

Научная статья | Original paper

УДК 519.2

Использование корреляционно-регрессионного и кластерного анализа для исследования данных по термографическим снимкам трубопроводов системы охлаждения

П.С. Щербань¹✉, К.Н. Илюхин¹, С.С. Ераносян¹, А.Н. Карагадян²

¹ РТУ МИРЭА, Институт информационных технологий

² БФУ им. И. Канта, ОНК Институт высоких технологий

✉ ursa-maior@yandex.ru

Резюме

Контекст и актуальность. Среди различных методов неразрушающего контроля в последние годы активно развивается термография. Ее использование позволяет фиксировать дефекты связанные с нарушением толщины стенки, наличием трещин, выбоин, коррозии. Часто термографию применяют для обследования зданий, конструкций, машин и механизмов, это обуславливается в том числе возможностью продолжения их эксплуатации даже в процессе диагностических мероприятий. Одним из подобных устройств, остановка которого для оценки технического состояния затруднительна, является система охлаждения судовых двигателей. **Цель.** Провести корреляционно-регрессионный и кластерный анализ датасета термограмм труб системы охлаждения судового двигателя и определить характер зависимости между различными параметрами. **Гипотеза.** Представляется вероятным, что в ходе выполнения корреляционно-регрессионного и кластерного анализа будут установлены зависимости между температурными характеристиками основного металла труб системы охлаждения и температурой зон внутритрубных дефектов, а также их геометрией. **Методы и материалы.** Датасет из 210 термографических снимков труб системы охлаждения, методы кластерного анализа, методы корреляционно-регрессионного анализа, программный комплекс Loginom. **Результаты.** В результате были установлены зависимости между типом дефектов (выявленных термографическим методом), их геометрическими особенностями и изменением температурных характеристик поврежденных и целых зон труб, используемых в системах охлаждения судовых двигателей. Подтверждена возможность эффективного



использования корреляционно-регрессионного и кластерного анализов как инструментов обработки данных на основе термографических изображений труб. **Выводы.** Организациям, отвечающим за нормативно-методическое обеспечение применения методов неразрушающего контроля, следует использовать полученные результаты для обновления требований к процедурам проведения термографических исследований. В частности, необходимо актуализировать ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Общие методы. Обновленная терминологическая и методическая части данного стандарта должны включать указания на возможность использования корреляционно-регрессионного и кластерного анализов как инструментов обработки термографических данных.

Ключевые слова: математические виды анализа, корреляционно-регрессионный анализ, кластерный анализ, термография, диагностика, управление качеством

Благодарности. Авторы благодарят за помощь в сборе данных для исследования С.С. Мазур.

Для цитирования: Щербань, П.С., Илюхин, К.Н., Ераносян, С.С., Карагадян, А.Н. (2025). Использование корреляционно-регрессионного и кластерного анализа для исследования данных по термографическим снимкам трубопроводов системы охлаждения. *Моделирование и анализ данных*, 15(2), 27—46. <https://doi.org/10.17759/mda.2025150202>

Application of correlation-regression and cluster analysis to study data based on thermographic images of cooling system pipelines

P.S. Shcherban¹✉, K.N. Ilyukhin¹, S.S. Eranosyan¹, A.N. Karagadyan²

¹ RTU MIREA, Institute of Information Technologies

Department of Applied Mathematics, Moscow

² Baltic Federal University of Immanuel Kant, BSC “Institute of High technologies”

✉ ursa-maior@yandex.ru

Abstract

Context and relevance. Among the various methods of non-destructive testing, thermography has been actively developing in recent years. Its use allows recording defects associated with a violation of wall thickness, the presence of cracks, potholes, and corrosion. Thermography is often used to inspect buildings, structures, machines and mechanisms, which is due, among other things, to the possibility of continuing their operation even during diagnostic activities. One of such devices, the shutdown of which is difficult to assess the technical condition, is the cooling system of marine engines. **Objective.** To conduct a correlation-regression and cluster analysis of a dataset of pipes thermograms of a marine engine cooling system and to determine the nature of the relationship between various parameters. **Hypothesis.**



It seems likely that in the course of performing the correlation-regression and cluster analysis, dependencies will be established between the temperature characteristics of the base metal of the cooling system pipes and the temperature of the zones of intra-pipe defects, as well as their geometry. **Methods and materials.** A dataset of 210 thermographic images of cooling system pipes, cluster analysis methods, correlation and regression analysis methods, Loginom software package. **Results.** As a result, dependencies were established between the type of defects (detected by the thermographic method), their geometric features and changes in the temperature characteristics of damaged and intact pipe zones used in ship engine cooling systems. The possibility of effectively using correlation and regression and cluster analyses as tools for processing data based on thermographic images of pipes was confirmed. **Conclusions.** Organizations responsible for regulatory and methodological support for the use of non-destructive testing methods should use the obtained results to update the requirements for thermographic research procedures. In particular, it is necessary to update GOST R ISO 18434-1-2013. Condition monitoring and diagnostics of machines. Thermography. General methods. The updated terminology and methodological parts of this standard should include references to the possibility of using correlation and regression and cluster analyses as tools for processing thermographic data.

Keywords: mathematical types of analysis, correlation and regression analysis, cluster analysis, thermography, diagnostics, quality management

Acknowledgements. The authors are grateful for assistance in data collection Mazur S.S.

For citation: Shcherban, P.S., Ilyukhin, K.N., Yeranosyan, S.S., Karagadyan, A.N. (2025). Application of correlation-regression and cluster analysis to study data from thermographic images of cooling system pipelines. *Modelling and Data Analysis*, 15(2), 27—46. (In Russ.). <https://doi.org/10.17759/mda.2025150202>

Введение

Трубопроводы систем охлаждения судовых двигателей в процессе эксплуатации сталкиваются с рядом факторов, отрицательно влияющих на их надежность. Вибрации, перепад температур, кавитационное воздействие потока перекачиваемой жидкости, эрозия переносимыми частицами, коррозионная активность растворенных солей и серы — приводят к постепенной деградации внутренней поверхности труб (Fox, Goodhew, De Wilde, 2016). При этом подобные повреждения как правило приобретают форму точечных дефектов (раковин, выбоин, выщерблин), объемных дефектов (площадные коррозионные и эрозионные повреждения), либо протяженных дефектов (трещины, области растрескивания, области ручейковой коррозии) (Mahami, и др., 2021).

Диагностика подобных внутритрубных дефектов в системах охлаждения судовых двигателей представляет сложную задачу (Madhavan, и др., 2023). Разборные методы как правило используются редко, поскольку это требует остановки эксплуатации судна (а часто и постановки в док). Безразборные методы осложняются пространственным размещением труб (что не позволяет проводить полноценное



радиографическое обследование) либо неполнотой библиотек для интерпретации данных ультразвуковой диагностики (Wei, Xiao, 2016). В связи с этим особое значение приобретает метод термографии, тем более, что по трубопроводам системы охлаждения циркулирует жидкость, температура которой значительно отличается от температуры окружающей среды (Li, 2024).

Стоит отметить, что термографические исследования подобных систем стали выполнятся лишь в последнее время, что связано с распространением специализированной техники и ростом опыта в интерпретации термограмм. Для проведения исследования был сформирован датасет из 210 термографических снимков, полученных на грузовом судне, типа: Self Discharging Bulk Carrier. Датасет получен на основе термограмм системы охлаждения среднеоборотного, шестицилиндрового, четырехтактного, двигателя, мощностью 2500 кВт. выполненных камерой GOYOJO Handheld Thermal Imaging Camera. При этом к каждому изображению для упрощения процесса обработки данных имелась термическая и пространственная шкалы. Термограммы были взяты со следующих видов труб (с указанием количества в датасете): трубы подачи забортной воды в насосы (48), трубы подачи пресной воды в теплообменник (44), трубы подачи воды в редуктор (36), трубы подачи масла в теплообменник (30), трубы подачи и выпуска пресной воды из двигателя (52).

По каждому из полученных изображений были классифицированы протяженные, точечные и объемные дефекты. Всего было определено 172 дефектов. Часть изображений труб (46) не имело дефектов. Далее была поставлена задача, по всем обследованным типам труб провести корреляционно-регрессионный анализ и установить взаимосвязи между: изменением температуры стенки трубы вне дефекта и в месте дефекта, между изменением средней температуры трубы вне дефекта и размерами дефекта. Таким образом можно оценить насколько геометрические характеристики дефекта влияют на нагрев неповрежденных областей (Trautman, Razban, Chen, 2021). Также была поставлена задача провести кластерный анализ дефектов, по температурным характеристикам, по всем обследованным типам труб. На основе результатов корреляционно-регрессионного и кластерного анализов сделать вывод о степени износа различных труб, применяемых в системах охлаждения судового двигателя.

Установление регрессионных зависимостей между параметрами трубопроводов системы охлаждения на термограммах

При опорожнении вертикального стального резервуара, в него начинает поступать Всего в исследуемом пакете данных рассматривались пять типов труб. Трубы подачи забортной воды в насосы являлись оцинкованными, стальными, бесшовными, с名义альным наружным диаметром в 377 и 219 мм и толщиной стенки в 13 мм. Трубы подачи пресной воды в теплообменник, трубы подачи воды в редуктор, трубы подачи масла в теплообменник — являлись фосфатированными, стальными и бесшовными с名义альным наружным диаметром в 114 и 89 мм и толщиной стенки в 6,0 и 5,5 мм. Трубы



подачи и выпуска пресной воды обладали всеми теми же характеристиками, но были только одного типоразмера, с внешним диаметром 89 мм и толщиной стенки 5,5 мм.

Перед проведением регрессионного анализа, каждая из термограмм оценивалась по числу дефектов, типу дефектов, геометрии дефектов (длине и ширине), температурным характеристикам основного металла трубы и температуре дефекта. При этом для точечных дефектов температура замерялась однократно, для протяженных либо объемных температура замерялась в трех точках, после чего рассчитывалось среднее значение по дефекту. Получаемые в результате обработки изображений (Рисунок 1) данные сводились в единую таблицу. Корреляционно-регрессионный анализ данных осуществлялся в программном комплексе Loginom.

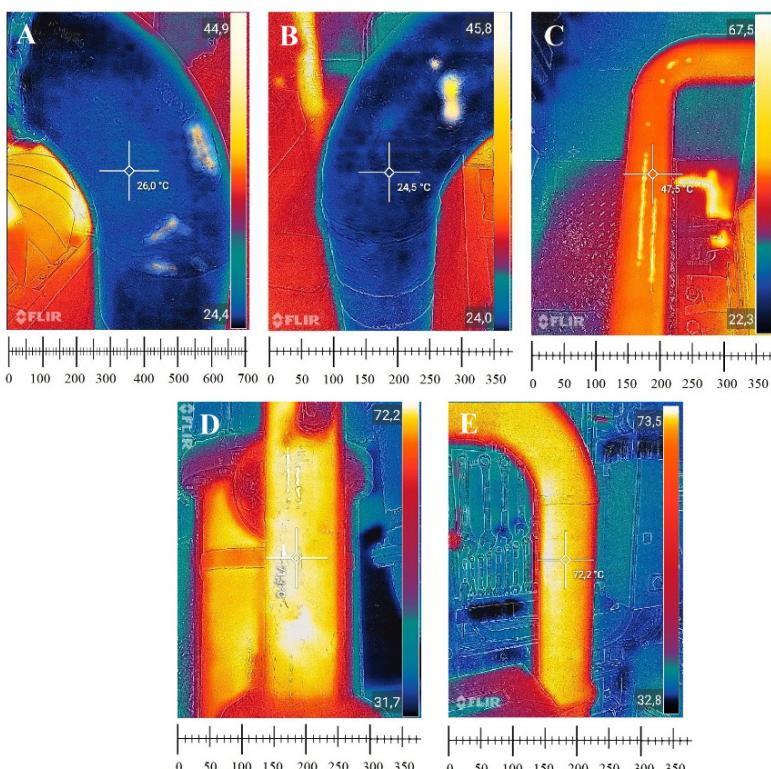


Рис. 1. Термограммы труб системы охлаждения.

А — трубы подачи забортной воды в насосы; В — трубы подачи воды в редуктор;
С — трубы подачи масла в теплообменник; Д — трубы подачи и выпуска пресной
воды из двигателя; Е — трубы подачи пресной воды в теплообменник

Fig. 1. Thermograms of cooling system pipes.

A — pipes supplying sea water to the pumps; B — pipes supplying water to the gearbox;
C — pipes supplying oil to the heat exchanger; D — pipes supplying and discharging fresh
water from the engine; E — pipes supplying fresh water to the heat exchanger



В ходе проведения анализа сопоставлялись различные показатели полученных термограммам. В начале была определена взаимосвязь между средней температурой трубы вне дефекта и температурой трубы в месте точечного, протяженного или объемного дефектов (Рисунок 2). Было установлено, что во всех случаях при росте температуры в месте дефекта возрастает и средняя температура неповрежденной поверхности, при этом вид дефектов оказывает влияние на скорость нагрева неповрежденной поверхности в трубах по-разному.

Так в трубах подачи воды в редуктор, трубах подачи и выпуска пресной воды из двигателя, трубах подачи пресной воды в теплообменник скорость прироста температуры неповрежденной поверхности от протяженных и объемных дефектов выше, чем от точечных. Это выражено в более крутом наклоне прямой (Рисунок 2 б, д, е).

С физической точки зрения это может обуславливаться большей потерей металла в протяженных и объемных дефектах, чем в точечных. Такая потеря приводит к возрастанию интенсивности теплопереноса от транспортируемой жидкости, через истонченную дефектную зону к неповрежденной поверхности (Li, 2024).

В результате вокруг протяженного или объемного дефекта формируется больший ореол нагрева неповрежденной части трубы (чем вокруг точечного дефекта). Наряду с этим в трубах подачи забортной воды в насосы не выявлено подобной тенденции. Очевидно это обусловлено большей толщиной стенки, а также отличным материалом трубы. Как по точечным, так и протяженным, и объемным дефектам скорости нагрева неповрежденной поверхности в трубах подачи забортной воды в насосы в целом идентичны (Рисунок 2 а.). Характер изменения температуры трубы вне дефекта (в данном случае речь идет о средней температуре) от температуры дефектной зоны свидетельствует об особенностях тепловой усталости металла. В ряде случаев (Рисунок 2. с, д) неповрежденная поверхность в ходе изменения температурных режимов будет быстрее претерпевать износ в зонах, соприкасающихся с протяженными и объемными дефектами (скорость развития данных дефектов будет выше). Кроме того именно по данным трубам (с, д) фиксируются наибольшие температурные значения как неповрежденной части так и дефектов.

Интересно проанализировать и какие характеристики дефекта в большей степени влияют на изменение средней температуры трубы вне дефектной зоны. По рассматриваемым термограммам относительно просто судить о длине и ширине дефекта, о толщине стенки в месте дефекта говорить можно лишь косвенно, сравнивая температуру дефектной зоны с температурой транспортируемой жидкости и учитывая теплопроводные способности металла (Trautman, Razban, Chen, 2021).

Рассмотрим имеющиеся данные на предмет того как длина и ширина дефекта влияют на температуру трубы вне дефектной зоны. Для определения взаимосвязи между размером дефекта в длину и средней температурой трубы вне дефекта построим график распределения значений (Рисунок 3.). При этом будем рассматривать все виды дефектов (точечные, протяженные и объемные).

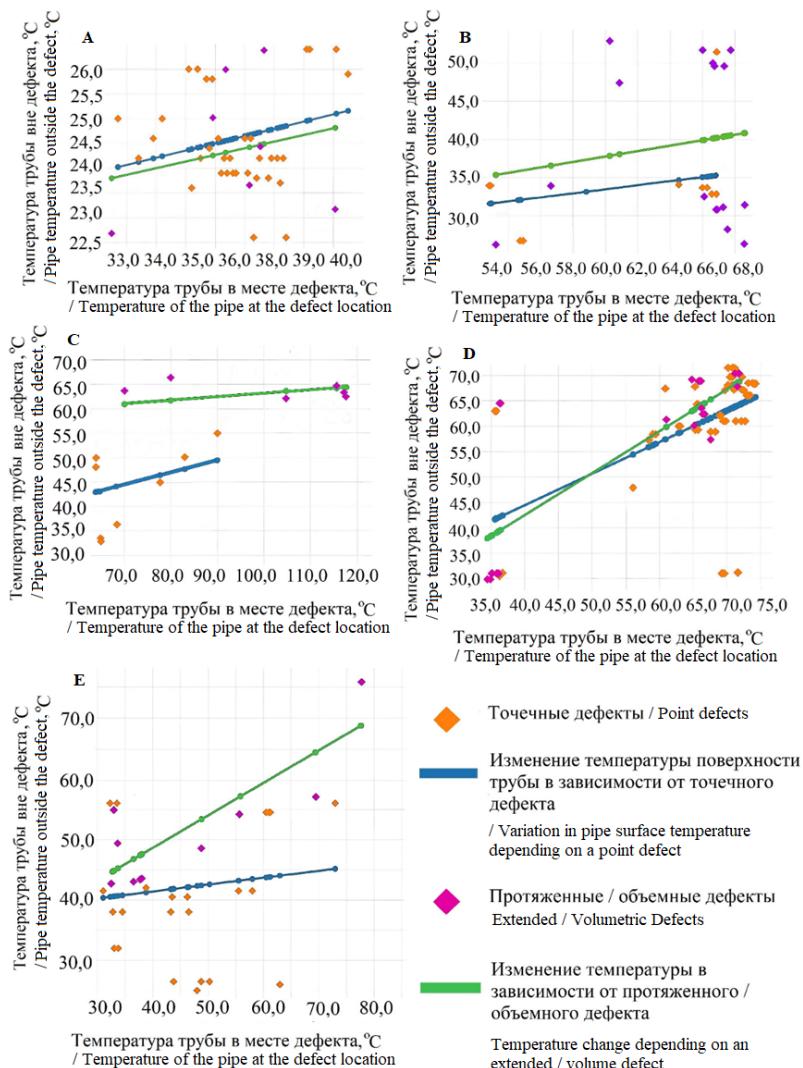


Рис. 2. Регрессионный анализ зависимости изменения средней температуры неповрежденной стенки трубы от температуры дефектов различного типа (точечного или протяженного / объемного). А — трубы подачи забортной воды в насосы; В — трубы подачи воды в редуктор; С -трубы подачи масла в теплообменник; Д- трубы подачи и выпуска пресной воды из двигателя; Е — трубы подачи пресной воды в теплообменник

Fig. 2. Regression analysis of the dependence of the change in the average temperature of the intact pipe wall on the temperature of defects of different types (point or extended / volumetric). A — pipes for supplying sea water to the pumps; B — pipes for supplying water to the gearbox; C — pipes for supplying oil to the heat exchanger; D — pipes for supplying and discharging fresh water from the engine; E — pipes for supplying fresh water to the heat exchanger

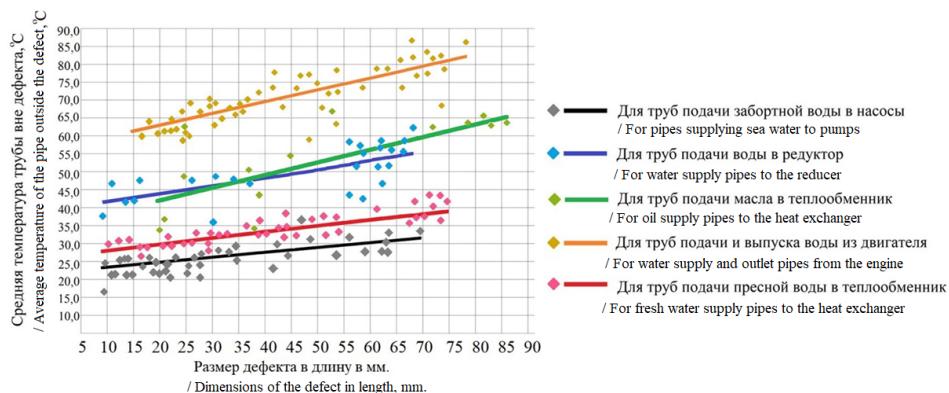


Рис. 3. Регрессионный анализ зависимости изменения средней температуры неповрежденной стенки трубы от размеров (длины) дефекта

Fig. 3. Regression analysis of the dependence of the change in the average temperature of the intact pipe wall on the size (length) of the defect

Из полученного графика видно, что по всем трубам прослеживается зависимость средней температуры трубы вне дефекта от размера дефекта. В частности, при увеличении длины дефекта возрастает и средняя температура неповрежденной поверхности (облегчается теплоперенос от транспортируемой жидкости к неповрежденным зонам поверхности).

Определение корреляционных зависимостей в сформированном массиве данных по трубопроводам системы охлаждения двигателей

Для установления характера корреляционной зависимости между средней температурой трубы вне дефекта и в месте дефекта, средней температурой трубы вне дефекта и длиной, а также шириной дефекта рассчитаем коэффициенты корреляции Пирсона, Спирмена и Кенделла (Janse, и др., 2021).

Коэффициент Пирсона используется для измерения линейной связи между двумя количественными переменными, которые распределены нормально или близко к нормальному распределению. Он позволяет установить, насколько пропорциональна изменчивость двух переменных (Janse, и др., 2021). Коэффициент Пирсона вычисляют по формуле:

$$K_n = \frac{n(\sum(xy)) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum(x^2) - (\sum x)^2][n\sum(y^2) - (\sum y)^2]}}, \quad (1)$$

где: x и y — две сравниваемые переменные; n — количество точек данных; $(\sum(xy))$ — сумма произведения парных оценок x и y ; $\sum(x^2)$ и $\sum(y^2)$ — суммы квадратов для каждой переменной.



Коэффициент корреляции Спирмена — позволяет определить фактическую степень параллелизма между двумя количественными рядами изучаемых признаков и дать оценку тесноты установленной связи с помощью количественно выраженного коэффициента (Essam, El, Ali, 2022). Рассчитывается он по следующей формуле:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (2)$$

где: d — разность между рангами $d_i = R(X_i) - R(Y_i)$, n — число наблюдений, по которым вычисляется коэффициент.

Коэффициент корреляции Кендалла является мерой силы и направления монотонной связи между двумя переменными. В отличие от коэффициента корреляции Пирсона, который оценивает линейную зависимость, коэффициент Кендалла применяется для оценки монотонных зависимостей, не требуя, чтобы связь между переменными была линейной. Он основывается на сравнении пар значений для каждой переменной и оценки того, насколько согласованность или несогласованность существует между ними. Коэффициент рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau = \frac{C - D}{\frac{n(n-1)}{2}} \quad (3)$$

где: n — количество пар наблюдений, C — количество согласованных пар, D — количество несогласованных пар.

Обоснуем выбор данных коэффициентов в качестве инструмента определения корреляционной зависимости. Так коэффициент Пирсона применяется для определения силы и взаимосвязи между двумя количественными и непрерывными переменными. В рассматриваемом случае температуры дефектной и бездефектной части труб, размеры дефектов — выражаются количественно и непрерывно. Использование коэффициента Пирсона подразумевает, что как минимум одна из сравниваемых переменных распределается в выборке согласно закону нормального распределения (Janse, и др., 2021).

В проводимом исследовании априори нельзя утверждать, что распределение температурных показателей или размеров дефектов по всей выборке будет подчиняться данному закону (поэтому для оценки были привлечены критерии Спирмена и Кенделла). Также через коэффициент Пирсона оценивается характер линейных зависимостей. В целом они и получены ранее (Рисунки 2 и 3). Применение коэффициента Пирсона требует гомоскедастичности распределения. В полученных регрессионных моделях не в каждом случае наблюдается стабильность и однородности дисперсии, в связи с чем по мимо критерия Пирсона опять же были привлечены для оценки критерии Спирмена и Кенделла.

Также требуется парность наблюдений (требование соблюдено) и достаточно большой объем выборки (в различных источниках указывается на объем выборки в не менее 25 наблюдений). Данное требование соблюдается для всех случаев,



за исключением данных по трубам подачи масла в теплообменник (число выявленных в сформированном пакете термограмм с дефектами — 14).

Выявленная проблема преодолима путем определения критического значения коэффициента корреляции. Для этого можно сформулировать две гипотезы. H1 — между температурными изменениями неповрежденной поверхности труб подачи масла в теплообменник и температурой, а также размерами дефектов есть взаимосвязь. H2 — данная взаимосвязь отсутствует. Для определения критического значения коэффициента корреляции представим исходные данные полученные из термограмм дефектных труб подачи масла в теплообменник (Таблица 1).

Далее используя формулу (1) рассчитаем величину коэффициента корреляции, между параметрами AB, AC, BC. Она составит, для AB 0,705, для AC 0,839, для BC 0,822. Вычислим для рассматриваемого случая число степеней свободы (k), учитывая, что объем выборки (n) = 14 труб.

$$k = n - 2. \quad (4)$$

По специальной таблице (Essam, El, Ali, 2022) найдем критические значения коэффициента корреляции по коэффициенту Пирсона для уровней значимости $p = 0,05$ и $p = 0,01$, при $k = 12$.

Таблица / Table 1

**Определение критического значения коэффициента корреляции
для показателей труб подачи масла в теплообменник. А — средняя
температура поверхности трубы вне дефекта (oC), В — средняя температура
поверхности трубы в месте дефекте (oC), С — длина дефекта (мм)**

**Determination of the critical value of the correlation coefficient
for the parameters of oil supply pipes to the heat exchanger. A is the average
temperature of the pipe surface outside the defect (oC), B is the average temperature
of the pipe surface at the defect location (oC), C is the length of the defect (mm)**

Труба / Pipe	A	B	C	AA	BB	CC	AB	AC	BC
1	34	65	20	1156	4225	400	2210	680	1300
2	36	69	21	1296	4761	441	2484	756	1449
3	58	77	39	3364	5929	1521	4466	2262	3003
4	64	82	25	4096	6724	625	5248	1600	2050
5	65	90	45	4225	8100	2025	5850	2925	4050
6	50	60	36	2500	3600	1296	3000	1800	2160
7	65	115	82	4225	13225	6724	7475	5330	9430
8	64	116	77	4096	13456	5929	7424	4928	8932
9	66	80	53	4356	6400	2809	5280	3498	4240
10	64	70	72	4096	4900	5184	4480	4608	5040



Труба / Pipe	A	B	C	AA	BB	CC	AB	AC	BC
11	49	60	25	2401	3600	625	2940	1225	1500
12	63	108	84	3969	11664	7056	6804	5292	9072
13	64	116	86	4096	13456	7396	7424	5504	9976
14	34	61	37	1156	3721	1369	2074	1258	2257
Сумма / Summ	776	1169	702	45032	103761	43400	67159	41666	64459

Поскольку все вычисленные коэффициенты корреляции больше критического значения (0,660), то они являются статистически значимыми, следовательно, гипотеза H1 верна. В результате получим следующую область допустимых значений (Рисунок 4). Таким образом полученные зависимости по трубам подачи масла в теплообменник могут быть использованы в общем анализе выборки.

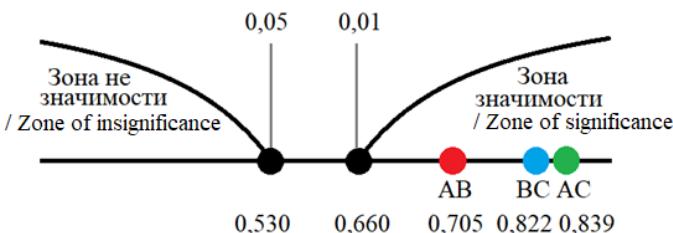


Рис. 4. Область допустимых значений на оси значимости при $k = 12$ и расположение AB, AC, BC

Fig. 4. The region of acceptable values on the significance axis for $k = 12$ and the location of AB, AC, BC

Возвращаясь к определению коэффициентов Пирсона, Спирмена и Кенделла для установления характера корреляционной зависимости между средней температурой труб вне дефекта и в месте дефекта, средней температурой труб вне дефекта и длиной, а также шириной дефекта проведем соответствующие расчеты по формулам (1, 2, 3) и сведем полученные значения в таблицу (Таблица 2).

Исходя из определения рассматриваемых коэффициентов корреляции при величинах от 0,3 до 0,7 связь между параметрами заметная или умеренно выраженная, при величинах выше 0,7 связь тесная (Shcherban, Sokolov, Abu Hamdi, 2023). В приведенной сводной таблице параметры, по которым определена заметная связь выделены желтым, параметры по которым связь тесная выделены красным.

Из полученных показателей корреляции следует, что для большинства рассматриваемых термограмм труб средняя температура поверхности трубы вне дефекта тесно или заметно коррелирует со средней температурой в месте дефекта (то есть общая температура поверхности растет с утонением стенки), также она коррелирует



с размером дефекта в длину (очевидно это обусловлено вытянутым характером большинства дефектов, даже принятых за точечные). Также есть взаимосвязь между температурой трубы в месте дефекта и размером дефекта в длину (Shcherban, Mazur, Mazur, 2022). Тесные связи по данным параметрам зафиксированы в выборках термограмм по трубам подачи воды в редуктор, по трубам подачи масла в теплообменник, по трубам подачи и выпуска пресной воды из двигателя.

Интерпретируя причины почему именно в трубах данного типа связь между параметрами оказалась более тесная, можно утверждать, что это вероятно продиктовано характером дефектов, а также большей температурой прокачиваемых жидкостей. С физической точки зрения действительно утонение стенки трубы в зонах размещения дефектов ведет к увеличению теплопереноса между внутренней полостью трубы и внешней поверхностью. Изменение температуры в дефектной зоне создает дополнительный нагрев и термическую нагрузку на окружающую дефект неповрежденную часть трубы (Shcherban, Mazur, Mazur, 2022). Таким образом корреляционно-регрессионный анализ термограмм может использоваться для оценки степени долговременной термической нагрузки дефектами на неповрежденные зоны труб. В проведенном исследовании можно утверждать, что процессы термической усталости металла будут более характерны для труб подачи воды в редуктор, труб подачи масла в теплообменник, труб подачи и выпуска пресной воды из двигателя.

Таблица / Table 2

**Результат корреляционно-регрессионного анализа
взаимосвязи температурных и геометрических параметров труб и дефектов**

**Result of correlation-regression analysis of the relationship
between temperature and geometric parameters of pipes and defects**

Трубы / Pipes	Критерий Пирсона / Pearson's criterion	Критерий Спирмена / Spearman's criterion	Критерий Кенделла / Kendall's criterion	Сравниваемые параметры / Compared parameters	
Трубы подачи забортной воды в насосы / Pipes for supplying sea water to pumps (A)	0,622	0,641	0,627	A	B
	0,524	0,446	0,411	C	D
	0,218	0,252	0,331	C	E
	0,686	0,636	0,655	A	D
Трубы подачи воды в редуктор / Water supply pipes to the reducer (B)	0,757	0,702	0,737	A	B
	0,353	0,634	0,491	C	D
	0,100	0,130	0,116	C	E
	0,619	0,634	0,577	A	D



Трубы подачи масла в теплообменник / Oil supply pipes to the heat exchanger (C)	0,705	0,752	0,682	A	B
	0,822	0,795	0,780	C	D
	0,411	0,453	0,407	C	E
	0,839	0,805	0,790	A	D
Трубы подачи и выпуска пресной воды из двигателя / Fresh water supply and outlet pipes from the engine (D)	0,645	0,609	0,617	A	B
	0,472	0,386	0,326	C	D
	0,277	0,241	0,215	C	E
	0,368	0,318	0,301	A	D
Трубы подачи пресной воды в теплообменник / Fresh water supply pipes to the heat exchanger (E)	0,328	0,358	0,309	A	B
	0,409	0,421	0,405	C	D
	0,130	0,031	0,127	C	E
	0,309	0,325	0,321	A	D

Примечание: А — Средняя температура трубы вне дефекта / Average pipe temperature outside the defect; В — Средняя температура трубы в месте дефекта / Average pipe temperature at the defect; С — Температура трубы в месте дефекта / Pipe temperature at the defect; D — Размер дефекта в длину / Defect size in length; E — Размер дефекта в ширину / Defect size in width.

Инструментарий корреляционно-регрессионного анализа таким образом позволяет нам выявлять наиболее опасные в своей динамике развития дефекты (протяженные и объемные дефекты исходя из Рисунка 2. б, г, д), а также установить в каких типах труб наиболее тесно выражена взаимосвязь между размерами дефекта и средними температурами нагрева (Таблица 2). В целом можно утверждать, что по результату анализа наименее надежными и подвергающимися наибольшему износу являются трубы подачи воды в редуктор и трубы подачи масла в теплообменник. Далее основываясь на сформированном пакете данных проведем кластерный анализ выявленных дефектов, категорируя их исходя из термических характеристик поврежденной зоны.



Кластерный анализ данных по дефектам трубопроводов системы охлаждения, выявленным на термограммах

Кластерный анализ также проводился на базе программного комплекса Loginom. Использовался метод k-means, при этом количество кластеров задавалось исходя из трех типов дефектов — точечных, протяженных и объемных. В результате было получено следующее распределение кластеров (Рисунок 5), где на каждом из изображений по оси абсцисс учитываются линейные размеры дефектов, а по оси ординат температурные характеристики.

При этом определение центра кластера производилось как среднее значение всех точек, принадлежащих кластеру. Формула для определения центра кластера (центроида) выглядит следующим образом:

$$C_k = \left(\frac{1}{|S_k|} \right)^* \sum_{x_i \in S_k} x_i \quad (5)$$

где: C_k — центр кластера k ; S_k — множество точек, принадлежащих кластеру k ; $|S_k|$ — количество точек в кластере k ; x_i — i -я точка кластера.

Среди устанавливаемых характеристик по каждому кластеру определялось также стандартное отклонение и размах. Стандартное отклонение дает возможность судить о степени разброса значений внутри кластера, что позволяет оценить степень однородности температурных характеристик дефектных зон труб. Формула для нахождения стандартного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

где: σ — стандартное отклонение, n — количество наблюдений в кластере, x_i — значение i -го элемента, \bar{x} — среднее значение выборки.

Чем выше значение σ , тем больше разброс значений внутри кластера, что может указывать на большую вариативность дефектов. Размах кластера позволяет установить диапазон температурных характеристик дефектов в рамках одного кластера и оценить максимальную изменчивость данных. Приведем формулу для определения размаха:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (7)$$

где: R — размах, x_{max} — максимальное значение в выборке, x_{min} — минимальное значение в выборке.

Размах кластера характеризует общий диапазон изменений значений температурных характеристик дефектов и помогает определить степень их неоднородности. При проведении кластеризации полученные результаты расчетов сведены в таблицу



(Таблица 3), установлены центры каждого из кластеров, рассчитано стандартное отклонение, определен размах.

Таблица / Table 3.

Результат кластерного анализа термограмм дефектов труб по температуре поверхности

Result of cluster analysis of thermograms of pipe defects by surface temperature

Трубы / Pipes	Параметр / Parameter	Кластеры / Clusters		
		Точечные дефекты / Point defects	Протяженные дефекты / Extended defects	Объемные дефекты / Volume Defects
Трубы подачи забортной воды в насосы / Pipes for supplying sea water to pumps (A)	I	36,5	37,4	38,9
	II	1,6	1,3	2,5
	III	7,8	5,7	8,2
	IV	32	5	3
Трубы подачи воды в редуктор / Water supply pipes to the reducer (B)	I	62,7	57,8	67,2
	II	6,8	3,5	0,8
	III	16,0	7,6	2,6
	IV	10	4	11
Трубы подачи масла в теплообменник / Oil supply pipes to the heat exchanger (C)	I	57,2	68,4	72,1
	II	17,2	4,5	1,3
	III	41,5	17,7	4,5
	IV	8	4	2
Трубы подачи пресной воды из двигателя / Fresh water supply and outlet pipes from the engine (D)	I	89	83,3	110
	II	12	5,6	9,5
	III	55	18,8	24
	IV	32	14	6
Трубы подачи пресной воды в теплообменник / Fresh water supply pipes to the heat exchanger (E)	I	42,9	47,3	-
	II	5,9	9,4	-
	III	26,8	26,0	-
	IV	27	14	-

Примечание: I — Центр кластера / Cluster center; II — Стандартное отклонение / Standard deviation; III — Размах / Range; IV — Количество значений / Quantity of values.



Полученные результаты свидетельствуют, что в ряде случаев (для труб подачи забортной воды в насосы, труб подачи и выпуска пресной воды из двигателя, труб подачи пресной воды в теплообменник) температурные характеристики слабо различаются в зависимости от типа дефектов, кластеры при этом довольно плотно группируются рядом друг с другом, частично или полностью перекрывая один другой (Li, и др., 2021). В данных трубах скорее всего идет коррозионный процесс, выраженный виде внутренней, площадной или в виде питтинговой коррозии (Vanem, Brand-sæter, 2016). Коррозия при этом ведет к равномерному истончению стенки, как в точечных, так и в протяженных и объемных дефектах, в результате риски эксплуатации данных типов труб во времени (из-за более плавного деградационного процесса) ниже.

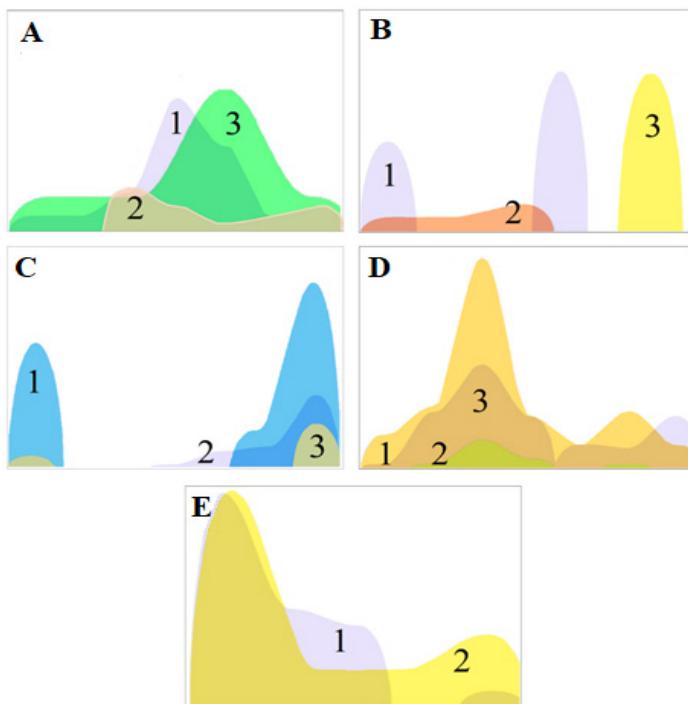


Рис. 5. Кластеризация дефектов по температуре поверхности. А — трубы подачи забортной воды в насосы; В — трубы подачи воды в редуктор; С — трубы подачи масла в теплообменник; Д — трубы подачи и выпуска пресной воды из двигателя; Е — трубы подачи пресной воды в теплообменник. 1 — кластеры точечных дефектов, 2 — кластеры протяженных дефектов, 3 — Кластеры объемных дефектов.

Fig. 5. Clustering of defects by surface temperature. A — pipes supplying sea water to the pumps; B — pipes supplying water to the gearbox; C — pipes supplying oil to the heat exchanger; D — pipes supplying and discharging fresh water from the engine; E — pipes supplying fresh water to the heat exchanger. 1 — clusters of point defects, 2 — clusters of extended defects, 3 — clusters of volumetric defects.



Возможно в тех же трубах (Рисунок 5а, д, е) идет и эрозионный процесс, под воздействием переносимых с потоком жидкости частиц. Скорее всего он выражен в виде коррозионно-эроздионных повреждений, поскольку во всех трех случаях (Рисунок 5 а, д, е) наблюдаются крайне «размазанные» основания кластеров, что свидетельствует о наличии большого числа повреждений разной геометрии, (даже внутри выделенных трех классов).

Отдельно необходимо остановиться на результатах, полученных по трубам подачи воды в редуктор и трубы подачи масла в теплообменник. В данных двух случаях (Рисунок 5 б, с) кластеры лучше отделяются друг от друга, что свидетельствует о значительной разнице дефектов по глубине (собственно дефекты одного и того-же класса нагреваются по разному и имеют разные размеры при неизменности материала трубы).

Такая отделимость кластеров говорит о том, что в случае с трубами подачи воды в редуктор и трубы подачи масла в теплообменник скорее всего действуют не только коррозионные и эрозионные процессы, но и процессы термического растрескивания, растрескивания металла под напряжением, термической и возможно гидравлической усталости.

Кластерный анализ также подтверждает, что по результату телевизионного обследования трубы подачи воды в редуктор и трубы подачи масла в теплообменник являются наиболее изношенными. Данные части системы охлаждения требуют разборки, дефектации и замены изношенных участков.

Выходы

В заключении отметим целесообразность использования корреляционно-регрессионного и кластерного анализа в обработке термографической информации. При этом на начальном этапе необходимо распознать на термограммах искомые характеристики изучаемых объектов (определить целостные и дефектные зоны, геометрию дефектов, температуру) и в результате получить набор данных, содержащий дискретные значения по анализируемым параметрам. После чего, возможно использовать оба аналитических инструмента.

Как корреляционно-регрессионный, так и кластерный анализы достаточно селективны и позволяют по пакету обрабатываемых данных косвенно судить о ряде физико-химических процессов, протекающих в системах охлаждения двигателей. Так возможно установить регрессионную зависимость в изменении температуры неповрежденной поверхности труб и дефектных зон, установить характер нагрева дефектных зон в зависимости от типа повреждений, установить взаимосвязь между изменением температуры поверхности неповрежденной зоны и геометрией дефекта. В целом между рядом температурных и геометрических характеристик труб и дефектов устанавливается довольно тесная корреляционная связь. При этом в зависимости от типа труб и материала интенсивность связей между параметрами геометрии дефекта и температуры неповрежденной поверхности может варьировать в достаточно значительном диапазоне.



Кластерный анализ термографических данных позволяет глубже интерпретировать полученные зависимости. С его помощью можно установить выраженность (отделимость) типов дефектов внутренней поверхности труб друг от друга как в плане геометрических характеристик, так и по температурным значениям. Это позволяет косвенно судить о стадии развития дефектов, о степени влияния физико — химических процессов на целостность внутренней поверхности труб системы охлаждения.

В целом положительный опыт использования данных аналитических инструментов требует включения кластерного и корреляционно-регрессионного анализа в число методов, используемых для обработки термографических данных. В связи с этим рекомендуется указать в существующем нормативном документе по термодиагностике (ГОСТ Р ИСО 18434-1-2013. Контроль состояния и диагностика машин. Термография. Общие методы) на возможность использования рассмотренных методов в качестве инструментов обработки данных полученных по термографическим снимкам.

Список источников / References

1. Fox, M., Goodhew, S., De, Wilde, P. Building defect detection: External versus internal thermography // Building and Environment. — 2016. — T. 105. — C. 317—331.
2. Mahami A. et al. Induction motor condition monitoring using infrared thermography imaging and ensemble learning techniques // Advances in Mechanical Engineering. — 2021. — T. 13. — № . 11. — 16878140211060956.
3. Madhavan, S. et al. Thermal management analyses of induction motor through the combination of air-cooling and an integrated water-cooling system // Scientific Reports. — 2023. — T. 13. — № . 1. — 10125.
4. Wei, Y., Xiao, Y. Improving defect visibility for composites with long pulse thermography // Composite Structures. — 2024. — T. 342. — 118241.
5. Li, Z. et al. Regression predictive modeling of high-speed motorized spindle using POA-LSTM // Case Studies in Thermal Engineering. — 2024. — T. 54. — 104053.
6. Trautman, N., Razban, A., Chen, J. Overall chilled water system energy consumption modeling and optimization // Applied Energy. — 2021. — T. 299. — 117166.
7. Janse, R.J. et al. Conducting correlation analysis: important limitations and pitfalls // Clinical Kidney Journal. — 2021. — T. 14. — № . 11. — C. 2332—2337.
8. Essam, F., El, H., Ali, S.R.H. A comparison of the pearson, spearman rank and kendall tau correlation coefficients using quantitative variables // Asian J. Probab. Stat. — 2022. — C. 36—48.
9. Shcherban, P. Study of failure statistics of cavitators in the fuel oil facilities through the application of regression and cluster analysis / P. Shcherban, A. Sokolov, R.V. Abu Hamdi // Proceedings on Engineering Sciences. — 2023. — Vol. 5, No. 1. — P. 39—48. — DOI 10.24874/PES05.01.00. — EDN UWEZFA.
10. Shcherban, P.S., Mazur, E.V., Mazur, S.N. The process parameter matrix method in controlling marine engine wear dynamics. Industrial laboratory. Diagnostics of materials. 2022;88(9): 47—52. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-9-47-52>



11. Li, X. et al. Surface Defect Detection of Seals Based on K-Means Clustering Algorithm and Particle Swarm Optimization //Scientific Programming. — 2021. — Т. 2021. — №.1. — 3965247.
12. Vanem, E., Brandsæter, A. Unsupervised anomaly detection based on clustering methods and sensor data on a marine diesel engine //Journal of Marine Engineering & Technology. — 2021. — Т. 20. — №. 4. — С. 217—234.

Информация об авторах

Щербань Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Институт информационных технологий, РГУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5106-7852>, e-mail: ursa-maior@yandex.ru

Илюхин Кирилл Николаевич, студент, РГУ МИРЭА, Институт информационных технологий. Кафедра прикладной математики, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: ilyuhin.kir@yandex.com

Ераносян Сос Самвелович, студент, РГУ МИРЭА, Институт информационных технологий. Кафедра прикладной математики, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: alikos20001@gmail.com

Карагадян Артур Наирьевич, студент, БФУ им. И. Канта, ОНК Институт высоких технологий, г. Калининград, Российская Федерация, e-mail: a.karagadian2001@gmail.com

Information about the authors

Pavel S. Shcherban, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Institute of Information Technologies, RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5106-7852>, e-mail: ursa-maior@yandex.ru

Kirill N. Ilyukhin, student, RTU MIREA, Institute of Information Technologies. Department of Applied Mathematics, Moscow, <https://orcid.org/0009-0001-4232-9811>, e-mail: ilyuhin.kir@yandex.com

Sos S. Yeranosyan, student, RTU MIREA, Institute of Information Technologies. Department of Applied Mathematics, Moscow, <https://orcid.org/0009-0000-3573-6411>, e-mail: alikos20001@gmail.com

Artur N. Karagadyan, student, IKBFU.I. Kanta, POC Institute of High Technologies, Kaliningrad, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8427-8362>, e-mail: a.karagadian2001@gmail.com

Вклад авторов

Щербань П.С. — идеи исследования; аннотирование, написание и оформление рукописи; планирование исследования; контроль за проведением исследования.

Илюхин К.Н. — применение статистических, математических или других методов для анализа данных; визуализация результатов исследования.

Ераносян С.С. — обработка датасета, подготовка данных, нормализация, измерения, корректировка расчетов по корреляционно-регрессионному анализу.



Карагадян А.Н. — обработка датасета, подготовка данных, корректировка расчетов по кластеризации, перевод разделов публикации на иностранный язык.

Все авторы приняли участие в обсуждении результатов и согласовали окончательный текст рукописи.

Contribution of the authors

Shcherban P.S. — research ideas; annotation, writing and design of the manuscript; research planning; research supervision.

Ilyukhin K.N. — application of statistical, mathematical or other methods for data analysis; visualization of research results.

Yeranosyan S.S. — dataset processing, data preparation, normalization, measurements, adjustment of calculations for correlation and regression analysis.

Karagadyan A.N. — dataset processing, data preparation, adjustment of clustering calculations, translation of publication sections into a foreign language.

All authors participated in the discussion of the results and approved the final text of the manuscript.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 13.05.2025

Received 2025.05.13

Поступила после рецензирования 15.05.2025

Revised 2025.05.15

Принята к публикации 26.05.2025

Accepted 2025.05.26

Опубликована 30.06.2025

Published 2025.06.30