

## **МОНИТОРИНГ ТРУБОПРОВОДОВ СЕЛЬСКИХ КОМУНИКАЦИЙ И ИХ ВОСТАНОВЛЕНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДГЕЗИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Виктор И. Балабанов, Владислав Ю. Бойков**

[tribov@mail.ru](mailto:tribov@mail.ru)

*Московский государственный агроинженерный университет,  
127550, Москва, Тимирязевская 581  
РОССИЯ*

**Key words:** *The pipeline, monitoring of a technical condition, restoration, between-repairs resource, aperture, rigid overlay, calculation on durability, adhesive materials.*

**Abstract:** *Results of the presented experimental researches have been coordinated with the theoretical calculations on the basis of the mathematical model simulating physical processes at reconstruction and repair of pipelines, and operational tests have shown expediency of use of algorithm of adhesive material selection and a choice of the optimum sizes of a rigid overlay and thickness of a glutinous seam for the pipeline (capacity) repair.*

Рыночная экономика обусловила необходимость проведения работ по повышению качества, конкурентоспособности и безопасности выпускаемой продукции, выполняемых работ и услуг агропромышленного комплекса. Анализ зарубежного и отечественного опыта свидетельствует о том, что эффективные механизмы решения возникающих по этим направлениям проблем могут базироваться только на концепции управления качеством. Это требует проведения теоретических и экспериментальных исследований процессов повышения технологических уровней и эффективности технического сервиса машин, оборудования и коммуникаций в агропромышленном комплексе, путем моделирования и оптимизации организационно-технологических решений на каждом этапе жизненного цикла оборудования.

Привлечение в качестве методологических средств исследования системного и комплексного подходов позволяет сформировать ряд направлений исследований, связанных с увеличением эффективности технического сервиса для повышения межремонтного ресурса машин и оборудования в сельском хозяйстве, внедрением новых прогрессивных технологических решений для обоснования эксплуатационно-технологических требований к новой и отремонтированной технике и условиям труда обслуживающего персонала.

Проводимые в названных направлениях исследования показывают, что жизненный цикл машин, оборудования и строительных объектов сельского хозяйства может быть также существенно увеличен за счет использования «интеллектуальных» технологий, включающих создание и применение оборудования и материалов, обеспечивающих непрерывный и независимый мониторинг трубопроводов.

Агрессивность гидрогеологической среды, наличие блуждающих токов, нарушение режимов подземных водотоков приводят к быстрому износу трубопроводов и кабельных сетей, выполненных из традиционных материалов и слабо защищенных от агрессивных воздействий. Подземное хозяйство многих предприятий агропромышленного комплекса (АПК) находится в критическом состоянии, что воздействует на жизнеспособность предприятий, зависящих в значительной мере от нормального функционирования инженерных сетей. Поэтому необходима постоянно действующая система диагностики и мониторинга, а, кроме того, активный поиск и разработка новых материалов и технологий для восстановления и повышения долговечности подземных инженерных систем.

Перед эксплуатирующими организациями стоят задачи обследования, единовременной проверки фактического состояния всех зданий предприятий АПК, их конструкций, оборудования, а также инженерных систем – в первую очередь теплотрасс, водопроводов, канализационных коллекторов, других сетей и коммуникаций с их обязательной паспортизацией. Это также требует организации системы постоянного мониторинга за их состоянием.

Используемые в АПК трубопроводы подвергаются агрессивному воздействию не только внешней, но и внутренней среды. Достаточно часто требуют восстановления трубопроводы в конструкциях сельскохозяйственной техники: приводах (гидравлический и пневматический) тормозов, гидроприводах рабочих органов на экскаваторах и т.д.

Однако, с нашей точки зрения, вопросы повышения технического уровня и эффективности технического сервиса трубопроводов на каждом этапе их переустройства до настоящего времени не нашли достаточно широкого и полного отражения в научных работах. Между тем существующий уровень внедрения результатов научных исследований и разработок в практику ремонта трубопроводных сетей АПК вызывает необходимость поиска и использования более достоверных критериев и методов количественной оценки реальной эффективности их технического сервиса. Это необходимо, чтобы, с одной стороны, более обоснованно решать вопрос о целесообразности применения результатов исследований, а с другой стороны – исследовать причины, препятствующие их полноценному и эффективному использованию.

Установлено, что, не смотря на разнообразие режимов работы трубопроводов и характер их повреждения (механические, коррозионные, кавитационное), использование клеевых материалов (адгезивов) во многих случаях является более целесообразным, чем использование традиционно применяемой сварки.

При проведении ремонта с применением адгезива возникает необходимость в определении условий его использования, а именно требуемой

толщины его слоя, величины нахлестки, необходимости армирования, размеров жесткой накладки и т.д. От оптимизации этих параметров зависит экономическая эффективность и работоспособность деталей восстановленных при помощи адгезива.

Проведенные расчеты показали возможность подбора адгезивного материала под решение конкретной задачи ремонта трубопровода.

Нами была исследована стальная деталь, имеющая круглое отверстие радиуса  $R_0$ , на которую с одной стороны действует давление жидкости (рис. 1). Отверстие имитирует повреждение стального образца. Была применена известная из прикладной теории упругости безмоментная теория расчета симметричных оболочек, частным случаем которых являются круглые, симметрично нагруженные пластины.

В качестве рабочей модели клеевой шов рассматривался как упругая среда, подчиняющаяся закону Гука и создающая давление на пластину (жесткую накладку), пропорциональное ее вертикальному перемещению:

$$(1) \quad p_k = \frac{\omega}{t} E_k$$

где,  $t$  – первоначальная толщина клеевого шва,  $E_k$  – модуль упругости

адгезивного материала,  $\omega$  – вертикальное перемещение пластины  
 – угол поворота нормали пластины после деформации.

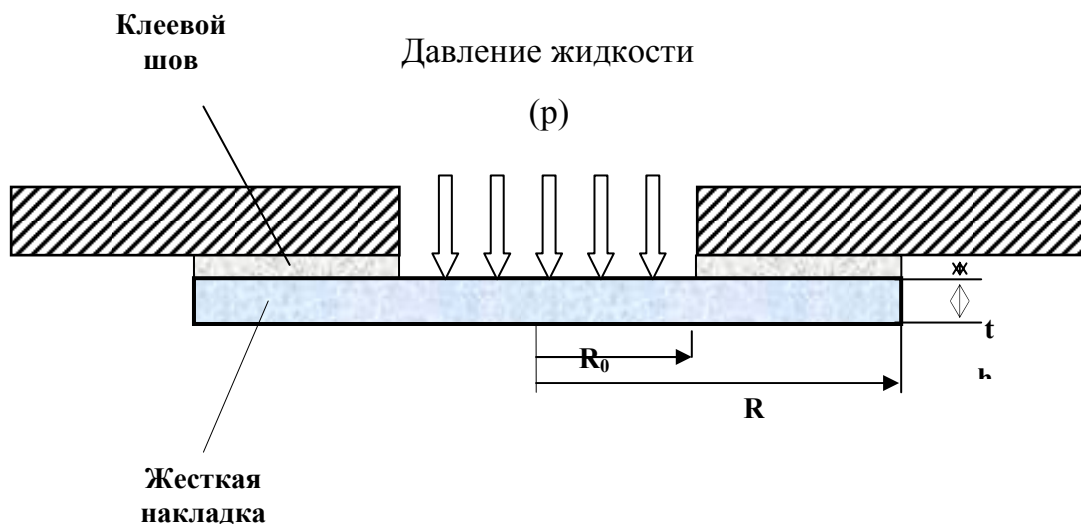


Рисунок 1 – Схема герметизации круглого отверстия адгезивным материалом

В области клеевого шва деформация пластины описывается дифференциальным уравнением 4 порядка

$$(2) \quad r^4 \frac{d^4 \vartheta}{dr^4} + 2r^3 \frac{d^3 \vartheta}{dr^3} - 3r^2 \frac{d^2 \vartheta}{dr^2} + 3r \frac{d\vartheta}{dr} - (b^4 r^4 + 3) \vartheta = 0$$

где  $b = \sqrt[4]{\frac{E_k}{tD}}$ ,  $a = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$  – жесткость пластины.

Общее решение этого уравнения имеет вид:

$$(3) \quad \mathcal{G} = C_1 J_1(br) + C_2 Y_1(br) + C_3 I_1(br) + C_4 K_1(br)$$

где  $J_1(br)$  и  $Y_1(br)$  – функции Бесселя,  $I_1(br)$  и  $K_1(br)$  – модифицированные функции Бесселя.

Из граничных условий, а также условия равновесия пластины в целом было найдено частное решение для рассматриваемого случая негерметичности трубопровода (емкости):

$$(4) \quad \omega = \frac{pR_0^3}{8bD} (2J_1(bR_0) - bR_0 J_0(bR_0))^{-1} J_0(br) + \frac{C_0}{b}$$

$$\sigma = \frac{pR_0^3 b^3}{8} (2J_1(bR_0) - bR_0 J_0(bR_0))^{-1} J_0(br) + C_0 \cdot b^3 D$$

$$C_0 = \frac{pR_0^3}{4D} \left( \frac{4}{bR_0} - \frac{(bR_0 J_1(bR_0) - bR_0 J_1(bR_0))}{(2J_1(bR_0) - bR_0 J_0(bR_0))} \right) \cdot ((bR_0)^2 - (bR_0)^2)^{-1}$$

где

Максимальное значение нормальное напряжение в клеевом шве принимает на границе отверстия, таким образом:

$$(5) \quad \sigma_{\max} = p \left( \frac{(bR_0)^2 (bR_0 J_0(bR_0)(k^2 - 1) - kJ_1(kbR_0) + J_1(bR_0))}{8(2J_1(bR_0) - bR_0 J_0(bR_0))(k^2 - 1)} + \frac{1}{(k^2 - 1)} \right)$$

Здесь  $k = R/R_0$  – безразмерная величина, показывающая во сколько раз размер жесткой накладке больше размера отверстия.

Выражения (4) и (5) в каждом конкретном случае негерметичности (размер отверстия  $R_0$ ) позволяют подобрать адгезивный материал с оптимальными характеристиками ( $[\sigma]$ ,  $E_k$ ), геометрическими размерами жесткой накладке (радиус  $R$ ) и клеевого шва (толщина  $t$ ).

На рис. 2 представлена зависимость максимального напряжения в клеевом шве от толщины клеевого шва для 2-х значений  $k$ .

В качестве адгезивного материала был выбран состав «Термолит» (на основе силиката натрия). Для данного состава: модуль упругости при растяжении  $E_k = 780$  (МПа), разрушающее напряжение при растяжении  $[\sigma] = 19,4$  (МПа). В качестве жесткой накладке была выбрана стальная пластина (модуль упругости для стали  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ ), толщиной  $h = 0,3$  мм. Радиус отверстия составлял

$$R_0 = \frac{d}{2} = 6 \text{ мм. Внешнее давление } p = 5 \text{ (МПа)} \approx 50 \text{ (атмосфер).}$$

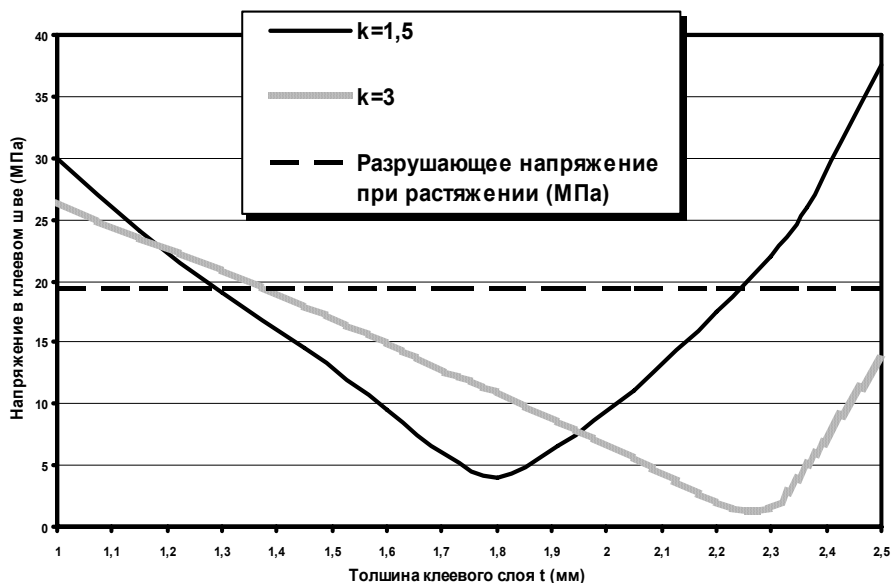


Рисунок 2 – График зависимости напряжения в клеевом шве от толщины клеевого шва для двух значений  $k = R/R_0$

Согласно сформулированным принципам была разработана и внедрена технология ремонта трубопроводов, мониторинг состояния которых и определение места нарушения функционирования (протечки) осуществлялся за счет замыкания электрической цепи «корпус – проводник в изоляции трубопровода», а собственно ремонт включал герметизацию отверстий в трубопроводе и восстановление проводника в изоляции с помощью жесткой накладки и адгезивного материала с диэлектрическими (для соединения накладки с трубой) и токопроводящими (для соединения накладки с нитью) свойствами (рис. 3).

Для осуществления технологий реконструкции и ремонта элементов трубопроводных сетей инженерного оборудования строительных объектов были выбраны адгезивные материалы, позволяющие за счет смешивания с различными наполнителями получать широкий спектр свойств для восстановления режимов функционирования трубопровода. Использование адгезивов позволяет восстановить потери металла от коррозии, механического изнашивания, кавитации и т.д. Была составлена классификация адгезивных материалов, представленная на рис. 4.

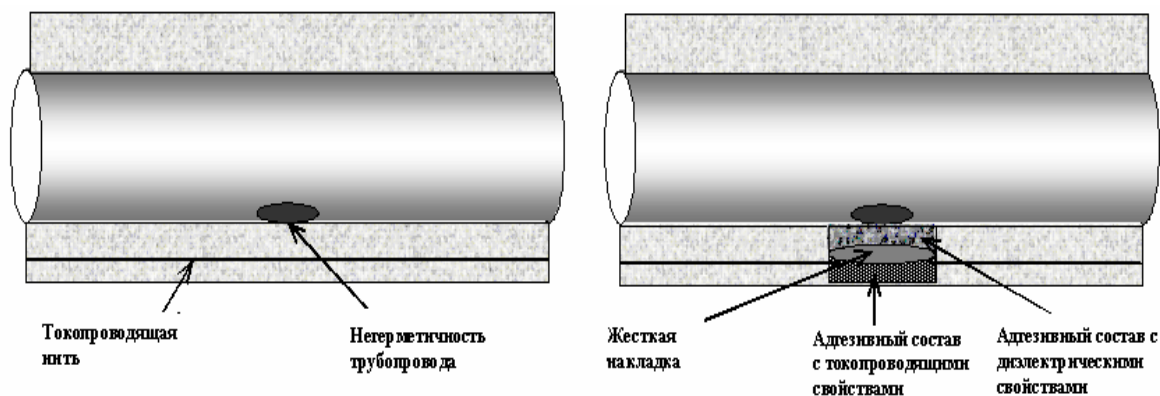


Рисунок 3 – Схема герметизации отверстия в трубопроводе

При каждом случае практического использования на адгезивное соединение воздействуют различные силовые факторы, величина и направление

которых определяет целесообразность применение того или иного адгезивного материала.

Лабораторные исследования проводились на установке, создающей максимальное давление 60 МПа. Для эксперимента использовался состав «Маком-1» (модуль упругости при растяжении – 5255 МПа; разрушающее напряжение при растяжении – 29,4 МПа), а также специально разработанная испытательная оснастка.

Для сравнительных зависимостей теоретических и экспериментальных исследований, представленных на рис. 5, были выбраны следующие параметры клеевого соединения:

- диаметр жесткой накладки – 20 мм;
- толщина клеевого шва – 1 мм;
- толщина жесткой стальной накладки – 0,3 мм (модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ ).



Рисунок 4 – Классификация термостойких адгезивов

Теоретические расчеты производились по формулам 4 и 5.

Также была измерена температура в различных точках системы выпуска отработанных газов на ряде автомобилей, произведено восстановление

искусственно сделанной негерметичности, при помощи состава «Термолит» по разработанному алгоритму с последующими производственными испытаниями.

На основании проведенных исследований установлено.

1. Анализ отечественных и зарубежных технологий переустройства трубопроводов предприятий АПК и элементов конструкций сельскохозяйственной техники показал, что необходима постоянно действующая система их мониторинга и последующего восстановления.

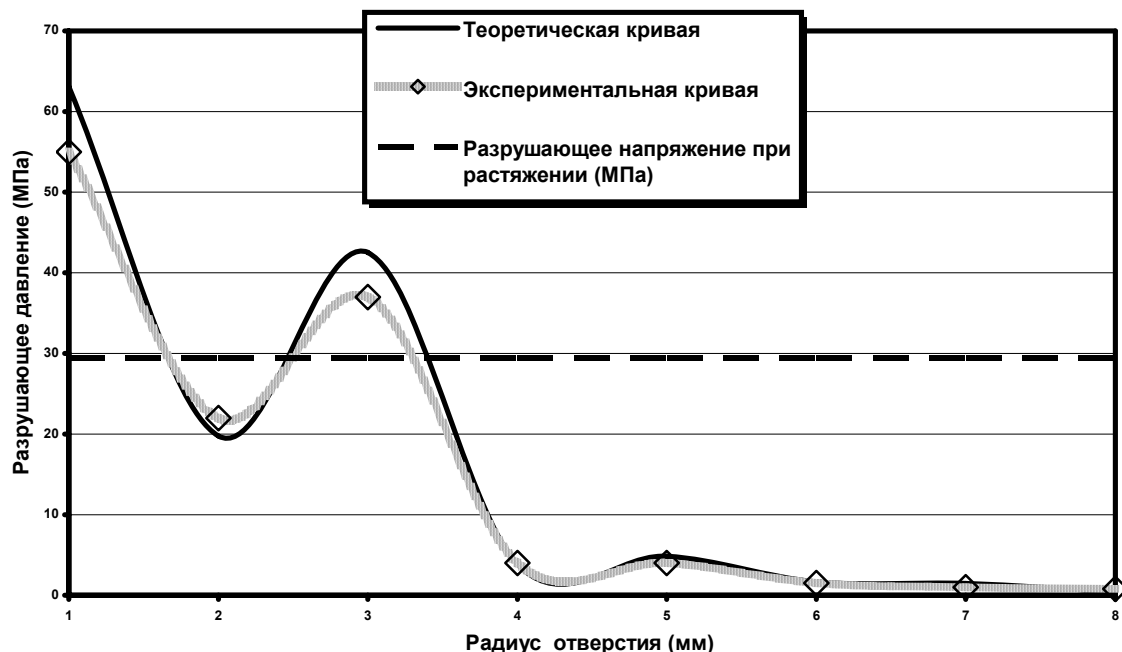


Рисунок 5 – Сравнительные зависимости теоретических и экспериментальных исследований

2. Результаты экспериментальных исследований согласуются с теоретическими расчетами на основе математической модели, имитирующей физические процессы при реконструкции и ремонте трубопроводов, а эксплуатационные испытания показали целесообразность использования алгоритма подбора адгезивного материала и выбора оптимальных размеров жесткой накладки и толщины клеевого шва для ремонта трубопровода (емкости).

3. Составленная классификация адгезивных материалов позволила удовлетворить широкому спектру условий эксплуатации трубопроводных сетей различного назначения. Использование разработанных материалов при ремонте инженерного оборудования позволило реализовать эффект ресурсосбережения и безопасности функционирования. Экспериментальное внедрение подтвердило эффективность применения технологии.

4. Результаты лабораторных испытаний показали целесообразность использования предложенной математической модели, имитирующей физические процессы при реконструкции и ремонте трубопроводов, для подбора адгезивного материала и выбора оптимальных размеров жесткой накладки и толщины клеевого шва для ремонта трубопровода (емкости).