. Прохоренко<sup>1</sup>, А.Б. Голованчиков<sup>2</sup>, А.В. Волжская<sup>3</sup>

<sup>1</sup>старший преподаватель кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, e-mail: [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

<sup>2</sup>доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, e-mail: [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

<sup>3</sup>бакалавр кафедры процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия, e-mail: [pahp@vstu.ru](mailto:pahp@vstu.ru)

**Аннотация.** Статья посвящена вопросу методики расчета ошибки опыта в отсутствии параллельных экспериментальных исследований. В её основе лежит замена истинных значений  $i$ -того выходного параметра как функции  $i$ -того входной величины на среднее арифметические расчетные значения этого параметра для  $(i-1)$  и  $(i+1)$  точек.



Проводится пример такого расчета для заданной реологической зависимости касательных напряжений от градиента скорости, так называемой степенной неньютоновской жидкости.

*Ключевые слова: ошибка опыта, дисперсия, дисперсия воспроизводимости, параллельные опыты, эксперимент, касательные напряжения, градиент скорости, неньютоновская жидкость.*

## THE METHOD OF CALCULATION OF THE VARIANCE OF REPRODUCIBILITY IN THE ABSENCE OF CONCURRENT EXPERIMENTAL STUDIES

N.A. Prohorenko<sup>1</sup>, A.B. Golovanchikov<sup>2</sup>, A.V. Volgsk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>senior lecturer of the Department of processes and apparatus of chemical and food products, Volgograd state technical University, Volgograd, Russia, e - mail: [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

<sup>2</sup> Ph.D., Professor of the Department of processes and apparatus of chemical and food production, Volgograd state technical University, Volgograd, Russia, e-mail: [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

<sup>3</sup>student of the Department of processes and apparatus of chemical and food production, Volgograd state technical University, Volgograd, Russia, e-mail: [pahp@vstu.ru](mailto:pahp@vstu.ru)

**Abstract.** The article is devoted to the method of calculating the error of experience in the absence of parallel experimental studies. It is based on replacement of is-muddy the values of the i-th output parameter as a function of the i-th input variable on the arithmetic average of the calculated values of this parameter for the (i-1) and (i+1) points. An example of such a calculation is given for a given rheological dependence of the tangential stresses on the velocity gradient, the so-called power non-Newtonian fluid.

*Keywords: experiment error, dispersion, reproducibility dispersion, parallel experiments, experiment, shear stresses, velocity gradient, non-Newtonian fluid.*

**Введение.** В научных исследованиях часто возникает необходимость в нахождении связи между результативными и факторными переменными.

При корреляционном анализе экспериментальных данных необходимо для расчетов коэффициентов корреляции, дисперсии воспроизводимости, адекватности математической модели и значимости ее коэффициентов помимо основных опытов проводить параллельные опыты, чтобы иметь возможность количественно оценивать разбросы выходных величин от входных в экспериментальных исследованиях с аналогичными отклонениями средних значений выходных величин в параллельных опытах от их теоретических значений, определяемых по предлагаемой математической модели.

Однако частоту в таблицах, справочниках, в статьях различных авторов одни и те же экспериментальные зависимости приводятся при разных неповторяющихся значениях аргументов, то есть в отсутствии параллельных опытов [1-3].

**Цель работы.** Разработка методики расчета вышеназванных величин корреляционного анализа в отсутствии параллельных опытов. В таблице 1 приведены исходные экспериментальные данные по реологической зависимости касательных напряжений от градиента скорости для 3% раствора КМЦ в воде, полученные на ротационном вискозиметре «Реотест» при 22°C.

**Материал и результаты исследований.** Проведем регрессионный анализ полученной зависимости экспериментальных данных.

Расчетные значения параметров  $\gamma_{ni}$  и  $\tau_{ni}$  условно параллельного эксперимента проводятся для любой  $i$ -той точки [ $i=(2 \div n_k-1)$ ], где  $n_k$  - число основных опытов.

$$\begin{aligned}\gamma_{ni} &= \frac{(\gamma_{i-1} + \gamma_{i+1})}{2} ; \\ \tau_{ni} &= \frac{\tau_{i-1} + \tau_{i+1}}{2} .\end{aligned}\quad (1)$$

Уравнение (1) справедливо при одинаковом шаге по  $\gamma$  в основных опытах. При произвольно изменяющемся шаге по аргумент  $\gamma$  формула (1) системы должна иметь вид:

$$\tau_{ni} = \tau_{i-1} + \left( \frac{\tau_{i+1} - \tau_{i-1}}{\gamma_{i+1} - \gamma_{i-1}} \right) (x_i - x_{i-1}) .\quad (2)$$

Результаты расчетов касательных напряжений в условных параллельных опытах  $\tau_{ni}$  и их линеаризированных значений  $y_{ni}$ , а также средних и теоретических значений степенной реологической зависимости:

$$\tau = k\gamma^n ,\quad (3)$$

и ее логарифмической анаморфозы:

$$y = b + ax ,\quad (4)$$

где  $y = \ln(\tau)$ ;  $b = \ln k$ ;  $a = n$ ;  $x = \ln(\gamma)$  приведены в таблице.

По известным формулам уже при наличии двух параллельных опытов проведены расчеты функций корреляционного анализа [4].

Расчетный критерий Кохрена  $G_p=0,328$ , табличное для 17 основных опытов и двух параллельных при числе рассчитываемых параметров в уравнение (4)  $p=2$ ,  $G_T=0,45$ , то есть условие воспроизводимости в параллельных опытах выполняется.

Расчетный критерий Фишера  $F_p=0,959$ , а табличный  $F_T=2,37$ , то есть математическая модель (4) адекватна экспериментальным данным.

Расчетные значения критерия Стьюдента:

- для коэффициента  $a=0,727$ ,  $t_a=10229$ ;
- для коэффициента  $b=1,843$ ,  $t_b=25924$ ;

а табличное значение  $S_t=2,11$ , то есть оба коэффициента значимы.

Коэффициент корреляции  $r=0,998$ , то есть зависимость касательных напряжений от градиента скорости высокая и прямая.

На рисунке 1 для наглядности представлена эта зависимость в логарифмических координатах, а на рисунке 2 – приведена реологическая кривая уравнения (3) с рассчитываемая методом метод наименьших квадратов коэффициентами степенной зависимости Освальда де Вилля:  $k=6,317$ ,  $n=0,727$ . Как видно из этого графика экспериментальные данные в целом хорошо аппроксимируется степенным уравнением (3): максимальная ошибка 7,5%, а абсолютная средняя  $|\delta c|=2,5\%$ .

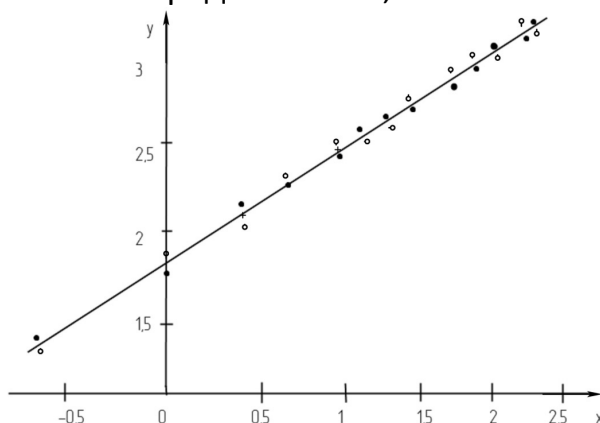


Рисунок 1 - Зависимость касательных напряжений от градиента скорости в линеаризированной системе координат:

1 – график теоретической зависимости  $y=1,84+0,727x$ ;

+ - средние значения функции между точками основного и параллельного эксперимента.

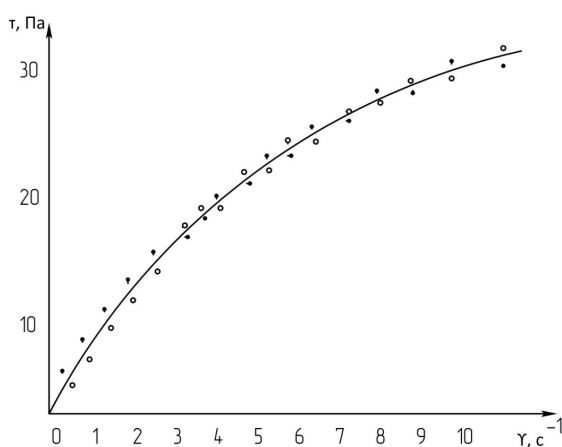


Рисунок 2 - Реологическая кривая 3% водного раствора КМЦ при 20° (1)

Таблица 1 - Исходные данные для зависимости касательных напряжений от градиента скорости (3 первых столбца таблицы) и расчетные параметры касательных напряжений для условно параллельных опытов (столбец 4)

№ точки	Градиент скорости, $u, c^{-1}$	Касательные напряжения, Па			Линеаризируемые параметры					$\tau T$	$\delta, \%$
		в основном эксперименте, $\tau$	усл. расчетные параллельные, $\tau T$	средние значения, $\tau c$	x	y	$y_n$	$y_c$	$y_T$		
1	0,5	3,8	-	-	-0,69	1,8	-	-	-	-	-
2	1,0	6,0	5,75	5,87	0	1,7	1,7	1,7	1,84	6,32	7,54
3	1,5	8,7	7,75	8,2	0,40	2,1	2,0	2,1	2,14	8,48	3,34
4	2,0	10,0	10,51	10,2	0,69	2,3	2,3	2,3	2,35	10,4	2,0
5	2,5	12,7	11,87	12,2	0,91	2,5	2,4	2,5	2,51	12,3	0,16
6	3,0	14,1	14,56	14,3	1,10	2,6	2,6	2,6	2,64	14,0	-2
7	3,5	16,7	15,62	16,1	1,25	2,8	2,7	2,7	2,75	15,7	-2,72
8	4	17,3	17,76	17,5	1,39	2,8	2,8	2,8	2,85	17,3	-2,24
9	4,5	18,9	18,65	18,7	1,50	2,9	2,9	2,9	2,94	18,8	0,47
10	5	20,1	20,76	20,4	1,61	3,0	3,0	3,0	3,01	20,3	-0,31
11	5,5	22,8	21,50	22,1	1,70	3,1	3,0	3,1	3,08	21,8	-1,42
12	6	23,0	24,49	23,7	1,79	3,1	3,2	3,1	3,15	23,2	-2,02
13	6,5	26,3	24,87	25,5	1,87	3,2	3,2	3,2	3,20	24,6	-3,64
14	7	26,9	27	26,9	1,94	3,2	3,2	3,2	3,26	26,0	-3,47
15	7,5	27,7	27,39	27,5	2,01	3,3	3,3	3,3	3,31	27,3	-0,72
16	8,0	27,9	28,15	28,0	2,08	3,3	3,3	3,3	3,35	28,6	2,28
17	8,5	28,6	29,12	28,8	2,14	3,3	3,3	3,3	3,4	29,9	3,79
18	9,0	30,4	29,82	30,1	2,20	3,4	3,3	3,4	3,44	31,2	3,71
19	9,5	31,1	32,43	31,7	2,25	3,4	3,4	3,4	3,48	32,4	2,26
20	10	34,6	-	-	2,30	3,5	-	-	-	-	-



Примечание. Для первой и последней точки нет расчетных значений, так как согласно уравнению (1) для них не рассчитываются значения условного расчетного параметра  $\tau_{n,1}$  и  $\tau_{n,20}$ .

**Вывод.** Таким образом предлагаемая методика расчета параметров параллельных опытов (экспериментов) без их проведения или в их отсутствии в справочной и научной литературе позволяет проводить аппроксимацию экспериментальных данных по известным формулам корреляционного анализа и определять параметры математических моделей МНК, дисперсию воспроизводимости в параллельных опытах, адекватность математической модели экспериментальным данным, значимость ее коэффициентов и уровень корреляции входных и выходных параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь А.Г., Статюха Г.А.. Планирование эксперимента в химической технологии. – Киев : Высшая школа, 1976, 183 с.
2. Князева А.С. Корреляционный анализ экспериментальных данных по реологии водно- глинистых суспензий с добавлением углещелочного реагента (УЩР) / Князева А.С., Кидалов Н.А., Голованчиков А.Б. // Известия Волгоградского государственного технического университета. Реология, процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. сб. науч. ст., 2014, Т 20, №6(113), с.11-13
3. Голованчиков А.Б., Симонов Б.В. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Учебное пособие. Часть 1. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 1994, 114 с.
4. Ефимов М.В. Исследование реологического поведения жидкообразного нефтешламамазутного остатка / Ефимов М.В., Балашов В.А // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Выпуск 4, №1 (74), 2011, с. 9-12.
5. Голованчиков, А.Б. Моделирование процесса ректификации в насадочной колонне с диффузионной структурой потока по жидкой фазе / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. - Волгоград, 2015. - № 14 (178). - С. 12-16.