

УДК 004.047

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ РЕГУЛЯРНЫХ И СЛУЧАЙНЫХ СЕТЕЙ НА ПЕРКОЛЯЦИЮ ДАННЫХ В УСЛОВИЯХ БЛОКИРОВАНИЯ УЗЛОВ

Лесько С.А., преподаватель, МГУПИ, Москва, Россия, E-mail: L_Sergey@rambler.ru

Аннотация. В статье рассматриваются различные модели и стратегии блокирования узлов сетей в их адресном и физическом пространстве. Показано, что моделирование этих процессов только в адресном пространстве является малоинформативным. Результаты моделирования в физическом пространстве сетей показали, что как в регулярных двумерных (2D), так и трехмерных (3D) структурах увеличение среднего числа связей, приходящихся на один узел, увеличивает скорость образования кластеров заблокированных узлов и порог перколяции данных. Причем в 3D структурах скорость кластеризации и увеличение порога перколяции оказывается выше. Процесс кластеризации заблокированных узлов в 3D структурах протекает быстрее, чем в 2D структурах, а наибольшей эффективностью с точки зрения потери работоспособности обладают 2D сети с множеством путей между узлами.

Ключевые слова: информационно – вычислительная сеть, блокирование узлов, топология сети, теория перколяции, порог перколяции, кластеризация.

RESEARCH OF TWO-DIMENSIONAL AND THREE-DIMENSIONAL REGULAR AND RANDOM NETWORK STRUCTURE INFLUENCE ON THE DATA PERCOLATION IN THE NODE BLOCKING CONDITIONS

Lesko S.A., Lecturer, MSUIECS, Moscow, Russia, E-mail: L_Sergey@rambler.ru

Abstract. The article describes various models and strategies of blocking network nodes in their address space and physical space. It is shown that the modeling of these processes in the address space only is less informative. The modelling results in the physical space have shown that both in regular two-dimensional (2D) and in three-dimensional (3D) structures the increase of the average number of bonds per one node increases as well the speed of formation of the blocked nodes clusters and the percolation threshold. At that in 3D structures, the speed of clustering and the percolation threshold are higher. The process of the blocked nodes clustering in the 3D structures is faster than in the 2D structures, and the highest efficiency in terms of working capacity have 2D networks with multiple bonds between their nodes.

Keywords: computer network, blocking nodes, bonds, network topology, percolation theory, the percolation threshold, clustering.

1. Введение

Одним из вопросов обеспечения надежности работы компьютерных и телекоммуникационных сетей является изучение вопросов образования групп физически связанных между собой каналами связи, но по тем или иным причинам

блокированных (исключенных из работы) узлов. При определенных условиях такие группы блокированных узлов могут увеличиваться в размерах и образовывать кластеры, что может привести к общей потере работоспособности сети. Кластер может, например, образоваться при блокировании опорных узлов сети передачи данных уровня района, города, или части базовых станций сети мобильной связи в результате пиковых нагрузок и перегрузки, или при распространении в информационно – вычислительных сетях (ИВС) эпидемии компьютерных вирусов, блокирующих работу различного сетевого оборудования.

В силу исторически сложившихся обстоятельств любая ИВС, начиная с уровня района города, имеет нерегулярную структуру. Наиболее ярким примером такой сети является Интернет. Это определяется множеством факторов, среди которых можно выделить: наличие провайдеров с различным сетевым и коммуникационным оборудованием, переменным числом абонентов с постоянно изменяющейся топологией подключения и многим другим.

Если блокированных узлов будет не очень много, то между двумя произвольно выбранными не близлежащими узлами будет сохраняться хотя бы один “открытый” путь (путь, состоящий из неблокированных узлов). Долю блокированных узлов, при которой сеть в целом потеряет работоспособность, можно назвать *порогом перколяции*, ниже значения которого сеть является работоспособной, несмотря на то, что в ней есть некоторые блокированные узлы или их группы (кластеры). Выше порога перколяции вся сеть целиком выключается и теряет работоспособность по передаче данных. И между двумя произвольно выбранными узлами нет ни одного “открытого” пути.

Исследование процессов образования кластеров блокированных узлов и перколяции данных в сетях, имеющих различную (в том числе и случайную) топологию можно проводить по двум направлениям:

- Исследование в *адресном пространстве* сети кинетики (зависимости от числа шагов или времени) изменения общего числа блокированных узлов при различных алгоритмах (стратегиях) блокирования.
- Исследование влияния *физической топологии* сетей на кинетику образования кластеров (групп связанных между собой близлежащих узлов) разного размера блокированных узлов, и перколяцию данных на разных стадиях блокирования.

Исследования в обоих направлениях могут помочь в разработке наиболее отказоустойчивых архитектур и топологий информационно – вычислительных сетей и методологии их защиты, в том числе и открытых сетей, включая Интернет.

2. Исследование кинетики блокирования узлов в адресном пространстве сети

В рамках проведенного исследования были приняты следующие упрощения: все узлы (10^6) компьютерной сети образуют единую сеть с определенной топологией (см. рис. 1), блокирование узлов происходит при заражении компьютерным вирусом. Вирус может отправить свои копии (10^2) от любого узла до любого другого произвольного узла (с вероятностью заражения $5 * 10^{-3}$), выбрав его адрес из всего множества пространства адресов (не обязательно физически связанным близлежащим узлам). Кинетика изменения общего числа заблокированных узлов сети на разных шагах развития эпидемии зависит от стратегии распространения вирусов. Причем (что отнюдь не тривиально), самой высокой скоростью обладает модель случайного распространения без разделения адресного пространства. Вместе с тем она создает и самую высокую сетевую активность (избыточный трафик), который может быть легко обнаружен и блокирована, поэтому критерием эффективности действия вирусов следует считать не только скорость блокирования, но и невысокую сетевую активность. Увеличение общего числа заблокированных узлов на разных шагах эпидемии и сетевая активность вирусов связаны между собой практически линейным образом, вне зависимости от реализующейся модели распространения.

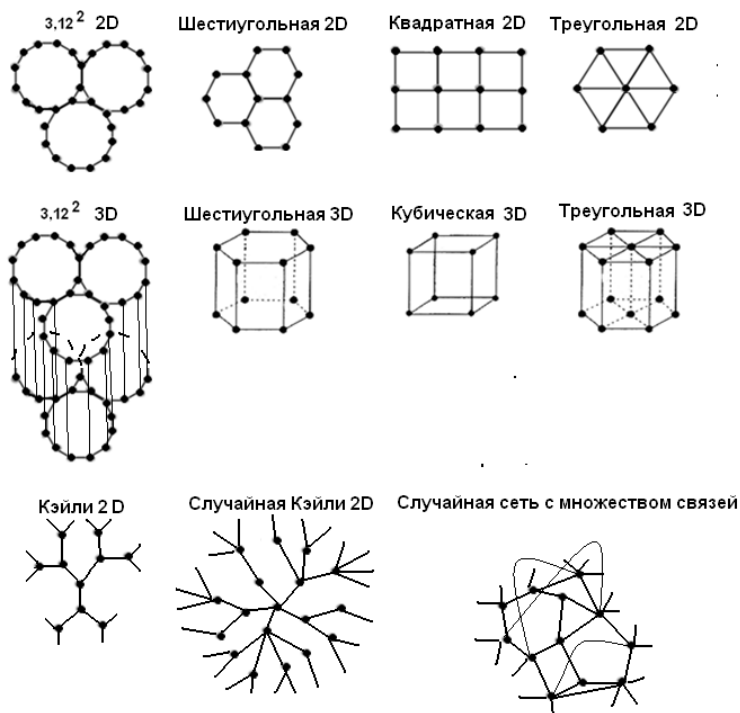


Рис. 1. Графическое представление исследованных в работе регулярных и нерегулярных двумерных (2D) и трехмерных (3D) структур

Исследование кинетики распространения вирусов и различных стратегий их поведения показывают, что моделирование процессов блокирования узлов только в

адресном пространстве ИВС являются малоинформативным, что не позволяет дать существенных рекомендаций по выработке эффективных мер превентивной защиты сетей, и разработки противодействия угрозам. Замена стандарта IPv4 с размером адресного пространства 2^{32} адреса, на стандарт IPv6 с размером адресного пространства 2^{128} адресов, замедлит (но не на много) время заражения всей сети. Время заражения уменьшается при увеличении коэффициента размножения и уменьшении длительности шага распространения вирусов. Однако искусственно уменьшать число одновременных TCP/IP соединений и создавать задержку передачи данных невозможно. Можно сделать вывод, что быстрота распространения угроз заложена в самих информационных технологиях.

Для получения необходимых результатов нужно проводить исследования и моделирование с учетом реальной физической структуры ИВС и ориентироваться на её свойства как специфической среды существования угроз.

3. Исследование кинетики блокирования узлов в физическом пространстве сетей

При обсуждении процессов кластеризации, необходимо уточнить в каком смысле используется понятие топология.

- Во-первых, можно говорить о топологии с точки зрения геометрии сети (треугольная, квадратная, сеть Кэйли и т.д., т.е. качественный подход).
- Во-вторых, с точки зрения среднего числа связей приходящихся на один узел любой сети (от регулярной, до случайной), т.е. количественный подход.

Для обсуждения полученных результатов в качестве примера рассмотрим, как реализуется в различных сетях (см. рис. 1), например модель: случайное распространение без способа деления адресного пространства (как самая быстрая с точки зрения захвата сети). Расчеты, выполненные по другим моделям распространения вирусов, показывают, что для них наблюдаются аналогичные результаты, но на *иных шагах развития эпидемии* (совпадающие с другими моделями по размеру кластеров и т.д., если сдвинуть данные по шкале: “номер шага”, т.е. *наблюдается масштабирование или сдвиг шкалы*).

На рисунке 2 приведены данные для образования кластера размером 5 заблокированных узлов. Точки, обозначенные на рисунке 2 цифрами, соответствуют сетям, имеющим соответственно структуры: регулярная сеть Кэйли (1), сеть $3,12^2$ (2), шестиугольная (3), квадратная (4) и треугольная (5) решетка, 3D структура с основой $3,12^2$ решетки (I), 3D структура с основой шестиугольной решетки (II), кубическая

решетка (III), 3D структура с основой треугольной решетки (IV). Линии на рисунке 2 указаны для обозначения поведения общих зависимостей кинетики кластеризации различных сетей.



Рис. 2. Зависимость образования кластера заблокированных узлов заданного размера от среднего числа связей

Важно отметить, что *изучение процессов образования кластеров небольших размеров является важным для сетей*, в которых может происходить *блокирование узлов в следствии их перегрузки в результате пиковых нагрузок*, возникновения длинных очередей заявок и превышения времени ожидания. Изучение процессов образования *кластеров больших размеров является более важным при блокировании узлов вследствие атак вирусов*, когда переход от малых к большим кластерам происходит очень быстро.

Как видно из рисунка 2, кинетика образования кластеров в регулярных 2D структурах является более медленной, чем в 3D сетях и 2D нерегулярных структурах. Например, в регулярной 2D треугольной решетке с числом связей на узел равным 6, кластер размера 5 образуется примерно на 35 шаге, а для случайной 2D сети с тем же числом связей примерно на 31. В квадратной решетке с числом связей на один узел – 4, кластер размера 5 образуется на 36 шаге, в нерегулярной 2D решетке на 33.

Представленные на рисунке 2 и в таблице 1 результаты показывают, что в 3D структурах, также как и в 2D скорость образования кластеров любых размеров зависит от среднего числа связей на узел и увеличивается (для кластеров всех размеров) с возрастанием числа связей.

Следует обратить внимание, что в таблице 1 для регулярных сетей, например со структурой квадратной решетки, среднее число связей равно 3,99, а шестиугольной решетки 2,99, треугольной решетки 5,99. Это связано с тем, что рассматриваются хотя и большие, но конечные структуры, в которых граница играет определенную роль

(узлы на границе имеют меньшее по сравнению с другими число связей). Для бесконечных решеток точное теоретическое значение среднего (на узел) числа связей соответственно будет равно 4,3 и 6.

Таблица 1.

Тип сети	Среднее число связей на один узел в сети конечного размера с данной структурой	Номер шага, на котором достигается выбранный кластер		
		Размер кластера 5 узлов	Размер кластера 50000 узлов	Размер кластера 999900 узлов
Решетка $3,12^2$ (2D структура)	2,66	40	75	87
Треугольная решетка (2D структура)	5,99	35	45	68
Квадратная решетка (2D структура)	3,99	36	47	67
Шестиугольная решетка (2D структура)	2,99	38	58	73
3D структура с основой $3,12^2$ решетки	4,66	35	60	70
3D структура с основой треугольной решетки	7,99	27	36	68
Кубическая решетка	5,99	28	38	57
3D структура с основой шестиугольной решетки	4,99	32	50	63

Особого обсуждения требует сеть Кэйли. Вне зависимости от того, является она регулярной, или имеет случайное число связей на один узел, среднее число связей, приходящихся на один узел сети конечного размера, стремится к 2. Это связано с тем, что при любой структуре сети Кэйли большая часть её узлов находится на внешней границе (является листьями графа сети).

Влияние граничных узлов, имеющих меньшее, чем остальные узлы число связей, для случайной сети с множеством путей между узлами оказывается более существенным, чем для сетей с регулярными структурами и краевые эффекты для таких сетей являются весьма значительными.

Моделирование кластеризации заблокированных узлов в сетях с различной структурой (см. таблицу 1 и рис. 2) позволяет сделать следующие выводы:

- Для регулярных 2D структур скорость образования кластеров любых размеров увеличивается с ростом среднего числа связей на один узел (для кластеров всех размеров) в ряду: регулярная сеть Кэйли, $3,12^2$, шестиугольная, квадратная и треугольная решетка. А для регулярных 3D структур в ряду: 3D структура с основой $3,12^2$ решетки, 3D структура с основой треугольной решетки, кубическая решетка, 3D структура с основой шестиугольной решетки (гексагональная структура).

- При общем одинаковом среднем числе связей (см. например область от 5 до 6 связей на рис. 2), приходящихся на один узел, в регулярных сетях с 3D структурой процесс кластеризации протекает быстрее, чем в 2D структурах. Случайные нерегулярные сети с размерностью 2D и множеством связей между узлами по скорости кластеризации занимают промежуточное положение между регулярными 2D и 3D структурами.

- При одинаковой размерности пространства структуры сетей (2D сети), наличие симметрии (регулярные решетки) замедляет процесс кластеризации по сравнению со случайными структурами. Увеличение размерности от 2D до 3D увеличивает скорость кластеризации. В частности можно сравнить двумерные и трехмерные структуры с одинаковым средним числом связей на узел (треугольная решетка (2D структура) и кубическая решетка (3D структура) – 5,99).

- Для случайных 2Dсетей с множеством путей между узлами, до блокирования, как минимум, половины узлов сети, увеличение среднего числа связей на один узел ускоряет процесс блокирования узлов (в рамках рассмотрения однотипной структуры).

В таблице 2 и на рисунке 3 представлены данные, показывающие зависимость доли зараженных узлов, при которой сеть с данной структурой теряет способность по передаче данных (порог перколяции) от среднего числа связей на один узел в сети с данной структурой. Полужирным курсивом в последней колонке таблицы 2 указаны пороги перколяции в пересчете на одну связь – *приведенные пороги перколяции*.

Таблица 2.

Тип сети	Число связей на один узел (для сетей со случайной структурой)	Среднее число связей на один узел в сети конечного размера с данной структурой	Среднее число связей на один узел в бесконечной сети с данной структурой (если исключить влияние границ)	Доля зараженных узлов, при которой сеть теряет способность к передаче данных p_c
Сеть Кэйли со случайным числом связей на один узел	от 3 до 5	1,99	4	0,210 (0,053)
	от 3 до 6		4,5	0,245 (0,054)
	от 3 до 7		5	0,280 (0,056)
	от 3 до 10		6,5	0,290 (0,045)
	от 3 до 15		9	0,365 (0,041)
	от 4 до 9		6,5	0,290 (0,045)
	от 4 до 12		8	0,335 (0,042)
	от 4 до 15		9,5	0,295 (0,031)
	от 4 до 17		10,5	0,330 (0,031)
	от 7 до 10		8,5	0,340 (0,040)
	от 7 до 15		11	0,355 (0,032)
	от 7 до 20		13,5	0,360 (0,027)
	от 10 до 15		12,5	0,350 (0,028)
	от 10 до 20		15	0,440 (0,029)
Случайная сеть с множеством путей между узлами	от 3 до 5	2,36	4	0,485 (0,121)
	от 3 до 6	2,82	4,5	0,575 (0,128)
	от 3 до 7	3,29	5	0,635 (0,127)
	от 3 до 10	4,7	6,5	0,730 (0,112)
	от 3 до 15	6,15	9	0,850 (0,094)
	от 4 до 9	4,75	6,5	0,750 (0,115)

		от 4 до 12	6,17	8	0,815 (<i>0,102</i>)
		от 4 до 17	9,41	10,5	0,830 (<i>0,079</i>)
		от 4 до 19	10,02	11,5	0,850 (<i>0,074</i>)
		от 7 до 10	6,75	8,5	0,825 (<i>0,097</i>)
		от 7 до 17	10,31	12	0,870 (<i>0,073</i>)
		от 10 до 15	10,69	12,5	0,865 (<i>0,069</i>)
		от 7 до 20	11,07	13,5	0,885 (<i>0,066</i>)
		от 10 до 20	13,10	15	0,885 (<i>0,059</i>)
	Сеть Кэйли со случайным числом связей на один узел и дополнительными каналами	от 3 до 7	1,99	5	0,270 (<i>0,054</i>)
		от 3 до 10		6,5	0,340 (<i>0,052</i>)
		от 3 до 15		9	0,315 (<i>0,035</i>)
		от 4 до 9		6,5	0,355 (<i>0,055</i>)
		от 4 до 12		8	0,320 (<i>0,040</i>)
		от 4 до 17		10,5	0,300 (<i>0,029</i>)
		от 4 до 19		11,5	0,330 (<i>0,029</i>)
		от 7 до 10		8,5	0,340 (<i>0,040</i>)
		от 7 до 15		11	0,320 (<i>0,029</i>)
		от 7 до 17		12	0,375 (<i>0,031</i>)
		от 7 до 20		13,5	0,375 (<i>0,028</i>)
		от 10 до 15		12,5	0,375 (<i>0,030</i>)
	от 10 до 20	15	0,375 (<i>0,025</i>)		
	Решетка $3,12^2$	–	2,66	2,7	0,185 (<i>0,069</i>)
	Треугольная решетка	–	5,99	6	0,525 (<i>0,088</i>)
	Квадратная решетка	–	3,99	4	0,405 (<i>0,101</i>)
	Шестиугольная решетка	–	2,99	3	0,305 (<i>0,101</i>)
	3D структура с основой $3,12^2$ решетки	–	4,66	4,7	0,515(<i>0,110</i>)
	3D структура с основой треугольной решетки	–	7,99	8	0,735(<i>0,092</i>)
	Кубическая решетка	–	5,99	6	0,685(<i>0,114</i>)
	3D структура с основой шестиугольной решетки	–	4,99	5	0,590(<i>0,118</i>)

В качестве порога перколяции можно выбрать долю заблокированных узлов всей сети, при которой, между двумя любыми произвольно выбранными её узлами нет ни одного открытого пути передачи данных (цепочки неблокированных узлов).

Точки, обозначенные на рисунке 3 цифрами, соответствуют сетям, имеющим структуры: $3,12^2$ (1), шестиугольная (2), квадратная (3) и треугольная (4) решетка, 3D структура с основой $3,12^2$ решетки (I), 3D структура с основой шестиугольной решетки (II), кубическая решетка (III), 3D структура с основой треугольной решетки (IV). Линии на рисунке 3 указаны для обозначения общих зависимостей поведения приведенного порога перколяции различных сетей, в расчете на одну связь (указаны в таблице 2 полужирным курсивом).

При построении реальной ИВС экономические затраты вряд ли позволят существенно увеличивать число связей, даже между критически важными, опорными узлами. Очевидно, что у любого выбранного опорного узла не может быть менее двух связей (в противном случае это будет висящая вершина), а число связей от 2 до 3 связей является вполне приемлемым. Таким образом, наибольший интерес на рисунке 3 представляет область небольшого среднего числа связей в расчете на один узел.

Рисунок 3 показывает, что при небольшом среднем числе связей на один узел самым высоким порогом перколяции в расчете на одну связь обладают 2D сети с множеством путей между узлами (имеют порог перколяции от 0,5 до 0,9 (см. таблицу 2), или в расчете на одну связь от 0,12 до 0,06).

Среднее число связей на один узел в сети конечного размера с данной структурой и доля заражённых узлов, при которой сеть теряет способность к передаче данных, определялись в результате численных экспериментов.

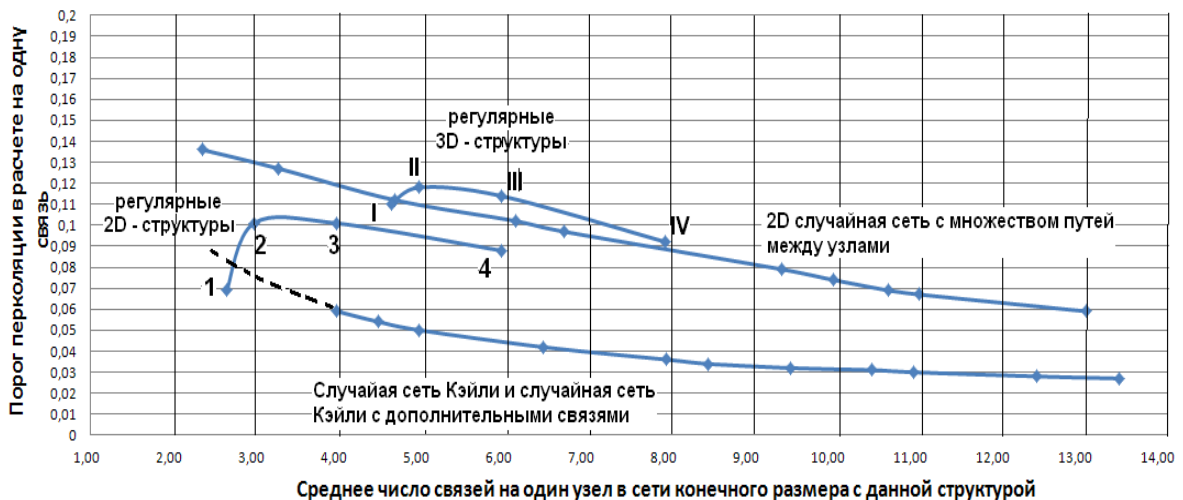


Рис. 3. Зависимость порога перколяции в расчете на один узел, от среднего числа связей, приходящихся на один узел в сети конечного размера (с данной структурой)

Случайные сети Кэйли и случайные сети Кэйли с дополнительными связями по своим перколяционным свойствам оказываются практически одинаковыми.

Увеличение размерности приводит и к возрастанию среднего числа связей, приходящихся на один узел. В связи с этим **необходимо сравнивать именно приведенные значения величины порога перколяции** в расчете на одну связь. Увеличение размерности структуры с 2-х до 3-х при одинаковом среднем числе связей увеличивает порог перколяции (надежность) сетей.

Наличие симметрии в структуре сети не оказывает существенного влияния на увеличение или уменьшение порога перколяции, такой же степени как изменение её размерности (см. на рис. 3 область среднего числа связей на один узел от 5 до 8).

Эти выводы являются очень важными для возможного повышения надежности работы сетей. Сеть Интернет, скорее всего, является структурой типа случайной сети Кэйли с дополнительными каналами между узлами. Однако, за счет относительно небольших изменений, она может быть превращена в структуру типа случайной сети с множеством путей между узлами, что существенно повысит её надежность и отказоустойчивость по передаче данных, вследствие повышения величины порога потери проводимости (перколяции) в целом.

Порог протекания (перколяции) данных позволяет взглянуть на проблему обеспечения надежности с одной очень важной стороны. Существующие компьютерные угрозы, как правило, используют для своего проникновения и блокирования, уязвимости определенного типа (не являются мультивекторными), которые являются различными для разных программно – аппаратных платформ, коммуникационного оборудования, программного обеспечения и т.д. которое обеспечивает работу отдельных узлов и всей сети в целом. Если, например, сеть Интернет по своей топологии является структурой Кэйли со случайным числом связей на один узел и дополнительными каналами, то интерполяция поведения порога перколяции к среднему числу связей равному 3 (пунктирная линия на рисунке 3) дает для неё величину приведенного порога перколяции равную 0,075, а в расчете на всю структуру 0,225. Следовательно, доля однотипного оборудования и программного обеспечения для такой сети не должна превышать 22,5% , а для случайной сети с множеством путей между узлами, 39% ($0,13 \cdot 3 = 0,39$ см. рис. 3). Это пассивным образом может предотвратить потерю работоспособности сети в целом, несмотря на то, что работоспособность и передача данных отдельных её узлов и сегментов может оказаться блокированной. Возможно, необходимо ввести антимонопольный запрет на долю рынка, используемого оборудования и программного обеспечения с учетом порога перколяции для используемых топологий сетей.

4. Выводы

- Методами математического моделирования с привлечением вычислительных экспериментов проведено комплексное исследование кинетики блокирования узлов в сетях с двумерной и трехмерной регулярной и случайной структурой при различных стратегиях поведения блокираторов. Показано, что моделирование этих процессов

только в адресном пространстве сетей является малоинформативным, и не позволяет дать существенных рекомендаций по выработке эффективных мер обеспечения защиты и надежности компьютерных сетей. Быстрота блокирования сетей заложена в специфике самих информационных технологиях, и для повышения отказоустойчивости нужно проводить исследования, с учетом реальной физической структуры сетей.

- Комплексное исследование влияния физической топологии сетей на их работоспособность показывает, что математический аппарат теории перколяции может быть использован, как новый метод моделирования в них процессов передачи данных в условиях блокирования узлов, а *результаты её применения позволяют разработать новые методы повышения надежности и защиты компьютерных сетей*.

- В результате проведенных вычислительных экспериментов было обнаружено, что как в регулярных двумерных (2D), так и трехмерных (3D) структурах увеличение среднего числа связей, приходящихся на один узел, увеличивает скорость образования кластеров блокированных узлов и порог перколяции данных. Причем в 3D структурах скорость кластеризации и увеличение порога перколяции оказывается выше.

- Методами математического моделирования показано, что при общем одинаковом среднем числе связей, приходящихся на один узел в регулярных сетях с 3D структурой, процесс кластеризации блокированных узлов протекает быстрее, чем в 2D структурах. Случайные сети с размерностью 2D по скорости кластеризации занимают промежуточное положение между регулярными 2D и 3D структурами.

- Вычислительные эксперименты показали, что при небольшом среднем числе связей на один узел самым высоким порогом перколяции при блокировании узлов в расчете на одну связь и наибольшей эффективностью с точки зрения потери работоспособности обладают 2D сети с множеством путей между узлами.

- Моделирование показало, что увеличение размерности структуры с 2-х до 3-х при одинаковом среднем числе связей увеличивает порог перколяции (надежность и отказоустойчивость) сетей при блокировании узлов.

- Исследования показали, что наличие симметрии в структуре сети (при одинаковом среднем числе связей на узел) не оказывает существенного влияния на увеличение или уменьшения порога перколяции, в такой же степени как изменение её размерности.

Список литературы:

1. C.C. Zou, W. Gong, D. Towsley. Code Red Worm Propagation Modeling and

Analysis. // In 9th ACM Symposium on Computer and Communication Security. – Washington DC, USA. – 2002. – P. 138 – 147.

2. Кестен Х. Теория просачивания для математиков. — Москва: Мир, 1986, — 392 с.

3. Лесько С.А., Жуков Д.О., Самойло И.В.. Математическое моделирование перколяционных процессов передачи данных и потери работоспособности в информационно – вычислительных сетях с 2D и 3D регулярной и случайной структурой. / «Качество. Инновации. Образование», № 97, 2013 — С. 42–50.