

Р.Ш. Хабибулин  
ВАЛИДНОСТЬ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ  
ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОЧАГА ПОЖАРА  
НА РЕЗЕРВУАР С ГОРЮЧЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

В работе рассмотрены вопросы оценки валидности компьютерной модели по определению температурного поля горизонтального резервуара с горючей жидкостью в условиях воздействия тепловых потоков пожара. Приведены результаты численных расчётов по разработанной модели и проведено их сравнение с имеющимися в литературных источниках данными натурных огневых экспериментов, сделаны выводы об их адекватности.

Ключевые слова: компьютерная модель, резервуар, нефтепродукт, очаг пожара, валидность, температурное поле, горючая жидкость, метод конечных элементов.

Рост потребления энергоресурсов, в том числе нефтепродуктов и других горючих жидкостей, требует решения актуальных научно-практических задач обеспечения пожарной безопасности объектов их хранения и транспортировки. Одной из таких задач является разработка компьютерных моделей для проведения расчётов позволяющих определять предельное тепловое нагружение конструкций резервуаров при пожаре, обосновывать выбор средств их тепло- и огнезащиты.

Практическое использование таких моделей требует оценки их валидности, т.е. адекватности результатов расчётов и экспериментальных данных.

Для оценки валидности разработанной в программно-математическом комплексе *Femlab* компьютерной модели теплового воздействия очага пожара на резервуар с горючей жидкостью необходимо:

- провести численные расчёты с использованием модели с учётом условий, определённых в экспериментальных исследованиях;
- провести сравнения расчётных и экспериментальных данных, сделать выводы о валидности расчётной модели.

Проведение численных расчётов осуществлялось в следующей последовательности:

- построение трёхмерной конечноэлементной модели резервуара в виде горизонтальной цилиндрической оболочки;
- задание параметров модели в виде констант и расчетных зависимостей;
- задание условий однозначности;
- задание временных параметров расчётов;
- проведение расчётов;
- визуализация и оценка результатов моделирования.

Для проведения расчётов нестационарной теплопроводности в стенке конструкции резервуара выбран метод конечных элементов (МКЭ), т.к. он обладает наиболее универсальными вычислительными алгоритмами для решения нестационарных задач [1].

Ниже приводятся основные исходные параметры для проведения численных расчетов.

Параметры материалов конструкции резервуаров:

- сталь: плотность  $\rho = 7800 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ; теплоемкость  $c = 500 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; теплопроводность  $\lambda = 45 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  [2];

- стеклопластик: плотность  $\rho = 2300 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ; теплоемкость  $c = 2100 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ; теплопроводность  $\lambda = 0,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$  [3].

Теплофизические параметры воды, дизельного топлива в зависимости от температуры определены на основе обработки табличных данных [2, 4, 5]. Полиномиальные зависимости показаны в табл. 1, 2. Степень черноты поверхности резервуара при расчётах составляла 0,9 [6].

Таблица 1

Зависимость теплофизических свойств воды от температуры

Характеристика	Зависимость
Плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$-1,078 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 + 1,549 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 - 8,596 \cdot 10^{-2} \cdot t^2 + 21,106 \cdot t - 909,678$
Теплопроводность, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$-1,127 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 8,543 \cdot 10^{-3} \cdot t - 9,355 \cdot 10^{-1}$
Удельная теплоемкость, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$9,324 \cdot 10^{-7} \cdot t^4 - 1,334 \cdot 10^{-3} \cdot t^3 + 7,252 \cdot 10^{-1} \cdot t^2 - 1,761 \cdot 10^2 \cdot t + 2,023 \cdot 10^4$

$t$  – температура в градусах Кельвина

Таблица 2

Зависимость теплофизических свойств дизельного топлива от температуры

Характеристика	Зависимость
Плотность, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$	$-5,357 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 6,348 \cdot 10^{-1} \cdot t + 1,069 \cdot 10^3$
Теплопроводность, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$1,785 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 - 1,283 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,530$
Удельная теплоемкость, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	$5,245 \cdot t + 541,64$

Для проверки валидности разработанной математической модели при расчете температурного поля резервуара при частичном воздействии открытого пламени было проведено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными, полученными в работе [6].

В проведенных натурных экспериментах исследовалось температурное поле модели цистерны в виде горизонтальной цилиндрической ёмкости, наполовину заполненной водой (диаметр  $D = 0,96 \text{ м}$ ; длина  $L = 2,9 \text{ м}$ ; толщина стенки  $\delta = 0,007 \text{ м}$ ). Температура пламени газовых горелок, воздействующего на боковую поверхность конструкции, определена экспериментально и составляла  $870 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Трёхмерная конечноэлементная конструкция модели резервуара в виде горизонтальной цилиндрической оболочки представлена на рис. 1. Результаты расчетов температурного поля корпуса цистерны показаны на рис. 2. Сравнительные численные и экспериментальные данные по динамике процесса нагрева корпуса ёмкости, температуры жидкости и паровоздушной фазы приведены на рис. 3 и 4.

В целом имеет место удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. Начиная с 400-й секунды теплового воздействия средняя относительная погрешность по несмоченной стенке составляет 6,0 %, по смоченной – 7,6 %, по паровоздушной смеси – 3,4 %, по жидкости – 5,9 %.

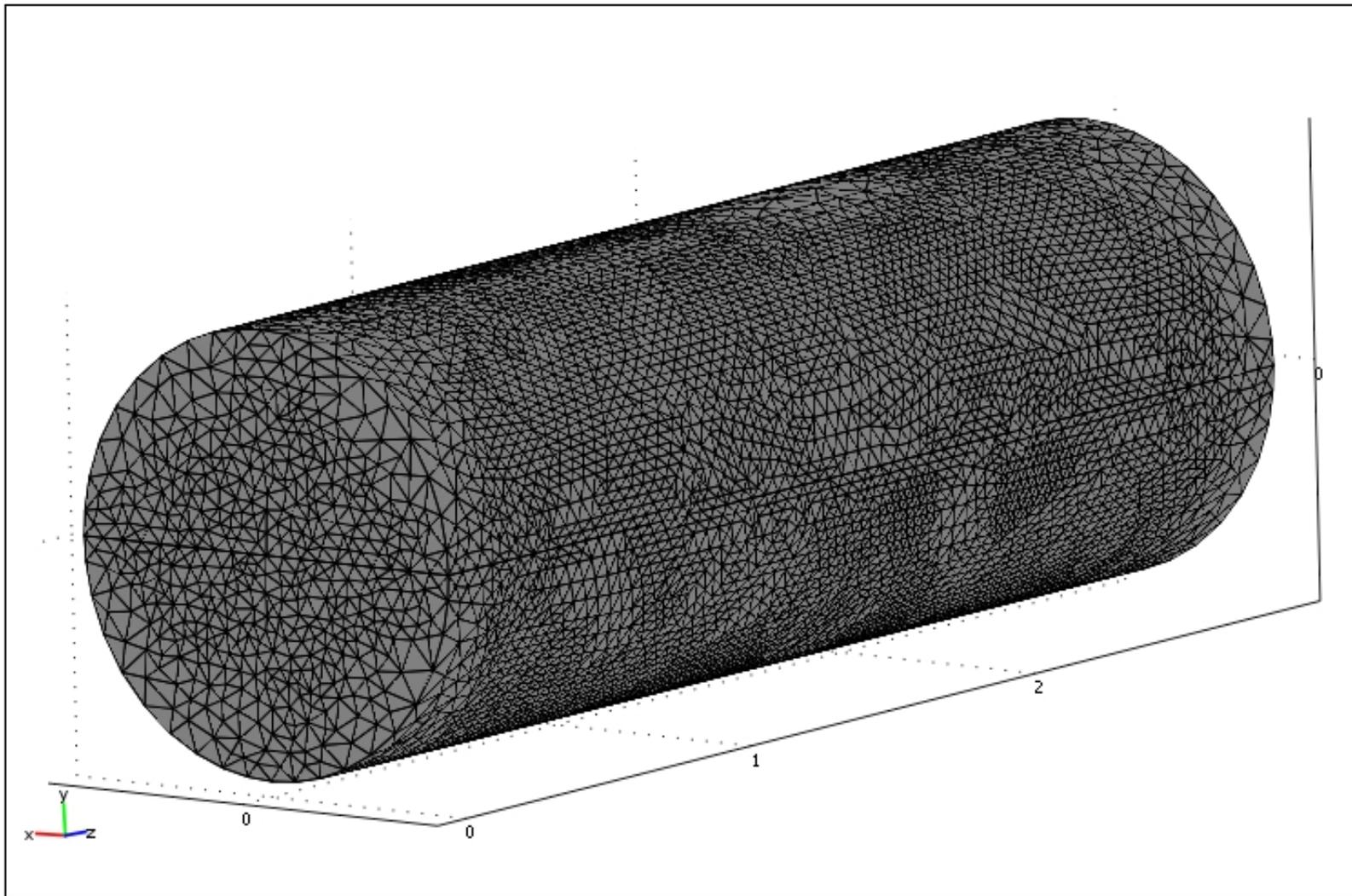


Рис. 1. Конечнoэлементная конструкция модели резервуара

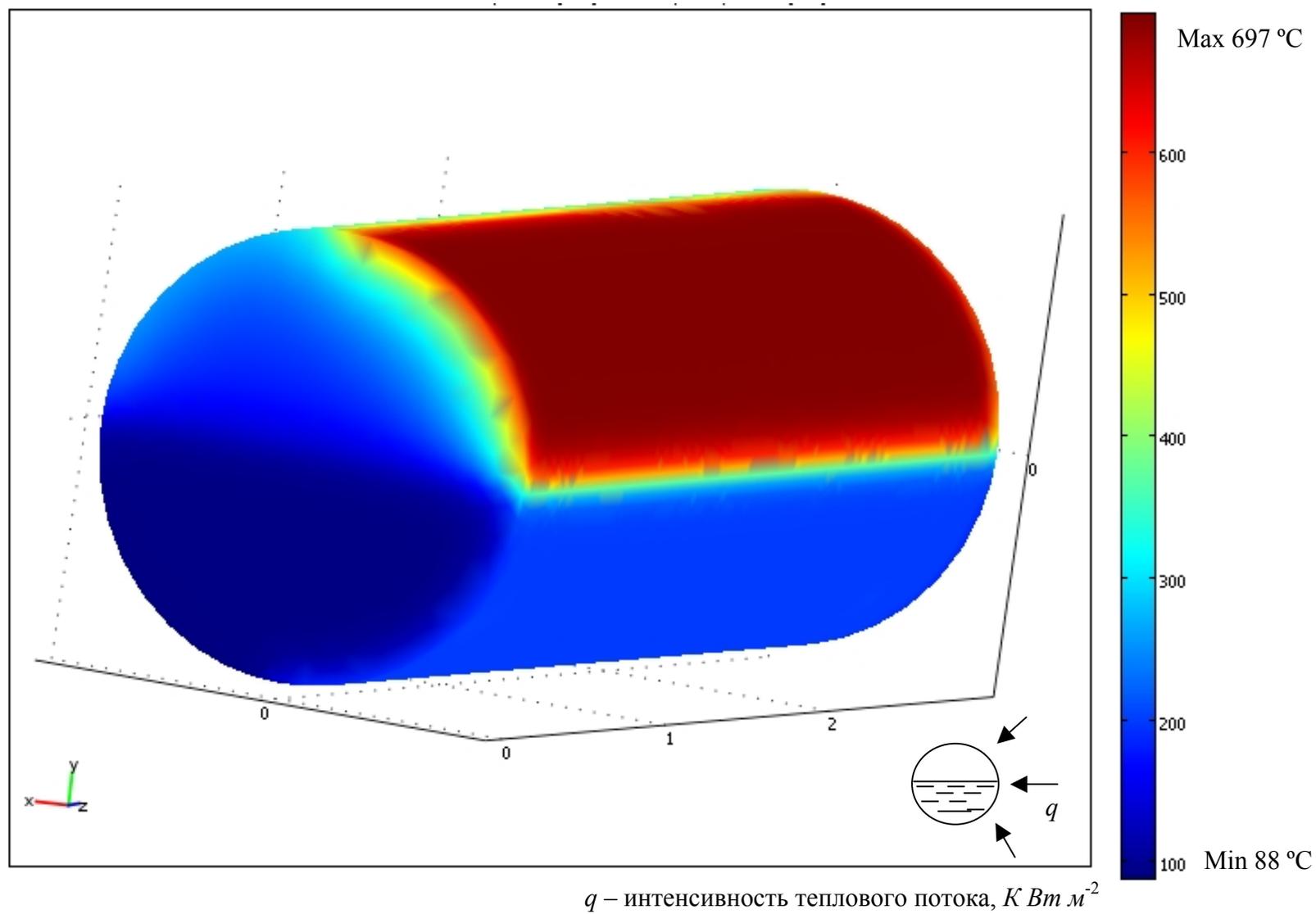


Рис. 2. Температурное поле корпуса резервуара при воздействии открытого пламени (1400 с от начала теплового воздействия)

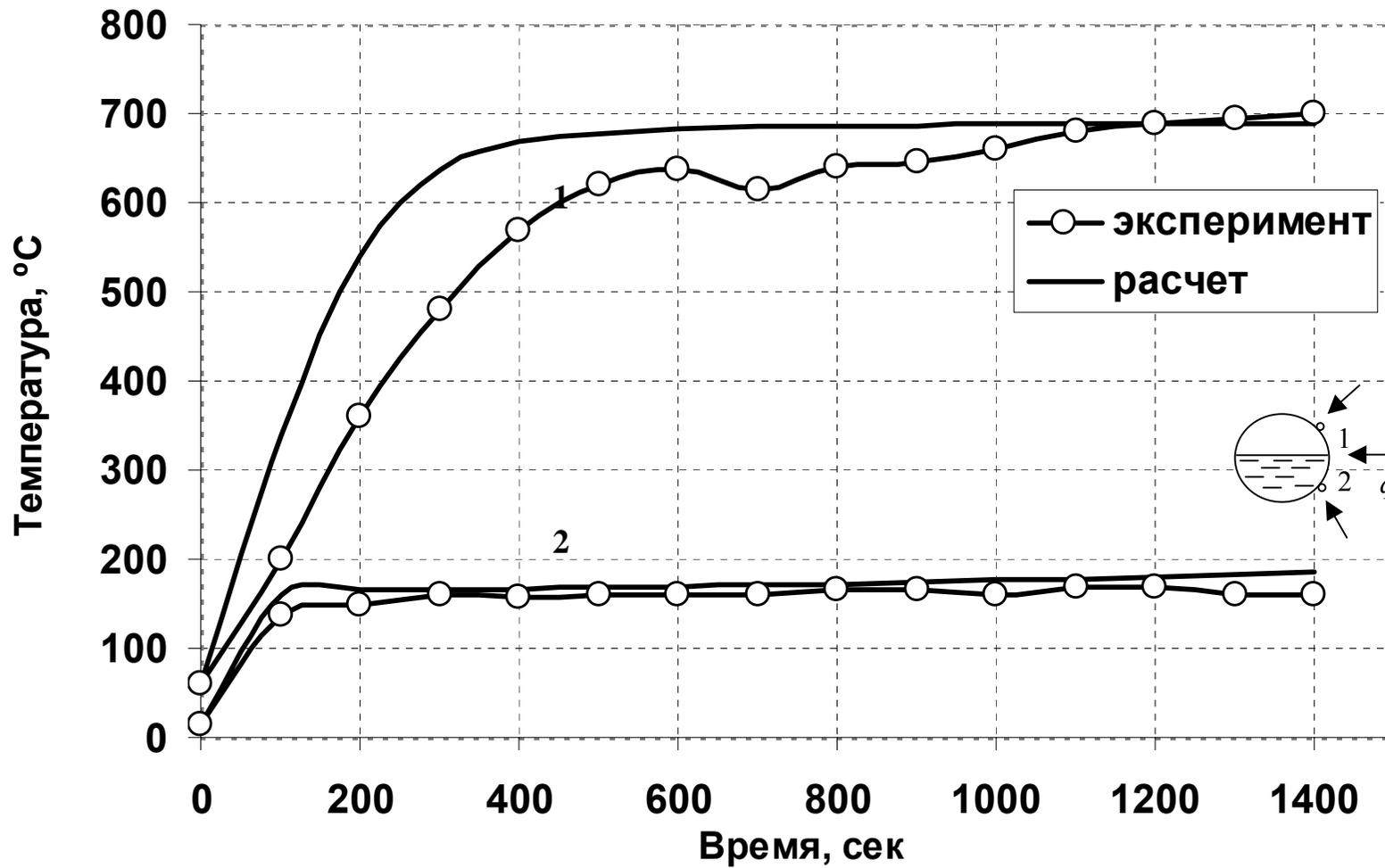


Рис. 3. Сравнительные расчетные и экспериментальные данные по изменениям температуры стенки резервуара при воздействии открытого пламени

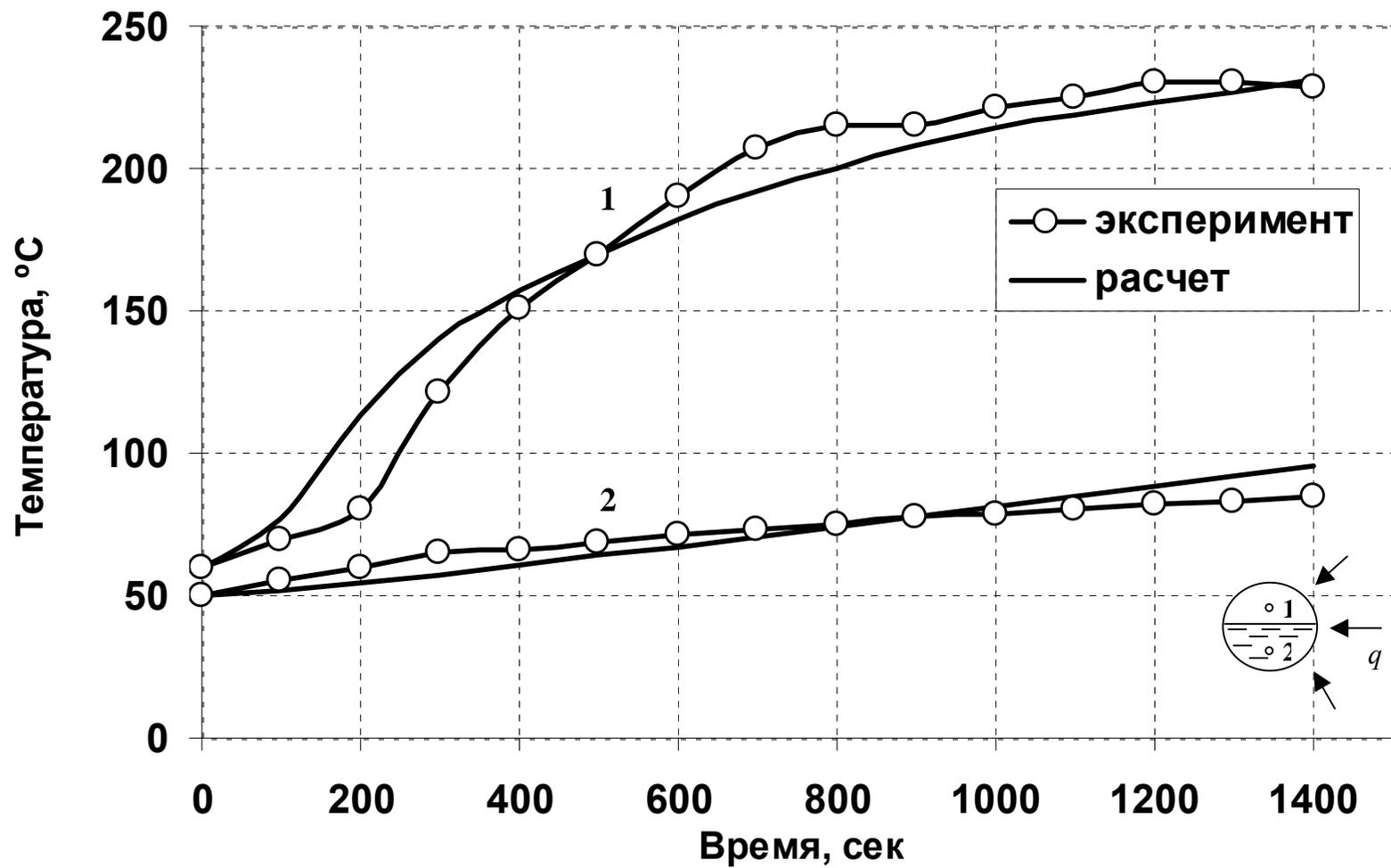


Рис. 4. Сравнительные расчетные и экспериментальные данные по изменениям температуры жидкости и паровоздушной смеси в резервуаре при воздействии открытого пламени

Несколько завышенные расчетные значения, по сравнению с экспериментом, можно объяснить неустойчивостью интенсивности теплового потока модельного очага пожара с учётом влияния факторов окружающей среды в условиях натурального эксперимента.

Для проверки валидности разработанной математической модели при расчете температурного поля корпуса резервуара в случае полного охвата пламенем было проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными в работе [7]. В проведенных натуральных экспериментах исследовалось температурное поле стеклопластикового цилиндрического бака, частично и полностью заполненного дизельным топливом (диаметр  $D = 0,41$  м; длина  $L = 0,46$  м; толщина стенки  $\delta = 0,013$  м). Температура пламени дизельного топлива при полном охвате им поверхности конструкции определена экспериментально и составляла  $750$  °С.

Аналогично, как и в предыдущем расчете, разработана конечноэлементная конструкция модели бака. Результаты расчетов температурного поля бака показаны на рис. 5 и 6. Сравнительные численные и экспериментальные данные по динамике процесса нагрева стенки бака, температуры жидкости и паровоздушной фазы (при степени заполнения 0,25) приведены на рис. 7 и 8.

В целом имеет место удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных. За всё время теплового воздействия средняя относительная погрешность по температуре стенки составляет 3,5 %, по паровоздушной смеси – 12,3 %, по жидкости – 7,7 %.

Модель в достаточной степени адекватно прогнозирует динамику температурного поля корпуса резервуара, среднеобъемных температур жидкости и паровоздушной фазы в случае непосредственного воздействия пламени пожара.

#### Литература

1. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов. – 4-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
3. Трофимов Н.Н., Канович М.З., Карташов Э.М. и др. Физика композиционных материалов. – М.: Мир, 2005. – 450 с.
4. Гуреев А.А., Азев В.С., Камфер Г.М. Топливо для дизелей. Свойства и применение. – М.: Химия, 1993. – 336 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1963. – 721 с.
6. Birk A.M., Poirier D. “Tank-Car Thermal Protection Defect Assessment: Fire Tests of 500-Gallon Tanks with Thermal Protection Defects”, Transportation development centre, TP14366E, March 2005.
7. US Coast Guard Office of Research and Development. Fire testing of independent fiberglass fuel tanks with and without protective coating of fire retardant paint, May 8, 1972. Report AD 740783. Washington, DC.

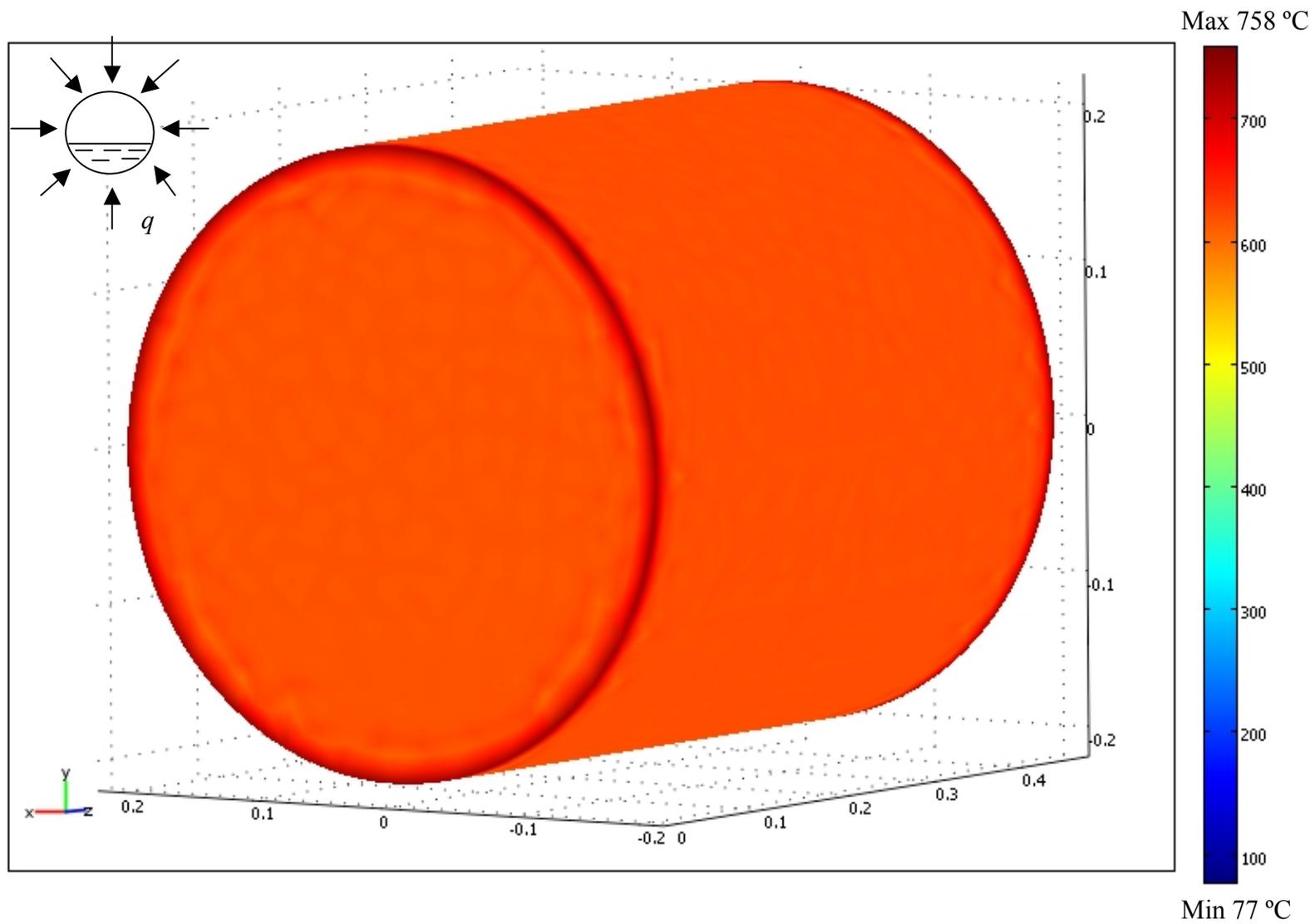


Рис. 5. Температурное поле бака при воздействии открытого пламени (330 с от начала теплового воздействия)

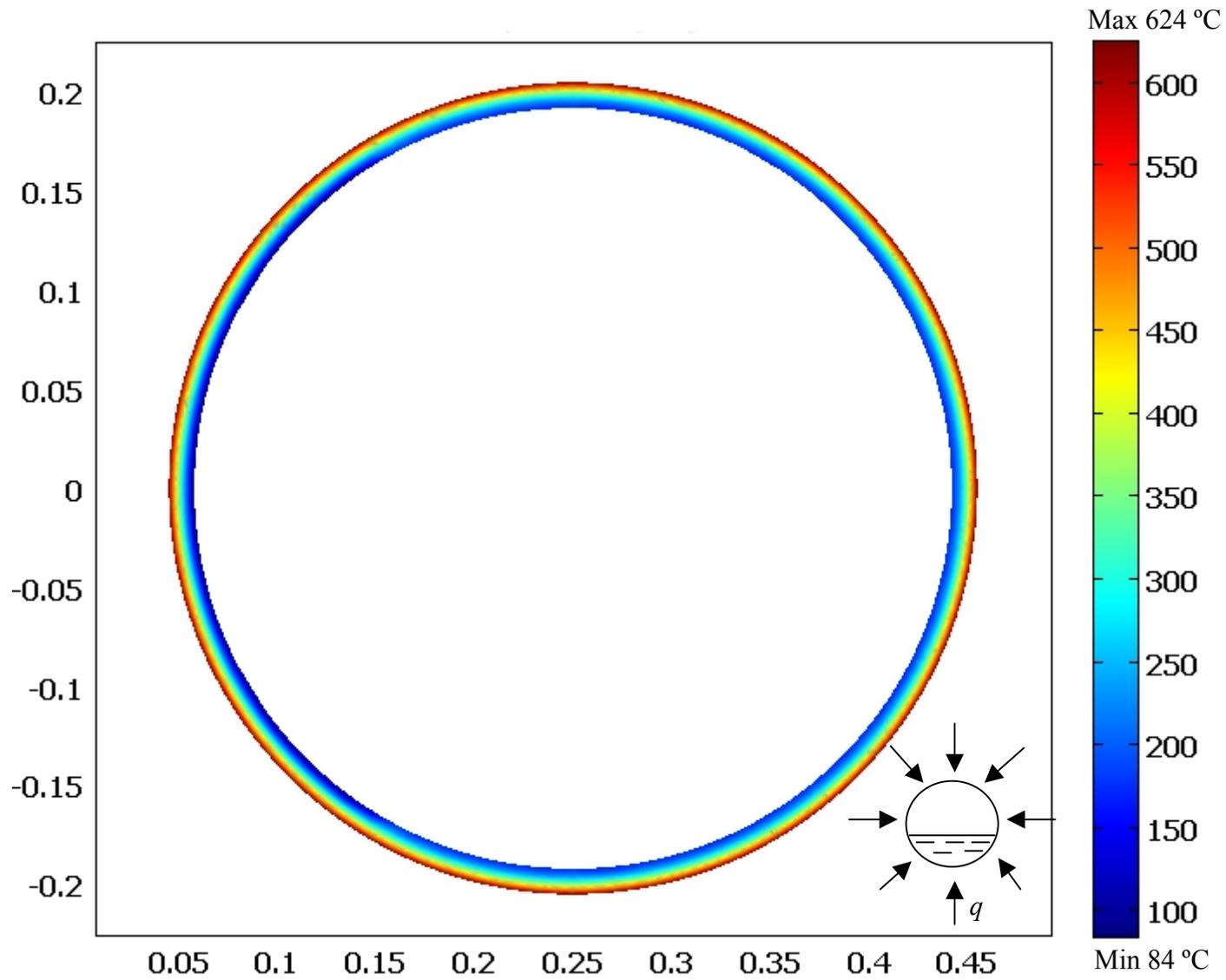


Рис. 6. Температурное поле поперечного сечения бака при воздействии открытого пламени (330 с от начала теплового воздействия)

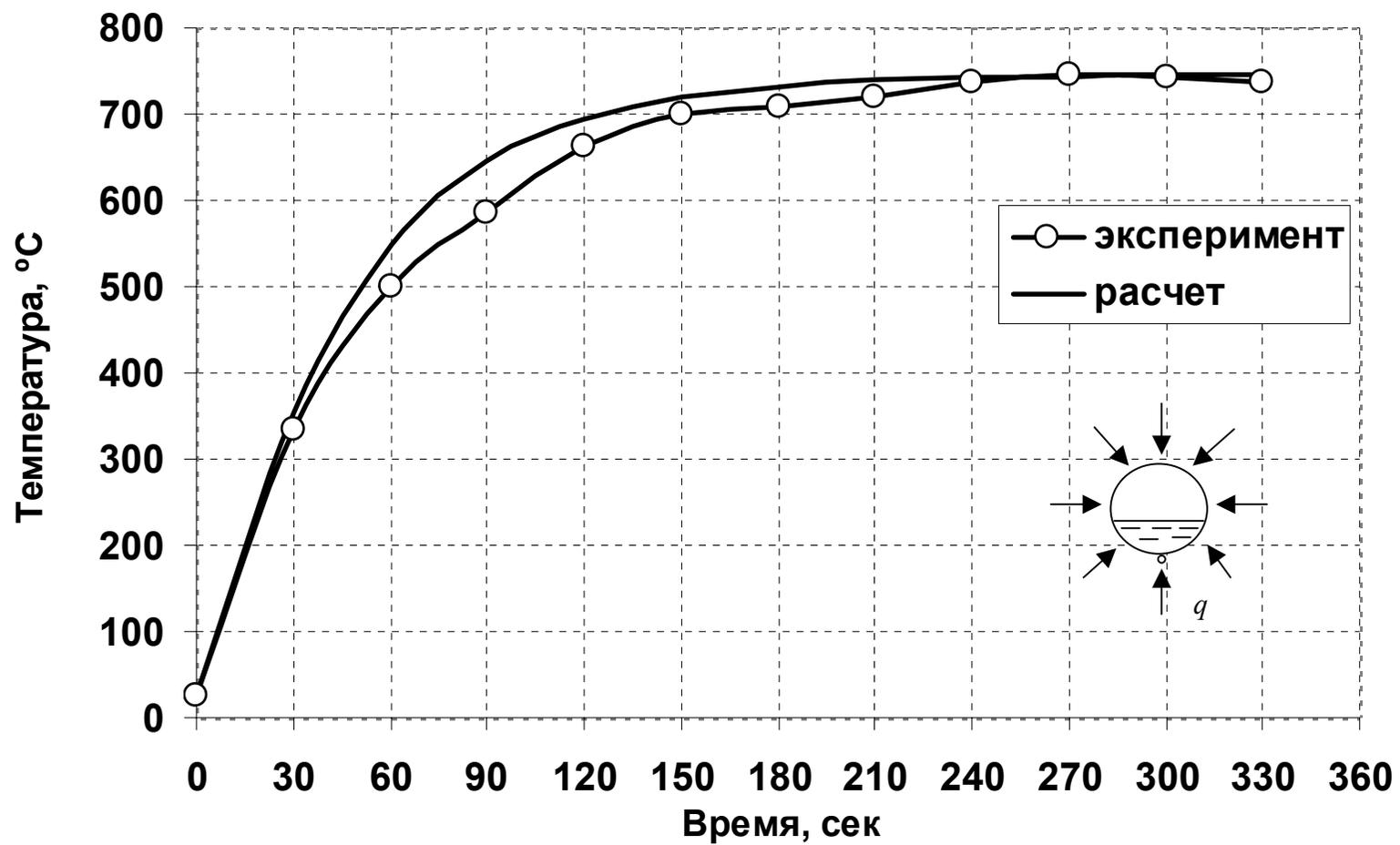


Рис. 7. Сравнительные расчетные и экспериментальные данные по изменениям температуры стенки бака при воздействии открытого пламени

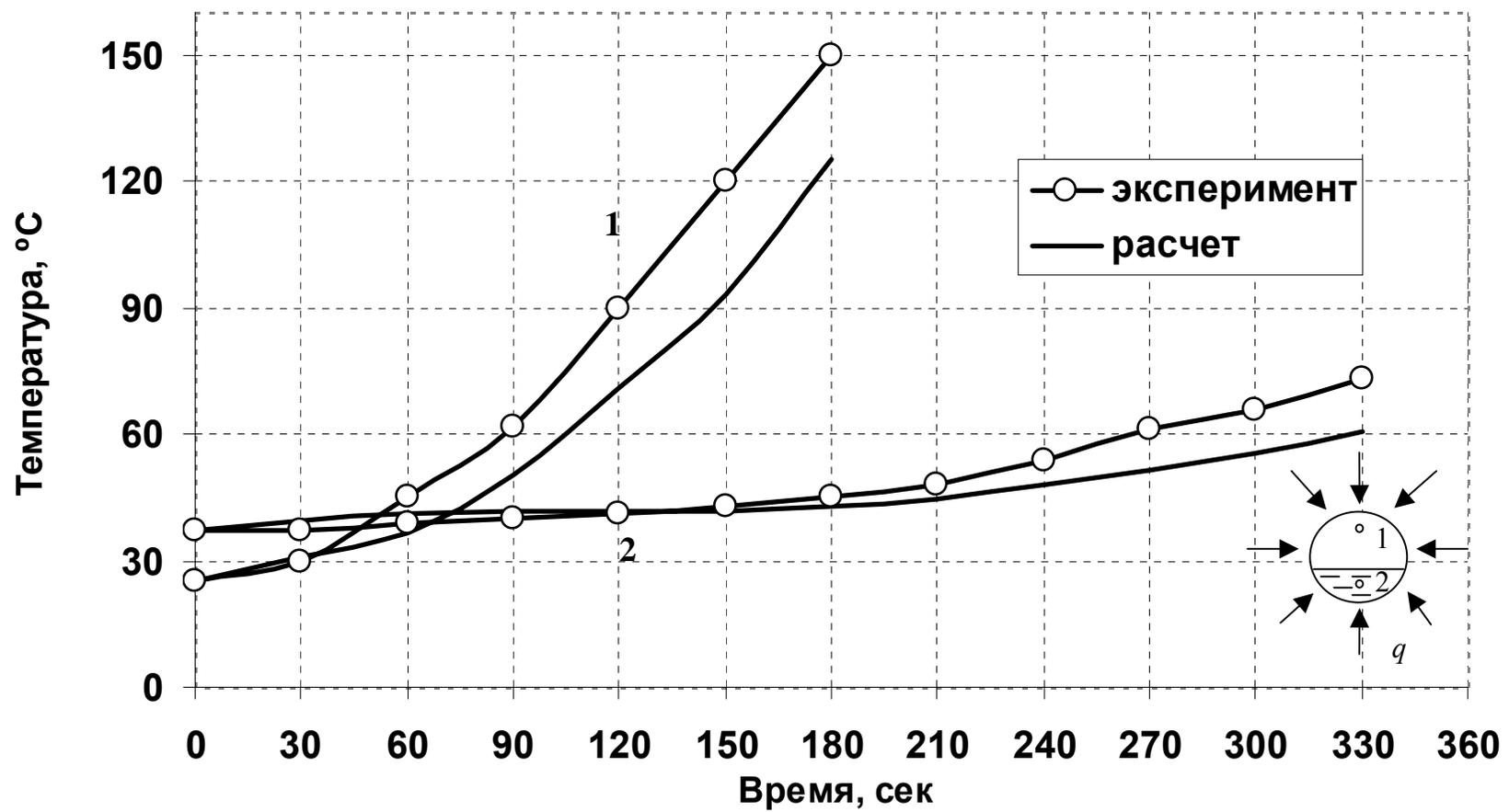


Рис. 8. Сравнительные расчетные и экспериментальные данные по изменениям температуры жидкости и паровоздушной смеси в баке при воздействии открытого пламени