

(глинозема). Гидроокисный осадок водопроводных станций можно применять при изготовлении шпатлевок и мастик, заменяя им мел или меловую пасту. [9, 10].

Перспективным методом утилизации осадков станций обезжелезивания является получение из него конечного продукта в виде коагулянта.

*Список использованных источников:*

1. Николадзе, Г.И. Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г.И.Николадзе. – Москва: Стройиздат, 1978. – 161 с.
2. Гуринович, А.Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения / А.Д. Гуринович. – Мн.: ТЕХНОПРИНТ, 2001. – 305 с.
3. Николадзе, Г.И. Технология очистки природных вод / Г.И. Николадзе: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк. 1987. – 497 с.
4. Кульский, Л.А. Технология очистки природных вод / Л.А.Кульский, П.П.Строкач.- 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1986. - 352 с.
5. Хаммер, М. Технология обработки природных и сточных вод / М.Хаммер. – Москва: Стройиздат, 1979. – 400 с.
6. Любарский, В.М. Осадки природных вод и методы их обработки / В.М.Любарский. – Москва: Стройиздат, 1980. – 129 с.
7. Науменко, Л.Е. Технология очистки промывных вод станций обезжелезивания коагулированием в присутствии фосфатов: диссертация кандидата технических наук: 05.23.04 / Науменко Л.Е. – Брест, 2009. – 190 с.
8. Любарский, В.М. Механическое обезвоживание осадков природных вод / В.М. Любарский, А.И. Федоров, С.Д. Беляева, О.Г. Бабуров // Водоснабжение и санитарная техника. – №4. – 1992. – с.19-21.
9. Шевченко, Л.Я. Утилизация осадков водопроводных станций / Л.Я. Шевченко // Водоснабжение и санитарная техника. – №4. – 1985. – с. 21
10. Белескова, Е.А. Об утилизации осадков, образующихся при обезжелезивании подземных вод / Е.А. Белескова, В.И. Айзенберг // Водные ресурсы. – 1979. – №5. – с. 190.

**Сазонов М.И., Хвисевич В.М., Веремейчик А.И., Томашев И.Г., Лазарук А.А.**

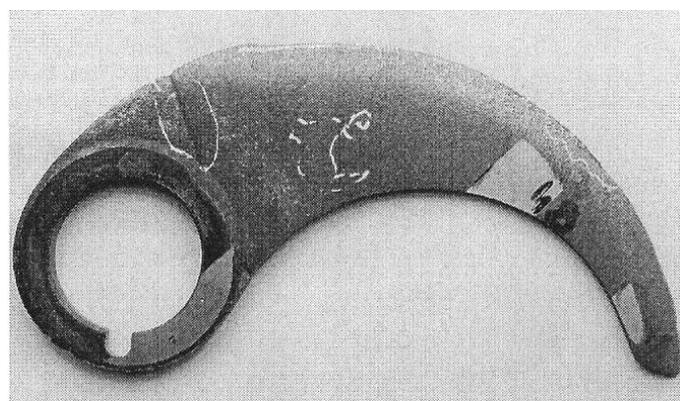
### **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КУТТЕРОВ**

*Брестский государственный технический университет, кафедра прикладной механики*

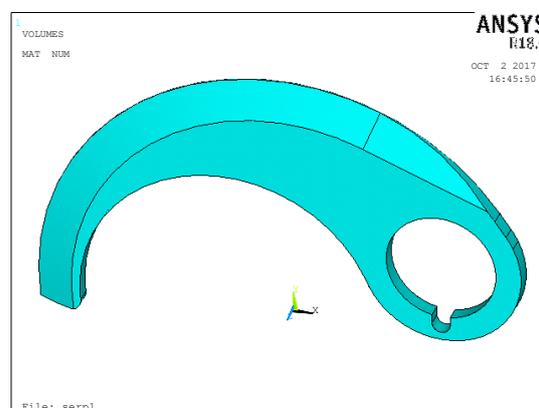
В пищевой промышленности для измельчения продуктов широко используются универсальные установки — куттеры. Производительность и ресурс этих установок определяется техническим состоянием измельчителей (ножей), вращающихся с высокими угловыми скоростями и работающих при больших нагрузках. Работа посвящена исследованию температурных полей и термонапряжений, возникающих в измельчителях, подвергнутых поверхностной плазменной закалке движущимся источником нагрева, а также исследованию их износостойкости.

**Методика проведения исследований**

Измельчители, используемые при измельчении пищевых продуктов на универсальных установках, изготовлены из хромистой жаропрочной нержавеющей стали 14X17H2 (ГОСТ 5632–2014) и упрочнялись объемной закалкой. В процессе эксплуатации ножи подвергались кавитационному, механическому и коррозионному изнашиванию и имели короткий срок эксплуатации (рисунок 1, а).



а)



б)

Рисунок 1 – Вид упрочненного объемной закалкой измельчителя после эксплуатации (а) и его конечно-элементная модель (б).

Нож толщиной 8 мм имеет серпообразную форму. В результате объемной закалки твердость детали достигала величины 42–48 HRC. В установке используются два ножа, которые установлены в горизонтальном положении на вращающемся валу емкости, в которую загружаются куски сырья общей массой  $m = 70$  кг. Заточенная под углом  $21^\circ$  кромка детали обращена вниз. В емкость подается пар с температурой  $T = 150^\circ\text{C}$ , после размельчения и расплавления сырья часть его остается под поверхностью детали. Ведущий вал вращается с высокой скоростью, совершая  $n = 740\text{--}1480$  об/мин. Один цикл нагружения при стационарном режиме  $t = 7$  мин; а с учетом времени перезагрузки установки за сутки деталь нагружается 25...40 раз. Долговечность измельчителей не превышала трех месяцев, поэтому разрушение материала является малоцикловым, что свидетельствует о наличии высокоинтенсивных нагрузок. Визуальные обследования показали ряд типичных дефектов — поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне.

Для определения оптимальных режимов процесса поверхностного плазменного азотирования (ППА) проведено исследование температурных полей, напряжений и деформаций, выполненное с применением конечно-элементного комплекса ANSYS [1]. В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель ножа, приведенная на рисунке 1, б. При решении температурной задачи в ANSYS использовался восьмиузловой термический элемент SOLID70. Модель разбивалась на 53572 конечных элемента. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции от плазменной струи к детали на всех поверхностях модели. Во избежание оплавления максимальная температура на поверхности ножа должна быть на 3...5 % меньше температуры плавления стали ( $\approx 1400^\circ\text{C}$ ) [2]. Согласно [2, 3], тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине зоны нагрева по закону, близкому к кривой вероятности

Гаусса. Исходя из этого на нагреваемой поверхности коэффициент конвекции задавался различным по ширине зоны нагрева, соответствующим нормальному распределению. Функции температуры и коэффициента конвекции задавались в следующем виде:

$$T(x, y, t) = \frac{T_0}{10^{-3} \left[ \left( R \cdot \cos\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) + x \right)^2 + \left( R \cdot \sin\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) - y \right)^2 \right] + 1} + T_H,$$

$$k(x, y, t) = \frac{k_0}{10^{-3} \left[ \left( R \cdot \cos\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) + x \right)^2 + \left( R \cdot \sin\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) - y \right)^2 \right] + 1},$$

где  $T_0 = 6000 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура в центре плазменной струи,  $R = 0,13 \text{ м}$  – радиус кривизны траектории движения плазменной струи, определяемый из геометрии режущей кромки ножа,  $v$  – скорость движения источника нагрева,  $T_H = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  – температура окружающей среды,  $k_0 = 7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  – коэффициент конвекции в центре плазменной струи. Удельная теплоемкость стали принималась зависящей от температуры и при температурах  $0 \dots 1300 \text{ }^\circ\text{C}$  находилась в интервале  $c_{ст} = 400 \dots 600 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  [4]. Время движения определялось в зависимости от перемещения дуги по режущей кромке при скорости движения плазматрона  $v = 10 \text{ мм}/\text{с}$ . Некоторые характеристики материала приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Некоторые характеристики материала измельчителя

Материал	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(К·м)	Модуль упругости $E$ , Па	Коэффициент Пуассона $\nu$	Удельная теплоемкость $c$ , Дж/(кг·К)
Сталь 14X17H2	50	$2 \cdot 10^{11}$	0,28	400...600

После каждого шага нагружения проводился расчет температурных полей, результаты которого записывались в LS-файлы. В результате проведения расчета определены поля температур в различные моменты времени. На рисунке 2 приведено распределение температурных полей на верхней и нижней поверхностях ножа при  $v=10 \text{ мм}/\text{с}$ .

При решении задачи термоупругости нож «закреплялся» по нижней торцевой поверхности для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном поверхности ножа, и по поверхности шпоночного паза для ограничения перемещения в направлении, параллельном его поверхности. На рисунке 3 представлено распределение эквивалентных напряжений и суммарных перемещений на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при скорости движения пятна нагрева  $v = 10 \text{ мм}/\text{с}$ .

Для осуществления процесса поверхностного плазменного азотирования в комплексе с установкой был разработан специальный манипулятор, при помощи которого осуществляется перемещение детали относительно плазменной дуги с заданной скоростью (частота вращения стола манипулятора может регулироваться в пределах  $0,5-180 \text{ об}/\text{мин}$ ). Упрочняемая деталь располагалась на столике манипулятора горизонтально. Осуществлен процесс ППА измельчителей пищевого сырья путем нанесения дорожек с шагом  $1,5 \text{ мм}$  на поверхности детали. По результатам экспериментов определены оптимальные параметры процесса ППЗ: скорость движения точки нагрева  $v = 10 \text{ мм}/\text{с}$ , расход аргона  $Q_{Ar} = 1,2 \text{ л}/\text{мин}$ , расход азота  $Q_{N_2} = 3,6 \text{ л}/\text{мин}$ , ток дуги  $I = 28 \text{ А}$ .

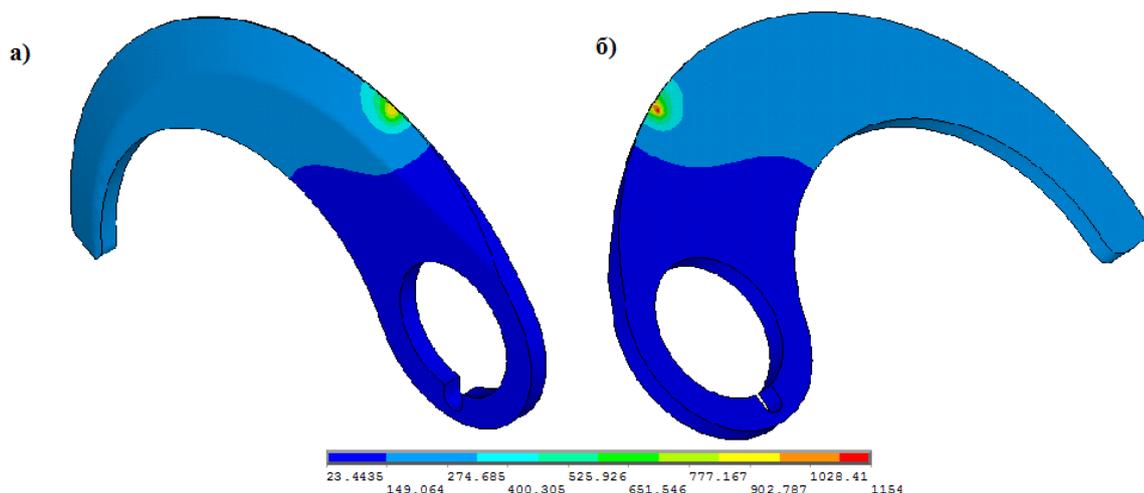


Рисунок 2 – Распределение температурных полей на верхней (а) и нижней (б) поверхностях ножа.

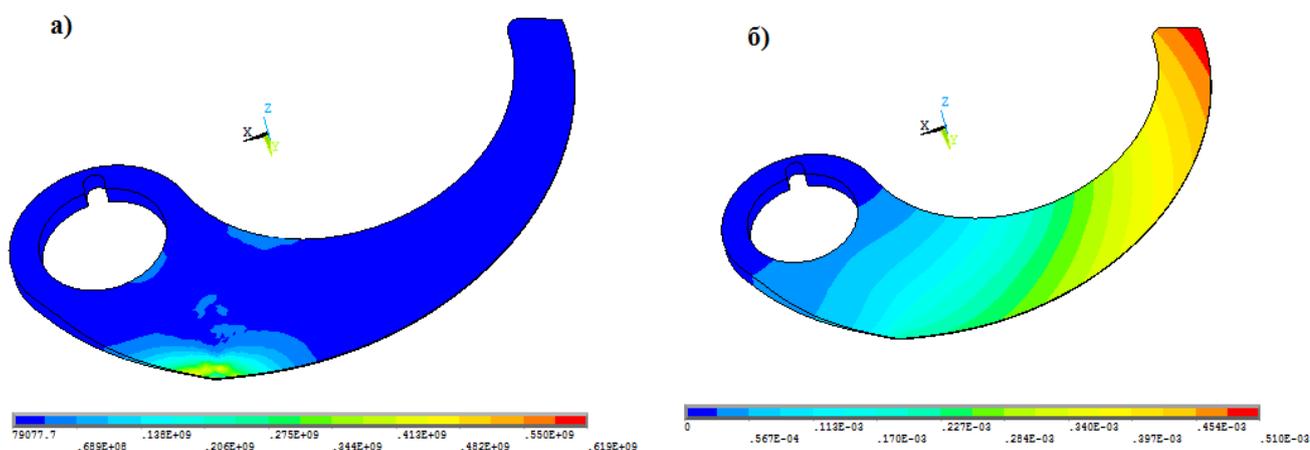
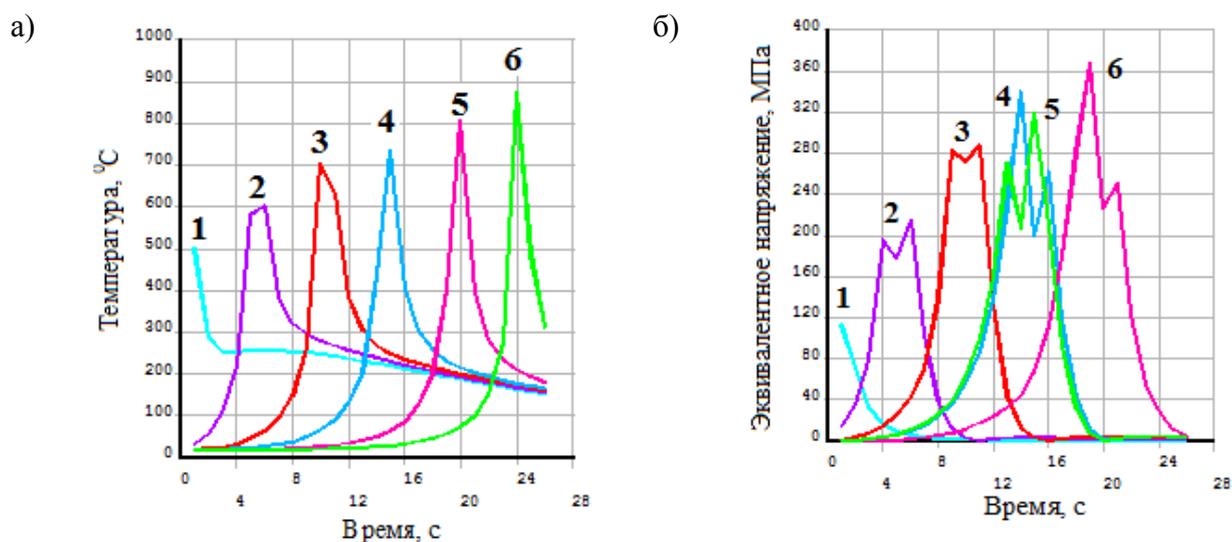


Рисунок 3 – Типичное поле эквивалентных напряжений по Мизесу (а) и суммарных перемещений (б) для момента времени  $t = 26$  с.



1 – сечение А, 2 – сечение В, 3 – сечение С, 4 – сечение D,  
5 – сечение Е, 6 – сечение F

Рисунок 4 – Зависимость температуры (а) и эквивалентных напряжений (б) на режущей кромке от времени в различных сечениях (рисунок 5).

На рисунке 4 приведены типичные распределения температуры и эквивалентных напряжений (по Мизесу) на режущей кромке в различных сечениях (рис. 3) от времени.

По результатам исследований износостойкости измельчителей построены графики относительного износа их элементов в сечениях А–F (рисунок 5) после упрочнения объемной закалкой и плазменным поверхностным азотированием (рисунок 6).

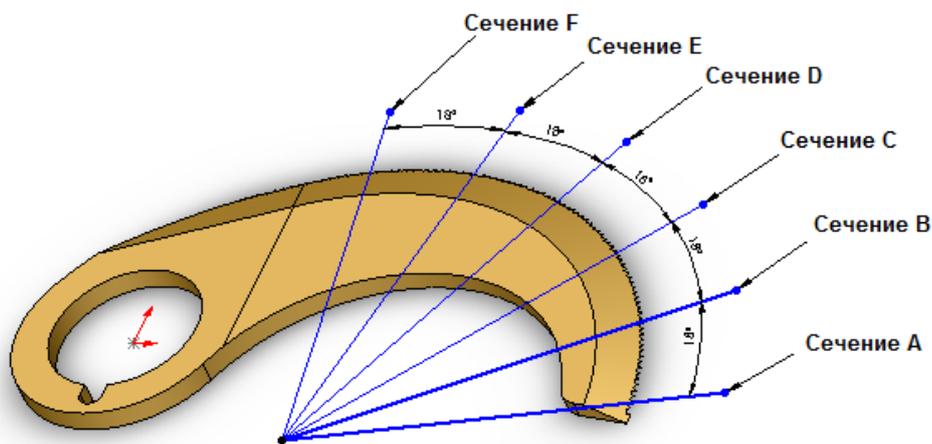


Рисунок 5 – Расположение сечений на рабочей зоне измельчителя.

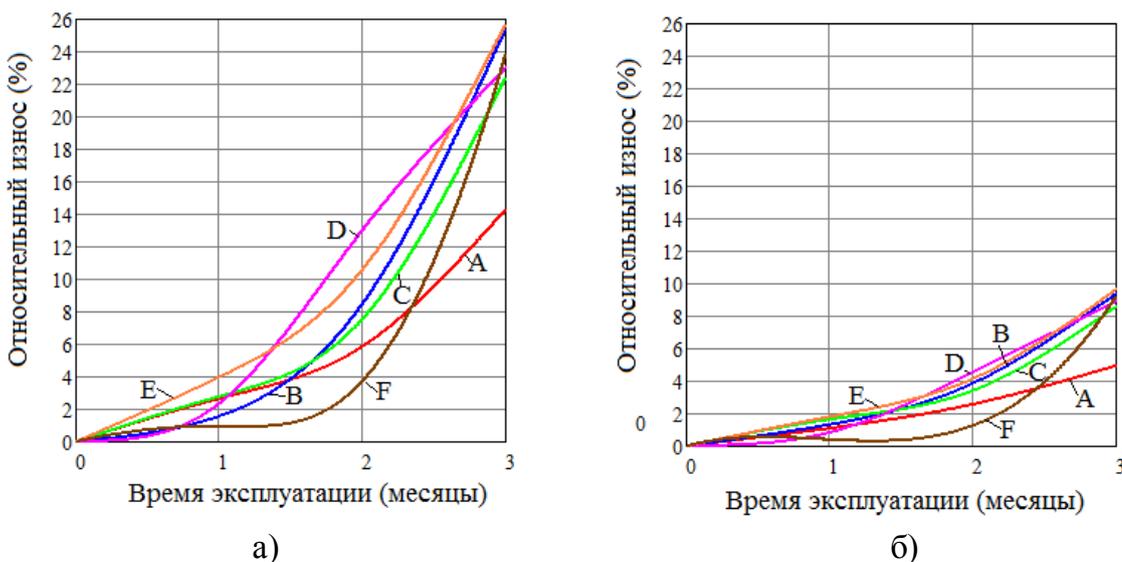


Рисунок 6 – Графики относительного износа измельчителей из стали 14X17H2, упрочненных: а) объемной закалкой; б) плазменного поверхностного азотирования.

Анализируя полученные зависимости, можно заключить, что износостойкость измельчителей, упрочненных путем объемной закалки и ППА, более чем в 2 раза выше, чем лишь после объемной закалки.

### Заключение

Осуществлен процесс поверхностного плазменного азотирования измельчителей пищевого сырья из стали 14X17H2 нанесением дорожек с шагом 1,5 мм на поверхность детали. Необходимая скорость движения источника и траектория плазменной струи автоматически выполнялась манипулятором. Определены оптимальные параметры процесса ППА: скорость движения источника

$v = 10$  мм/с, расход аргона  $Q_{Ar} = 1,2$  л/мин, расход азота  $Q_{N_2} = 3,6$  л/мин, ток дуги  $I = 28$  А. Выполненные исследования упрочненных ППЗ измельчителей на износостойкость показали значительное увеличение их долговечности, а срок эксплуатации увеличен в 2,3 раза. Исследовано НДС измельчителя в процессе поверхностной плазменной закалке с помощью разработанной механико-математической ANSYS-модели, учитывающей распределение температуры по диаметру зоны нагрева и зависимость характеристик материала от температуры, что позволило уточнить параметры ППА и обеспечить прочность и жесткость деталей без снижения их материалоемкости.

*Список использованных источников:*

1. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. М.: Машиностроение. – 2004. – 510 с.
2. Балановский, А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А.Е. Балановский. – Иркутск: ИрГТУ, 2006. – 180 с.
3. Сазонов, М.И. Исследование НДС при локальной закалке рабочей зоны пробивного инструмента с интенсивным теплоотводом / М.И. Сазонов, А.И. Веремейчик, В.М. Хвисевич, В.В. Гарбачевский, Д.Л. Цыганов // Фундаментальные и прикладные проблемы физики : сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-техн. конф., Саранск, 16–18 ноября 2015 г. – Саранск : Мордовск. гос. пед. инт-т, 2015. – С. 40–46.
4. Таблицы физических величин. Справочник. / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

**Шляхова Е.И., Левчук Н.В.**

### **ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК АСПЕКТ ПРОБЛЕМЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

*Брестский государственный технический университет, кафедра технологии строительного производства, кафедра инженерной экологии и химии*

Долговечность и надежность — это главные понятия, характеризующие способность строительного материала к противостоянию внешним агрессивным факторам техносферы. В то же время долговечность — это способность сохранять свои эксплуатационные свойства до предельного состояния с необходимыми перерывами на ремонт. Ее измеряют обычно сроком службы без потери эксплуатационных качеств в конкретных климатических условиях и режиме эксплуатации [1].

При увеличении срока службы акцент делается на решение основных, глобальных экологических проблем — ресурсосбережение и предотвращение загрязнения окружающей среды при строительстве. Таким образом, приоритетными являются задачи не только эстетические и инженерные, но и эколого-материаловедческие, позволяющие обеспечить выбор долговечных, экологически безопасных строительных материалов и их использование при проектировании экологически комфортных зданий.

Основными причинами деструкции пористых строительных материалов, в том числе природного и искусственного камня, являются частые осадки и сезонные