

УДК 658.26.001.63; 621.311.172

Оценка влияния ветровой нагрузки при термографической диагностике объектов энергетики

А.Б. Власов

Судомеханический факультет МГТУ, кафедра электрооборудования судов

Аннотация. Проведен экспериментальный и теоретический анализ теплового состояния исследуемых объектов, оценка их температуры на основе данных количественной термографической (тепловизионной) диагностики. Показано, что возможно с достаточной степенью точности произвести учет воздействующих диагностических факторов в широком диапазоне значений, применяя программное обеспечение, позволяющее провести подобные расчеты.

Abstract. Experimental and theoretical analysis of the heat condition of investigation objects has been held, estimation of their temperature based on the given quantitative IR thermography (thermovision) diagnostics has been given. It has been shown that there is possibility to produce the account of influencing diagnostic factors in a broad range of meanings using software allowing to conduct similar calculations with a sufficient degree of accuracy.

Ключевые слова: термография, тепловизионная диагностика, электрическое оборудование, провод, фарфоровая крышка, влияние ветра, экспертный анализ, факторный анализ, техническое состояние

Key words: IR thermography, thermovision diagnostics, electric equipment, the wire, the porcelain covering, the wind influence, expert analysis, factorial analysis, technical condition

1. Введение

Термографическая (тепловизионная) диагностика является ведущим методом оперативного контроля технического состояния объектов тепло- и электроэнергетики. Ее преимуществом является оценка технического состояния объектов непосредственно в процессе эксплуатации под нагрузкой.

Проведение натурных испытаний, например, на открытых подстанциях в большинстве случаев происходит при наличии ветра. Ветровая нагрузка, не влияя на процесс термографической съемки, значительно затрудняет экспертную оценку реального технического состояния объектов контроля, поскольку под действием ветра тепловые контрасты резко уменьшаются и выявление реальных дефектов затрудняется. Поэтому задача разработки методов учета фактора ветровой нагрузки остается актуальной.

В ранних рекомендациях, например, (Дроздов, Сухарев, 1987), приводилось соотношение, учитывающее влияние скорости ветра на результаты измерения, в виде

$$\Delta t_1/\Delta t_2 = (v_2/v_1)^n, \quad (1)$$

где Δt_1 , Δt_2 – значения превышения температуры поверхности объекта, например, контактного соединения, провода, измеренные при значениях скорости ветра, равных v_1 и v_2 :

$$\begin{aligned} \Delta t_1(v_1) &= t(v_1) - T_0; \\ \Delta t_2(v_2) &= t(v_2) - T_0, \end{aligned} \quad (2)$$

T_0 – температура окружающей среды. Значение n в диапазоне скоростей ветра 0,2-7 м/с принято считать постоянным и равным $n = 0,448$ (Дроздов, Сухарев, 1987).

Издание нормативных документов РД 34.45-51.300-97 (2002), в отличие от предыдущих изданий, не содержит рекомендации по учету влияния скорости ветра на температуру поверхности того или иного изделия, хотя влияние ветра на охлаждение исследуемых объектов очевидно.

Предварительно следует отметить, что аналитический вид и параметры соотношения (1) связаны с известным критерием Рейнольдса Re , определяющим режим обтекания потоком воздуха различных поверхностей

$$Re = vL/\nu, \quad (3)$$

где v – скорость ветра; ν – коэффициент кинематической вязкости, L – "определяющий" размер поверхности, равный, например, диаметру объекта D в форме цилиндра.

Фиксированное значение $n \approx 0,5$ в выражении (1) соотносится с тем предположением, что при некоторых режимах вынужденной конвекции (область ламинарных потоков), при условии постоянного теплового потока от поверхности, например, за счет электрических или диэлектрических потерь в объеме

конструкции, используются критериальные соотношения, при которых коэффициент Нуссельта Nu , пропорционален величине $Re^{0.5}$, т.е. $Nu \sim v^{0.5}$. В свою очередь, Nu определяет коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k , влияющий, наряду с коэффициентом теплоотдачи излучением α_l , на значение превышения температуры поверхности Δt при различных граничных условиях тепловизионных испытаний (Власов, 2005; 2006).

В то же время анализ процесса теплообмена на поверхности различных объектов показывает, что соотношение (1) не может в полной мере учесть совокупность возможных режимов вынужденной и смешанной конвекции, определяемых величиной скорости ветра, геометрией исследуемых объектов энергетики, и следовательно, не может достоверно описывать тепловое состояние поверхности при ее тепловизионном обследовании.

Тем не менее в различных изданиях, например, РД 153-34.0-20.363-99 (1999) предлагается учитывать влияние ветра на перегрев объектов исследования с учетом соотношения (1), а также рекомендуется использование поправочных коэффициентов.

2. Формулировки прямой и обратной задачи

Нами сформулированы (Власов, 2005; 2006) условия прямой и обратной задач оценки влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля.

2.1. Прямая задача

Прямая задача определяет, насколько уменьшается температура поверхности объекта $t_b(v)$ при скорости ветра v (индекс "в"), если при отсутствии ветра температура поверхности равна $t_{б.в}$ (индекс "б.в" – без ветра, $v = 0$), а температура среды постоянна и равна T_0 .

В связи с такой постановкой условия прямой задачи при ее решении можно экспериментально определить превышение температуры поверхности без ветра:

$$\Delta t_{б.в} = t_{б.в} - T_0, \quad (4)$$

и, используя алгоритм решения прямой задачи, теоретически определить превышение температуры поверхности с ветром, равное

$$\Delta t_b(v) = t_b(v) - T_0. \quad (5)$$

В процессе выработки экспертного решения по результатам тепловизионного контроля для практического использования представляет интерес параметр – коэффициент превышения температуры K_v , определяемый соотношением:

$$K_v(v) = \Delta t_{б.в} / \Delta t_b(v). \quad (6)$$

Зная теоретическое значение коэффициента превышения температуры $K_v(v)$, можно оценить температуру поверхности объекта при тех или иных ветровых нагрузках по соотношению:

$$t_b(v) = T_0 + \Delta t_b(v) = T_0 + \Delta t_{б.в} / K_v(v). \quad (7)$$

2.2. Обратная задача

Обратная задача определяет, какое значение будет иметь температура поверхности объекта при отсутствии ветра ($v = 0$) при приведенной температуре среды $T_{пр}$ (например, $T_{пр} = 40^\circ\text{C}$), если в процессе тепловизионных испытаний при произвольных значениях температуры окружающей среды T_0 и скорости ветра v определяется температура поверхности $t_b(v)$.

В рамках решения обратной задачи теоретически рассчитывается температура поверхности объекта $t_{б.в}$ при отсутствии ветра при приведенной температуре среды $T_{пр}$. Например, определение значения $t_{б.в}$ при условии, что $t_{пр} = 40^\circ\text{C}$, $v = 0$ дает возможность оценивать состояние аппаратов и электротехнических устройств, контактных соединений по ГОСТ 8024-90.

Обратная задача имеет практическое значение для эксперта, которому необходимо оценить, увеличится ли температура поверхности объекта до критической, если при фиксированной токовой нагрузке ветер, например, на подстанции, прекратится, а температура окружающего воздуха поднимется, например, в летний период до 40°C и выше.

Зная теоретическое значение коэффициента превышения температуры $K(v)$, можно оценить температуру поверхности объекта в отсутствие ветровых нагрузках по соотношению:

$$t_{б.в} = t_{пр} + \Delta t_{б.в} = t_{пр} + \Delta t_b(v) K_v. \quad (8)$$

В частности, важным следствием обратной задачи является решение вопроса о температуре поверхности объекта при прекращении ветровой нагрузки при фиксированной температуре среды, например, при диагностике оборудования открытых подстанций.

Таким образом, обратная задача позволяет выработать адекватное экспертное решение в наиболее распространенных режимах диагностики, когда тепловизионная съемка производится при той или иной скорости ветра.

3. Многообразие воздействующих факторов при тепловизионных испытаниях оборудования

Следует отметить, что рекомендации по использованию соотношения (1) ограничиваются единственно указанием диапазона скорости ветра безотносительно к форме и размерам испытуемых объектов энергетики и другим факторам, определяющим условия тепловизионных испытаний.

К факторам с разной степенью влияния, которые не учитываются в соотношении (1), можно отнести:

- влияние радиационного охлаждения объекта за счет излучения и его доминирующее влияние над теплопередачей по мере увеличения температуры;
- влияние коэффициентов излучательности поверхности объекта;
- влияние температуры на все физические параметры воздуха и, следовательно, на процесс теплопередачи, зависимый от температуры;
- влияние температуры на электрическое сопротивление объекта, и, следовательно, на процесс тепловыделения;
- влияние линейных размеров изделия на процессы конвекции около изделия;
- влияние скорости ветра на тепловые потоки от изделия при различной форме;
- совокупное влияние всех перечисленных и других факторов друг на друга и на температуру поверхности изделия.

Все перечисленные выше факторы могут быть учтены в процессе теоретических расчетов коэффициентов теплоотдачи и значений температуры поверхности при термографической диагностике оборудования (Власов, 2005; 2006).

Таким образом, влияние ветровой нагрузки при наличии многообразных факторов может быть в полной мере учтено при решении прямой и обратной задач теплового расчета.

Учитывая важность практического учета влияния скорости ветра на данные тепловизионного контроля и проверки разработанных программ, нами проведены экспериментальные исследования и факторный анализ результатов тепловизионного контроля типичных объектов энергетики с учетом ветровой нагрузки.

4. Экспериментальные данные по влиянию ветровой нагрузки на температуру поверхности объектов тепловизионных испытаний

Представляет интерес экспериментальная проверка влияния ветровой нагрузки на реальные электротехнические конструкции и создание математических моделей и программ учета ветровой нагрузки на результаты тепловизионной диагностики.

Для решения поставленной задачи проведены эксперименты, которые можно описать следующим образом. В качестве объекта исследования выбран проходной фарфоровый изолятор (ПТ-6 У3) высотой $H \approx 18$ см и внешним (средним) диаметром $D \approx 50$ мм, внутренним диаметром $d \approx 23$ мм. По центральной оси изолированной внутренней полости объема изолятора, расположенного вертикально и закрепленного в держателе, пропущен нихромовый провод диаметром 1,5 мм.

Разогрев током (до 20 А) провода приводит к постепенному повышению его температуры до стационарного значения. В частности, устанавливаются радиальные тепловые потоки через воздух и стенку фарфоровой изоляции. Величина тепловых потерь на единицу длины провода P_l (Вт/м) может быть рассчитана по известным значениям тока I , напряжения U и длины проводника.

Температура (с ветром и без ветра) внешней поверхности фарфора $t_{в.Ф}$ ($t_{б.в.Ф}$), металлического нихромового проводника $t_{в.Н}$ ($t_{б.в.Н}$), температура воздуха T_0 на удалении от исследуемых объектов контролировалась в различных точках термомпарами типа "медь–константан" с точностью до $0,1^\circ\text{C}$, а также тепловизионным методом.

Ветровая нагрузка создавалась вентилятором, обеспечивающим локальное обдувание собственно фарфорового изолятора или провода. Скорость теплового потока, достигавшая в пределе $v_{\max} = 5$ м/с, локально измерялась анемометром АТТ-1002 с точностью $\pm 0,1$ м/с.

На основе эксперимента возможно экспериментальное определение значений температур $t_{б.в}$ и $t_{в}$ и расчет коэффициента превышения температуры $K_{v_{\text{эксп}}}$, рассчитываемого по соотношению (6) в зависимости от скорости ветра.

Одновременно с экспериментальным определением значений $\Delta t_{\text{эксп}}$ и $K_{v_{\text{эксп}}}$ производился расчет теоретических значений $\Delta t_{\text{теор}}$ и $K_{v_{\text{теор}}}$ с помощью программ, алгоритмы которых представлены в работах (Власов, 2005; 2006).

4.1. Результаты испытаний влияния ветровой нагрузки на охлаждение нихромового провода

Результаты испытаний охлаждения ветром нагретого фиксированным током нихромового провода при температуре окружающей среды в пределах $T_0 = 22-24^\circ\text{C}$ представлены экспериментальными точками на рис. 1. Сплошные линии проведены по результатам расчета значений $\Delta t_{в,н}(v)$ и K_v по алгоритмам решения прямой задачи, представленным и описанным в работах (Власов, 2005; 2006). Анализ показывает, что теоретические значения $\Delta t_{теор}$ и $K_{v,теор}$ адекватно описывают экспериментальные данные в исследуемом диапазоне ветровых нагрузок к диапазону от 0 до 5 м/с.

В результате анализа полученных данных следует сделать важные выводы, которые учитываются при тепловизионной диагностике: по мере увеличения скорости ветра от 0 до 5 м/с превышение температуры провода уменьшается от исходного значения более чем 7-10 раз (рис. 1, 2). В частности, при первоначальном (без ветра) превышении температуры $\Delta t_{б.в,н} = 28^\circ\text{C}$ коэффициент превышения температуры K_v достигает значения $K_v = 8$ при $v = 5$ м/с.

Резкое увеличение K_v от 1 до значений 3...5 происходит уже при незначительной скорости ветра $v \approx 1$ м/с, характерной для относительно безветренной погоды.

Этот факт подтверждает необходимость учета влияния скорости ветра на результаты тепловизионных обследований открытых подстанций.

Рис. 1. Зависимость превышения температуры $\Delta t_{в,н}(v)$ нихромового провода от скорости ветра v при различных начальных превышениях температуры провода $\Delta t_{б.в,н}$ без ветра

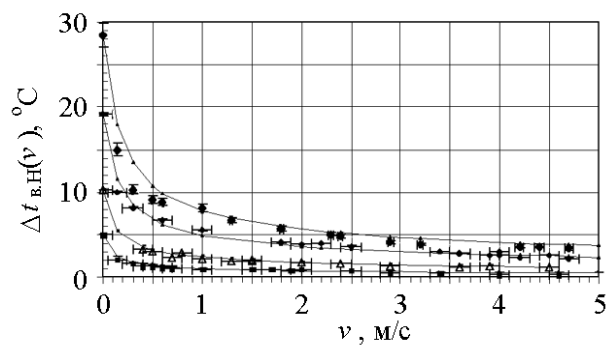
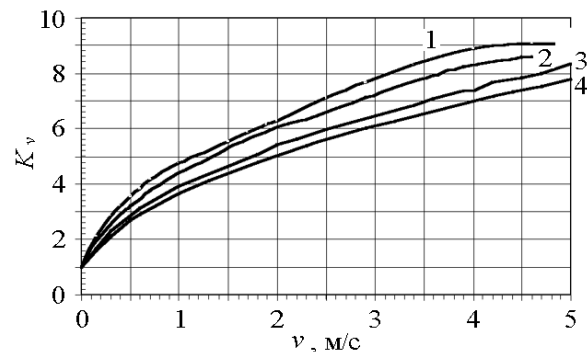


Рис. 2. Теоретические зависимости коэффициента превышения температуры K_v нихромового провода от скорости ветра v при различных начальных превышениях температуры провода без ветра

1: $\Delta t_{б.в,н} = 5^\circ\text{C}$; 2: $\Delta t_{б.в,н} = 10^\circ\text{C}$;
3: $\Delta t_{б.в,н} = 19^\circ\text{C}$; 4: $\Delta t_{б.в,н} = 28^\circ\text{C}$



4.2. Результаты испытаний влияния ветровой нагрузки на охлаждение фарфорового изолятора

По фиксированной мощности источника нагрева и фиксированной температуре среды температура поверхности фарфора без ветровой нагрузки достигает равновесного значения $t_{б.в,ф}$, так что значение $\Delta t_{б.в,ф}$ может быть рассчитано по соотношению (4). Под действием ветровой нагрузки температура поверхности снижается до нового равновесного значения $t_{в,ф}$, определяемого заданной скоростью ветра v .

На рис. 3 приведена зависимость превышения температуры $\Delta t_{в,ф}(v)$ поверхности фарфора от скорости ветра, полученная путем неоднократных испытаний при фиксированном значении превышения температуры без ветра $\Delta t_{б.в,ф} = (13 \pm 0,2)^\circ\text{C}$. Сплошные линии проведены по результатам расчета значений $\Delta t_{в,ф}(v)$ и K_v по алгоритмам решения прямой задачи, представленным и описанным в работах (Власов, 2005; 2006).

Видно, что увеличение скорости ветра от 0 до 1 м/с приводит к резкому уменьшению значения превышения температуры фарфора $\Delta t_{в,ф}$ от 13°C до 5°C ($K_v = 13/5 = 2,6$); дальнейшее возрастание скорости ветра до 5 м/с приводит к монотонному уменьшению $\Delta t_{в,ф}$ до 2°C ($K_v = 13/2 = 6,5$).

Анализ экспериментальных данных показывает, что наибольшее изменение значения K_v происходит в области скоростей ветра от 0 до 1 м/с, как наиболее характерных значений при тепловизионной диагностике реальных объектов.

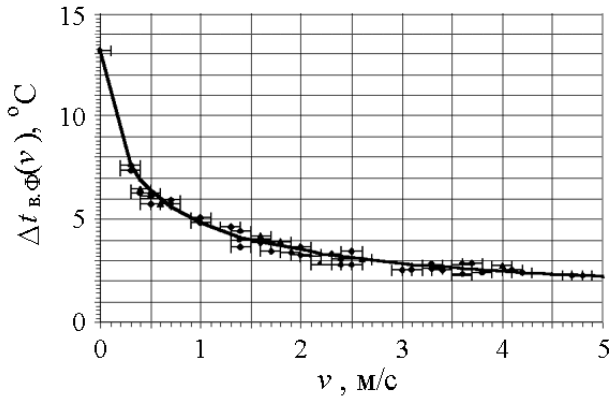


Рис. 3. Зависимость превышения температуры $\Delta t_{в,ф}(v)$ поверхности фарфорового изолятора от скорости ветра v при начальном превышении температуры фарфора $\Delta t_{б,в,ф} = 13^\circ\text{C}$ ($D \approx 50$ мм)

4.3. Факторный анализ влияния ветровой нагрузки на охлаждение различных объектов

Результаты эксперимента и расчетов показывают, что тепловое состояние объектов исследования определяется совокупным влиянием многих реальных факторов, в связи чем актуальна оценка эффекта влияния изменения диагностических факторов на характер изменения диагностического параметра тепловизионной диагностики Y_i , например, превышения температуры исследуемого элемента $\Delta t_{в}(v)$ или $\Delta t_{б,в}$, коэффициента превышения температуры K_v , на основе методики обработки данных с помощью полного факторного эксперимента ПФЭ, элементы которого описаны в работах (Власов, 2005; 2006).

Процедура проведения ПФЭ заключается в следующем. Среди наиболее воздействующих на результат диагностических параметров $\Delta t_{б,в,i}$, выделяются наиболее существенные, например, четыре ($m = 4$) реальных фактора $X_{p1}, X_{p2}, X_{p3}, X_{p4}$. Эти переменные нормируются в соответствии с алгоритмом ПФЭ и преобразуются в безразмерные значения X_1, X_2, X_3, X_4 .

Преобразование значений реальных переменных (факторов) к безразмерным величинам (кодировка факторов и подготовка метрики) осуществляется по соотношению:

$$X_i = (X_{pi} - X_{pi0}) / \Delta X_{pi}, \quad (9)$$

где X_i – кодированный безразмерный i -й фактор; X_{pi} – реальное значение i -го фактора; X_{pi0} – реальное базовое значение i -го фактора; ΔX_{pi} – шаг варьирования i -го реального фактора.

Кодировка факторов приводит к тому, что в выбранном интервале значений реальных факторов, безразмерные факторы изменяются в пределах, например, от -1 до $+1$.

Зависимость диагностических параметров Y от реальных воздействующих факторов X_{pi} описывается полиномом типа:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ji} X_j X_i + \sum b_{ii} X_i^2, \quad (10)$$

где X_i – кодовые (безразмерные) значения параметров, принимающих на концах выбранных интервалов значения ± 1 ; коэффициенты b_i полинома (10) рассчитываются по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{k=1}^n X_{ik} Y_k}{\sum_{k=1}^n X_{ik}^2}, \quad (11)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$.

Общее число опытов n (оптимальное число вариантов значений выбранных диагностических факторов), необходимое для адекватного описания полинома (10) в рамках ПФЭ, при числе факторов $m = 4$ определяется выражением $n = 2^m + 2m + 1 = 25$.

На основе матрицы ПФЭ, особенности которой представлены в (Власов, 2005; 2006), задаются 25 различных вариантов значений X_1, X_2, X_3, X_4 .

С помощью разработанной программы (Власов, 2005; 2006), например, расчета обратной задачи определяются n значений функции $Y_1 = \Delta t_{б,в,1}, \dots, Y_{25} = \Delta t_{б,в,25}$. Совокупность значений функции $Y_i = \Delta t_{б,в,i}$ ($i = 1 \dots 25$) позволяет определить полный набор коэффициентов b_i , адекватно описывающих функцию Y в форме полинома типа (10).

При необходимости упрощения полинома (10) число его коэффициентов может быть уменьшено; методами статистического анализа возможно определение значимости полученных коэффициентов и адекватности описания исследуемой функции полиномом.

В том случае, когда отличие расчетного значения полинома $Y_k(X_1, X_2, X_3, X_4)$ от значения $\Delta t_{б,в,k}$, рассчитываемого по программе (Власов, 2005; 2006) превышает допустимую погрешность, целесообразно изменение диапазона выбранного интервала значений реальных факторов или шага их варьирования.

Этот подход позволяет аналитически с достаточной степенью точности определить значения $Y(X_1, X_2, X_3, X_4)$ при произвольных значениях $X_{p1}, X_{p2}, X_{p3}, X_{p4}$ в выбранном диапазоне значений факторов, не прибегая к расчету диагностических параметров с помощью программы (Власов, 2006).

Применение методик полного факторного эксперимента к результатам, полученным на основе математической модели, учитывающей влияние ветровой нагрузки на охлаждение различных объектов, позволяет оценить совокупное влияние различных реальных факторов в произвольных диапазонах значений.

Для визуализации и более четкого осознания содержательной интерпретации полинома Y , описывающего функцию теплового состояния объектов, возможно построение трехмерных диаграмм в программной среде *STATISTICA*. Следует отметить, что построение трехмерной поверхности накладывает дополнительную погрешность на значение диагностического параметра, определяемое графическим способом.

4.3.1. Факторный анализ влияния ветровой нагрузки на охлаждение нихромового провода

С практической точки зрения актуальной является разработка методики оценки температуры поверхности объекта без ветра на основе данных, получаемых при тепловизионной диагностике при ветровой нагрузке (обратная задача).

Поэтому нами проведен факторный анализ учета ряда наиболее значимых факторов, представленных в табл. 1 (диаметр провода D , скорость ветра v , температура окружающей среды T_0), на превышение температуры поверхности металлических проводов, выполненных из различного материала: нихром (индекс Н, значение температурного коэффициента удельного электрического сопротивления $TK_{pH} \approx 0,0004^\circ C^{-1}$), алюминий (А, $TK_{pA} \approx 0,0038^\circ C^{-1}$), медь (М, $TK_{pM} \approx 0,0043^\circ C^{-1}$), а также фарфоровых изоляторов и покрышек.

На основе полного факторного эксперимента могут быть получены коэффициенты полиномов Y , описывающие параметры тепловизионной диагностики: величины $\Delta t_{б.в}(v)$ и K_v в диапазоне изменения исследуемых параметров $X_1 - X_4$.

В табл. 1 представлены значения входных переменных для факторного анализа диагностической модели для нихромового провода (значение коэффициента излучательности принято равным $\varepsilon = 0,2$).

При выбранном шаге варьирования значения D (для расширения интервала значений в качестве переменной выбрано значение логарифма D), как входного фактора, равны: нижнее $D_{min} = 0,001$ м ($X_{p2} = \lg D = -3$; $X_2 = -1$); базовое $D_0 = 0,01$ м ($X_{p2} = -2$; $X_2 = 0$); верхнее $D_{max} = 0,1$ м ($X_{p2} = -1$; $X_2 = +1$). В выбранном диапазоне значений исследуемый провод с диаметром $D = 0,0015$ м ($X_{p2} = -2,82$; $X_2 = -0,824$) имеет параметры, относящиеся к интервалу значений $-1 \leq X_2 \leq +1$.

Полный набор коэффициентов b_i , описывающих функцию $Y = \Delta t_{б.в.Н}(v; \Delta t_{в.Н})$ и полученных при решении обратной задачи, представлен в табл. 2.

Таким образом, искомое значение $\Delta t_{б.в.Н}(X_1, X_2, X_3, X_4)$ может быть определено с помощью программ или с достаточной степенью точности на основе расчета полинома Y , описываемого уравнением (10).

Трехмерная диаграмма (рис. 4), полученная по результатам расчетов, описывает зависимость превышения температуры без ветра $\Delta t_{б.в.Н}(v; \Delta t_{в.Н})$ от двух переменных диагностических факторов ($v; \Delta t_{в.Н}$) при постоянных ($D; T_0$) (табл. 1).

Подобные гиперповерхности позволяют оперативно оценить значение превышения температуры провода с фиксированным диаметром для произвольных значений переменных ($v; \Delta t_{в.Н}$). Для примера, определим значение превышения температуры провода $\Delta t_{б.в.Н}(10^\circ C; 3$ м/с; 1,5 мм; $20^\circ C$) без ветра, если при скорости ветра $v = 3$ м/с значение превышения температуры провода равно $\Delta t_{в.Н} = 10^\circ C$.

Для удобства анализа (рис. 4) ось значений v разбита на 16 интервалов по 0,25 м/с, а ось значений $\Delta t_{в.Н}$ – на 18 интервалов по $1^\circ C$ каждый. Проводим вертикальные линии от искомых значений $v = 3$ м/с и $\Delta t_{в.Н} = 10^\circ C$ вплоть до пересечения с гиперповерхностью, определив точки A и B . Одновременно, на плоскости ($v; \Delta t_{в.Н}$) находим положение точек C и D , используя линии соответствующих интервалов. Из точки C восстанавливаем перпендикуляр до точки E , которая находится на пересечении линий интервалов на гиперповерхности. Восстанавливаем перпендикуляр из точки D до точки F – пересечения с линией CF , параллельной линии CD . С помощью горизонтальной сетки линий, пересекающих ось $Z \equiv \Delta t_{б.в.Н}$, находим искомое значение превышения температуры без ветра, в данном случае примерно равное $\Delta t_{б.в.Н} \approx 55^\circ C$.

Расчет по программе (Власов, 2006), учитывающей совокупное значение многих факторов, дает значение $\Delta t_{б.в.Н} \approx 54^\circ C$; расчет значения полинома $Y = \Delta t_{б.в.Н}$ по формуле (10) дает значение $\Delta t_{б.в.Н} \approx 57^\circ C$. Очевидно, что относительная погрешность расчетов различными методами не превышает 3-4 %.

Таблица 1. Значения переменных при факторном анализе нагрева нихромового провода

Характеристика фактора	Входные факторы			
	$\Delta t_{в,н}, ^\circ\text{C}$	$\lg D, \text{м}$	$v, \text{м/с}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4
Базовое значение X_{pi0} , соответствующее $X_{i0} = 0$	12,5	-2	1,5	20
Значение X_{pi} , соответствующее верхнему уровню $X_i = +1$	20	-1	2,5	30
Значение X_{pi} , соответствующее нижнему уровню $X_i = -1$	5	-3	0,5	10
Шаг варьирования ΔX_{pi}	7,5	1	1	10

Таблица 2. Расчетные значения коэффициентов полинома $Y = \Delta t_{б,в}(v; \Delta t_{в})$ для различных материалов и конструкций

Коэффициент	Материал, конструкция			
	Провод		Изолятор	Покрышка
	Нихром (табл. 1)	Алюминий (табл. 5)	Фарфор (табл. 3)	Фарфор (табл. 4)
b_0	34,18288	26,26136	15,90939	12,82944
b_1	17,7856	15,68572	10,11469	8,157033
b_2	-14,9625	-1,43199	-1,9411	-1,58274
b_3	10,04947	4,552885	4,923802	1,528729
b_4	-0,64463	-0,47981	-0,94858	-0,32762
b_{12}	-7,03981	-0,85006	-1,33863	-0,9865
b_{13}	5,012313	2,838938	3,091875	0,955125
b_{14}	-0,27519	-0,28944	-0,69425	-0,117
b_{23}	-4,60269	-0,28256	-0,235	-0,31287
b_{24}	0,178063	0,016063	-0,25388	0,03475
b_{34}	-0,29106	-0,11444	0,087625	-0,02138
b_{11}	-0,95977	-0,72207	-0,19016	-0,56562
b_{22}	6,208317	0,500062	1,047767	0,536793
b_{33}	-1,91798	-0,47139	-0,45478	-0,09177
b_{44}	0,146898	0,203152	0,615897	0,039943

4.3.2. Факторный анализ влияния ветровой нагрузки на охлаждение фарфорового изолятора

Анализ показывает, что значение $\Delta t_{в,ф}$, характеризующее тепловое состояние поверхности фарфорового изолятора без ветра, также определяется факторами, отмеченными выше.

На основе полного факторного эксперимента могут быть получены коэффициенты полиномов Y , описывающие параметры тепловизионной диагностики: величины $\Delta t_{б,в,ф}(v)$ и K_v в диапазоне изменения исследуемых параметров $X_1 - X_4$ ($50 \text{ мм} \leq D \leq 100 \text{ мм}$).

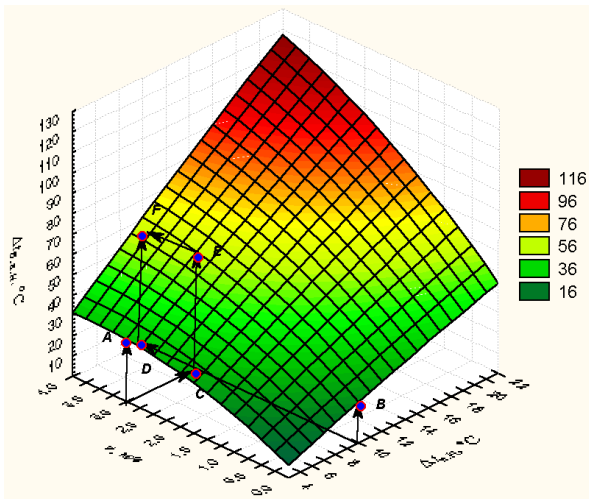


Рис. 4. Зависимость значений $\Delta t_{б,в,н}(v, \Delta t_{в,н})$ нихромового провода от скорости ветра v и превышения температуры $\Delta t_{в,н}$ при $D = 1,5 \text{ мм}$ ($X_2 = -0,824$) и $T_0 = T_{пр} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = +0$)

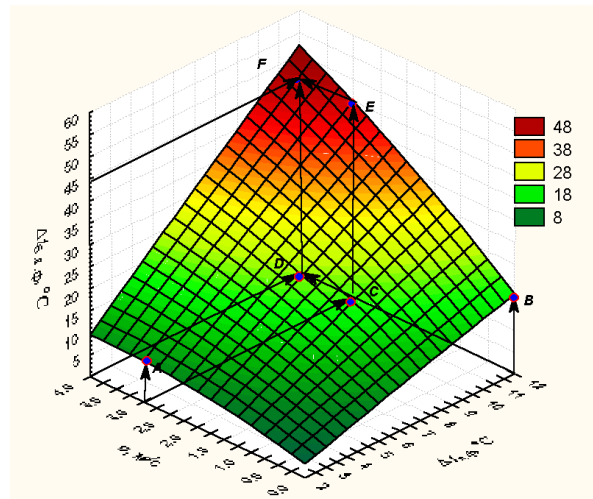


Рис. 5. Зависимость значений $\Delta t_{б,в,ф}(v, \Delta t_{в,ф})$ фарфорового изолятора от скорости ветра v и превышения температуры $\Delta t_{в,ф}$ при $D = 50 \text{ мм}$ ($X_2 = -1$) и $T_0 = T_{пр} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = +0$)

В табл. 3 представлены значения входных переменных при факторном анализе диагностической модели для фарфорового изолятора (значение коэффициента излучательности принято равным $\epsilon = 1$).

При выбранном шаге варьирования значения входного фактора D равны: нижнее $D_{\min} = 50$ мм ($X_{p2} = 50$ мм; $X_2 = -1$); базовое $D_0 = 75$ мм ($X_{p2} = 75$ мм; $X_{20} = 0$); верхнее $D_{\max} = 100$ мм ($X_{p2} = 100$ мм; $X_2 = +1$). В данном случае исследуемый изолятор с диаметром $D = 50$ мм имеет параметры, относящиеся к интервалу значений $-1 \leq X_2 \leq +1$.

Полный набор коэффициентов b_i , описывающих функции $Y = \Delta t_{\delta, в. ф}(v; \Delta t_{в. ф})$ и полученных при решении обратной задачи, представлен в табл. 2.

Таблица 3. Значения переменных при факторном анализе нагрева фарфорового изолятора

Характеристика фактора	Входные факторы			
	$\Delta t_{в. ф}, ^\circ\text{C}$	$D, \text{ мм}$	$v, \text{ м/с}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4
Базовое значение X_{pi0} , соответствующее $X_{i0} = 0$	6,5	75	1,5	20
Значение X_{pi} , соответствующее верхнему уровню $X_i = +1$	11	100	2,5	30
Значение X_{pi} , соответствующее нижнему уровню $X_i = -1$	2	50	0,5	10
Шаг варьирования ΔX_{pi}	4,5	25	1	10

Для примера на рис. 5 определено графическим методом, аналогично описанному выше, значение превышения температуры $\Delta t_{\delta, в. ф}(3 \text{ м/с}; 12^\circ\text{C})$ поверхности фарфорового изолятора без ветра, если при $D = 50$ мм ($X_2 = -1$) и $T_0 = T_{\text{пр}} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = 0$) и скорости ветра $v = 3$ м/с значение превышения температуры фарфора равно $\Delta t_{в. ф} = 12^\circ\text{C}$. Искомое значение превышения температуры $\Delta t_{\delta, в. ф}$ без ветра в данном случае примерно равно $\Delta t_{\delta, в. ф} \approx 44^\circ\text{C}$. Расчет по программе, учитывающей многие факторы, дает значение $\Delta t_{\delta, в. ф} \approx 42,92^\circ\text{C}$; расчет по соотношению (10) дает значение $\Delta t_{\delta, в. ф} \approx 44,99^\circ\text{C}$. Очевидно, что относительная погрешность расчетов различными методами не превышает 4-5 %.

Для многочисленного электротехнического оборудования с фарфоровыми крышками (трансформаторы напряжения, трансформаторы тока и т.п.) характерны более высокие значения диаметра D . Поэтому в том случае, когда необходимо оценить температуру поверхности фарфоровой крышки с большим диаметром, например, в диапазоне $D = 200 \dots 1000$ мм, целесообразно изменить диапазоны входных параметров (табл. 4).

Таблица 4. Значения переменных при факторном анализе нагрева фарфоровой крышки

Характеристика фактора	Входные факторы			
	$\Delta t_{в. ф}, ^\circ\text{C}$	$D, \text{ мм}$	$v, \text{ м/с}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4
Базовое значение X_{pi0} , соответствующее $X_{i0} = 0$	6,5	500	1,5	20
Значение X_{pi} , соответствующее верхнему уровню $X_i = +1$	11	700	2,5	30
Значение X_{pi} , соответствующее нижнему уровню $X_i = -1$	2	300	0,5	10
Шаг варьирования ΔX_{pi}	4,5	200	1	10

При выбранном шаге варьирования значения D равны: нижнее $D_{\min} = 300$ мм ($X_{p2} = 300$ мм; $X_2 = -1$); базовое $D_0 = 500$ мм ($X_{p2} = 500$ мм; $X_{20} = 0$); верхнее $D_{\max} = 700$ мм ($X_{p2} = 700$ мм; $X_2 = +1$). Расчетная гиперповерхность для фарфоровой крышки с диаметром $D = 500$ мм, представленная на рис. 6, характеризуется набором коэффициентов полинома, представленного в табл. 2.

Допустим, что при скорости $v = 1$ м/с значение $\Delta t_{в. ф} = 6^\circ\text{C}$. Проведя идентичный описанному выше графический анализ для фарфоровой крышки $D = 500$ мм (рис. 6), получим значение превышения температуры без ветра $\Delta t_{\delta, в. ф2} \approx 9^\circ\text{C}$. Расчет по программе, учитывающей совокупное влияние многих факторов, дает значение $8,65^\circ\text{C}$.

Сравнивая результаты расчетов, полученные для фарфоровых изоляторов с различными диаметрами $D_1 = 50$ мм и $D_2 = 500$ мм (рис. 5, 6), можно сделать вывод, что при одинаковых значениях факторов, например, $v = 3$ м/с и $\Delta t_{в. ф} = 12^\circ\text{C}$, значение превышения температуры $\Delta t_{\delta, в. ф1} \approx 44^\circ\text{C}$, а $\Delta t_{\delta, в. ф2} \approx 22^\circ\text{C}$. Расчет показывает, что дальнейшее увеличение диаметра до значения $D_3 = 700$ мм приводит к уменьшению величины $\Delta t_{\delta, в. ф3}$ до 19°C .

Следовательно, можно сделать вывод, что влияние ветровой нагрузки на объекты с меньшим диаметром проявляется в большей степени.

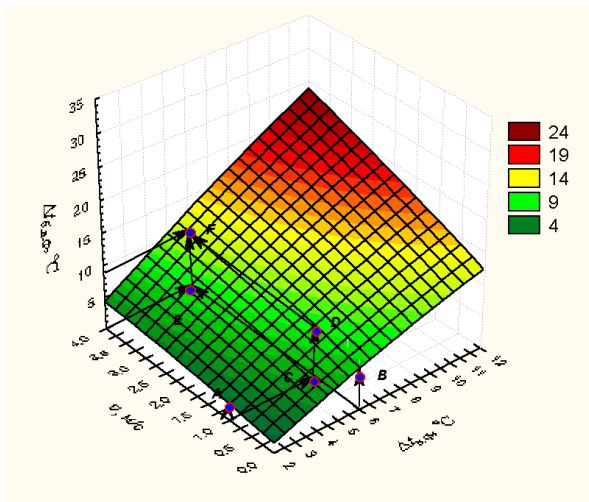


Рис. 6. Зависимость значений $\Delta t_{0,v,\phi}(v, \Delta t_{v,\phi})$ фарфоровой покрышки от скорости ветра v и превышения температуры $\Delta t_{v,\phi}$ при $D = 500$ мм ($X_2 = 0$) и $T_0 = T_{пр} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = 0$)

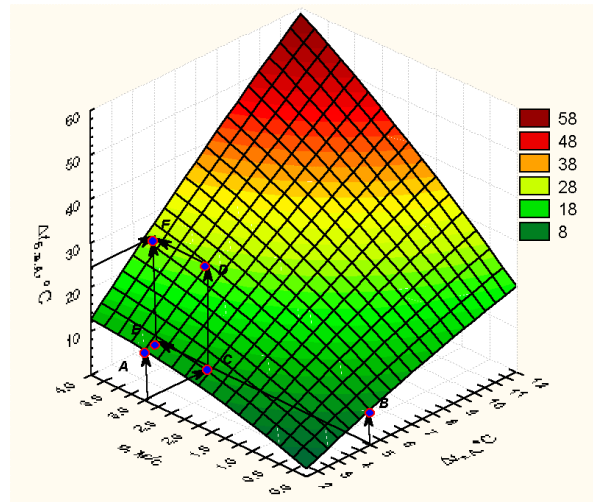


Рис. 7. Зависимость значений $\Delta t_{0,v,A}(v, \Delta t_{v,A})$ алюминиевого провода от скорости ветра v и превышения температуры $\Delta t_{v,A}$ при $D = 20$ мм ($X_2 = -1$) и $T_0 = T_{пр} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = 0$)

4.3.3. Факторный анализ влияния ветровой нагрузки на охлаждение алюминиевых проводов различного диаметра

Анализ показывает, что значение $\Delta t_{v,A}$, характеризующее тепловое состояние поверхности алюминиевого провода без ветра, также определяется факторами, отмеченными выше: превышение температуры провода с ветром $\Delta t_{v,A}$, диаметр D , скорость ветра v , температура окружающей среды T_0 .

На основе полного факторного эксперимента могут быть получены коэффициенты полиномов Y , описывающие параметры тепловизионной диагностики: величины $\Delta t_{0,v,A}(v)$ и K_v в диапазоне изменения исследуемых параметров X_1 - X_4 .

В табл. 5 представлены значения входных переменных при факторном анализе диагностической модели для алюминиевого провода (значение коэффициента излучательности принято равным $\epsilon = 0,2$).

Таблица 5. Значения переменных при факторном анализе нагрева алюминиевого провода

Характеристика фактора	Входные факторы			
	$\Delta t_{v,A}, ^\circ\text{C}$	$D, \text{мм}$	$v, \text{м/с}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4
Базовое значение X_{pi0} , соответствующее $X_{i0} = 0$	6	30	3	20
Значение X_{pi} , соответствующее верхнему уровню $X_i = +1$	10	40	4	30
Значение X_{pi} , соответствующее нижнему уровню $X_i = -1$	2	20	2	10
Шаг варьирования ΔX_{pi}	4	10	1	10

При выбранном шаге варьирования значения входного фактора D равны: нижнее $D_{\min} = 20$ мм ($X_{p2} = 20$ мм; $X_2 = -1$); базовое $D_0 = 30$ мм ($X_{p2} = 30$ мм; $X_2 = 0$); верхнее $D_{\max} = 40$ мм ($X_{p2} = 40$ мм; $X_2 = +1$).

Полный набор коэффициентов b_i , описывающих функции $Y = \Delta t_{0,v,A}(v; \Delta t_{v,A})$ и полученных при решении обратной задачи, представлен в табл. 2.

Расчетные гиперповерхности для алюминиевых проводов с диаметрами $D_1 = 20$ мм, $D_2 = 30$ мм, $D_3 = 40$ мм представлены на рис. 7, 8, 9.

Графический анализ рис. 7 показывает, что при скорости $v = 3$ м/с, значение $\Delta t_{v,\phi} = 5^\circ\text{C}$, значение превышения температуры без ветра составит $\Delta t_{0,v,\phi2} \approx 25^\circ\text{C}$. Расчет по программе дает значение $24,55^\circ\text{C}$.

Проведем анализ влияния значений диаметра провода на превышение температуры $\Delta t_{0,v,A}$ без ветра при идентичных условиях под действием ветровой нагрузки.

Сравним предельные (для выбранного диапазона) значения превышения температуры $\Delta t_{0,v,A}(4 \text{ м/с}, 12^\circ\text{C})$ алюминиевого провода в зависимости от диаметра D , если при скорости ветра $v = 4$ м/с превышение температуры составляет $\Delta t_{v,A} = 12^\circ\text{C}$. С учетом данных, приведенных на рис. 7-9, получаем, что по мере увеличения диаметра от 20 мм до 40 мм, значение $\Delta t_{0,v,A}$ уменьшается от значения

58°C до 54°C. Следовательно, относительное изменение $\delta_D = \delta(\Delta t_{б.в.А})/\delta D$ составляет примерно $\delta_D = (58 - 54)/(40 - 20) = 0,2^\circ\text{C}/\text{мм}$ в диапазоне рассматриваемых значений диаметра провода.

При исследовании охлаждения токопроводящих проводников, контактных соединений, шин и др., разогреваемых током, необходимо производить учет величины температурного коэффициента сопротивления. Анализ данных показывает, например, при $v = 1$ м/с, что изменение $TK\rho$ от нулевого значения до значения $0,0042^\circ\text{C}^{-1}$ (медь) вызывает уменьшение превышения температуры $\Delta t_{в}(TK\rho; D)$ провода диаметром 10 см от 106°C ($K_v = 1,13$) до 102°C ($K_v = 1,18$), провода диаметром 1 мм от 42°C ($K_v = 2,86$) до 32°C ($K_v = 3,75$). Различие в значениях температуры поверхности проводов с различными значениями $TK\rho$ может достигать $10\text{-}15^\circ\text{C}$ при различных скоростях ветра.

Следует отметить, что влияние различных факторов на медные провода (индекс М) идентично влиянию на алюминиевые провода, что связано с практически одинаковыми значениями температурного коэффициента удельного электрического сопротивления ($TK\rho_M \approx 0,0042^\circ\text{C}^{-1}$).

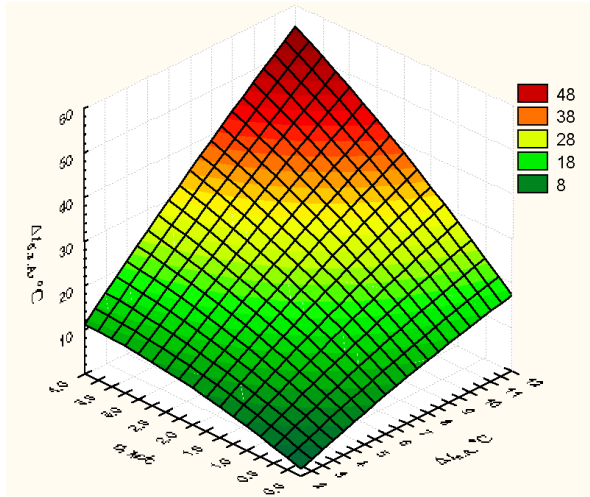


Рис. 8. Зависимость значений $\Delta t_{б.в.А}(v, \Delta t_{в.А})$ алюминиевого провода от скорости ветра v и превышения температуры $\Delta t_{в.А}$ при $D = 30$ мм ($X_2 = -1$) и $T_0 = T_{пр} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = +0$)

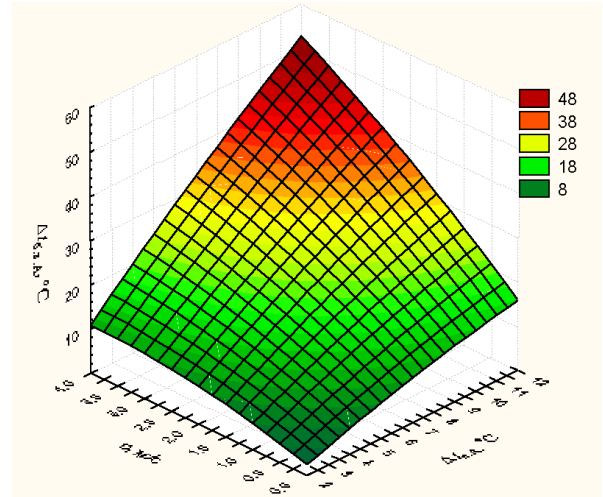


Рис. 9. Зависимость значений $\Delta t_{б.в.А}(v, \Delta t_{в.А})$ алюминиевого провода от скорости ветра v и превышения температуры $\Delta t_{в.А}$ при $D = 40$ мм ($X_2 = -1$) и $T_0 = T_{пр} = 20^\circ\text{C}$ ($X_4 = 0$)

5. Заключение

Разработанная методика позволяет определить факторы, характеризующие аварийные состояния объектов на основании данных тепловизионного контроля, полученных при произвольных значениях скорости ветра, форме и геометрических размерах объектов. Она позволяет провести анализ чувствительности метода тепловизионной диагностики, выявить характер влияния различных факторов на функции состояния как отдельно, так и в различных сочетаниях.

Проведенные расчеты показывают, что скорость ветра является важным диагностическим фактором при тепловизионной диагностике, в связи с чем игнорирование этого фактора в руководящих документах по тепловизионному контролю объектов энергетики является недопустимым.

Приведенные коэффициенты полинома Y и многомерные зависимости $Y(X_i)$ позволяют оценить превышение температуры поверхности различных объектов с достаточной степенью точности.

Гиперповерхности позволяют оперативно оценить диагностический параметр тепловизионной диагностики аналогично номограммам, широко используемым в электро- и теплоэнергетике.

Анализ теплового состояния исследуемых объектов и оценка их температуры с достаточной степенью точности возможен только путем учета воздействующих диагностических факторов в широком диапазоне значений и применения программного обеспечения, позволяющего провести подобные расчеты.

Литература

- Власов А.Б.** Дистанционная оценка величины тепловых потоков оборудования на основе тепловизионной диагностики. *Электротехника*, № 4, с.45-49, 2006.
- Власов А.Б.** Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. М., Колос, 280 с., 2006.

- Власов А.Б.** Оценка влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля объектов энергетики. *Электрика*, № 6, с.34-39, 2006.
- Власов А.Б.** Оценка влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля объектов энергетики. *Электротехника*, № 12, с.15-21, 2006.
- Власов А.Б.** Расчет параметров влияния ветровой нагрузки на результаты тепловизионного контроля. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006611662, регистр. 18.05.2006, Российское агентство по патентам и товарным знакам, Россия, 2006.
- Власов А.Б.** Тепловизионная диагностика объектов электро- и теплоэнергетики (диагностические модели). *Мурманск, МГТУ*, 265 с., 2005.
- Власов А.Б.** Учет ветровой нагрузки при ИК-термографии. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. *СПб., СПЭИПК*, № 30, с.305-317, 2006.
- Дроздов В.А., Сухарев В.И.** Термография в строительстве. *М., Стройиздат*, 240 с., 1987.
- РД 153-34.0-20.363-99. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. *Под общ. ред. С.А. Бажанова, А.В. Кузьмина, М.А. Вихрова. М., РАО "ЕЭС РОССИИ"*, 1999.
- РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования. Приложение 3. Тепловизионный контроль электрооборудования и воздушных линий электропередачи. *Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. М., изд. НИЦ ЭНАС*, с.241-254, 2002.