

ОБНАРУЖЕНИЕ И ОЦЕНКА КОЛИЧЕСТВА ВОДЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ АВИАЦИОННЫХ СОТОВЫХ ПАНЕЛЯХ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

© 2023 г. А.О. Чулков^{1,*}, Б.И. Шагдыров¹, В.П. Вавилов¹, Д.Ю. Кладов¹, В.И. Стасевский¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634050 Томск, пр-кт Ленина, 30
*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Поступила в редакцию 22.09.2023; после доработки 05.10.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Описаны результаты применения автоматизированного алгоритма обнаружения воды в горизонтально ориентированных сотовых авиационных панелях и определения массы воды по результатам активного теплового контроля (ТК). В отличие от ультразвукового метода, ТК позволяет обнаруживать воду и оценивать ее количество при наличии воздушного зазора между водой и контролируемой обшивкой. Разработанный на базе искусственной нейронной сети алгоритм обеспечил оценку количества воды в ячейках сот с погрешностью до 15 % как в случае примыкания воды к обшивке, так и при наличии воздушного зазора.

Ключевые слова: тепловой неразрушающий контроль, сотовая панель, вода в сотах, искусственная нейронная сеть.

DETECTING AND EVALUATING WATER INGRESS IN HORIZONTALLY ORIENTED AVIATION HONEYCOMB PANELS BY USING AUTOMATED THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING

A.O. Chulkov^{1,*}, B.I. Shagdyrov¹, V.P. Vavilov¹, D.Yu. Kladoy¹, V.I. Stasevskiy¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634050 Tomsk, Lenin Av., 30
*E-mail: chulkovao@tpu.ru

Results of applying active thermal nondestructive testing for the detection of water ingress in horizontally oriented aviation honeycomb panels and quantitative evaluation of water content are presented. Unlike ultrasonic inspection, thermal testing allows detecting water and evaluating its quantity in the presence of air gaps between water and inspected honeycomb skin. The proposed algorithm based on using an artificial neural network has enabled estimating water content with errors under 15 % in the cases where water contacts with a honeycomb skin, as well as in presence of air gaps between skin and water.

Keywords: thermal nondestructive testing, honeycomb panel, water ingress, artificial neural network.

DOI: 10.31857/S0130308223120035, EDN: XIEKEM

ВВЕДЕНИЕ

Сотовые конструкции появились в авиации в начале 20-го века [1] и широко используются в настоящее время благодаря их высокой жесткости и прочности при относительно малой массе. Несмотря на развитые технологии производства сотовых панелей на основе алюминия, а также панелей, включающих вошеную бумагу и полимерные композиты, сотовые конструкции могут содержать производственные и эксплуатационные дефекты. К производственным дефектам относятся отслоения обшивки от сотового наполнителя, смятие наполнителя, заполнение сот связующим (эпоксидной смолой), непрочности вокруг технологических вставок и т.д. Такие дефекты могут возникать также в процессе эксплуатации авиационной техники, однако специфическим эксплуатационным дефектом является вода в ячейках сот, которая в процессе замерзания/размерзания может приводить к катастрофическому разрушению элементов планера. Все вышеуказанные дефекты могут быть выявлены с помощью теплового неразрушающего контроля (НК). Следует отметить, что традиционно применяемый ультразвуковой метод НК неэффективен для контроля дефектов сотовых панелей, что связано с малой толщиной обшивки сот, а также различной ориентацией воды в ячейках сот, в особенности при наличии воздушного зазора между водой и контролируемой поверхностью [2—5].

Тепловой НК может быть использован для определения воды без использования дополнительного источника нагрева [6]. Участки сотовых панелей, содержащие воду, характеризуются



Рис. 1. Пассивная диагностика влагосодержания в руле направления самолета Boeing-737 после посадки с помощью тепловизионного модуля ThermApp (обследование НИ ТПУ в 2018 г., аэропорт г. Томска [6]).

высокой тепловой инерцией и, следовательно, аномальной температурой в ходе нестационарных тепловых процессов, сопровождающих посадку самолета (см. иллюстрацию на рис.1). Соответствующая методика была разработана в НИ ТПУ и передана в ГосНИИ ГА, где используется в настоящее время. Более поздние исследования показали, что, анализируя время восстановления температуры дефектных зон после посадки самолета, можно приблизительно определить количество воды в ячейках сот [6].

Применение активного теплового контроля (ТК) позволяет оценить количество воды в ячейках сот с меньшей погрешностью по сравнению с пассивной инспекцией, однако требует больших трудозатрат [4—6]. Пассивная тепловизионная диагностика воды основана на оценке площади, занимаемой водой, и возможна в течение определенного интервала времени после посадки самолета. Следует отметить, что пространственная ориентация сотовых панелей в планере может иметь большое количество вариантов, что приводит к различному распределению воды в частично заполненных ячейках сот. Опираясь на практический опыт контроля воды в эксплуатируемых самолетах, установлено, что под действием силы гравитации вода в сотовых панелях перемещается вниз, поэтому в вертикально расположенных сотовых панелях нижние ячейки сот обычно заполнены целиком.

Для повышения производительности ТК авиационных сотовых конструкций и монолитных композиционных панелях в НИ ТПУ был разработан ряд тепловизионных дефектоскопов [7], в том числе роботизированного и сканирующего типов, которые обеспечивают производительность НК до $25 \text{ м}^2/\text{ч}$. Тем не менее процедуры обработки результатов ТК остаются трудоемкими. Кроме того, интерпретация данных зависит от квалификации оператора-термографиста, поэтому актуальна разработка автоматизированных тепловых дефектоскопов и специализированных алгоритмов анализа результатов НК.

Для реализации таких алгоритмов в НК применяют искусственные нейронные сети (НС). В частности, разработанные в НИ ТПУ программные алгоритмы на базе НС эффективно позволяют выявлять расслоения в теплозащитных покрытиях и монолитных композиционных материалах, а также определять глубину их залегания в автоматизированном режиме [8].

В настоящей статье описан способ автоматизированного выявления и количественной оценки воды в горизонтально ориентированных композитных сотовых панелях при использовании односторонней процедуры активного ТК и обработки данных с помощью искусственной НС.

2. КОНТРОЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ

Для разработки и экспериментальной апробации алгоритма оценки количества воды в авиационных сотовых панелях был изготовлен контрольный образец панели размерами 160×160×10 мм (рис. 2). Несколько групп ячеек сот были заполнены водой в различном количестве. Поскольку стеклопластиковая обшивка сот толщиной 1 мм частично прозрачна для оптического излучения нагрева, контролируемая поверхность была окрашена черной матовой краской с коэффициентом излучения/поглощения 0,96.

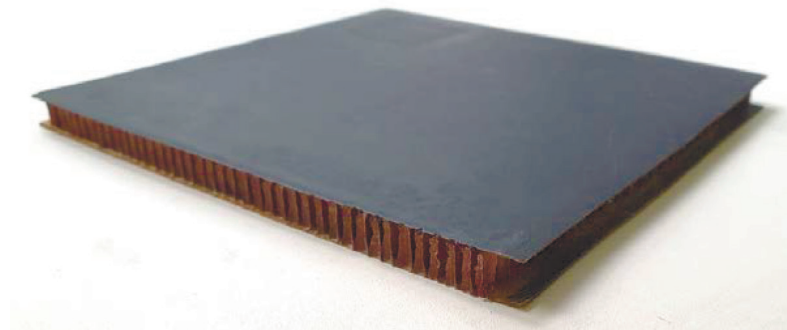


Рис. 2. Контрольный образец сотовой панели с обшивкой из стеклопластика и сотовым наполнителем из вощеной бумаги.

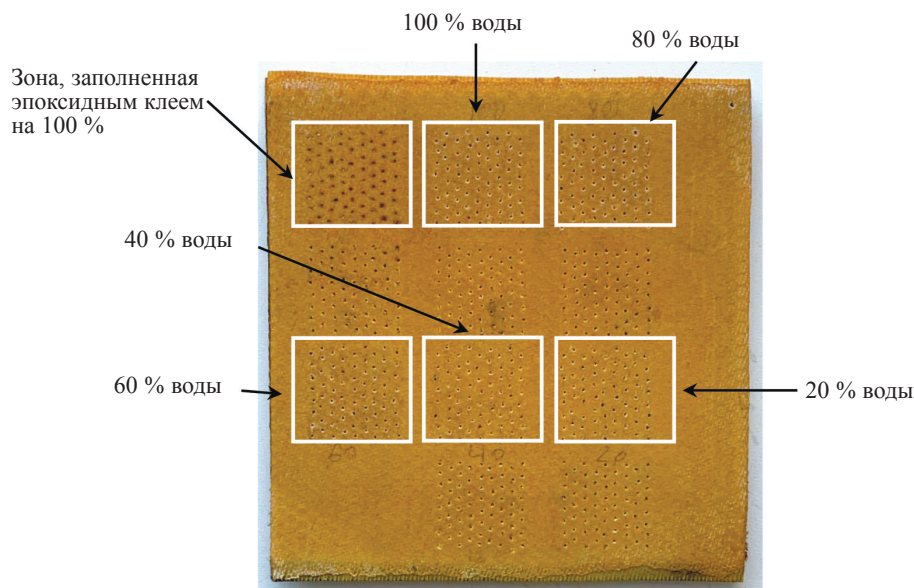


Рис. 3. Обратная поверхность контрольного образца с дефектными зонами.

На обратной стороне сотовой панели в обшивке были проделаны отверстия, через которые в ячейки сот вводили воду. Всего было выделено шесть зон, каждая из которых включала 72 ячейки; 5 зон были заполнены водой на 20, 40, 60, 80 и 100 %, а одна зона была заполнена на 100 % эпоксидной смолой, что имитировало соответствующий производственный дефект. Воду и эпоксидную смолу вводили с помощью шприца в каждую ячейку отдельно. Обратная поверхность образца показана на рис. 3. После наполнения ячеек сот отверстия на задней поверхности образца были закрыты клейкой лентой.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сотовую панель контролировали в односторонней процедуре ТК со стороны поверхности, окрашенной в черный цвет. Применили 2 схемы контроля: 1) «снизу», когда вода находилась в контакте с обшивкой; 2) «сверху», когда вода в соответствующих зонах не касалась внутренней поверхности обшивки (контроль через воздух). Перед контролем по второй схеме образец выдерживали 12 ч для того, чтобы вода опустилась на дно ячеек сот. Следует заметить, что реальное распределение воды в ячейках, например, заполненных водой на 20 %, могло отличаться от ожидаемого за счет действия сил поверхностного натяжения.

Экспериментальная установка показана на рис. 4. Для нагрева использовали тепловой дефектоскоп с оптическим нагревателем мощностью 1 кВт. Одновременно с нагревом выполняли регистрацию термограмм с частотой 10 Гц с помощью тепловизионного модуля FLIR A325 SC.

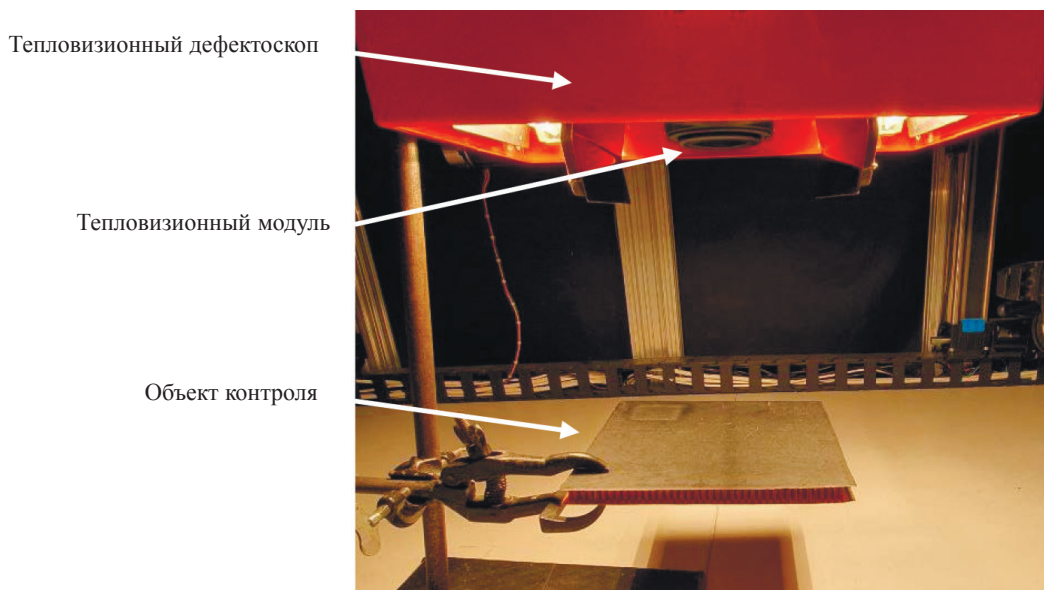


Рис. 4. Тепловой контроль воды в сотах по схеме «сверху».

На рис. 5а приведена термограмма, полученная при контроле образца по схеме «снизу». Квадратами выделены зоны, для которых на рис. 5б приведены графики изменения средней температуры. На рис. 5в в увеличении показан участок графиков рис. 5б, в котором видно различие профилей температуры для зон с различным количеством воды. Температурные различия между зонами с различным содержанием воды обусловлены различной тепловой инерцией этих зон и сохраняются в течение значительного времени на пологих участках соответствующих температурных профилей. Заметим, что для областей с содержанием воды 60, 80 и 100 % температуры были близки, испытывая определенное насыщение.

На рис. 6 приведены результаты ТК по схеме «сверху». Различия температурных профилей в этом случае оказались близкими к наблюдавшимся при контроле «снизу», несмотря на наличие воздушных зазоров. Это объясняется тем, что при длительных временах наблюдения пологие участки температурных профилей поверхностных температур определяются тепловой инерцией ячеек в целом, т.е. включая воду через воздушный зазор. Заметим, что при малых временах наблюдения (см. участки резкого спада температуры на рис. 5б и 6б) поведение температурных кривых определяется теплофизическими свойствами и толщиной обшивки, а также толщиной воды, прилегающей к обшивке.

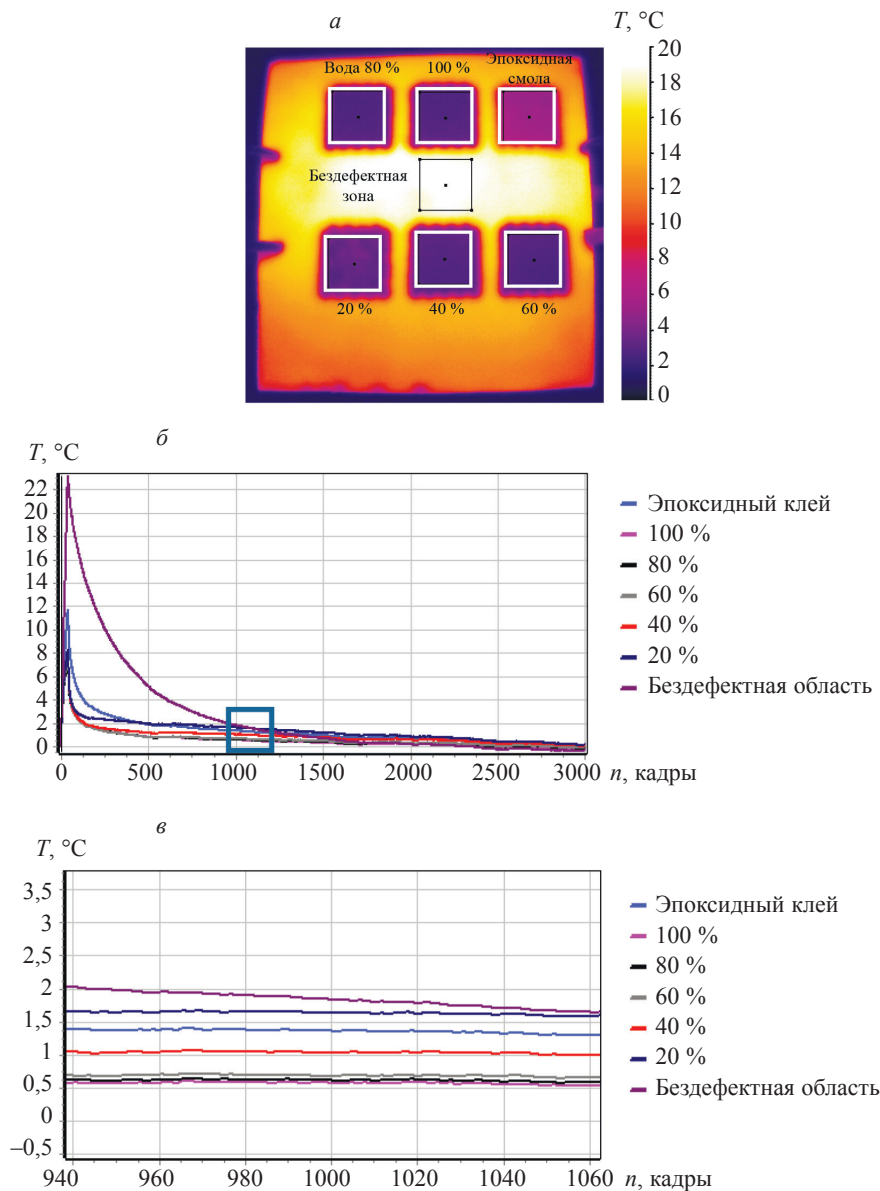


Рис. 5. Результаты ТК воды в контрольной сотовой панели по схеме «снизу»: термограмма на 10-й секунде контроля (а); графики изменения средних температур в дефектных зонах (б); графики температуры в зоне, выделенной на рис. 5б, (в).

4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ

Для автоматизированного определения количества воды в ячейках сот был использован программный модуль THERMO_NN (НИ ТПУ) [9]. Обучение искусственной НС проводили с использованием алгоритма наименьшей среднеквадратичной ошибки. Согласно ранее предложенной методике, перед применением алгоритмов дефектометрии на базе искусственных НС целесообразна обработка данных методом термографической реконструкции сигнала (Thermographic Signal Reconstruction — TSR). Такой подход позволяет «разделить» используемые для обучения данные, что обеспечивает низкий процент ошибок при применении обученной НС на конкретной серии экспериментов. Недостатком подхода является ориентация искусственных НС на распознавание преимущественно однотипных данных. Иными словами, даже небольшие изменения условий проведения эксперимента приводят к существенным ошибкам в результатах автоматизированной обработки данных. В рамках предлагаемого алгоритма в качестве предварительной обработки результатов ТК применено простое вычитание первого (фонового) кадра, что позволило подчер-

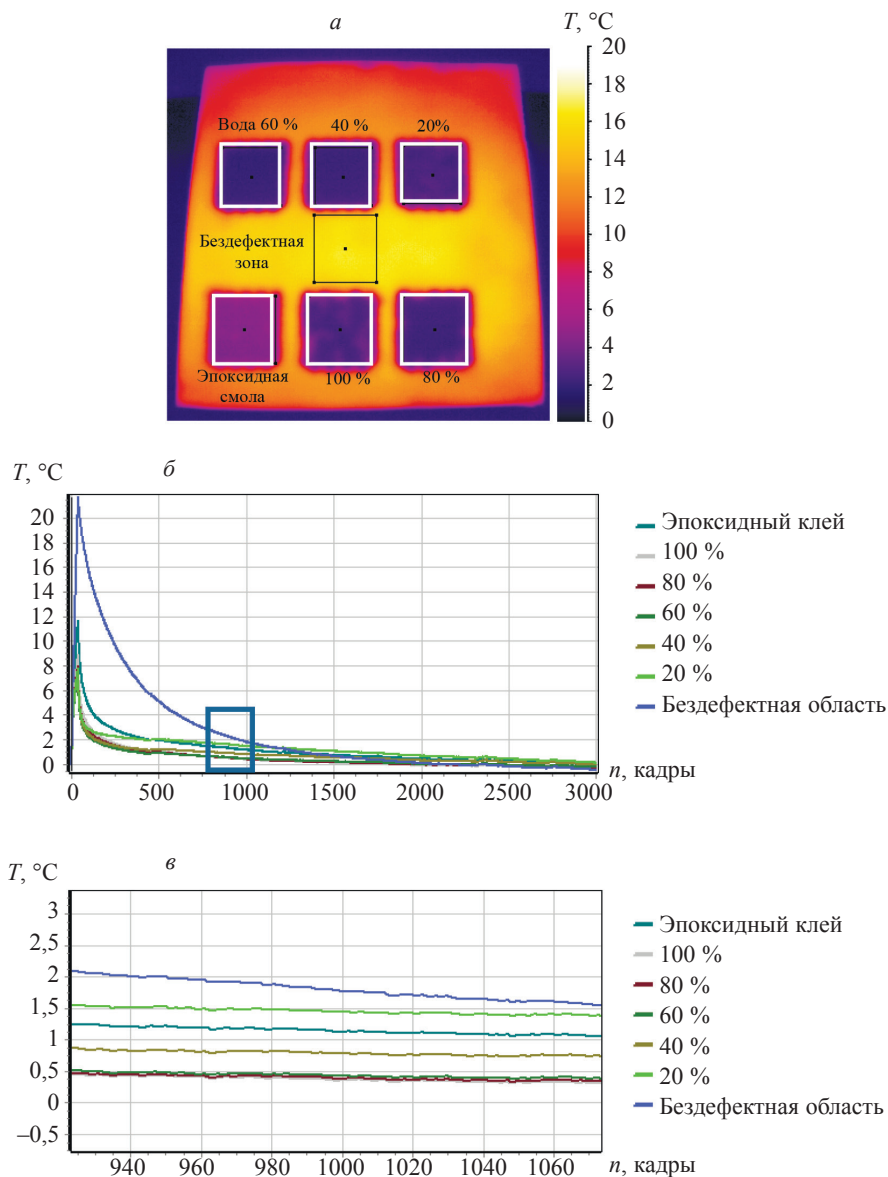


Рис. 6. Результаты ТК воды в контрольной сотовой панели по схеме «сверху» (через воздух): термограмма на 10-й секунде контроля (а); графики изменения средних температур в дефектных зонах (б); графики температуры в зоне, выделенной на рис. 6б, (в).

кнуть различия температурных профилей в зонах с различным содержанием воды при ТК по схемам как «снизу», так и «сверху» (см. рис. 5в и 6в).

Данные для обучения искусственной НС были получены в зонах, расположенных по углам и в центральных точках отдельных дефектных отметок (см. рис. 7а и 7в) путем анализа последовательностей термограмм, полученных при контроле воды по схемам «снизу» и «сверху». Таким образом, при обучении НС в каждой дефектной отметке были использованы данные из пяти различных зон с 400—450 пикселями в каждой. Соответственно, для каждой дефектной отметки количество кривых, участвующих в обучении, составляло около 2200, что при 3000 точек в каждой кривой по времени обеспечивало 6 600 000 значений, которые были использованы для обучения искусственной НС с целью определения параметров одной дефектной отметки. Целями обучения являлось количество воды, причем для ячеек, заполненных водой на 100 %, соответствующей целью являлось значение 1, для 20 % — 0,2 и т.д. Для зоны с ячейками, заполненными эпоксидной смолой, целью обучения было значение 1,2.

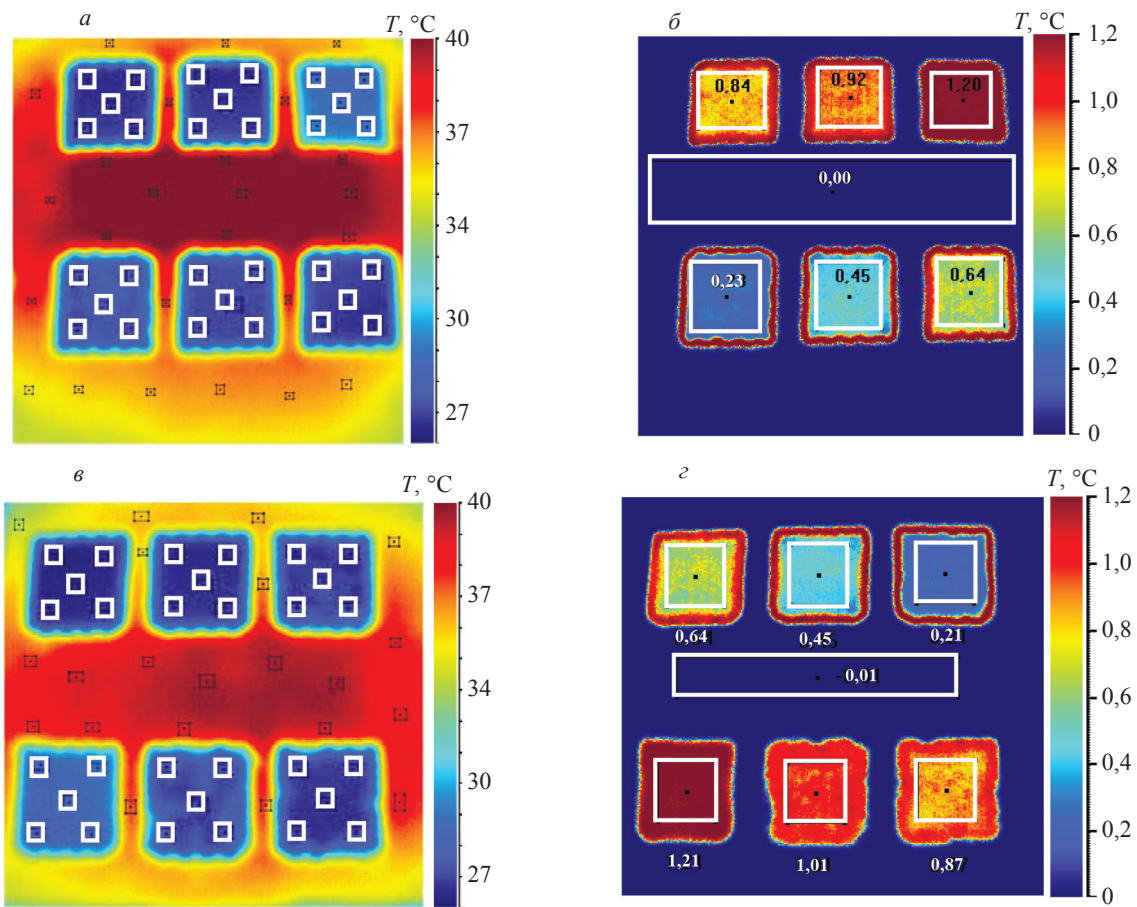


Рис. 7. Результаты автоматизированного определения содержания воды в сотовых панелях: термограмма на 10-й секунде контроля, показаны зоны, использованные для обучения НС (схема контроля «снизу») (а); карта содержания воды (контроль «снизу») (б); термограмма на 10-й секунде контроля, показаны зоны, использованные для обучения НС (схема контроля «сверху») (в); карта содержания воды (контроль «сверху») (г).

На рис. 7б и 7г приведены карты дефектов, полученные с помощью искусственной НС. Цвет каждой из дефектных зон, а также бездефектной зоны, соответствует количеству воды согласно приведенной шкале (в принятых условных единицах).

Таблица 1

Результаты автоматизированного определения количества воды в сотовой панели

Истинное наполнение	Оценка наполнения ячеек сот						Бездефектные зоны
	Эпоксидная смола 100 %	Вода, %					
		100	80	60	40	20	
НС	1,2	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0
Контроль по схеме «снизу» (вода в контакте с внутренней стороной обшивки)							
Оценка цели по экспериментальным данным	1,20	0,92	0,84	0,64	0,45	0,23	0
Величина ошибки, %	0	8	5	7	13	15	0
Контроль по схеме «сверху» (вода не контактирует с внутренней стороной обшивки)							
Оценка цели по экспериментальным данным	1,21	1,01	0,87	0,64	0,45	0,21	0,01
Величина ошибки, %	1	1	9	7	13	5	0

В табл. 1 приведены ошибки определения количества воды в сотах при различных схемах ТК. Видно, что наибольшая погрешность (13 и 15 %) относится к участкам панели, заполненным

водой на 40 и 20 % в схеме контроля «снизу». Для схемы испытаний «сверху» наибольшая величина ошибки составила 13 и 9 % для участков с заполнением водой на 40 и 80 %.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активный ТК целесообразен для выявления дефектов в сотовых панелях благодаря высокой производительности испытаний и возможности идентификации характерных видов дефектов. Проведенные ранее исследования продемонстрировали ошибку определения количества воды при полном заполнении сот на уровне около 10 % от объема сот. Результаты настоящих исследований подтверждают возможность автоматизированного определения количества воды в сотах с помощью алгоритма, работающего на базе искусственной НС, включая ситуации, где между водой и обшивкой имеется воздушный зазор, и, следовательно, применение контактного ультразвукового контроля неэффективно. При этом величина ошибки оценки влагосодержания (по крайней мере в лабораторных условиях) не превысила 15 %, что приемлемо с практической точки зрения. Предложенная процедура активного ТК может быть реализована в условиях лаборатории, ангара и предположительно на стоянке самолета в качестве дополнительной к пассивной диагностике. Применение разработанного алгоритма для определения количества воды при частичном заполнении ячеек вертикально расположенных панелей потребует дополнительного обучения искусственной НС и является предметом дальнейших исследований.

Настоящее исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда №22-29-01469.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.aviationunion.ru/media/news/25824>
2. *Ibarra-Castanedo C., Brault L., Genest M., Farley V., Maldague X.P.V.* Detection and characterization of water ingress in honeycomb structures by passive and active infrared thermography using a high resolution camera / Conference: 2012 Quantitative InfraRed Thermography. 2012. DOI: 10.21611/qirt.2012.278
3. *Чулков А.О., Гаверина Л., Прадере С. Батсале Ж.-С., Вавилов В.П.* Обнаружение воды в сотовых композиционных конструкциях методом терагерцовой термографии // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 72—76.
4. *Вавилов В.П., Нестерук Д.А.* Способ тепловизионного контроля воды в сотовых панелях эксплуатируемых самолетов / Патент РФ № 2284515. 2005.
5. *Нестерук Д.А.* Тепловизионный контроль воды в авиационных сотовых панелях в процессе эксплуатации самолетов / Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: Томский политехнический университет, 2005.
6. *Пань Янян.* Количественная оценка влагосодержания в композиционных сотовых панелях эксплуатируемых самолётов методом инфракрасной термографии / Дисс. ... канд. техн. наук. Томск: Томский политехнический университет, 2018.
7. <https://www.interfax-russia.ru/siberia/news/uchenye-tomskogo-politeha-usovershenstvovali-defektoskop-dlya-aviacii>
8. *Chulkov A.O., Vavilov V.P., Shagdyrov B.I., Klodov D.Yu.* Automated detection and characterization of defects in composite-metal structures by using active infrared thermography // Journal of Nondestructive Evaluation. 2023. V. 42 (1). DOI: 10.1007/s10921-023-00929-x
9. *Чулков А.О., Нестерук Д.А., Вавилов В.П.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ “THERMO_NN” №2020619186. 2020.