

Компьютерная имитация испытания клеевого соединения на раздирание

П.А. Севостьянов, Е.А. Рыжкова, В.М. Кочкоян, А.А. Савилов

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина

Аннотация: В статье рассматриваются результаты моделирования при компьютерной имитации испытания клеевого соединения на раздирание. Имитационные модели раздирания склеенных полотен построены с учетом двух этапов испытания образца, особенностей геометрической структуры, а также с учетом физико-механических свойств материалов и клея. При моделировании учитывался статистический разброс параметров на микроуровне процесса. В статье описывается алгоритм процесса испытания образца и дается оценка его поведения в зависимости от значений и вариаций параметров материала.

Ключевые слова: компьютерная имитация, модель, испытание образца раздирание, клеевое соединение, прочность материала, результаты моделирования, концентрация напряжения.

Клеевые соединения поверхностей материалов находят широкое применение в самых разных областях технологий производства изделий. Основной показатель качества клеевого соединения – его прочность, которая устанавливается экспериментально в результате испытания на раздирание образцов склеенного продукта. Раздирание является одним из видов и способов разрушения. Проблема прочности материала и его сопротивлении разрушению присутствует в различных областях материаловедения. Современный взгляд на проблему можно изучить, например, по литературе, список которой представлен в [1]. Особенность раздирания в том, что оно нацелено на проверку прочности соединения нескольких слоев однородных или разнородных материалов, причем в число испытываемых слоев входит и клей, посредством которого получено изделие.

Испытание на раздирание проводится на разрывных машинах согласно ГОСТ 32316.1 – 2012 [2]. У подвергаемого испытанию образца прямоугольной формы оставляют не склеенными слои с одной стороны образца. Это позволяет отогнуть края и зажать их в неподвижном и

подвижном зажимах разрывной машины (рис.1). Затем подвижный зажим перемещается вниз, удаляясь от неподвижного зажима с постоянной скоростью и увеличивая механическое напряжение и деформацию в слоях склеенного материала.

В испытании образца можно выделить два этапа. На 1-м этапе – от начала испытания до начала раздираания – происходит лишь деформация слоев материала до участка начала клеевого соединения. На 2-м этапе начинается раздираание соединения. Момент перехода от одного этапа к другому определяется предельной нагрузкой, которую может выдержать без разрушения слабейший слой клеевого соединения. Для ускорения исследования и снижения его стоимости целесообразно осуществлять предварительную компьютерную имитацию испытания. Компьютерная модель предоставляет сведения, более насыщенные информацией о деталях и особенностях динамики испытания [3,4].

Выделим пять слоев соединения, отличающиеся своими механическими характеристиками: это два слоя склеиваемых материалов, слой клея и два слоя, в которых произошло проникновение клея в соответствующий материал с эффектом адгезии (рис.1). Ширина испытываемого образца на несколько порядков больше толщины клеевого соединения, что позволяет ограничиться плоской двумерной задачей, в которой ось X направлена вдоль направления разрыва, а ось Y – вдоль направления движения зажима.

Целью моделирования 1-го этапа раздираания является выделение участков в слоях или на границе слоев, в которых происходит накопление максимального напряжения. Очевидно, что именно от этих участков и начнется развитие раздираания на 2-м этапе испытания образца. В описываемых ниже моделях при выполнении всех геометрических

построений и выборе значений физических величин использовались относительные единицы, но выдерживались пропорции и размерности.

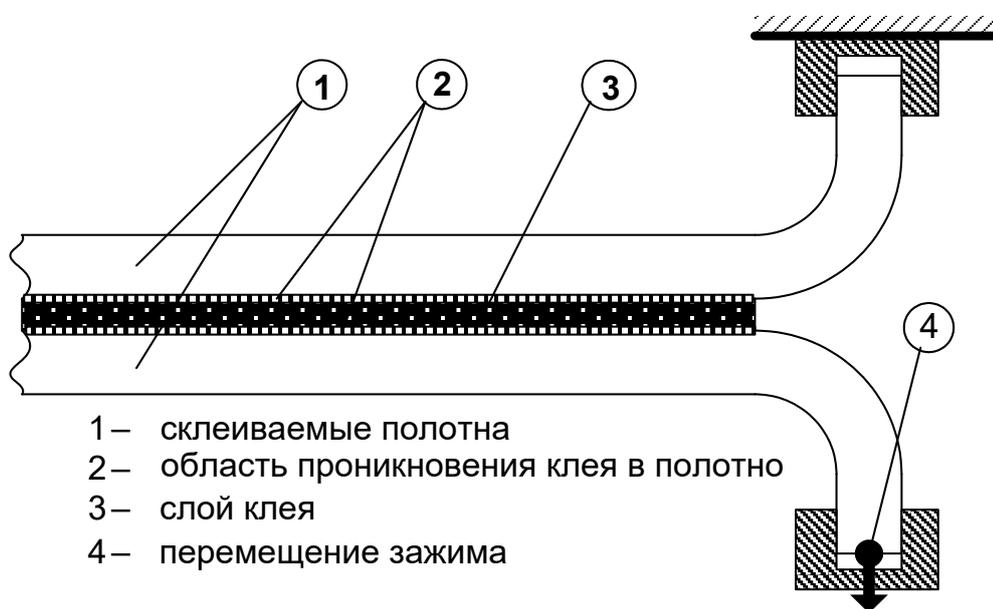


Рис.1. Схема испытания образца склеенных полотен материала на сопротивление раздиранию клеевого соединения

Для моделирования 1-го этапа была разработана 2-мерная конечно – элементная модель. На рис.2 показан фрагмент сетки конечных элементов в окрестности границы слоев материалов, адгезионных слоев и клея. Всего в модели 15468 треугольных элементов с 125148 степенями свободы.

На рис.3 показано распределение напряжения «по фон Мизесу» (НМ), которое является общепринятой интегральной характеристикой тензора напряжений [5]. Моделирование проведено для соотношения модулей упругости верхнего слоя материала G_1 , верхнего адгезионного слоя G_2 , клея G_3 , нижнего адгезионного слоя G_4 и нижнего слоя материала G_5 , соответственно: $G_2/G_1 = 1.5$; $G_3/G_1 = 3.0$; $G_4/G_1 = 2.5$; $G_5/G_1 = 2.0$. Коэффициенты Пуассона $\mu_1 = 0.01$; $\mu_2 = 0.1$; $\mu_3 = 0.25$; $\mu_4 = 0.3$; $\mu_5 = 0.4$.

Кроме описанного варианта значений параметров, исследовались и другие их комбинации.

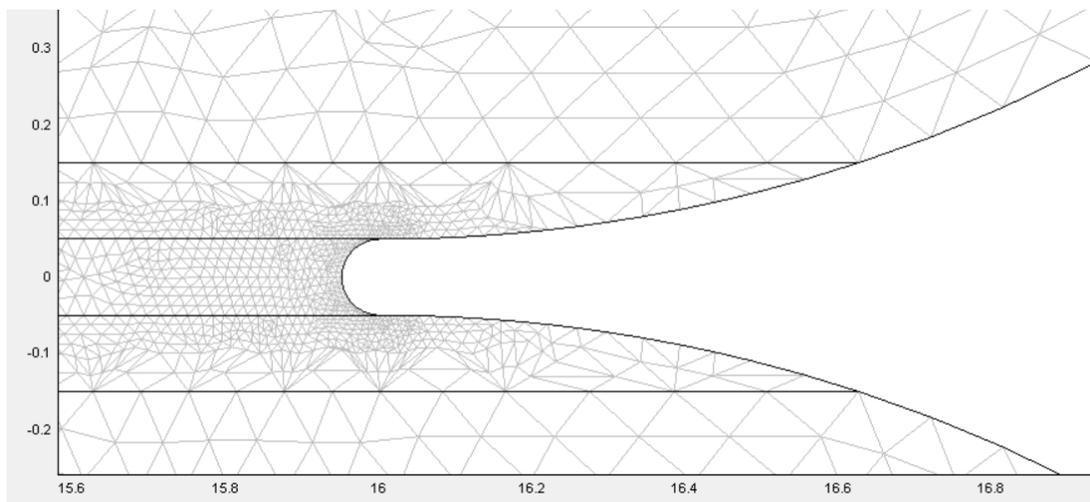


Рис.2. Фрагмент сетки треугольных конечных элементов модели.

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что концентрация наибольшего напряжения всегда происходит на границе клея и адгезионного слоя материала с меньшим модулем упругости.

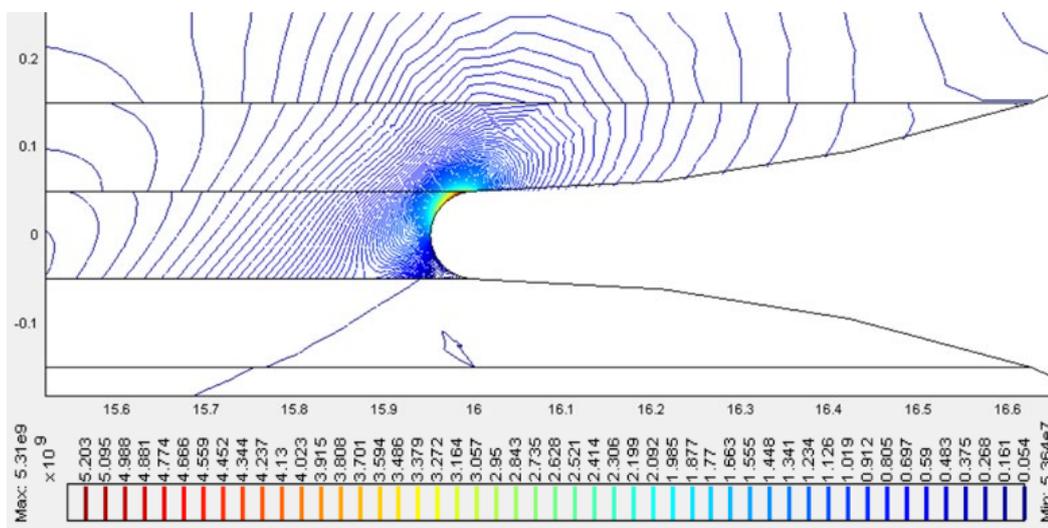


Рис.3 Ris2_1Geo5sloev. Контурные линии равных НМ вблизи области концентрации напряжений

На рис.4 показана динамика нарастания НМ в области концентрации напряжения по мере по мере перемещения подвижного зажима. Отметим, что наряду с таким «интегральным» показателем, как НМ, в процессе имитации 1-го этапа раздираания вычисляются и ряд других характеристик деформации, в том числе все компоненты тензоров напряжения и деформации, смещения и энергетические характеристики по всем точкам модели. Это позволяет получить исчерпывающую характеристику напряженного состояния образца и его изменения с нарастанием перемещения зажима испытательной машины. Моделирование 1-го этапа раздираания образца позволяет оценить область начала 2-го этапа раздираания клеевого соединения.

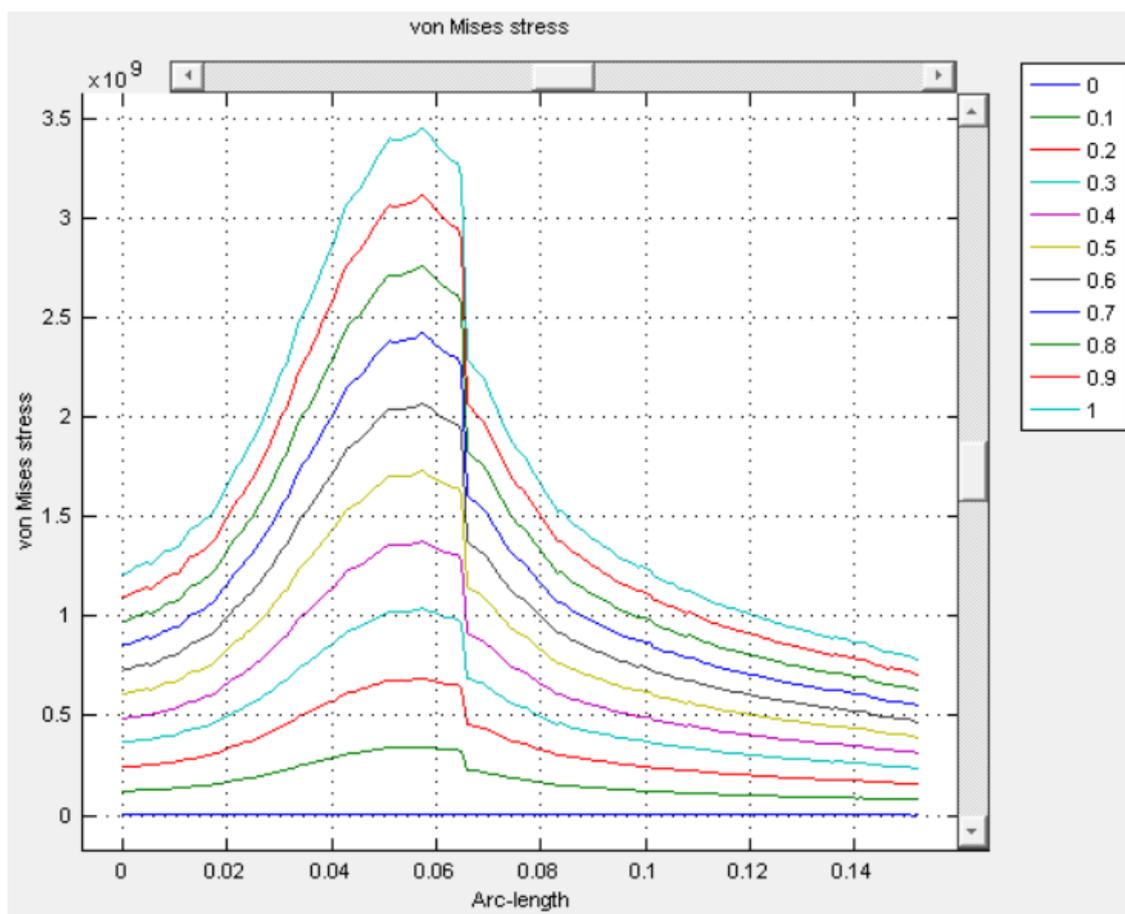


Рис.4. Нарастание НМ с перемещением зажима в пределах области концентрации напряжений вдоль касательной к границе склеивания

Модель 2-го этапа основана на представлении раздираания как процесса перколяции [6], «просачивания» точки, в которой нарушается целостность образца, вглубь материала. В каждый момент времени точка перемещается из своего текущего положения в одну из соседних точек, наиболее слабых по способности сопротивляться действующим нагрузкам, в окружении текущей точки в направлении действия раздирающей силы. Процесс перколяции предполагает существование микроструктурных неоднородностей в каждом из слоев.

Построенная в соответствии с этими представлениями компьютерная модель показала, что траектория раздираания зависит от среднего уровня прочности слоя и величины случайных вариаций этой прочности. Траектория может как удерживаться в пределах того слоя, в котором она началась, так и переходить в соседние слои, если прочность слоев по средним показателям одинакова или почти одинакова, а микроструктурные вариации прочности в соседних слоях велики настолько, что допускают переходы такого рода. Именно такой случай для 50 повторных прогонов модели показан на рис.5.

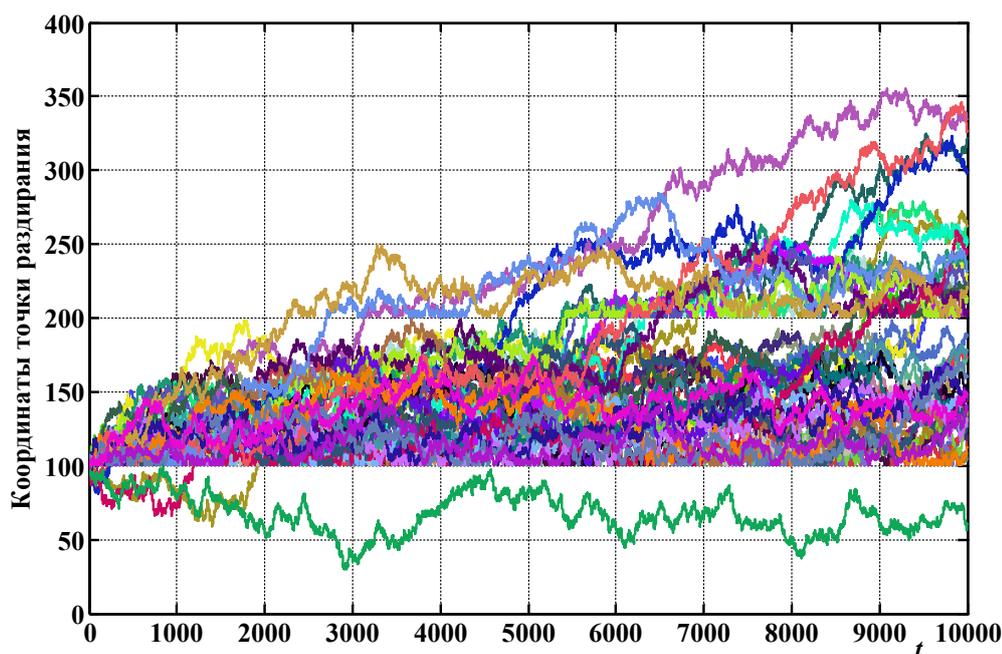


Рис.5. 50 траекторий раздираания в трех слоях клевого соединения.

В этом варианте значений параметров модели координата толщины слоя клея находится в диапазоне [0 - 100], адгезионного слоя в диапазоне [100 - 200] и слоя материала [200 - 1000]. Средние значения прочности для всех трех слоев были приняты одинаковыми, а коэффициенты вариации прочности во всех трех слоях были разными и существенными: $CVg = 10\%$; $CVa = 20\%$; $CVm = 15\%$. Старт раздирания для всех траекторий находился в точке с координатой 90, вблизи границы слоя клея и слоя адгезии.

На рисунке видно, что из 50 траекторий только одна в течение все модельного времени в 10000 шагов сохранилась в пределах одного слоя. Большая часть траекторий сосредоточилась в границах слоя адгезии, и заметная доля перешла в склеиваемый материал. Поскольку процесс носит явно выраженный вероятностный характер, для получения усредненной информации о склеевом соединении необходимо выполнить несколько повторных прогонов модели.

Перколяционная модель позволяет оценить, насколько затраты энергии при разрыве меньше значений, получаемых по средним оценкам [7]. Предположим, что средние значения силового или деформационного показателя прочности оцениваются величинами, соответственно, $SgSr$, $SaSr$, $SmSr$. Траектории на рис.5 получены при условии, эти средние одинаковы. Обозначим это значение Sr . Затраты энергии на раздирание образца на длине L пропорциональны $Q \sim Sr^2 \cdot L$. Однако, фактические затраты энергии могут быть оценены интегралом:

$$Q_p \sim \int_0^L s^2 dl$$

Интеграл вычисляется вдоль криволинейной траектории раздирания. Отношение $w = Q_p/Q$ показывает, насколько фактические расходы или

потребность в энергии раздирания меньше величины, рассчитанной по средним значениям. Поскольку траектории раздирания – случайные процессы, то и величина w – случайная. На рис.6 показана гистограмма значений w по 10000 траекторий.

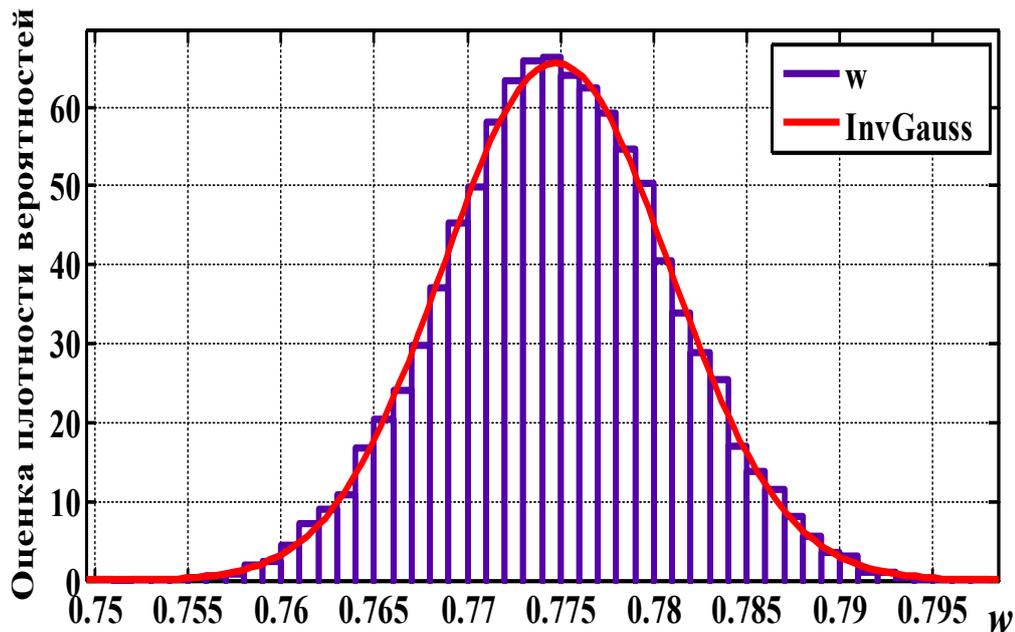


Рис.6. Гистограмма величины параметра w при равных средних прочностях слоев клея и обоих склеиваемых материалов

Из гистограммы следует, что для представленного варианта параметров модели затраты энергии на раздирание составляют в среднем 77,5% от величины, рассчитанной по средним значениям параметров. В данном примере гистограмма наилучшим образом – с наивысшим значением максимального правдоподобия – соответствует так называемому инверсному Гауссову (обратному нормальному) распределению, или распределению Вальда [9].

Таким образом, разработанные модели имитации раздирания склеенных полотен с учетом двух этапов испытания образца, особенностей геометрической структуры и физико-механических свойств материалов и

клея, а также статистического разброса этих параметров на микроуровне процесса позволяют описать испытание образца и получить оценку его поведения в зависимости от значений и вариаций параметров материала.

Литература

1. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Силовой, деформационный и энергетический критерии разрушения. // Труды ВИАМ, №10 (58), 2017. – С.97 – 111.
2. Севостьянов П.А. Компьютерные модели в механике волокнистых материалов - Москва: ТИСО Принт, 2013. - 253 с.
3. Севостьянов П.А. Методы исследования и моделирования неровноты продуктов прядения. - Москва: РГУ им. А. Н. Косыгина, 2019. - 240 с.
4. Jones R.M. Deformation Theory of Plasticity, Section 4.5.6. Bull Ridge Corporation, 2009. – 622 p.
5. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов - 17-е изд., испр. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. - 542 с.
6. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. - Изд. 2-е. - Москва: ЛИБРОКОМ, 2011. - 112 с.
7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика: для инженеров и науч. работников - Изд. 2-е, испр. - Москва: Физматлит, 2012. - 813 с.
8. Антонова А.С., Аксенов К.А. Многокритериальное принятие решений в условиях риска на основе интеграции мультиагентного, имитационного, эволюционного моделирования и численных методов // Инженерный вестник Дона, 2012, №4 (часть 2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1466

9. Khramkov V.V., Rukosueva A.A. Benefits of using simulation. // Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации. 2022. № 21. С. 270-271

10 Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1707

References

1. Erasov V.S., Oreshko E.I. Trudy VIAM, №10 (58), 2017. pp. 97 – 111.
2. Sevost'yanov P.A. Komp'yuternye modeli v mekhanike voloknistykh materialov [Computer models in the mechanics of fibrous materials] Moskva: TIsso Print, 2013. 253 p.
3. Sevost'yanov P.A. Metody issledovaniya i modelirovaniya nerovnoty produktov pryadeniya [Methods of studying and modeling the unevenness of spinning products]. Moskva: RGU im. A. N. Kosygina, 2019. 240 p.
4. Jones R.M. Deformation Theory of Plasticity, Section 4.5.6. Bull Ridge Corporation, 2009. 622 p.
5. Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. 17-e izd., ispr. Moskva: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2018. 542 s.
6. Tarasevich Yu.Yu. Perkolyaciya: teoriya, prilozheniya, algoritmy. Izd. 2-e. [Percolation: Theory, Applications, Algorithms]. Moskva: LIBROKOM, 2011. 112 p.
7. Kobzar' A.I. Prikladnaya matematicheskaya statistika: dlya inzhenerov i nauch. rabotnikov. Izd. 2-e, ispr. [Applied Mathematical Statistics: for Engineers and Scientists]. Moskva: Fizmatlit, 2012. 813 p.
8. Antonova A.S., Aksenov K.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4. (chast' 2). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2012/1466



9. Khramkov V.V., Rukosueva A.A. Molodezh'. Obshchestvo. Sovremennaya nauka, tekhnika i innovacii. 2022. № 21. pp. 270-271

10. Zyryanov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1707

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 6.01.2026

Дата публикации: 24.02.2026