

3. **Консолидированный** финансовый отчет о финансовом положении ОАО «РЖД» по состоянию на 31 декабря 2010 г. – URL : http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=32.

4. **Консолидированный** финансовый отчет о финансовом положении ОАО «РЖД» по состоянию

на 31 декабря 2011 г. – URL : http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=32.

5. **Консолидированный** финансовый отчет о финансовом положении ОАО «РЖД» по состоянию на 31 декабря 2012 г. – URL : http://ir.rzd.ru/static/public/ru?STRUCTURE_ID=32.

УДК 629.463.32

И. Г. Киселев, В. В. Галов, С. Б. Комиссаров

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК НА КОТЕЛ ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ЖИДКОГО ПЕКА

Представлена информация о каменноугольном пеке, перевозимом железнодорожным транспортом. Описано устройство вагона-цистерны для перевозки жидкого пека. Рассмотрена проблема разрушения котла вагона-цистерны вследствие циклического разогрева груза электрическими подогревателями. Показана зависимость основных показателей прочности стали от температуры. Приведены возможные пути предотвращения снижения прочностных характеристик котла. Представлены постановка и решение краевой задачи теплопроводности в частных производных с учетом и без учета эквивалентного коэффициента теплопроводности.

жидкий пек, вагон-цистерна, электронагреватель, предел текучести.

Введение

Условия эксплуатации вагонов-цистерн, оборудованных электрическими подогревателями, определяет специфику их повреждений, характер и особенности которых в настоящее время не отражены в нормативных документах.

Особенность конструкции таких вагонов-цистерн делает стоимость их ремонта достаточно высокой по сравнению с вагонами-цистернами универсальной конструкции (без системы разогрева).

Для минимизации мероприятий по поддержанию парка данного вида подвижного состава в рабочем состоянии требуется исследовать снижение тепловых нагрузок на котел цистерны, которые являются главной причиной выхода вагонов из строя.

1 Свойства перевозимого груза – каменноугольного пека

Каменноугольный пек – твердый продукт переработки каменноугольной смолы (выход 50–60 мас.%), используется в качестве компо-

нента для получения анодной массы и обожженных анодов, являющихся, в свою очередь, необходимыми составляющими производства алюминия. Плотность 1,2–1,3 г/см³, зольность – 0,2–0,3%. Не имеет определенных температур плавления и затвердевания; плавится в интервале, характеризуемом температурой размягчения. Различают каменноугольный пек среднетемпературный (с температурой размягчения 65–90 °С; с температурой вспышки 200–250 °С; выход летучих веществ, образующихся при термическом разложении, 53–63%) и высокотемпературный (с температурой размягчения 135–150 °С; с температурой вспышки 360–400 °С; выход летучих веществ, образующихся при термическом разложении, 43–54%). Повышение температуры размягчения достигается дистилляцией среднетемпературного пека с водяным паром или инертными газами и обработкой воздухом.

2 Подвижной состав для перевозки жидкого пека

Жидкий пек транспортируется в специализированных железнодорожных вагонах-

цистернах, оборудованных термоизоляцией котла и специальными электрическими нагревателями, обеспечивающими его перевозку в жидком состоянии при температуре окружающей среды до минус 30 °С, а также его разогрев на пунктах выгрузки [1].

Встроенные электрические подогреватели устанавливаются под котлом цистерны в нижней части воздушного зазора, образованного между котлом и кожухом электронагревателей.

Секции электронагревателей (рис. 1), устанавливаемые под котлом в нижней части воздушного зазора между котлом и кожухом электронагревателей в специальных нишах, легко снимаются [2].

Все электронагреватели цистерны разделены на три группы, каждая из которых тоже разделена на три подгруппы, соединенные между собой по схеме «звезда». Нагреватели каждой подгруппы соединены параллельно. Подключение электронагревателей цистерны по схеме «звезда» к сети промышленного переменного тока напряжением 380 В обеспечивает на фазе напряжение 720 В. Каждая группа электронагревателей имеет номинальную мощность 30 кВт. Суммарная мощность всех нагревателей составляет 90 кВт [3].

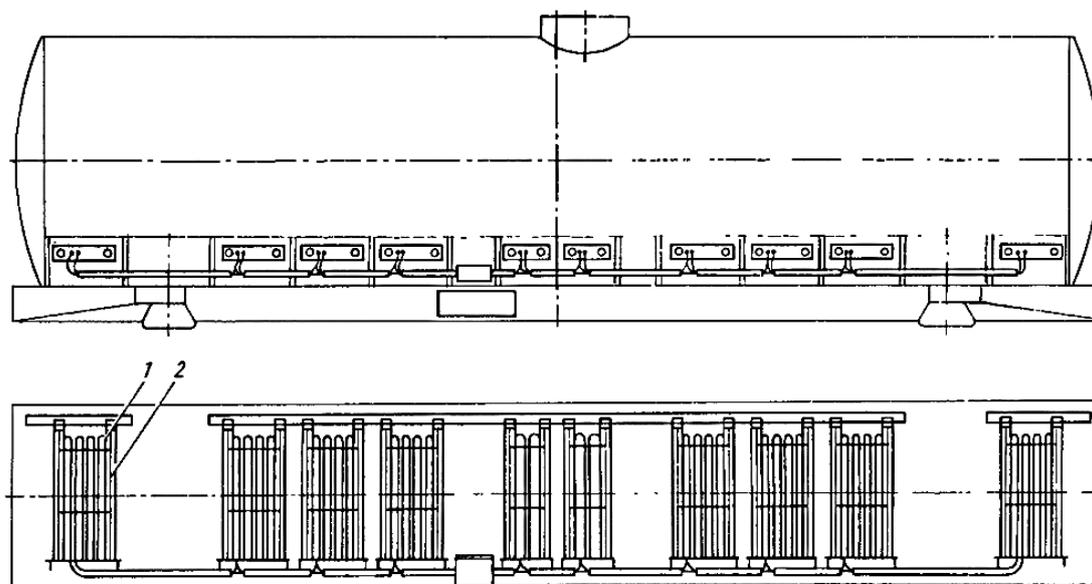


Рис. 1. Установка электронагревателей на цистерне для пека модели 15–1532:
1 – электрические нагреватели; 2 – съемные секции

3 Снижение прочностных характеристик котла цистерны вследствие перегрева

Котел вагона-цистерны для пека испытывает температурное воздействие от груза, загружаемого при температуре 300 °С и выгружаемого после разогрева нагревательными элементами с 500 °С [4]. Температура пека, перевозимого в течение 5 суток, сохраняется не ниже 180 °С (рис. 2).

Повышенные температуры снижают прочностные характеристики стали. С ростом температуры уменьшается значение предельных напряжений, под воздействием которых наблюдается переход упругого состояния металла в пластичное (предел текучести), т. е. снижается сопротивление пластической деформации.

Исследования показали зависимость от температуры основных показателей прочности стали 10 Г2 СА, применяемой для изготовления котлов вагонов-цистерн для пека, а

именно временного сопротивления σ_v и предела текучести $\sigma_{0,2}$ (рис. 3) [5].

4 Предотвращение снижения прочностных характеристик котла цистерны вследствие перегрева

Существует несколько вариантов снижения воздействия перегрева котла цистерны на его прочностные характеристики.

Одним из путей снижения воздействия перегрева является применение стали с повышенными значениями временного сопротивления и предела текучести для изготовления котлов цистерны для перевозки жидкого пека.

Однако это может привести к снижению показателей сопротивления, усталости материала, что неблагоприятно сказывается на сроке службы вагонов [5].

Другой путь снижения воздействия перегрева – решение задачи теплообмена при

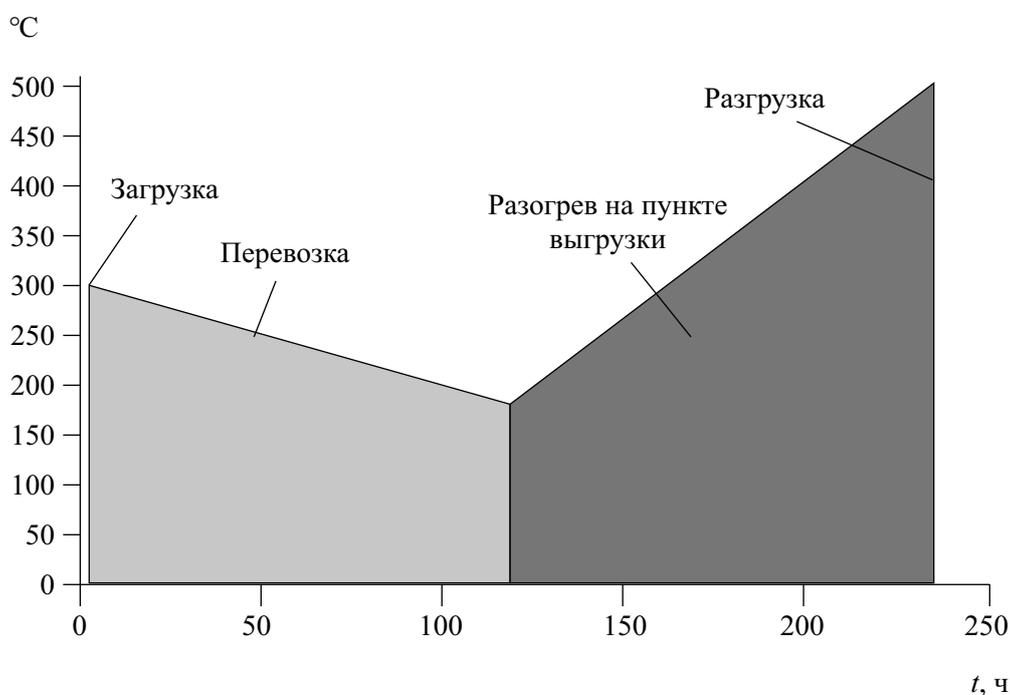


Рис. 2. Цикл разовой температурной нагрузки котла вагона-цистерны модели 15-1532 для жидкого пека

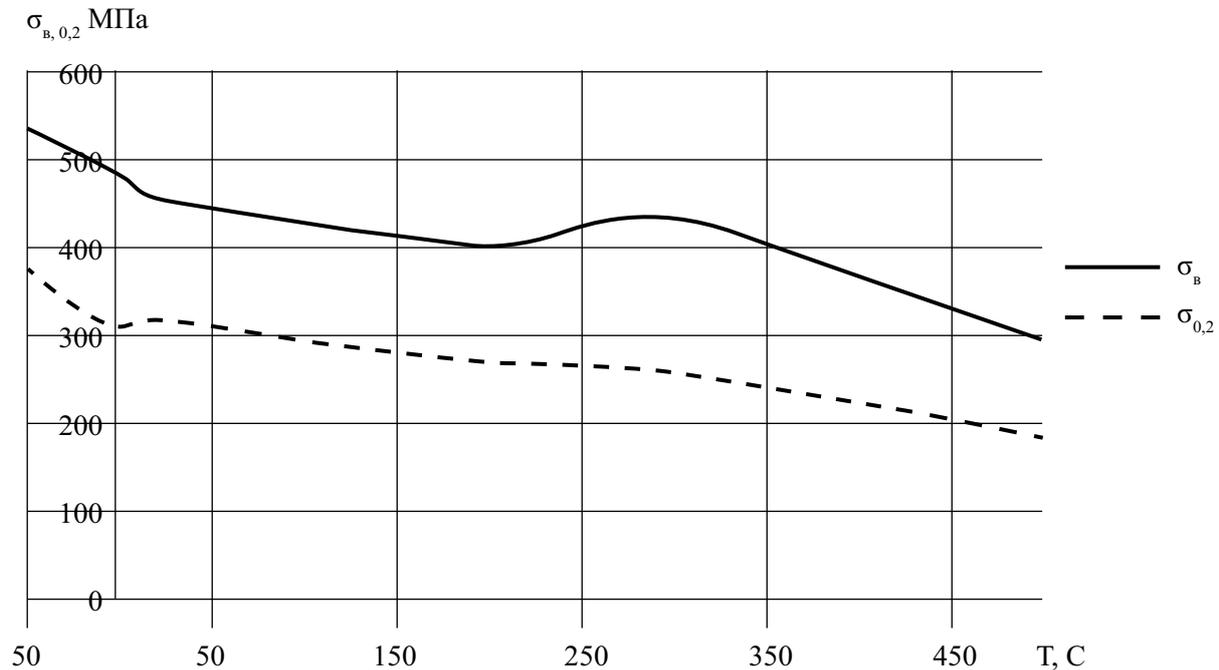


Рис. 3. Температурная зависимость временного сопротивления и предела текучести для стали 10 Г2 СА

разогреве жидкого пека в железнодорожной цистерне с целью снижения мощности электрических нагревателей.

Разогрев пека происходит за счет теплопереноса в среде двумя способами: за счет теплопроводности и конвекции.

Разогрев затвердевающего груза в неподвижной железнодорожной цистерне сопровождается только свободным движением частиц, т. е. происходит в условиях естественной конвекции. При таких условиях имеет место перенос теплоты через отдельные слои груза, где каждый слой характеризуется эквивалентным коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, что позволяет рассматривать разогреваемый в цистерне груз как квазитвердое тело с переменным коэффициентом теплопроводности. Процесс конвективного теплообмена в этом случае сводится к явлению теплопроводности, что исключает из рассмотрения уравнения гидродинамики и существенно упрощает математическое описание теплообмена.

Уравнение теплопроводности согласно закону Фурье для слоя разогреваемого груза будет записано в виде

$$q = \frac{\lambda_{\text{экв}}}{\delta_i} (T_i - T_{i+1}),$$

где i – индекс номера слоя; T_i, T_{i+1} – температуры на границах слоя, К; δ_i – толщина слоя, м.

Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$ вычисляется по формуле $\lambda_{\text{экв}} = \varepsilon_k \lambda_{\text{ГР}}$, его значение уточняется на каждом шаге расчета. Здесь и далее «ГР» показывают принадлежность коэффициента характеристике груза.

Коэффициент конвекции ε_k является функцией чисел Прандтля Pr и Грасгофа Gr :

$$\varepsilon_k = 0,105 (Pr_{\text{ГР}} Gr_{\text{ГР}})^{0,3};$$

$$10^3 \leq Pr_{\text{ГР}} Gr_{\text{ГР}} \leq 10^6;$$

$$\varepsilon_k = 0,4(\text{Pr}_{\text{ГР}} \text{Gr}_{\text{ГР}})^{0,2};$$

$$10^6 \leq \text{Pr}_{\text{ГР}} \text{Gr}_{\text{ГР}} \leq 10^{10}.$$

При малых значениях аргумента $\text{Pr}_{\text{ГР}} \text{Gr}_{\text{ГР}} < 10^3$ значение функции равно $\varepsilon_k = 1$, что обуславливает теплоперенос в разогреваемом грузе только теплопроводностью. Снижение интенсивности теплообмена при больших значениях аргумента $\text{Pr}_{\text{ГР}} \text{Gr}_{\text{ГР}} > 10^6$ объясняется противоположным взаимодействием, возникающим при движении восходящих (нагретых) и нисходящих (охлажденных) потоков в разогреваемом грузе.

Решение задачи теплопроводности заключается в определении поля температур в котле железнодорожной цистерны при разогреве груза. С точки зрения зависимости температуры от времени задача является нестационарной. Зависимость эквивалентного коэффициента теплопроводности от температуры

$\lambda_{\text{экв}} = f(\Delta T)$ приводит к нелинейности дифференциального уравнения и, следовательно, задачи теплопроводности.

Разогрев груза в железнодорожной цистерне определяет полярную постановку задачи. В качестве расчетной области выбрана половина поперечного сечения средней части котла цистерны (рис. 4). Расчет процесса разогрева в этом случае сводится к решению параболического дифференциального уравнения в частных производных

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_{\text{экв}} \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_{\text{экв}}}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[\lambda_{\text{экв}} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right].$$

Уравнение имеет бесчисленное множество решений. Для получения единственного решения конкретизирована задача теплопроводности при заданных условиях однозначности.

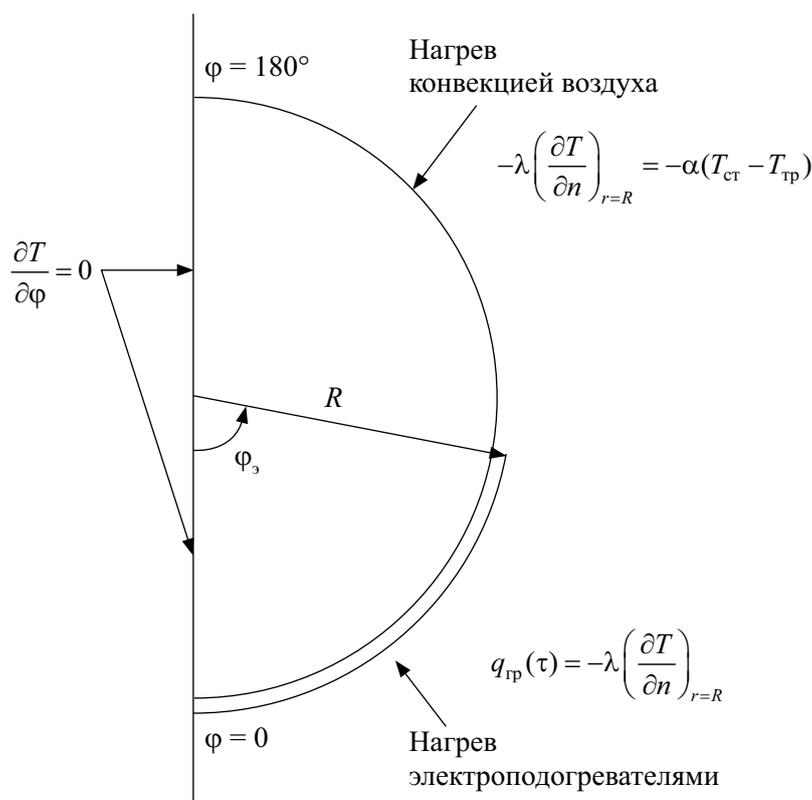


Рис. 4. Расчетная область железнодорожной цистерны со встроенным электроподогревом

Для систем разогрева встроенными электроподогревателями снаружи котла цистерны начальные условия задаются выражением

$$T(r, \varphi) = T_0; \quad 0 \leq r \leq R; \quad 0 \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

Граничные условия определяются системами выражений, характеризующих передачу теплоты в разных зонах котла цистерны (рис. 4):

$$q_{\text{ГР}}(\tau) = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right); \quad r = R; \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_3;$$

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) = \alpha(T_{\text{н}} - T_{\text{ГР}}); \quad r = R; \quad \varphi_3 \leq \varphi \leq 180^\circ.$$

Результат решения краевой задачи теплопроводности в частных производных без уче-

та эквивалентного коэффициента теплопроводности, учитывая, что у всего затвердевшего груза одинаковый коэффициент теплопроводности, показан на рис. 5а. Данное решение задачи теплопроводности при нагреве каменноугольного пека неверно. Результаты расчета показали, что при подведенной теплоте электронагревателей за время $\tau = 6$ ч происходит сильный перегрев стенки котла до 600°C , а большая часть груза остается неразогретой, ее температура равна 50°C . Следовательно, нельзя считать затвердевший вязкий груз однородным твердым телом, так как при разогреве меняются его теплофизические характеристики, что изменяет последовательность расчета: необходимо учитывать гидродинамические уравнения разогрева жидкости, которые значительно усложняют поставленную задачу.

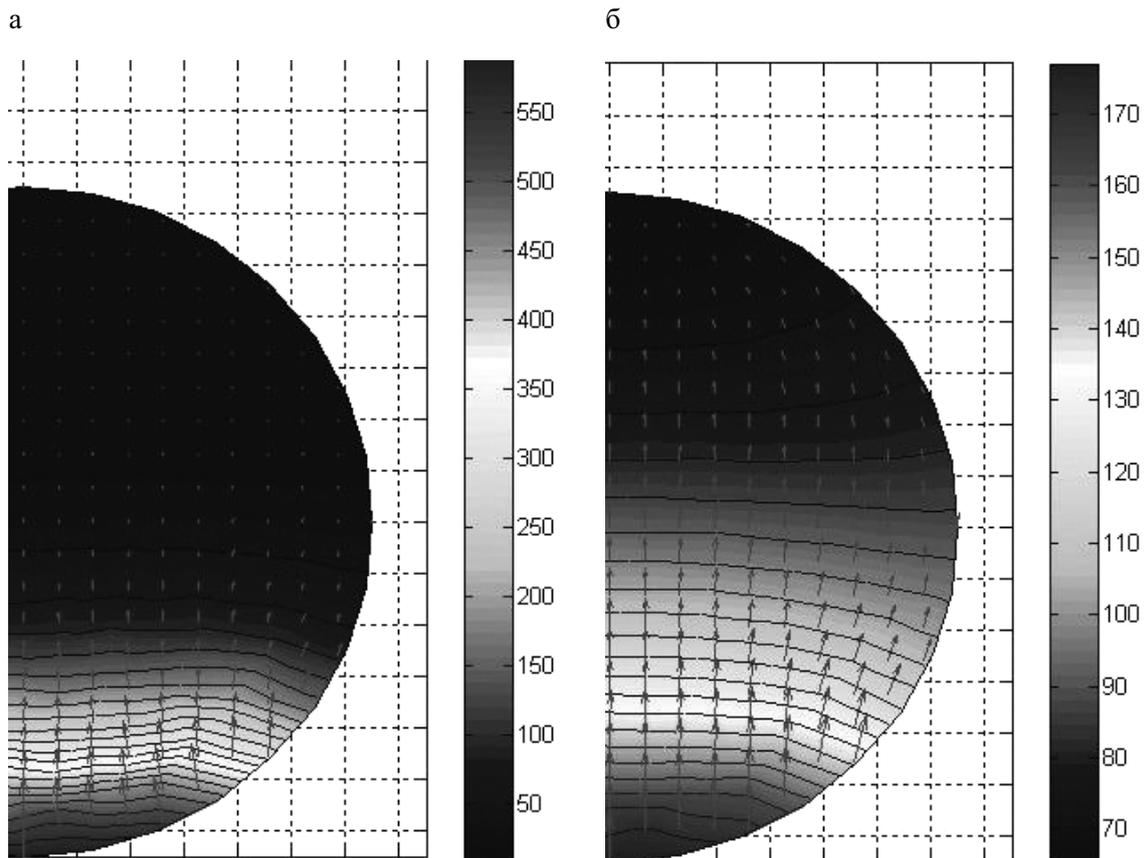


Рис. 5. Температурное поле $T(x, y, \tau)$ при $\tau = 6$ ч: без учета (а) и с учетом (б) эквивалентного коэффициента теплопроводности

Результат решения краевой задачи теплопроводности в частных производных, учитывающий эквивалентный коэффициент теплопроводности, представлен на рис. 5б. Загустевший пек в верхней части цистерны разогревается до 70 °С, в нижней – до 180 °С, что и требуется по исходной задаче. Перегрева стенок котла в данном случае не наблюдается.

Заключение

В ходе исследования подтвердилось, что $\tau = 6$ ч является оптимальным временем для разогрева каменноугольного пека в железнодорожной цистерне электроподогревателями, загустевший пек в верхней части цистерны разогревается до 70 °С, в нижней – до 180 °С, что и требуется по исходной задаче, перегрева стенок котла не наблюдается. Максимальная температура размягчения пека составляет 150 °С. Нагревание стенки котла цистерны до 250 °С вместо 500 °С позволит сохранить прочностные характеристики и избежать по-

вреждений, связанных с потерей устойчивости оболочки котла.

Библиографический список

1. **Вагонное хозяйство** / В. И. Гридюшко, В. П. Бугаев, Н. З. Криворучко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1988. – 295 с.
2. **Цистерны** (Устройство, эксплуатация, ремонт) : справ. пособие / В. К. Губенко, А. П. Никодимов, Г. К. Жилин и др. – М. : Транспорт, 1990. – 151 с.
3. **Специализированные цистерны для перевозки опасных грузов** : справ. пособие. – М. : МПС РФ; Изд-во стандартов, 1993.
4. **Вагоны** промышленного железнодорожного транспорта : учеб. / П. В. Шевченко, А. П. Горбенко. – Киев : Вища шк., 1980. – 224 с.
5. **Методика** определения объема ремонта котлов при восстановлении ресурса вагонов-цистерн для перевозки жидкого пека / А. А. Битюцкий, К. И. Рыжов // Совершенствование методов испытаний и диагностики грузовых вагонов : сб. науч. тр. Вып. 2 / под ред. А. А. Битюцкого ; Инженер. центр вагоностроения. – СПб. : ОМ-Пресс, 2007. – С. 90–100.