

**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki



PRACA INŻYNIERSKA

DOROTA WOJTAŁOW, JACEK ZŁYDACH

**SYMULACJA ROZPRZESTRZENIANIA SIĘ DYMU I OGNIĄ W
OPARCIU O NIEHOMOGENICZNE AUTOMATY KOMÓRKOWE**

PROMOTOR:
dr inż. Jarosław Wąs

Kraków 2010

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZĄ PRACĘ DYPLOMOWĄ WYKONAŁEM OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE, I NIE KORZYSTAŁEM ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMNIENIONE W PRACY.

.....

PODPIS



DOROTA WOJTAŁOW, JACEK ZŁYDACH

**SIMULATION OF FIRE AND SMOKE BY USING
NON-HOMOGENEOUS CELLULAR AUTOMATA**

SUPERVISOR:
Jarosław Wąs Ph.D

Krakow 2010

Serdecznie dziękujemy ...

Spis treści

1. Wstęp	6
1.1. Temat pracy	6
1.2. Geneza tematu	6
1.3. Realizacja projektu	7
1.4. Zawartość pracy	7
2. Teoria	8
2.1. Czym jest ogień	8
2.2. Propagacja ciepła	9
2.2.1. Przewodnictwo	9
2.2.2. Konwekcja	10
2.2.3. Radiacja	10
2.2.4. Zależność temperatury od dostarczonej energii	12
3. Automaty komórkowe	13
3.1. Definicja automatu komórkowego	13
3.2. Klasyfikacja automatów komórkowych	14
4. Projekt	16
4.1. Główne założenia	16
4.2. Architektura aplikacji	16
4.2.1. Moduł Controller	17
4.2.2. Moduł Scene	19
4.2.3. Moduł Model	19
5. Algorytm	20
5.1. Model automatu	20

1. Wstęp

1.1. Temat pracy

Tematem pracy jest stworzenie symulacji rozprzestrzeniania się dymu i ognia w oparciu o niehomogeniczne automaty komórkowe. Zakres pracy obejmuje stworzenie symulacji rozchodzenia się dymu i ognia na podstawie automatów komórkowych wraz z jej wizualizacją, a także walidację stworzonego modelu. Celem pracy jest pokazanie możliwości niehomogenicznych automatów komórkowych jako narzędzia umożliwiającego odzwierciedlenie rzeczywistego rozprzestrzeniania się dymu i ognia podczas pożaru.

1.2. Geneza tematu

W dobie wszechobecnej urbanizacji i ciągłego budownictwa, wraz ze wzrostem świadomości dotyczącej bezpieczeństwa pożarowego oraz zaangażowania w jego zagwarantowaniu pojawiła się potrzeba możliwości modelowania i obserwacji rozprzestrzeniania się ognia w zamkniętych budynkach. Wspomniane symulacje pożarów wykazują szereg zastosowań. Są z powodzeniem wykorzystywane w śledztwach. Dają możliwość odtworzenia przebiegu zdarzeń i porównania z wynikami oględzin. Umożliwiają zbadanie prototypu budynku pod kątem gwarancji bezpieczeństwa pożarowego. Ułatwiają projektowanie systemów oddymiania. W połączeniu z modelami ewakuacji ludzi stanowią kompleksowy system ułatwiający tworzenie bezpiecznych budowli.

W ostatnich latach powstał szereg programów umożliwiających wizualizację symulacji rozchodzenia ognia. Opracowane dotychczas rozwiązania swoje działanie opierają na metodach numerycznej dynamiki płynów (ang. Computational Fluid Dynamics). Niewątpliwą zaletą numerycznego podejścia jest dokładność wyników. Głównymi wadami jest złożoność obliczeń i stopień komplikacji modelu. Niehomogeniczne automaty komórkowe umożliwiają znaczne uproszczenie modelu. Uproszczenie modelu powoduje z kolei redukcję złożoności obliczeń czyniąc automaty komórkowe szczególnie dogodną metodą w przypadku tworzenia prototypów oraz symulacji czasu rzeczywistego.

Teza Wykorzystując zasady tworzenia automatów komórkowych oraz w oparciu o prawa fizyki można w realistyczny sposób przy użyciu niehomogenicznych automatów komórkowych zamodelować zjawiska rozchodzenia się ognia i dymu podczas pożaru.

W celu wykazania powyższej tezy przeprowadzono następujące działania:

- Przeprowadzono badania dotyczące zjawisk fizycznych zachodzących podczas pożaru.
- Zidentyfikowano czynniki mające kluczowy wpływ na kształt i charakter pożaru.
- Zaproponowano model niehomogenicznego automatu komórkowego odzwierciedlającego prawa fizyczne.
- Zaimplementowano opracowany algorytm wraz z wizualizacją wyników oraz możliwością edycji danych wejściowych oraz kontroli symulacji w czasie rzeczywistym.
- Dokonano weryfikacji jakościowej zaproponowanego modelu.

1.3. Realizacja projektu

Praca została zrealizowana jako wolnostojąca aplikacja komputerowa napisana w języku Java. Do renderowania grafiki trójwymiarowej została użyta biblioteka graficzna Java3D. Aplikacja została przetestowana z wykorzystaniem biblioteki JUnit4.

1.4. Zawartość pracy

Praca składa się z [iluć] rozdziałów. W pierwszym rozdziale znajdują się podstawy teoretyczne, związane zarówno z modelowanymi zjawiskami fizycznymi jak i użytym algorytmem. Rozdział Modele symulacji zawiera propozycje zweryfikowanych modeli rozprzestrzeniania się dymu i ognia zaprojektowanych w oparciu o niehomogeniczne automaty komórkowe. Rozdział Implementacja przedstawia sposób realizacji projektu, napotkane problemy oraz ich rozwiązania. Opisuje możliwości graficznego interfejsu użytkownika oraz sposób korzystania z niego.

2. Teoria

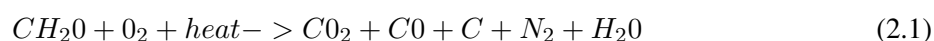
Kluczowym elementem, niezbędnym do prawidłowego zamodelowania pożaru jest zrozumienie czym jest ogień oraz poznanie zjawisk jakim podlega. Niniejszy rozdział zawiera krótki wstęp teoretyczny, przedstawiający zjawiska fizyczne niezbędne do zrozumienia istoty pożaru i prawidłowego jego zamodelowania.

2.1. Czym jest ogień

Ogień nie jest substancją. Ogień powstaje jako produkt reakcji chemicznej zachodzącej między paliwem i tlenem. Obserwowalną postać ognia, czyli to co widzimy i nazywamy ogniem tworzy światło powstałe w wyniku ruchu rozgrzanego powietrza. Jest to jednak tylko jeden z aspektów tego złożonego procesu. Elementami koniecznymi do powstania i podtrzymania ognia są:

- tlen
- paliwo
- ciepło

Paliwem może być ciecz, ciało stałe lub gaz. Samo w sobie paliwo nie ulega spalaniu. Paliwo pod wpływem ciepła pochodzącego np. z zapalki lub otrzymanego od innego nagrzanego ciała ogrzewa się. Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury, paliwo ulega procesowi dekompozycji. Jednym z produktów dekompozycji są opary. W przypadku jednego z najbardziej popularnych paliw - drewna oprócz oparów w wyniku dekompozycji otrzymujemy węgiel i popiół. Spalanie drewna przedstawia poniższa reakcja 2.1:



Kiedy opary osiągną odpowiednią temperaturę tzw. temperaturę zapłonu (w przypadku drewna wynosi ona ok. $300^{\circ}C$) oraz gdy ich stężenie w powietrzu jest odpowiednie może dojść do zapłonu. Do zapłonu dochodzi w wyniku kontaktu z otwartym ogniem, iskrą lub w wyniku osiągnięcia przez opary temperatury tzn. samozapłonu. Wynikiem zapłonu jest spalanie oparów. Jak widać głównym substratem reakcji spalania są opary powstające w wyniku ogrzania paliwa. W przypadku niektórych paliw jest to jedyny reagent. Jednym z przykładów jest benzyna, która w wyniku ogrzania w całości zamienia się w opary ulegające spalaniu. W przypadku drewna, poza oparami spalaniu ulega także węgiel. Jest to jednak reakcja bardzo powolna. Na szczególną uwagę zasługuje fakt wytwarzania energii cieplnej w procesie spalania, co powoduje samoistne podtrzymanie ognia. Płomień będący wizualną postacią spalania ogrzewa sąsiadujące cząsteczki paliwa, dzięki czemu nie gaśnie.

Bardzo istotnym reagentem w procesie spalania jest tlen. Atomy gazów, oparów powstałych w wyniku podgrzania paliwa w wyniku zapłonu łączą się z tlenem. Aby mogło dojść do reakcji spalania bardzo ważne jest zachowanie odpowiednich proporcji między substratami reakcji. Lower Explosive Limit (LEL) określa minimalne stężenie oparów w powietrzu, konieczne aby mogło dojść do zapłonu. Odpowiednio, Upper Explosive Limit (UEL) oznacza maksymalne stężenie oparów, powyżej którego nie dojdzie do zapłonu. Przykładowo: dla tlenku węgla $LEL = 12$, natomiast $UEL = 75$, co oznacza w powietrzu musi być między 12% – 75% aby mogło dojść do jego zapalenia. LEL oraz UEL określają

także pośrednio wymaganą ilość tlenu. Dla większości paliw ilość tlenu wymaganego do zapłnu wynosi ok. 15%.

2.2. Propagacja ciepła

Jak zostało wspomniane w rozdziale ?? jednym z czynników niezbędnych do podtrzymania ognia jest ciepło. Ciepło podczas pożaru jest propagowane na trzy różne sposoby:

- Przewodnictwo
- Konwekcja
- Radiacja

2.2.1. Przewodnictwo

Przewodnictwo cieplne jest procesem, który polega na wymianie ciepła pomiędzy nierównomiernie ogrzаныmi ciałami będącymi w kontakcie. Zachodzi ono we wszystkich stanach skupienia: ciałach stałych, cieczach i gazach, jednak sposób i skala tego zjawiska jest bardzo zróżnicowana. Najczęściej mówimy o przewodnictwie w ciałach stałych. W cieczach i gazach występuje ono niezmiernie rzadko i polega na zderzeniach cząsteczek podlegających nieorganizowanym, przypadkowym ruchom i ich dyfuzji. W ciałach stałych przenoszenie ciepła odbywa się na dwa sposoby:

- dzięki drganiom atomów
- poprzez ruch elektronów

Celem omawianego przewodnictwa jest osiągnięcie równowagi cieplnej. Podczas przewodnictwa ciepło jest zawsze przenoszone od ciała o większej temperaturze do ciała o niższej. Zgodnie z zasadą zachowania energii, głoszącą że w układzie izolowanym suma wszystkich energii jest stała, ilość energii uzyskanej przez ciało chłodniejsze jest równa ilości energii oddanej przez cieplejszy obiekt. Energia przenoszona jest wraz z ruchem cząsteczek wewnętrznych. Nie wszystkie ciała przewodzą ciepło w takim samym sposób. Zależność między ilością ciepła przewodzonego przez ciało, a jego zmianą temperatury najlepiej opisuje prawo Fouriera. Przyjmuje ono następującą postać:

$$q(r, t) = -k * gradT \quad (2.2)$$

gdzie: k - współczynnik przewodzenia ciepła [$W/(m * K)$] T - temperatura [K] q - natężenie strumienia ciepła [$W/(m^2)$] Prawo Fouriera oznacza, że gęstość strumienia ciepła przekazywana w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię jest proporcjonalna do gradientu temperatury. Minus we wzorze wynika ze wspomnianego wyżej kierunku przepływu ciepła: od ciała cieplejszego do zimniejszego. Strumień ciepła jest mierzony w kierunku zgodnym z jego przepływem, zatem przyrost temperatury będzie miał wartość ujemną.

Do dobrych przewodników należą przede wszystkim:

- metale - do najlepszych należą srebro, miedź, złoto, aluminium

Źle przewodzą ciepło:

- drewno
- papier
- ciecze
- gazy

Materiał	Temp. [C]	Wspł. przewodnictwa [$W/(m * K)$]
Beton	20	0.84-1.3
Drewno	-	0.1-0.17
Szkło crown	20	0.22-0.29
Azbest	20	0.16-0.37
Guma wulkanizowana	20	0.22-0.29
Miedź	20	400
Stal	20	10
Ołów	20	30
Powietrze	20	0.025

Tablica 2.1: Współczynniki przewodnictwa materiałów

Zła przewodność cieczy i gazów wynika z istoty procesu przewodnictwa w tych stanach skupienia. Za wysoką wartość współczynnika przewodnictwa odpowiada ruch elektronów. Dlatego też, we wszystkich dielektrykach wartość ta przyjmuje wartości z przedziału $[0,001 - 3][W/(m * K)]$, podczas gdy w metalach może sięgać ona nawet $400[W/(m * K)]$.

Na uwagę zasługuje też fakt, że przewodność metali maleje wraz ze wzrostem ich temperatury. Tabela 2.1 zawiera współczynniki przewodnictwa przykładowych materiałów, które zostały wykorzystane przy testowaniu algorytmu symulacji.

2.2.2. Konwekcja

Konwekcja, zwana też unoszeniem lub wnikanem jest to zgodnie ze szkolną definicją sposób przewodnictwa ciepła polegający na "unoszeniu prąbranej energii cieplnej przez cząsteczki substancji i dzięki swojej wędrówce przekazywaniu energii innym cząsteczkom". Jak się znajdzie jakaś inna przystępna definicja to podmienić Konwekcja zachodzi we wszystkich płynach, czyli zarówno ciecach jak i gazach. Nie zachodzi natomiast w ciałach stałych. Konwekcja ze względu na połączenie w sobie dwóch zjawisk:

- przekazywania ciepła
- ruchu płynów

jest zjawiskiem niezwykle skomplikowanym do teoretycznego ujęcia. Przenoszenie ciepła w konwekcji zachodzi wskutek ruchu płynu, tak więc warunkiem niezbędnym do wystąpienia zjawiska konwekcji jest ruch ośrodka. Można wyróżnić dwa podstawowe typy konwekcji, dzielące zjawisko wnikania ze względu na przyczynę ruchu ośrodka:

- konwekcja naturalna - w tym przypadku ruch płynu wywołany jest różnicami gęstości substancji znajdujących się w polu grawitacyjnym
- konwekcja wymuszona - ruch płynu spowodowany jest działaniem urządzeń zewnętrznych (wentylatorów, pomp)

Przykładem konwekcji naturalnej jest unoszenie ciepłego powietrza w pomieszczeniu. Ogrzane powietrze zmniejsza swoją gęstość, w wyniku czego unosi się do góry. Jego miejsce wypełnia zimne powietrze, które w kolejnym etapie ulega ogrzaniu rozpoczynając kolejny cykl wędrówki powietrza. Ruchy powietrza wywołane zjawiskiem konwekcji tworzą tzw. prądy konwekcyjne. Konwekcja naturalna jest typem konwekcji występującym podczas pożaru.

2.2.3. Radiacja

Radiacja, czyli inaczej promieniowanie jest to sposób rozchodzenia ciepła w postaci fal elektromagnetycznych. Najważniejszym aspektem przewodnictwa ciepła przez promieniowanie jest możliwość

wymiany ciepła między ciałami nie stykającymi się. W bardzo niskich temperaturach ilość przekazywanego przy pomocy radiacji ciepła jest tak mała, że zjawisko to może być pomijane. Wzrost znaczenia promieniowania następuje wraz ze wzrostem temperatury ciał wymieniających ciepło. Przyjmuje się, że radiacja zachodzi dla ciał o temperaturach wyższych od 0° Kelvin. Promieniowanie jest rodzajem wymiany energii, która nie wymaga żadnego nośnika. Każde ciało emituje fale. W normalnych warunkach większość promieniowania zachodzi przy udziale fal podczerwonych. Należy jednak pamiętać że w radiacji mogą brać udział także fale świetlne czy ultrafioletowe. Poza emisją promieniowania każde ciało reaguje także na fale wysyłane przez innych. Dla każdego ciała jesteśmy w stanie określić wartości trzech współczynników opisujących reakcję ciała na wiązkę promieniowania. Należą do nich:

- Absorpcyjność czyli pochłanianiałość
- Refleksyjność czyli odbijalność
- Przepuszczalność

Radiacja następuje we wszystkich kierunkach aż do momentu zablokowania drogi promieni przez ciało pochłaniające je. Większość ciał stałych o rozmiarach większych od kilku mikrometrów nie przepuszcza promieniowania. Na wspomnianej głębokości pod powierzchnią ciała następuje całkowita absorpcja promieniowania cieplnego. Ponadto ciała stałe mogą przepuszczać fale tylko o określonej długości. Przykładem jest szkło, które przepuszcza jedynie fale świetlne. Ilość promieniowania emitowanego przez ciało szare można obliczyć ze wzoru 2.3

$$\dot{Q}_{emit} = \sigma * \varepsilon * A_s * T_s^4 \quad (2.3)$$

gdzie

- $\varepsilon \in (0, 1)$ - emisyjność powierzchni. $\varepsilon = 1$ - dla ciała doskonale czarnego. Określa jak bardzo dane ciało jest podobne do ciała doskonale czarnego.
- $\sigma = 5.67 * 10^{-8} [W/(m^2 * K^4)]$ - stała promieniowania
- $A_s [m^2]$ - powierzchnia
- $T_s [K]$ - temperatura

Przeanalizujmy przykład promieniowania między rzeczywistymi obiektami znajdującymi się w pewnym pomieszczeniu np. stół w pokoju. W przypadku jednej powierzchni zamkniętej w innej (w omawianym przypadku wewnętrzną powierzchnią będzie powierzchnia stołu, natomiast zewnętrzną ściany pokoju) zakłada się, że wewnętrzna powierzchnia nie opromienia siebie. Innymi słowy całe promieniowanie ciała wewnętrznego przechodzi do powierzchni zewnętrznej. W drugim kierunku następuje tylko częściowe przejście energii z ciała zewnętrznego do wewnątrz. Ponadto, w przypadku gdy otaczająca powierzchnia jest znacząco większa od powierzchni wewnętrznej i obie powierzchnie są oddzielone gazem, który nie promieniuje (powietrze) zjawisko promieniowania zachodzi równolegle ze zjawiskiem konwekcji i oba te zjawiska należy wziąć pod uwagę równocześnie. W takim przypadku wymianę ciepła można określić za pomocą wzoru 2.4

$$\dot{Q}_{cak} = c_{ak} * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_{inf}^4) \quad (2.4)$$

gdzie:

- c_{ak} — *całkowity współczynnik wymiany ciepła* T_{inf} — *temperatura powietrza w znacznej odległości* Omówione powyżej procesy podowują, że promieniowanie jest zjawiskiem szczególnie skomplikowanym.

2.2.4. Zależność temperatury od dostarczonej energii

Opisane w podrozdziałach 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 metody obrazują różne sposoby przekazywania energii między cząsteczkami materii. Po ich poznaniu należy zadać sobie pytanie w jaki sposób ta energia wpływa na temperaturę substancji? Wielkością reprezentującą zależność między dostarczoną energią a temperaturą substancji jest ciepło właściwe. Ciepło właściwe jest wielkością charakterystyczną dla materiału i informuje ono o tym ile ciepła należy dostarczyć aby ogrzać 1kg substancji o $1^{\circ}C$. Opisaną powyżej zależność przedstawia wzór 2.5

$$c = Q / (m * \Delta T) \quad (2.5)$$

gdzie:

- c - ciepło właściwe [$J / (kg * K)$]
- m - masa ciała [kg]
- T - temperatura [K]

Znając ilość ciepła dostarczonego do ciała w wyniku procesów przekazywania energii oraz dokonując przekształcenia powyższego wzoru można w bardzo prosty sposób policzyć zmianę temperatury badanego ciała.

3. Automaty komórkowe

W rozdziale tym wyjaśniono pojęcie automatu komórkowego, przedstawiono formalną definicję automatów komórkowych oraz ich najczęstsze zastosowania. Podczas omawiania automatów zamieszczono ogólny algorytm symulacji z wykorzystaniem automatów komórkowych. Zasadę działania prostych automatów przedstawiono na przykładzie gry Life. Szczególną uwagę podczas opisu automatów komórkowych poświęcono niehomogenicznym automatom komórkowym, gdyż to one zostały wykorzystane do symulacji pożaru.

3.1. Definicja automatu komórkowego

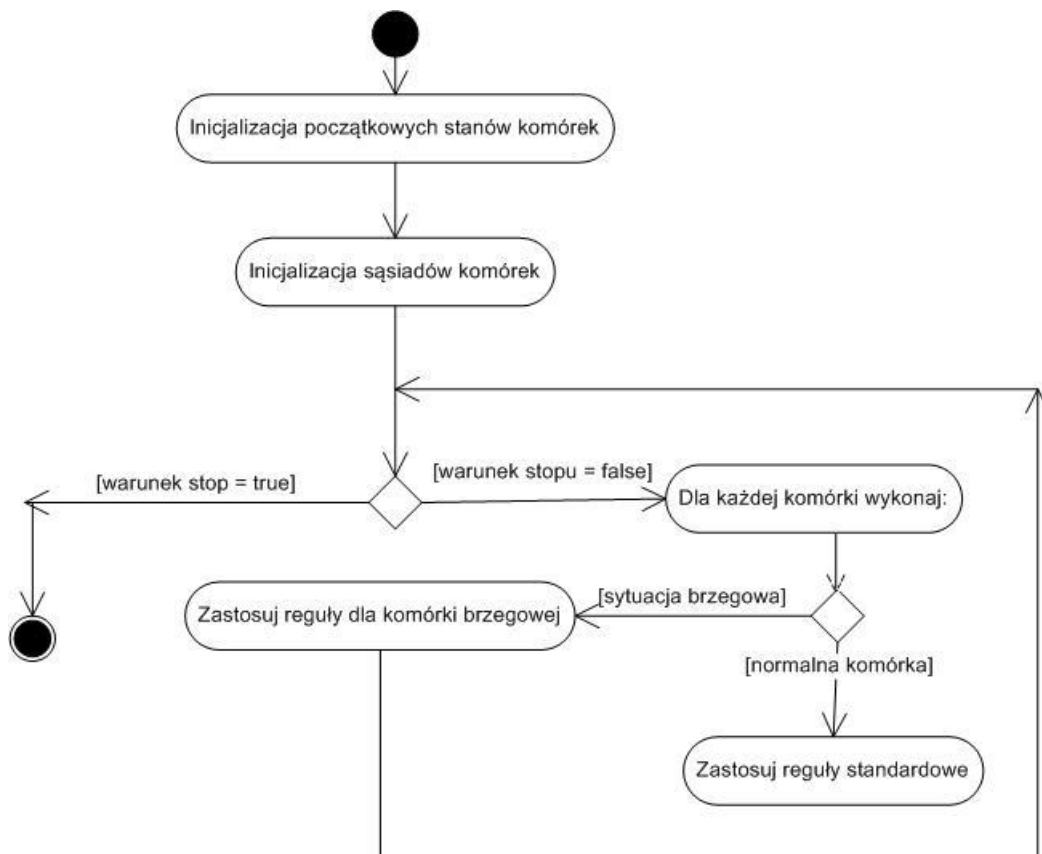
Według definicji **Ferbera** *Automat komórkowy jest dyskretnym, dynamicznym systemem, którego zachowanie jest całkowicie określone w warunkach lokalnych relacji*. Inną definicją, ukazującą automat komórkowy w matematycznym zapisie jest definicja **Weimara**, przedstawiająca automat jako czwórkę parametrów:

$\text{CellularAutomata}=(L,S,N,f)$ (3.1) gdzie

- L - zbiór komórek tworzących automat
- S - zbiór stanów, które może przyjmować komórka
- N - zbiór sąsiadów danej komórki
- f - funkcja przejścia, która każdą komórkę ze zbioru L przeprowadza ze stanu S_i w stan $S_{(i+1)}$. S_t jest jednym ze stanów ze zbioru S przyjmowanym przez komórkę w i -tej jednostce czasu, natomiast $S_{(i+1)}$ jest stanem przyjmowanym przez komórkę w $i+1$ -ej jednostce czasu na podstawie analizy stanów sąsiadów komórki (N).

Innymi słowy, automat komórkowy jest to model matematyczny opisujący siatkę komórek, ich stany oraz reguły przejść między kolejnymi stanami. Każda komórka z pewnej dyskretnej siatki komórek może przyjmować jeden z określonego zbioru stanów. W dyskretnych przedziałach czasowych następuje ewolucja komórki, na podstawie jej **stanu poprzedniego** oraz **stanu jej sąsiadów**. Ewolucję komórki określa funkcja przejścia. Odpowiedni dobór zbioru stanów oraz funkcji przejść kształtuje cechy automatu, jego dynamikę oraz szybkość. W wyniku ewolucji komórka przyjmuje kolejny stan ze zbioru S . Ze względu na wielowymiarowość automatów komórkowych, sąsiedztwa można definiować w różny sposób. W przypadku dwuwymiarowego automatu najprostszym sąsiedztwem, zwanym też sąsiedztwem von Neumana będzie zbiór czterech komórek N,S,E,W gdzie kolejne literki oznaczają kierunki zgodne z różą wiatrów. W dwuwymiarowym automacie jako sąsiedztwo można przyjmować także zbiór ośmiu komórek (sąsiedztwo **Moore'a**: cztery wspomniane powyżej kierunki wraz z kierunkami pośrednimi N, S, E, W, NW, NE, SE, SW. W trójwymiarowym automacie najprostszym sąsiedztwem jest zbiór wszystkich komórek połączonych ścianami z aktualnym sześcianem. Innym sąsiedztwem mogą być wszystkie sześciany połączone z aktualnie badanym zarówno ścianami jak i krawędziami. Ważnymi elementami automatu komórkowego jest stan początkowy automatu, czyli z góry określony stan każdej komórki w

chwili 0 (przed pierwszą iteracją algorytmu). W przypadku automatów komórkowych o ograniczonej siatce konieczne jest także zdefiniowanie warunków brzegowych. Warunki brzegowe określają reguły przejść dla komórek znajdujących się na brzegach automatu. W przypadku jednowymiarowej siatki, przykładem warunku brzegowego jest określenie sąsiadów ostatniego $n - \text{tego}$ elementu jako $n - 1$ oraz 1 - przedostatni oraz pierwszy element. Poniżej przedstawiono ogólny schemat działania algorytmu komórkowego:



Automaty komórkowe dzięki możliwościom zastąpienia bardzo skomplikowanych wzorów prostymi regułami są szeroko stosowane do modelowania procesów fizycznych i chemicznych np. symulacje pożarów lasów, budynków, rozprzestrzenianie leków w organizmie ludzkim. Innym zastosowaniem jest symulacja zjawisk, które ze względu na swoją naturę, w wyniku braku zjawisko dokładnych wzorów nie mogą być odwzorowane w sposób dokładny. Przykładem takiej symulacji jest na przykład ruch ludzi podczas ucieczki z ewakuowanego budynku.

3.2. Klasyfikacja automatów komórkowych

Od wprowadzenia pojęcia automatu komórkowego, które datuje się na lata 40-te XX-go wieku powstały różne metody klasyfikacji automatów komórkowych. Jedną z najważniejszych jest podział ze względu na homogeniczność automatu. **Homogenicznym automatem komórkowym** nazywamy, automat który spełnia wszystkie postulaty homogeniczności. Należą do nich:

- jednakowy zbiór stanów dla każdej komórki
- jednakowy zbiór reguł dla każdej komórki
- stały obszar siatki automatu

- jednakowy schemat określający sąsiadów dla każdej komórki
- jednakowa metoda aktualizacji wszystkich komórek

Jeżeli automat nie spełnia, *któregokolwiek* z wyżej wymienionych warunków jest klasyfikowany jako **niehomogeniczny automat komórkowy**.

Najprostszym przykładem klasycznego, homogenicznego automatu komórkowego jest gra *Life*. W grze *Life* mamy zazwyczaj do czynienia z nieskończoną planszą. Każda z komórek siatki może przyjmować dwa stany: jest żywa lub martwa. Każda z komórek posiada ośmiu sąsiadów - są to komórki przylegające krawędziami i rogami. W grze tej wszystkie komórki zmieniają swój stan, co pewien ustalony odstęp czasu. Nowy stan komórki jest obliczany wyłącznie na podstawie jej poprzedniego stanu oraz stanów sąsiadów. Metoda aktualizacji komórek oraz schemat określający nowy stan jest identyczny dla wszystkich komórek automatu. Mimo nazwy omawianej symulacji jedynym udziałem człowieka w tej grze jest ustawienie stanu początkowego komórek.

Innymi sposobami klasyfikacji automatów komórkowych jest podział ze względu na sąsiedztwo (sąsiedztwo Moore'a oraz von Neumana), ze względu na wielowymiarowość planszy (jedno-, dwu-, trójwymiarowa,...), a także ze względu na kształt pojedynczej komórki. W jednowymiarowym automacie komórką jest odcinek, w dwuwymiarowym najprostszym wariantem jest kwadrat, a w trójwymiarowej sześciątka. Różnice między tymi automatami zostały częściowo omówione w rozdziale poprzednim.

4. Projekt

Głównym celem projektu jest stworzenie i weryfikacja modelu rozprzestrzeniania się ognia wykorzystując niehomogeniczne automaty komórkowe, który został opisany w rozdziale 5. Nacisk z pracy został położony na opracowanie algorytmu najdokładniej oddającego rzeczywistość. Aplikacja, o nazwie Sparkle została zaprojektowana tak, aby zapewnić użytkownikowi wysoką ergonomię pracy i łatwość nauki. Podczas projektowania i implementacji szczególna uwaga została poświęcona dalszym możliwościom rozbudowy programu oraz testowania kolejnych wersji modelu algorytmicznego. Wstęp poniższego rozdziału zawiera ogólne założenia dotyczące całego projektu. Następnie w kolejnych podrozdziałach została opisana architektura aplikacji oraz budowa i funkcjonowanie poszczególnych modułów.

4.1. Główne założenia

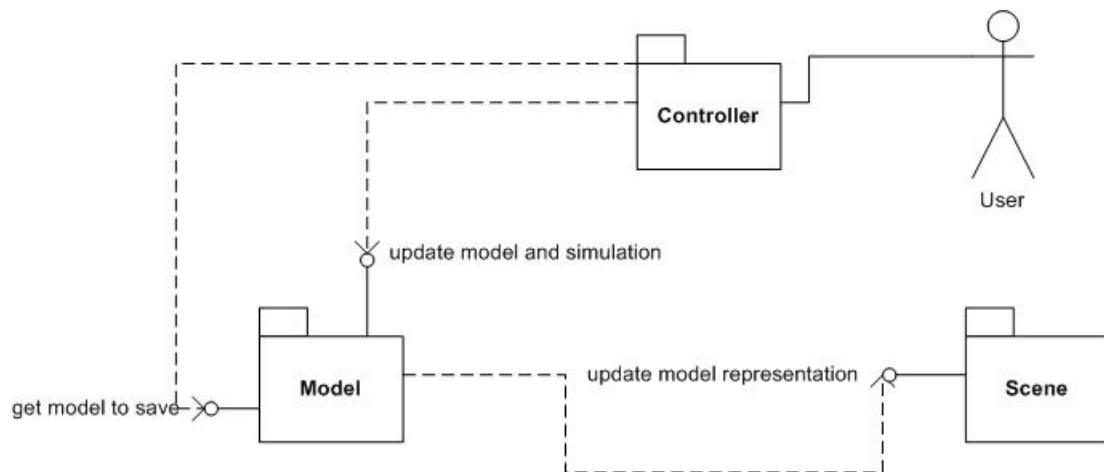
- Projekt obejmuje zarówno stworzenie i weryfikację modelu rozprzestrzeniania pożaru jak i zaimplementowanie uproszczonej wizualizacji oraz graficznego interfejsu użytkownika (GUI).
- Interfejs aplikacji powinien umożliwiać edycję budynku w którym przeprowadzana jest symulacja: dodawanie elementów konstrukcji, określanie materiałów z których zostały stworzone.
- Użytkownik powinien mieć możliwość określenia źródła ognia (miejsca w którym rozpoczyna się pożar).
- Aplikacja powinna umożliwiać kontrolę nad symulacją: możliwość zatrzymania symulacji, wznowienia, rozpoczęcia od początku.
- Dodatkowym elementem jest zapis wyników w postaci rozkładu temperatury do pliku, umożliwiający dogłębną analizę rezultatów.
- Wizualizacja powinna obejmować zarówno rozkład temperatury jak i rozprzestrzenianie się rozprzestrzenianie ognia.

4.2. Architektura aplikacji

Aplikacja została podzielona na trzy główne moduły:

- Controller - odpowiada za interakcję z użytkownikiem, dostarcza GUI umożliwiające kontrolę symulacji
- Model - przechowuje model symulacji, realizuje algorytmy rozprzestrzeniania ognia
- Scene - odpowiada za wizualizację wyników

Zależności pomiędzy poszczególnymi komponentami przedstawia diagram komponentów 4.1. Zapewnienie bardzo prostych relacji między modułami pozwala niezależnie rozwijać kolejne części ap-



Rysunek 4.1: Architektura aplikacji

likacji, w łatwy sposób podmieniać i modyfikować ich zachowanie. Inną zaletą zastosowanego modelu jest łatwość testowania poszczególnych części programu niezależnie.

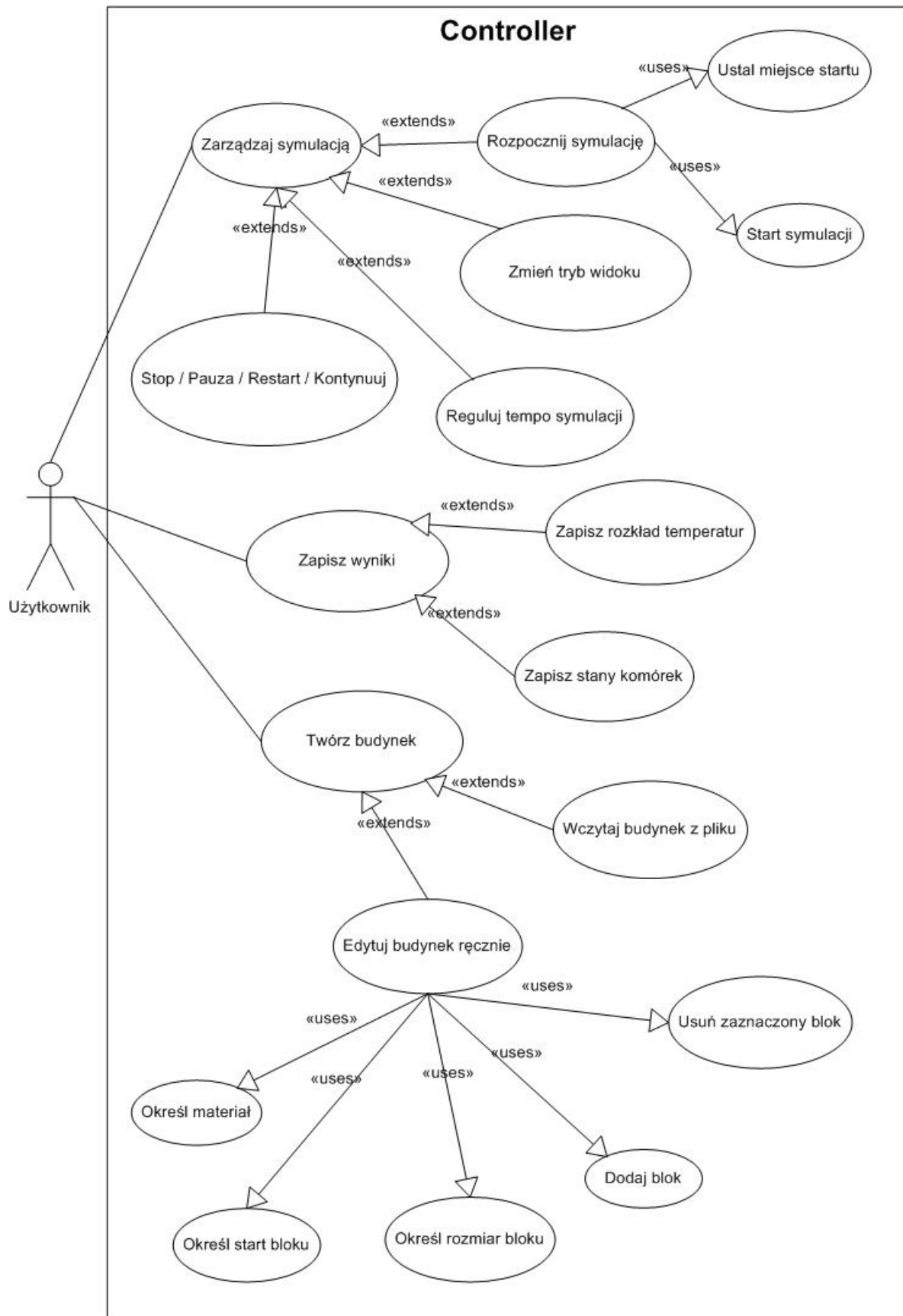
Przedstawiony model powstał na bazie jednego z najpopularniejszych modeli tworzenia aplikacji wykorzystujących graficzny interfejs użytkownika: Model-View-Controller. Elementem różniącym przedstawiony powyżej model od tradycyjnej architektury Model-View-Controller jest rozdzielenie elementów GUI pomiędzy dwa moduły:

- Scene przedstawiającą wyniki aplikacji oraz
- Controller, który łączy w sobie elementy kontroli i widoku dostarczając użytkownikowi zestaw narzędzi umożliwiających komunikację z aplikacją.

4.2.1. Moduł Controller

Moduł kontroler odpowiada za komunikację między użytkownikiem a silnikiem aplikacji (elementem realizującym logikę algorytmiczną). Jego podstawowym zadaniem jest dostarczenie łatwego w obsłudze, graficznego interfejsu oraz obsługa akcji użytkownika. Wspomniana obsługa akcji obejmuje zarówno zebranie danych od użytkownika, ich przetworzenie i dostarczenie do modelu jak i pobranie z modelu danych i ich export na zewnątrz aplikacji. Funkcjonalności dostarczane przez moduł Controller przedstawia diagram przypadków użycia 4.2 Controller zbudowany jest z następujących klas.

- Editor - dostarcza użytkownikowi pole tekstowe umożliwiające edycję budynku. Rejestruje obiekty nasłuchujące, w dalszym ciągu tekstu nazywane Listenerami, których zadaniem jest przechwytywanie akcji i ich obsługa w ramach metod zwanych Handlerami. W przypadku edytora nasłuchiwanie ogranicza się do komend wprowadzanych z klawiatury. Tekst wprowadzony do edytora jest przekazywany klasie EditorParser do dalszego przetworzenia.
- EditorParser - odpowiada za parsing czyli analizę otrzymanego tekstu oraz wywołanie odpowiednich metod modelu odpowiadających za dodanie / usunięcie bloku.
- MainWindow - reprezentuje główne okno aplikacji. Zawiera edytor tekstowy, scenę, na której przedstawiane są wyniki symulacji oraz zestaw paneli menu. Odpowiada za rozmiary i rozmieszczenie zawieranych elementów.
- MenuPanel - dostarcza zestaw narzędzi (guzików, pól tekstowych, opcji wyboru) umożliwiających sterowanie aplikacją, dodawanie bloków do budynku oraz przeglądanie tekstu pomocy. Rejestruje Listenerzy obsługujące wyżej wymienione akcje.



Rysunek 4.2: Przypadki użycia

- TopMenu - zawiera elementy umożliwiający zapis wyników symulacji do pliku oraz wprowadzenie budynku z pliku.
- FileChooser - okno wyboru pliku z którego następuje odczyt parametrów budynku lub do którego zapisywane są wyniki.
- SimulationMgr - odpowiada za przebieg symulacji. Reguluje jej tempo, obsługuje zdarzenia wstrzymania / wznowienia.

4.2.2. Moduł Scene

Jedynym zadaniem sceny, zwanej dalej także widokiem jest graficzne przedstawienie dostarczonego modelu. Model Scene nie korzysta z żadnych innych modułów. Całkowite odizolowanie widoku od innych komponentów umożliwia jego łatwą modyfikację. Pakiet Scene zawiera klasę

- Scene3D - odpowiedzialną za wizualizację stworzonego budynku oraz aktualizację widoku podczas symulacji.

4.2.3. Moduł Model

Komponent model jest silnikiem aplikacji. Zawiera struktury danych oraz algorytmy realizujące symulację w oparciu o niehomogeniczny automat komórkowy. Składa się z następujących klas:

- Cell - zawiera zestaw atrybutów opisujących pojedynczą komórkę automatu oraz metod umożliwiających dostęp do nich. Do atrybutów komórki należą:
 - Materiał
 - Masa
 - Temperatura
 - Stan
 - Zawartość palnych oparów
 - Czas pozostały do całkowitego spalenia komórki
- Material - opisuje właściwości materiału z którego może być zbudowana komórka. Do właściwości materiału należą:
 - Nazwa
 - Kolor
 - Przezroczystość
 - Czas spalania
 - Ciepło właściwe
 - Przewodnictwo ciepła
 - Temperatura zapłonu
 - Palność - wartość określająca czy materiał jest paliwem czy nie.
- HeatConductor - odpowiada za obliczenie ilości energii przekazanej za pomocą przewodnictwa między komórkami. Uaktualnia temperaturę komórek w wyniku przekazania energii.
- HeatAndVaporsConductorWithConvection - odpowiada za obliczenie ilości energii przekazanej przez konwekcję. Uaktualnia temperaturę komórek w wyniku przekazania energii. Symuluje przepływ oparów, przenoszonych przez prądy konwekcyjne.

- FireConductor - odpowiada za aktualizację stanu komórki
- World - odpowiada za stworzenie modelu automatu odzwierciedlającego zbudowany obiekt. Aktualizuje stan automatu przez wywołanie metod klas HeatConductor, HeatAndVaporsConductor-WithConvection, FireConductor.

Dokładną ilustrację zależności między klasami wchodzących w skład omówionych komponentów, z uwzględnieniem szczegółów implementacyjnych zawierają diagram zamieszczone w rozdziale ??.

5. Algorytm

Rozdział przedstawia propozycję algorytmu symulacji rozprzestrzeniania się ognia i dymu podczas pożaru. Przedstawiony poniżej model jest niehogenicznym automatem komórkowym i jako taki spełnia postulat niehomogeniczności. W pierwszej części rozdziału przedstawiono wartości parametrów tworzących automat komórkowy. Kolejne podrozdziały zawierają szczegółowy opis kluczowych funkcji współpracujących funkcję przejścia.

5.1. Model automatu

Zgodnie ze wzorem 3.1 będącym istotą przytoczonej w rozdziale 3 definicji automatu komórkowego według Weimara jednym z kluczowych elementów podczas tworzenia automatu jest określenie siatki, czyli powierzchni automatu. W modelu symulacji pożaru w budynku ze względu na trójwymiarowość zjawiska oraz istotę jego rzeczywistego odtworzenia (możliwość wykorzystania wyników w celu opracowania modelu ewakuacji osób, badanie przyczyn katastrofy i drogi rozchożenia ognia) najbardziej naturalnym typem automatu jest automat *trójwymiarowy*. Powierzchnię automatu stanowi sześciąt składający się z również sześciennych komórek o wymiarach $0.5m \times 0.5m \times 0.5m$. Odpowiedni dobór wielkości komórek automatu ma kluczowy wpływ na jego działanie. Zbyt mała ilość komórek może doprowadzić do utraty dokładności algorytmu oraz ukazać zniekształcony obraz działania modelu. Zbyt duża ilość elementów powoduje spadek wydajności algorytmu, a w komputerowej realizacji algorytmu oznacza zwiększone zapotrzebowanie na pamięć i moc procesora. W omawianym algorytmie wielkość komórek została wybrana empirycznie. Wybrany na podstawie doświadczeń rozmiar komórki jest najlepszym kompromisem między czasem działania a dokładnością modelu. Rozmiar całkowitej powierzchni automatu jest wielkością zmienną, definiowaną przez użytkownika systemu. Pozwala to na przeprowadzanie symulacji budynków o zróżnicowanej wielkości dopasowując rozmiar automatu tak aby całość siatki stanowiła budynek oraz aby budynek był w całości objęty przez siatkę.

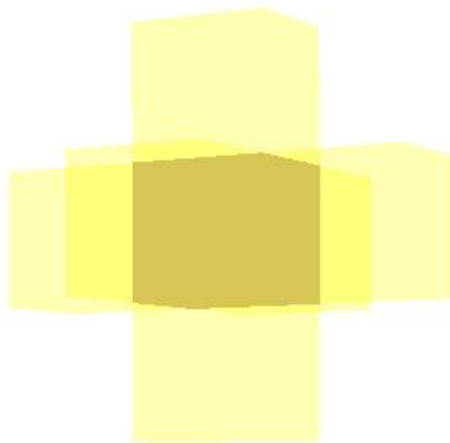
Typy komórek wchodzących w skład automatu można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- Ciała stałe
- Gazy

Model symulacji nie uwzględnia interakcji ognia z wodą lub innymi cieczami i nie przedstawia zjawisk fizycznych zachodzących podczas tych interakcji. W ciałach stałych funkcje przejścia odzwierciedlają zjawisko przewodnictwa cieplnego. W gazach będących płynami przewodnictwo zastąpione jest konwekcją. Wszystkie typy komórek poddane są zjawisku radiacji. Ponadto, komórki reprezentujące ciała stałe dzielimy ze względu na rodzaj materiału z jakiego są stworzone.

Każdy z materiałów posiada zestaw parametrów określających jego właściwości fizyczne:

- Ciepło właściwe - określa jak zmienia się temperatura ciała w zależności od ilości dostarczonego / oddanego ciepła
- Gęstość
- Współczynnik przewodnictwa ciepła - określa zdolność materiału do przewodnictwa cieplnego



Rysunek 5.1: Schemat sąsiedztwa

- Temperatura zapłonu - określa temperaturę charakterystyczną dla danego materiału, po której osiągnięciu dochodzi do produkcji palnych oparów
- Palność - określa procentową ilość oparów powstałych po osiągnięciu temperatury zapłonu. Determinuje szybkość spalania.

Wyżej wymienione parametry bezpośrednio wpływają na zachowanie funkcji przejścia, powodując zróżnicowane zachowanie komórek w zależności od typu materiału.

Poza różnymi typami komórek, o niehomogeniczności automatu świadczą różne definicje sąsiedztwa. Ze względu na fakt, że siatka automatu modeluje przestrzeń zamkniętą - budynek - konieczne jest zróżnicowanie sąsiedztwa w środku siatki oraz na jej brzegach. W zaproponowanym algorytmie wykorzystano zmienną liczbę sąsiadów w zależności od położenia komórki. Komórka znajdująca się w środku siatki posiada sześciu sąsiadów. Sąsiadami są komórki przylegające ścianami do aktualnie rozpatrywanej, co jest dwójwymiarowym wariantem sąsiedztwa von Neumana. Rozkład sąsiadów dla komórki znajdującej się w centrum przestrzeni przedstawia rysunek 5.1 W przypadku gdy komórka znajduje się na skraju siatki liczba sąsiadów ulega zmniejszeniu. Do zbioru sąsiadów należą komórki, przylegające ścianami do rozpatrywanej oraz jednocześnie będące wewnątrz przestrzeni modelu. W skrajnym przypadku, gdy komórka znajduje się w narożniku liczba sąsiadów z sześciu spada do trzech. Stan komórki brzegowej jest obliczany, podobnie jak w przypadku komórki znajdującej się wewnątrz automatu na podstawie wszystkich jej sąsiadów. Zmniejszona ilość sąsiadów powoduje zmieniony rozkład ich wpływu na nowy stan bieżącej komórki. Waga znaczenia każdej z komórek wzrasta dwukrotnie. Innymi, alternatywnymi rozwiązaniami sytuacji brzegowych są :

1. Uznanie za sąsiada ostatniego elementu w danej płaszczyźnie, elementu pierwszego czyli znajdującego się na przeciwległym brzegu. Jest to tak zwane sąsiedztwo periodyczne. W przypadku symulacji pożaru taki typ sąsiedztwa nie odzwierciedla rzeczywistych interakcji między komórkami w pomieszczeniu. Komórka znajdująca się po drugiej stronie budynku nie wpływa bezpośrednio na stan aktualnie rozpatrywanej.
2. Zastosowanie warunków pochłaniających, czyli nadanie komórkom brzegowym z góry określonego, nie uwzględniającego sąsiedztwa stanu. Rozwiązanie to powoduje, że komórki brzegowe nie mogą być traktowane jako elementy budynku z rzeczywistymi właściwościami fizycznymi.

Każda z komórek automatu może przyjmować jeden z trzech stanów:

- Komórka niezapalona
- Komórka paląca się
- Dym

Poza wyżej wymienionymi trzema stanami, każda komórka posiada wartość swojej aktualnej temperatury, która również w sposób pośredni określa jej stan i ma znaczący wpływ na wynik funkcji przejścia.

6. Implementacja

Bibliografia