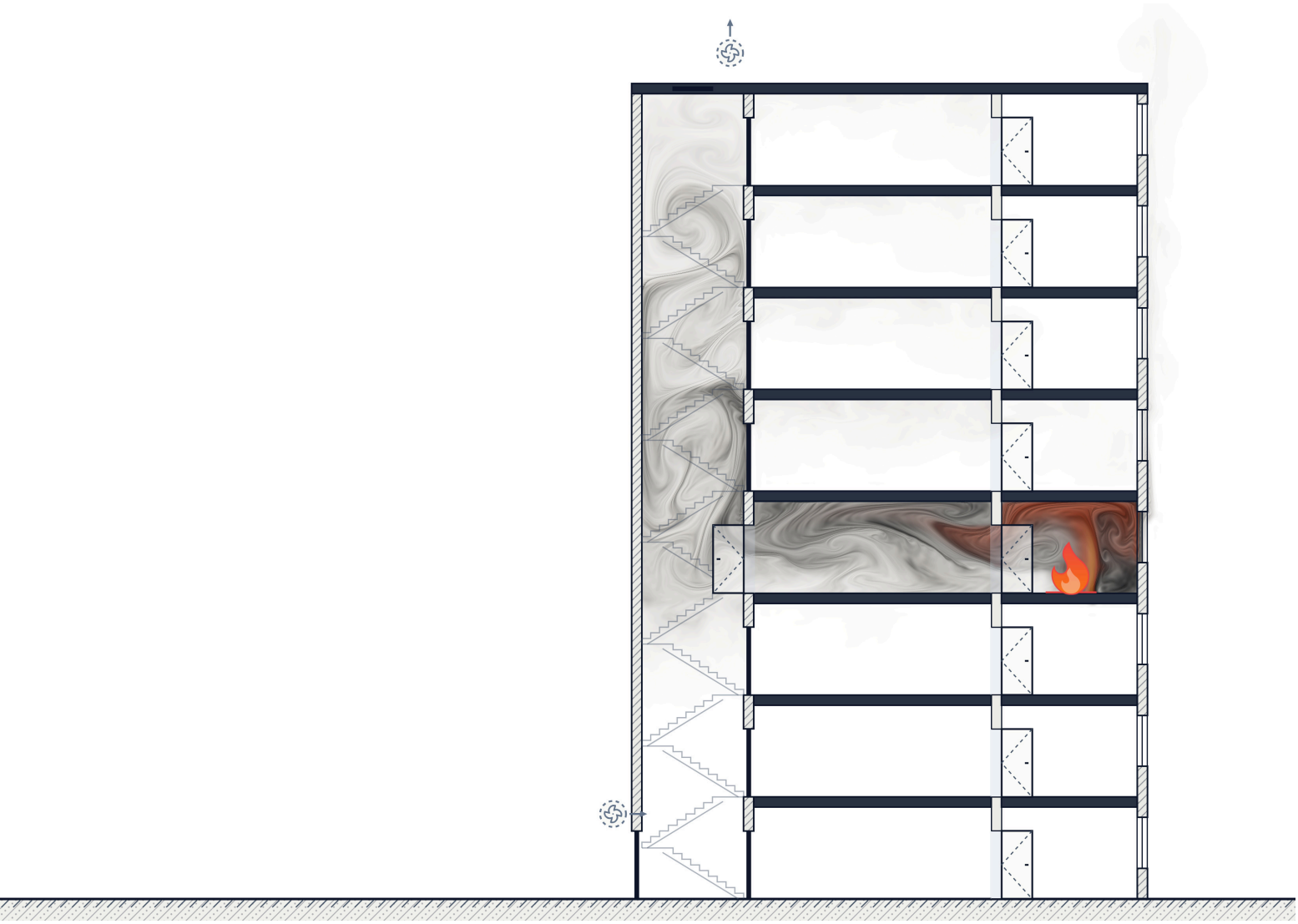
Poligon

Podręcznik techniczny

Model matematyczny, metody numeryczne, weryfikacja oraz zastosowanie w szkoleniach i prototypowaniu wentylacji pożarowej budynków



mgr inż. Damian Kubera

rzeczoznawca ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych

Wydanie 2
Etap rozwojowy programu r29
Październik 2026

Metryka dokumentu

Tytuł	Poligon. Podręcznik techniczny
Autor	mgr inż. Damian Kubera, rzeczoznawca ds. zabezpieczeń przeciwpożarowych
Wydanie	2, październik 2026
Etap rozwojowy programu	r29 (3 listopada 2026)
Program	Poligon, część FireCalc, firecalc.web.app/poligon

Zastrzeżenia

Poligon jest dwuwymiarowym modelem przepływu dymu i powietrza, przeznaczonym do szkoleń, do objaśniania działania systemów wentylacji pożarowej i do wstępnego porównywania wariantów układu. Wyniki nie są obliczeniami projektowymi i nie zastępują trójwymiarowej symulacji CFD, obliczeń według przepisów i norm ani badań odbiorczych instalacji. Liczby opisane w programie i w tym podręczniku jako uzyskane „w modelu" dotyczą modelu, a nie konkretnego budynku.

Podręcznik opisuje stan programu w etapie rozwojowym r29; program nie ma jeszcze numerowanych wydań. Równania, stałe i wyniki testów pochodzą z kodu tego etapu; w kolejnych etapach mogą się zmienić.

Prawa

© 2026 Damian Kubera. Kroje pisma: Libertinus Serif i Libertinus Math (The Libertinus Project Authors), Inter (The Inter Project Authors), JetBrains Mono (The JetBrains Mono Project Authors), wszystkie na licencji SIL Open Font License 1.1.

Przedmowa

Pomysł na Poligon narodził się w codziennej pracy nad projektami. Rzeczoznawca, który omawia z projektantem, inwestorem albo wykonawcą koncepcję wentylacji pożarowej, wciąż wraca do tych samych pytań: dlaczego dym popłynie w tę stronę, po co w tym miejscu kurtyna dymowa, dlaczego wyciąg bez powietrza uzupełniającego nie zadziała. Słowa i statyczne rysunki często nie wystarczają, bo zjawiska przepływowe trudno sobie wyobrazić, dopóki nie zobaczy się ich w ruchu. Ta sama rozmowa wygląda zupełnie inaczej, gdy skutek każdej decyzji można pokazać na żywo: jak kurtyna dymowa zatrzymuje warstwę dymu, jak dodatkowa ściana zmienia drogę jego rozprzestrzeniania się, co się stanie, gdy wentylator popchnie dym w niewłaściwą stronę. Poligon powstał właśnie po to. Liczy w czasie rzeczywistym przepływ dymu, ciepła i powietrza w budynku, w przekroju pionowym albo w rzucie, a wynik pokazuje po kilku sekundach od zmiany warunków.

Z tej potrzeby wyrosło drugie zastosowanie programu: szkolenia. Projektant, rzeczoznawca, strażak i zarządca budynku najlepiej rozumieją wentylację pożarową wtedy, gdy widzą skutek własnej decyzji: otwarcia drzwi, włączenia wentylatora, zamknięcia kompensacji czy obniżenia stropu. Gotowe lekcje prowadzą krok po kroku przez typowe układy, a piaskownica pozwala w każdej chwili odejść od scenariusza i sprawdzić własny pomysł. Prowadzący zmienia warunki w trakcie obliczeń, a sala po chwili widzi, dokąd płynie dym, jak zmienia się ciśnienie i ile powietrza przepływa przez otwory.

Trzecim zastosowaniem jest prototypowanie wentylacji pożarowej. Trójwymiarowa symulacja CFD, na przykład w programie FDS, wymaga przygotowania modelu oraz godzin albo dni obliczeń dla każdego wariantu. Zanim do niej dojdzie, warto wiedzieć, który układ w ogóle rokuje: gdzie postawić wyciąg, skąd doprowadzić powietrze uzupełniające, czy kompensacja nie zewrze się z wyciągiem, czy wentylatory strumieniowe popchną dym we właściwą stronę i czy kurtyna ma szansę zatrzymać warstwę. W edytorze Poligonu rzut przestrzeni rysuje się w kilka minut, a warianty porównuje od razu. Do pełnej symulacji trafiają tylko te, które przejdą to sito.

Podręcznik opisuje Poligon tak, jak opisuje się programy obliczeniowe: najpierw model matematyczny, następnie modele urządzeń i metody numeryczne, pomiary, weryfikację i granice stosowania. Osobne rozdziały poświęcono prototypowaniu układów w edytorze i scenariuszom szkoleniowym. Wszystkie stałe, wzory i wyniki testów podano według kodu programu w etapie rozwojowym r29, tak aby każdą liczbę dało się sprawdzić w programie.

Damian Kubera

Spis treści

1 Wprowadzenie 7

1.1 Przeznaczenie programu 7

1.2 Czym Poligon nie jest 7

1.3 Budowa programu 8

1.4 Oznaczenia i jednostki 8

1.5 Układ podręcznika 10

2 Model matematyczny 11

2.1 Założenia 11

2.2 Równanie ruchu 11

2.3 Ciągłość i rozszerzalność gazów 12

2.4 Energia 13

2.5 Dym 13

2.6 Strefy zamknięte 14

2.7 Rzut: model warstwy podstropowej 14

2.8 Głębokość modelu i strumienie 18

2.9 Warunki brzegowe 19

2.10 Ciepło wydzielone, sadza i widzialność 19

3 Modele elementów i urządzeń 22

3.1 Opory miejscowe 22

3.2 Szczeliny w przenoszeniu dymu i ciepła 23

3.3 Domykanie otworów 24

3.4 Klapa dymowa według powierzchni czynnej 24

3.5 Klapy upustowe sterowane ciśnieniem 25

3.6 Wentylatory kanałowe 25

3.7 Regulacja falownikiem 26

3.8 Wentylatory strumieniowe i przewoźne 27

3.9 Pożar 27

3.10 Kurtyny dymowe w rzucie 27

3.11 Przegrody dorysowane i biegi schodów 28

3.12 Siła otwarcia drzwi 28

3.13 Człowiek w przekroju 28

4 Metody numeryczne 30

4.1 Siatka przesunięta i typy komórek 30

4.2 Kompilacja geometrii 31

4.3 Krok czasu 31

4.4 Adwekcja półlagranżowska 32

4.5 Siły 32

4.6 Źródła i relaksacja 33

4.7 Rzut ciśnienia 33

4.8 Zmiany geometrii w trakcie obliczeń 34

4.9 Obliczenia na karcie graficznej 35

4.10 Jakość obliczeń i siatki 35

4.11 Czas rzeczywisty 36
4.12 Przenoszenie strumieniowe ciepła wydzielonego 36
4.13 Warstwa liczona w czasie (r14) 37

5 Pomiary 39
5.1 Zadymienie 39
5.2 Strumienie i prędkości 39
5.3 Ciśnienia 40
5.4 Odczyty w przekroju garażu 40
5.5 Punkty pomiarowe użytkownika 40
5.6 Wybór wartości na rysunku 41
5.7 Obraz pól 41
5.8 Płaszczyzna wynikowa w rzucie 43
5.9 Odczyty z warstwą liczoną w czasie (r14, domyślne od r15) 44

6 Weryfikacja i walidacja 46
6.1 Pojęcia 46
6.2 Testy weryfikacyjne fizyki 46
6.3 Zgodność obliczeń na karcie graficznej i na procesorze 48
6.4 Testy tez lekcji 50
6.5 Szczelność przegród 52
6.6 Ciepło wydzielone, sadza i widzialność 52
6.7 Rzut ciśnienia o zmiennej gęstości (r09) 53
6.8 Przegrody ukośne (r10) 54
6.9 Warstwa liczona w czasie (r14) 55
6.10 Model warstwy domyślny, płomień pod stropem i profil (r15) 57
6.11 Domknięcia planu poprawek (r16) 58
6.12 Porównanie z FDS i Współczynnik FDS (r18) 58
6.13 Faza pożaru we Współczynniku FDS (r19) 59
6.14 Pierwsze porównanie z pomiarami pełnoskalowymi (krok K2) 60
6.15 Zakres niezwalidowany 61

7 Prototypowanie wentylacji pożarowej 62
7.1 Miejsce Poligonu w procesie projektowym 62
7.2 Edytor modeli 62
7.3 Procedura przesiewu wariantów 65
7.4 Co model oddaje wiarygodnie 65
7.5 Pułapki modelu dwuwymiarowego 66
7.6 Przejście do symulacji trójwymiarowej 67

8 Scenariusze szkoleniowe 68
8.1 K1. Klatka schodowa: klapa dymowa 68
8.2 K2. Klatka schodowa: nadciśnienie 69
8.3 Porównanie dwóch klatek 70
8.4 G1. Garaż: wentylacja strumieniowa 70
8.5 G2. Garaż do 1500 m²: oddymianie przez wjazd 71
8.6 G3. Garaż: kurtyna dymowa 72
8.7 G4. Garaż: kanał oddymiający 73
8.8 E1. Model z edytora 74

8.9 Opcje zaawansowane 74

9 Przepisy, normy i literatura **76**

A Załącznik. Stałe i nastawy domyślne **79**

1

Wprowadzenie

1.1 Przeznaczenie programu

Poligon rozwiązuje w czasie rzeczywistym dwuwymiarowe równania ruchu powietrza z uwzględnieniem wyporu termicznego oraz przenoszenia ciepła i dymu. Liczy w przekroju pionowym (klatka schodowa, garaż w przekroju podłużnym) albo w rzucie (garaż, hala), na siatce o kilkudziesięciu tysiącach komórek (w jakości „Ultra" na karcie graficznej do 250 tysięcy), z krokiem czasu od jednej do pięciu setnych sekundy. Wynik widać od razu: pola dymu, temperatury, ciśnienia i prędkości, strumienie powietrza przez otwory i różnice ciśnień na drzwiach.

Program ma trzy zastosowania.

1. **Szkolenia.** Gotowe scenariusze (K1, K2, G1–G4) prowadzą przez typowe układy w krokach lekcji. Prowadzący może w każdej chwili otworzyć i zamknąć drzwi, włączyć wentylatory, przestawić pożar albo dorysować przegrody i kurtyny, a uczestnicy od razu widzą skutek. Tryb prezentera powiększa rysunek na potrzeby wyświetlania z rzutnika, a w klatkach K1 i K2 ekran można podzielić na dwie klatki liczone jednocześnie, np. oddymianie grawitacyjne obok nawiewu mechanicznego (punkt 8.3).
2. **Prototypowanie wentylacji pożarowej.** Edytor modeli (rozdział 7) pozwala narysować rzut przestrzeni (także ze ścianami ukośnymi, po obrysie rzutu z pliku DXF), ustawić wyciągi, nawiewy, kompensację, wentylatory strumieniowe, kurtyny i pożar, a potem porównać warianty w kilka minut. Warianty zapisuje się jako projekty pod nazwą tematu, a kierunek przepływu w strefie odwraca jedno polecenie zamiany nawiewu z wyciągiem. Program pomaga wybrać układ, który warto policzyć pełną symulacją trójwymiarową.
3. **Zrozumienie zjawisk.** Efekt kominowy, płaszczyzna neutralna, odwrócony ciąg latem, dławienie wyciągu bez powietrza uzupełniającego, zwarcie kompensacji z wyciągiem, cofanie się warstwy pod prąd powietrza, przelewanie się dymu pod kurtyną. Wszystkie te zjawiska wynikają w Poligonie wprost z równań, a nie z zaprogramowanego z góry ruchu dymu.

1.2 Czym Poligon nie jest

Poligon nie jest narzędziem do obliczeń projektowych. Nie zastępuje trójwymiarowej symulacji CFD, obliczeń według przepisów i norm ani badań odbiorczych instalacji. Jego ograniczenia wynikają z budowy modelu; szczegółowo opisano je w punktach 2.1 i 7.5. Najważniejsze z nich:

- model jest dwuwymiarowy: przekrój to plaster o zadanej głębokości, a rzut uśrednia wielkości po wysokości pomieszczenia;
- nie ma modelu turbulencji, spalania, promieniowania ani toksyczności; pożar jest objętościowym źródłem ciepła, objętości i dymu o zadanej mocy, niezależnej od dopływu tlenu, i nie przechodzi na sąsiednie przedmioty;
- nie ma tarcia przy ścianach (od r16 tarcie stropu i posadzki tylko jako opcja testowa), przewodzenia ciepła w przegrodach poza stratą warstwy dymu do stropu i ścian w rzucie (poza

tym relaksacja temperatury), wiatru, tryskaczy, czujek ani logiki sterowania instalacjami poza narastaniem pożaru i domykaniem otworów;

- w przekroju obraz dymu i odczyt zadymienia pochodzą ze stężenia względnego dymu, skalara biernego o wydajności dobranej pod obraz, a w rzucie z warstwy dymu liczonej w czasie (krycie słupa z sadzy, grubość warstwy); sadzę i widzialność program liczy osobno, tak jak FDS, z ciepła wydzielonego przez pożar (punkt 2.10), bez osiadania i łączenia się cząstek sadzy; w rzucie wartość na płaszczyźnie wynikowej wynika z dwóch warstw ze strefą przejściową 0,3 m, która czeka na kalibrację na plastrach FDS (punkt 5.9); empiryczną poprawkę widzialności z porównania z symulacjami FDS garaży daje opcja „Współczynnik FDS", domyślnie wyłączona;
- kratka wyciągowa w przekroju jest szczeliną przez całą głębokość modelu, więc przekrój nie odwzorowuje zasysania powietrza spod warstwy przy kratce punktowej i nie odróżnia kratek rozproszonych od skupionych przy tej samej wydajności (punkt 7.5);
- parametry modeli uproszczonych (wydajność dymu, liczba Froude'a czoła warstwy w rzucie, udział pędu wentylatorów strumieniowych) dobrano tak, by zachowanie modelu zgadzało się z doświadczeniem i z prostymi wzorami; nie są one skalibrowane na pomiarach.

Wynikiem Poligonu jest więc porównanie wariantów i zrozumienie mechanizmu. Liczby opisane w programie jako uzyskane „w modelu" dotyczą modelu, nie konkretnego budynku.

1.3 Budowa programu

Poligon działa w przeglądarce: jako zakładka FireCalc (firecalc.web.app/poligon) albo jako pojedynczy plik HTML uruchamiany z dysku, bez dostępu do internetu. Składa się z czterech części.

- **Scenariusze.** Każdy scenariusz to funkcja, która z parametrów (stan drzwi, wydajności wentylatorów, moc i miejsce pożaru, przegrody dorysowane przez użytkownika) buduje geometrię: bryły, obszary atmosfery, linie oporów, wentylatory, pożary, strefy cieplne i punkty pomiarowe. Do scenariusza należą też kroki lekcji i kontrolki piaskownicy.
- **Silnik obliczeń.** Geometria jest zamieniana na siatkę (kompilacja), a symulacja liczy kolejne kroki czasu w osobnym wątku (Web Worker), na procesorze albo na karcie graficznej (WebGPU), według wyboru w pasku dolnym (punkt 4.9). Zmiana parametru w trakcie obliczeń buduje nową geometrię i nakłada ją na bieżące pola bez zerowania stanu (punkt 4.8).
- **Obraz.** Pola z silnika są rysowane na płótnie: dym, temperatura, ciśnienie, przepływ albo widzialność; nad nimi leżą rysunek budynku, odczyty przyrządów i punkty pomiarowe użytkownika.
- **Interfejs.** Kolumna lekcji z krokami, zapisanymi ustawieniami i piaskownicą, szuflada szybkich nastaw, przebieg wybranej wielkości w czasie, bilans powietrza, tryb prezentera, porównanie dwóch klatek, edytor modeli z projektami zapisanymi w przeglądarce, opcje zaawansowane do diagnozy modelu (punkt 8.9).

1.4 Oznaczenia i jednostki

Podręcznik stosuje jednostki SI; wyjątkiem są strumienie objętości wentylatorów i otworów, podawane w programie i w tekście w m³/h, oraz moc pożaru, podawana w kW albo MW. Temperatury w równaniach są bezwzględne [K]; w opisach podawane są także w °C.

Tabela 1.1. Oznaczenia

Symbol	Znaczenie	Jednostka
A	pole przekroju otworu albo pole źródła w płaszczyźnie modelu	m²
C_d	współczynnik wypływu otworu	–
c_p	ciepło właściwe powietrza, 1005	J/(kg·K)
C_w	współczynnik widzialności: 3 dla znaków odbijających światło, 8 dla podświetlanych	–
D	głębokość modelu: w przekroju grubość plastra, w rzucie wysokość pomieszczenia H	m
d	głębokość kurtyny dymowej (od stropu)	m
F	ciąg wentylatora strumieniowego albo przewoźnego	N
Fr	liczba Froude'a czoła warstwy w rzucie	–
g	przyspieszenie ziemskie, 9,81	m/s²
g'	zredukowane przyspieszenie ziemskie warstwy	m/s²
H	wysokość pomieszczenia (stropu nad posadzką)	m
h	grubość warstwy dymu pod stropem w rzucie	m
K	współczynnik oporu miejscowego ściany komórki	–
K_e, K_m	współczynnik ekstynkcji; masowy współczynnik ekstynkcji sadzy, 8700	1/m; m²/kg
P	ciśnienie kinematyczne, $P = p/\rho_0$	m²/s²
p	ciśnienie względem hydrostatyki powietrza zewnętrznego	Pa
p_s	ciśnienie strefy zamkniętej (bez połączenia z atmosferą)	Pa
p_{atm}	ciśnienie atmosferyczne, 101 325	Pa
$\dot{Q}$	moc pożaru (szybkość wydzielania ciepła)	kW
$\dot{q}'''$	moc objętościowa pożaru w komórkach źródła	kW/m³
q_V	ciepło wydzielone przez pożar na jednostkę objętości gazu (w programie pole q)	kJ/m³
S	źródło objętości (rozbieżność prędkości)	1/s
s	stężenie względne dymu	–
S_w	widzialność (zasięg widzenia znaku), najwyżej 30	m
T, T_{zew}, T_0	temperatura; temperatura powietrza zewnętrznego; temperatura odniesienia 293,15	K
t, Δt	czas; krok czasu	s
$\mathbf{u} = (u, v)$	prędkość; składowa pozioma i pionowa (w rzucie: wzdłuż osi x i y rzutu)	m/s
$\dot{V}$	strumień objętości	m³/s, m³/h
Δx	bok komórki siatki	m
ΔH_c	ciepło spalania paliwa (efektywne)	kJ/kg
Y, Y_s	wydajność dymu w scenariuszu; współczynnik produkcji sadzy (nastawa, 0,10 domyślnie)	–, kg/kg
β	współczynnik ściany po linearyzacji oporu	–
θ	przyrost temperatury warstwy, $\theta = T - T_{\mathrm{zew}}$	K
κ	wykładnik izentropy powietrza, 1,4	–
λ	szybkość relaksacji temperatury albo zaniku dymu	1/s
ρ_0	gęstość odniesienia powietrza, 1,2	kg/m³

Symbol	Znaczenie	Jednostka
ρ_s	gęstość sadzy w gazie	kg/m³
τ	przepuszczalność kurtyny dla warstwy dymu	–
χ	udział ciepła wydzielonego zatrzymany w gazie (profil pionowy w rzucie)	–
ω	wirowość	1/s

Indeks f oznacza ścianę komórki (ang. *face*), c komórkę, nb komórkę sąsiednią przez ścianę f. Gwiazdka oznacza wielkość pośrednią w kroku czasu (po adwekcji i siłach, przed rzutem ciśnienia).

1.5 Układ podręcznika

Rozdział 2 przedstawia równania modelu w postaci ciągłej, w przekroju i w rzucie. Rozdział 3 opisuje modele elementów budynku i urządzeń: oporów miejscowych, szczelin, klap upustowych, wentylatorów, regulatora falownika, pożaru i kurtyn. Rozdział 4 przedstawia dyskretyzację i algorytm kroku czasu, a rozdział 5 sposób pomiaru wielkości pokazywanych w programie. Rozdział 6 zbiera wyniki weryfikacji i opisuje to, czego nie zwalidowano. Rozdział 7 jest poświęcony prototypowaniu układów wentylacji w edytorze, a rozdział 8 scenariuszom szkoleniowym, porównaniu dwóch klatek i opcjom zaawansowanym. Rozdział 9 zestawia przepisy, normy i literaturę, a załącznik stałe i nastawy domyślne.

2

Model matematyczny

Rozdział przedstawia w postaci ciągłej równania, które Poligon rozwiązuje. Ich dyskretyzację opisuje rozdział 4, a modele elementów i urządzeń, wchodzące do równań jako źródła i warunki na ścianach komórek, rozdział 3.

2.1 Założenia

1. Przepływ jest dwuwymiarowy, w płaszczyźnie modelu. W **przekroju** oś y jest pionowa (w górę), a wynik dotyczy plastra budynku o głębokości D. W **rzucie** obie osie są poziome, a wielkości są uśrednione po wysokości pomieszczenia H; wtedy $D = H$.
2. Powietrze i gazy pożarowe tworzą jeden płyn o własnościach powietrza: gaz doskonały przy ciśnieniu bliskim atmosferycznemu. Różnice ciśnień w budynku (do kilkuset paskali) są małe wobec p_{atm}, więc gęstość zależy tylko od temperatury: $\rho T = \rho_0 T_0$ (przybliżenie małej liczby Macha).
3. W **przekroju** od etapu r09 bezwładność i wypór odnosi się do jednostki masy gazu o gęstości $\rho = \rho_0 T_0 / T$ (rzut ciśnienia o zmiennej gęstości, punkt 2.2.2); postać ze stałą gęstością w członach bezwładności (przybliżenie Boussinesqa) zostaje tylko jako ustawienie do porównań. W **rzucie** gęstość w członach bezwładności jest stała. W obu trybach zmiany gęstości uwzględnia się w rozszerzalności gazów ogrzewanych przez pożar.
4. Równania nie zawierają lepkości molekularnej ani modelu turbulencji. Energię ruchu rozprasza schemat adwekcji (lepkość numeryczna, punkt 4.4), a część rozproszonej wirowości oddaje z powrotem wzmocnienie wirowości (punkt 4.5).
5. Dym jest skalarem biernym: przenosi go przepływ, a sam nie zmienia ruchu powietrza ani bilansu ciepła.
6. W przekroju i w rzucie bez modelu warstwy wymianę ciepła z przegrodami opisuje relaksacja temperatury do wartości strefy cieplnej (bezwładność cieplna przegród). W rzucie z warstwą liczoną w czasie, domyślnym od etapu r15, warstwa traci ciepło do stropu i ścian ze współczynnikami z korelacji i z przewodzeniem w przegrodzie (punkt 2.7.5). Osobnego modelu promieniowania nie ma. W przekroju całe ciepło pożaru trafia do gazu, bez części oddawanej przez promieniowanie płomienia; w rzucie z modelem warstwy pióropusz i warstwa dostają moc konwekcyjną, pomniejszoną o udział promieniowania χ_r.
7. Moc pożaru jest zadana i nie zależy od dopływu tlenu (pożar w zamkniętym pomieszczeniu pali się pełną mocą); pożar nie przechodzi na sąsiednie przedmioty, np. kolejne samochody.

2.2 Równanie ruchu

Prędkość $\mathbf{u} = (u, v)$ spełnia równanie pędu

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\,\mathbf{u} = -\nabla P + b\,\mathbf{e}_y + \mathbf{a}_j + \mathbf{f}_\omega, \tag{2.1}$$

gdzie P jest ciśnieniem kinematycznym, $\mathbf{e}_y$ wektorem jednostkowym osi pionowej, $\mathbf{a}_j$ przyspieszeniem od wentylatorów strumieniowych i przewoźnych (punkt 3.8), a $\mathbf{f}_\omega$ siłą wzmocnienia wirowości. Opory miejscowe (drzwi, kratki, klapy, szczeliny) działają na pojedynczych ścianach komórek i opisuje je punkt 3.1.

Wypór działa tylko w przekroju. Siła wyporu na jednostkę objętości to $g(\rho_{\text{zew}} - \rho)$; po podzieleniu jej przez gęstość powietrza zewnętrznego i podstawieniu $\rho \propto 1/T$ przy jednakowym ciśnieniu otrzymuje się przyspieszenie

$$b = g\,\frac{\rho_{\text{zew}} - \rho}{\rho_{\text{zew}}} = g\,\frac{T - T_{\text{zew}}}{T}. \tag{2.2}$$

Przy małych różnicach temperatury wzór pokrywa się z klasyczną postacią Boussinesqa $g\,(T - T_{\text{zew}})/T_{\text{zew}}$. Przy dużych przyrostach, nad pożarem, przyspieszenie rośnie wolniej i nigdy nie przekracza g, co zgadza się z fizyką gorącego gazu w zimnym otoczeniu.

2.2.1 Ciśnienie względem hydrostatyki powietrza zewnętrznego

Ciśnienie w modelu liczy się względem ciśnienia hydrostatycznego powietrza zewnętrznego na tej samej wysokości:

$$p_{\text{rz}}(x, y, t) = p_{\text{atm}} - \rho_{\text{zew}}\, g\, y + p, \qquad p = \rho_0 P + p_s, \tag{2.3}$$

gdzie p_s jest ciśnieniem strefy zamkniętej (punkt 2.6), równym zeru w obszarach połączonych z atmosferą. W komórkach atmosfery $P = 0$. Ponieważ wypór (2.2) również jest liczony względem powietrza zewnętrznego, w budynku z dwoma otworami na różnych wysokościach różnica ciśnień i przepływ wynikają z samych równań: efekt kominowy zimą, odwrócony ciąg latem i płaszczyzna neutralna nie są w programie zadane, tylko obliczone. Program pokazuje i mierzy właśnie p, czyli nadciśnienie albo podciśnienie względem powietrza zewnętrznego na tej samej wysokości.

2.2.2 Przekrój: bezwładność i wypór na jednostkę masy

W postaci podstawowej (2.1) gradient ciśnienia dzieli się przez gęstość odniesienia ρ_0. Przyspieszenie gorącego gazu od różnicy ciśnień jest wtedy zaniżone o czynnik T_0/T, prędkość wypływu przy zadanej różnicy ciśnień o czynnik $\sqrt{T_0/T}$, a ciśnienie hydrostatyczne przy $T_{\text{zew}} \neq T_0$ o czynnik T_{zew}/T_0. Dlatego od etapu r09 przekrój liczy się domyślnie z rzutem ciśnienia o zmiennej gęstości (ustawienie `variableDensity`, włączone domyślnie od 4 października 2026 r.), w którym bezwładność i wypór odnosi się do jednostki masy gazu; postać z ρ_0 zostaje tylko jako ustawienie do porównań:

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\gamma \nabla P + a_b\, \mathbf{e}_y, \qquad \gamma = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{T}{T_0}, \qquad a_b = g\,\frac{\rho_{\text{zew}} - \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = g\,\frac{\gamma_f T_0 - T_{\text{zew}}}{T_{\text{zew}}}, \tag{2.4}$$

gdzie gęstość na ścianie komórki jest średnią gęstości dwóch sąsiednich komórek, $\bar{\rho} = (\rho_a + \rho_b)/2$, czyli $\gamma_f = 2T_aT_b/(T_0(T_a + T_b))$. Wypór ma postać jak w FDS [Rehm, Baum 1978]. Warunek ciągłości (2.5), bilans objętości, ciśnienie stref zamkniętych i pole ciepła wydzielonego zostają bez zmian, a ciąg wentylatorów strumieniowych w przekroju dzieli się przez masę gazu. W rzucie postać z ρ_0 zostaje, bo temperatura rzutu jest temperaturą warstwy, a nie całego słupa gazu. Dyskretyzację opisuje punkt 4.7, a wyniki testów punkt 6.7. Ta sama postać działa na procesorze i na karcie graficznej.

2.3 Ciągłość i rozszerzalność gazów

Z równania ciągłości $\partial\rho/\partial t + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0$ i warunku $\rho T = \rho_0 T_0$ wynika, że rozbieżność prędkości jest równa względnej szybkości zmian temperatury elementu płynu:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = S, \qquad S = -\frac{1}{\rho}\frac{D\rho}{Dt} = \frac{1}{T}\frac{DT}{Dt}. \tag{2.5}$$

Pochodna materialna DT/Dt jest sumą członów źródłowych równania energii (2.7), więc źródło objętości S liczy się z przyrostu temperatury w kroku źródeł, bez adwekcji. W komórkach pożaru, dopóki temperatura nie osiągnie ograniczenia $T_{\max}$,

$$S = \frac{\dot{q}'''}{\rho_0 \, c_p \, T_0}. \tag{2.6}$$

Pożar wypycha więc gazy z pomieszczenia przez otwory, a stygnący dym się kurczy. Wypływ netto z pomieszczenia z pożarem o mocy $\dot{Q}$ wynosi $\dot{Q}/(\rho_0 c_p T_0)$, czyli ok. 2,83 m³/s (10 200 m³/h) na każdy megawat, pomniejszony o skurcz od stygnięcia. Ten bilans sprawdza test opisany w punkcie 6.2.

2.4 Energia

Temperatura spełnia równanie

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = \frac{\dot{q}''' \, T}{\rho_0 \, c_p \, T_0} - \lambda \, (T - T_r). \tag{2.7}$$

Pierwszy człon źródłowy to bilans energii gazu przy stałym ciśnieniu, $\rho c_p \, DT/Dt = \dot{q}'''$, z gęstością $\rho = \rho_0 T_0 / T$. Drugi to relaksacja do temperatury strefy cieplnej T_r z szybkością λ. Strefy cieplne definiuje scenariusz; typowo:

- wnętrze budynku: T_r równe temperaturze wewnętrznej, $\lambda \approx 1/60$ s^{-1} (bezwładność cieplna przegród; tym samym prawem stygnie dym);
- powietrze zewnętrzne w obszarze obliczeń: $T_r = T_{\text{zew}}$, $\lambda = 0{,}2$ s^{-1}, z zanikiem dymu 0,1 s^{-1}, żeby otoczenie budynku nie zachodziło dymem.

Temperatura jest ograniczona od góry wartością $T_{\max} = 1200$ K i od dołu wartością 150 K (ochrona obliczeń). W przekroju przyrost temperatury w kroku źródeł, także ujemny przy stygnięciu, daje źródło objętości (2.5). W rzucie jest inaczej (punkt 2.7.3).

2.5 Dym

Stężenie względne dymu s jest przenoszone przez przepływ, wytwarzane w komórkach pożaru i usuwane przez zanik w strefach cieplnych z λ_s:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla s = Y G_s \frac{\dot{q}'''}{\rho_0 \, c_p \, T_0} - \lambda_s \, s, \tag{2.8}$$

gdzie $G_s = 0{,}3$ jest stałą programu, a Y wydajnością dymu scenariusza pomnożoną przez $Y_s/0{,}10$ (nastawa współczynnika produkcji sadzy, domyślnie 0,10 kg/kg). Skalę dobrano tak, że pożar 500 kW na 2 m² w pomieszczeniu 4 × 3 m przy $Y = 1$ daje po ok. 30 s średnie $s \approx 1$, czyli dym gęsty. Nawiew wentylatora rozcieńcza dym w komórkach portu (punkt 3.6).

Wielkością pokazywaną w odczytach jest **zadymienie**: udział objętości obszaru, w której s przekracza próg $s_p = 0{,}15$. Ten sam próg wyznacza izolinię granicy zadymienia na obrazie. Wielkość s nie jest stężeniem masowym sadzy ani gęstością optyczną i nie przelicza się jej na widzialność: sadzę i widzialność liczy osobne pole ciepła wydzielonego (punkt 2.10), przenoszone z zachowaniem ilości. Pole s pozostaje podstawą obrazu dymu, odczytu zadymienia i tez lekcji; w wariancie z warstwą liczoną w czasie obraz i zadymienie wynikają z grubości i stężeń warstw (punkt 5.9).

2.6 Strefy zamknięte

Obszar płynu bez połączenia z atmosferą (zamknięte pomieszczenie, garaż z zamkniętą bramą i szachtami) nie może jako płyn nieściśliwy ani przyjąć, ani oddać objętości: równanie (2.5) nie miałoby rozwiązania, gdy wentylator wyciąga powietrze. Dla każdej takiej składowej spójnej V_s model prowadzi jedno ciśnienie strefy p_s ze ściśliwością adiabatyczną powietrza:

$$\frac{dp_s}{dt} = \frac{\kappa\, p_{\mathrm{atm}}}{V_s} \int_{V_s} S\, dV, \tag{2.9}$$

gdzie całka obejmuje źródła od wentylatorów (nawiew dodatni, wyciąg ujemny) i rozszerzalność gazów. Wewnątrz składowej ciśnienie P ma średnią zero, a do wyświetlania i do charakterystyk wentylatorów służy $p = \rho_0 P + p_s$. Skutek widać w lekcjach: wyciąg bez powietrza uzupełniającego obniża p_s, aż charakterystyka wentylatora sprowadzi wydajność prawie do zera (zostaje przeciek szczelinami), a nadmiar nawiewu podnosi ciśnienie w strefie tak, że samozamykacz nie domyka drzwi.

2.7 Rzut: model warstwy podstropowej

W rzucie nie ma osi pionowej, więc wyporu nie da się policzyć wprost. Model rzutu zachowuje równania (2.1) i (2.5) dla prędkości uśrednionej po wysokości, bez członu wyporu, a pionową budowę warstwy dymu zastępuje kilkoma prostymi modelami opisanymi niżej. Temperatura T oznacza w rzucie temperaturę warstwy pod stropem, a $\theta = T - T_{\mathrm{zew}}$ jej przyrost. Od etapu r15 rzut liczy domyślnie, zamiast tych modeli, warstwę w czasie z bilansu masy i ciepła (punkt 2.7.5). Modele z punktów 2.7.1–2.7.3 działają w rzucie bez modelu warstwy, wybieranym adresem z dopiskiem `?warstwa=0` albo przełącznikiem w opcjach zaawansowanych (punkt 8.9); ścinanie warstwy przez wentylatory strumieniowe (punkt 2.7.4) działa w obu wariantach.

2.7.1 Czoło warstwy

Ciepła warstwa rozpływa się pod stropem jak prąd grawitacyjny. Dym i temperatura są przenoszone prędkością $\mathbf{u} + \mathbf{v}_f$, gdzie prędkość czoła

$$\mathbf{v}_f = \mathrm{Fr}\,\sqrt{g' h}\;\hat{\mathbf{n}}, \qquad \hat{\mathbf{n}} = -\frac{\nabla h}{|\nabla h|}, \tag{2.10}$$

$$h = H\,\min\!\left(1, \frac{\theta}{\theta_{\mathrm{ref}}}\right), \qquad g' = g\,\frac{\theta}{T_{\mathrm{zew}} + \theta}. \tag{2.11}$$

Grubość warstwy h rośnie z przyrostem temperatury do pełnej wysokości przy $\theta_{\mathrm{ref}} = 150$ K. Prędkość czoła działa tylko tam, gdzie spadek grubości przekracza 0,02 H na komórkę (czoło warstwy), a g' i h bierze się z najgrubszej warstwy w otoczeniu 3 × 3 komórek, bo w samej komórce czoła $\theta \approx 0$. Postać zależności jest taka jak dla czoła prądu grawitacyjnego [Benjamin 1968]; liczbę Froude'a dobrano w modelu: domyślnie $\mathrm{Fr} = 0{,}7$, w rzutach garaży 0,35. Wartość dla garaży daje pod stropem 3 m ok. 0,8 m/s przy $\theta = 100$ K (h = 2 m) i ok. 1,1 m/s przy pełnej grubości warstwy ($\theta \geq 150$ K), co odpowiada prędkości strumienia podstropowego z korelacji Alperta dla pożaru 4 MW pod stropem 3 m w odległości ok. 10 m (ok. 0,8 m/s).

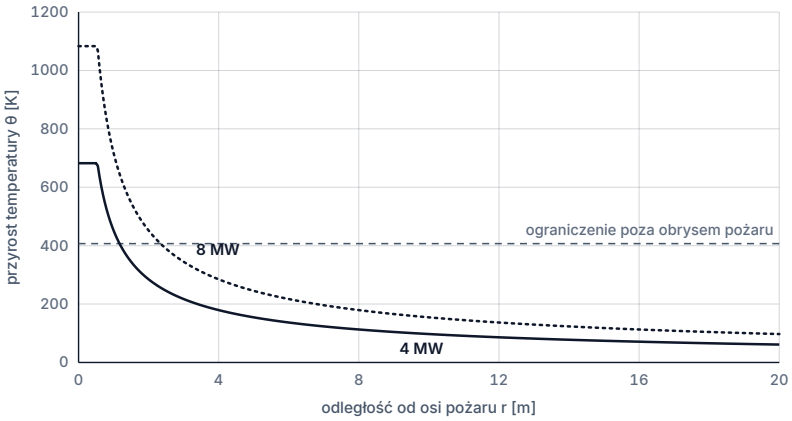
Skutek tego modelu ma bezpośrednią wartość dydaktyczną: dym przemieszcza się pod prąd powietrza tylko wtedy, gdy prędkość powietrza jest mniejsza od prędkości czoła. To odpowiednik prędkości krytycznej w wentylacji strumieniowej.

2.7.2 Ograniczenie temperatury warstwy

W rzucie ciepło pożaru trafia tylko do komórek nad samochodem, więc bez dodatkowego warunku warstwa miałaby setki stopni nawet kilkadziesiąt metrów od pożaru. W rzeczywistości pióropusz zasysa powietrze z otoczenia, a strumień podstropowy rozpływa się promieniście i miesza z powietrzem. Model obcina przyrost temperatury warstwy górną obwiednią z korelacji Alperta dla strumienia podstropowego [Alpert 1972]:

$$\theta \le \theta_A(r) = \begin{cases} 16{,}9\,\dot{Q}^{2/3}\,H^{-5/3}, & r \le 0{,}18\,H, \\ 5{,}38\,(\dot{Q}/r)^{2/3}\,H^{-1}, & r > 0{,}18\,H, \end{cases} \tag{2.12}$$

z mocą $\dot{Q}$ w kW, wysokością stropu H i odległością od osi pióropusza r w metrach. Osią pióropusza jest środek ciężkości komórek pożaru. Poza komórkami pożaru temperatura warstwy nie przekracza 700 K (ok. 427 °C), więc żar pokazuje się tylko w obrysie pożaru także przy dużej mocy. Obwiednia rośnie od razu z mocą pożaru (także w fazie narastania), a po ugaszeniu maleje tak wolno, jak stygnie sama warstwa: dym, który już się rozpłynął, nie stygnie skokowo. Przebieg obwiedni pokazuje ryc. 2.1.



Ryc. 2.1. Obwiednia przyrostu temperatury warstwy w rzucie według wzoru (2.12) dla pożaru 4 MW i 8 MW pod stropem 3 m. Linia przerywana: ograniczenie temperatury poza obrysem pożaru (700 K przy powietrzu 20 °C).

2.7.3 Rozszerzalność netto

W rzucie źródłem objętości jest tylko pożar, ze stałym udziałem rozszerzalności netto φ_e:

$$S = \varphi_e \frac{\dot{q}'''}{\rho_0\, c_p\, T_0}, \qquad \varphi_e = 0{,}35. \tag{2.13}$$

Większość ciepła warstwa oddaje stropowi i ścianom w drodze do wyciągu, a stygnące gazy się kurczą; współczynnik φ_e opisuje część rozszerzalności, która w garażu faktycznie wypycha powietrze. Źródło liczy się z mocy pożaru, a nie z przyrostu temperatury, więc nie znika, gdy warstwa w komórce pożaru dojdzie do $T_{\max}$. Relaksacja i strata ciepła warstwy w rzucie nie dają źródła objętości: temperatura w rzucie dotyczy warstwy, a nie całego słupa gazu, a warstwa rozpływa się prędkością czoła, która rozszerza ciepły obszar bez ubytku u źródła. Skurcz liczony z jej stygnięcia przewyższałby rozszerzalność i przy zamkniętej bramie ciśnienie w garażu malałoby bez końca. Warstwa traci ciepło do powietrza zewnętrznego ze stałą $\lambda_w = 0{,}015\ \mathrm{s}^{-1}$.

Przy pożarze 4 MW rozszerzalność netto wynosi ok. 14 300 m³/h, a pełna ok. 40 700 m³/h. Wentylatory w modelu są objętościowe, więc garaż z wyciągiem i nawiewem o tej samej wydajności ma nadciśnienie i część gazów uchodzi bramą. Dlatego w projektach nawiew mechaniczny dobiera się mniejszy od wyciągu.

2.7.4 Ścinanie warstwy przez wentylatory strumieniowe

Wentylator strumieniowy wisi pod stropem i rozpędza głównie warstwę podstropową, a powietrze wraca dołem, pod strumieniem. Model uśredniony po wysokości nie oddaje tego zjawiska: w dwóch wymiarach powietrze wraca bokiem, przy ścianach, i zawraca dym. Dlatego do przepływu uśrednionego trafia tylko udział ψ pędu wentylatorów, a reszta napędza pole prędkości warstwy względem średniej $\Delta\mathbf{u}$:

$$\frac{\partial \Delta\mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\,\Delta\mathbf{u} = (1-\psi)\,\mathbf{a}_j - \lambda_\Delta\,\Delta\mathbf{u}, \tag{2.14}$$

z $\psi = 0{,}4$ i $\lambda_\Delta = 0{,}02\ \mathrm{s}^{-1}$. Pole $\Delta\mathbf{u}$ jest zerowe w bryłach i w atmosferze. Dym i temperaturę warstwy przenosi w rzucie prędkość

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u} + \Delta\mathbf{u} + \mathbf{v}_f. \tag{2.15}$$

Skutek: wentylatory strumieniowe pchają dym w stronę wyciągu, a powrót powietrza nie zawraca dymu. W scenariuszu G2 wentylator przewoźny stoi na posadzce i rozpędza całe powietrze, więc tam $\psi = 1$.

2.7.5 Warstwa liczona w czasie (r14, domyślna od r15)

Od etapu r15 (7 października 2026 r.) rzut liczy ten model domyślnie. Rzut bez niego, z czołem warstwy, obwiednią i rozszerzalnością netto z punktów powyżej, jest dostępny pod adresem z dopiskiem `?warstwa=0` (`?warstwa=1` przywraca model).

Modele z poprzednich punktów wiążą grubość warstwy z temperaturą, a nie z ilością dymu, który dopłynął z pożaru. Przy pożarze 4 MW w garażu 3 m warstwa w kole o promieniu ok. 4 m od pożaru ma przez to grubość całego garażu i nie płynie (prędkość czoła działa tylko na czole), a dym na wysokości 1,8 m trzeba szacować z profilu (punkt 5.8). Rozproszony model dwustrefowy zapisuje w każdej komórce rzutu stan warstwy górnej, masę M [kg/m²] i ciepło $\Theta = M\theta_u$ [K·kg/m²], oraz ciepło wydzielone w warstwie górnej Q_u i dolnej Q_l [kJ/m²]. Z przybliżenia małej liczby Macha

$$\rho_u = \rho_a\,\frac{T_{\mathrm{zew}}}{T_{\mathrm{zew}} + \theta_u}, \qquad h = \frac{M}{\rho_u} = \frac{M + \Theta/T_{\mathrm{zew}}}{\rho_a}, \qquad z_i = H - h, \tag{2.16}$$

gdzie ρ_a jest gęstością powietrza otoczenia, h grubością warstwy (najwyżej H), a z_i wysokością jej granicy nad posadzką. Przy sztywnym stropie warstwy płyną prędkościami

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u} + \left(1 - \frac{h}{H}\right)\Delta\mathbf{u}, \qquad \mathbf{u}_l = \mathbf{u} - \frac{h}{H}\,\Delta\mathbf{u}, \tag{2.17}$$

a pole ścinania $\Delta\mathbf{u}$ z równania (2.14) jest prędkością warstwy górnej względem dolnej i dostaje siłę wyporu warstwy oraz opór:

$$\frac{\partial \Delta\mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\cdot\nabla)\,\Delta\mathbf{u} = (1-\psi)\,\mathbf{a}_j - \lambda_\Delta\,\Delta\mathbf{u} - g'\,\nabla h - \left(\frac{C_i H}{h(H-h)} + \frac{c_f}{h}\right)|\Delta\mathbf{u}|\,\Delta\mathbf{u}, \qquad g' = g\,\frac{\theta_u}{T_{\mathrm{zew}} + \theta_u}, \tag{2.18}$$

z $C_i = 0{,}002$ i $c_f = 0{,}004$ (wartości startowe do kalibracji). Od r17 pole $\Delta\mathbf{u}$ i przenoszenie obu warstw liczy się w podkrokach kroku przepływu, a przepływ uśredniony krokiem z własnego warunku Couranta (punkt 4.13, wzór (4.15)). Masa warstwy przyrasta w komórkach pożaru o strumień pióropusza Heskestada [Karlsson i Quintiere 2000; Drysdale 2011] na wysokości granicy $z = z_i$:

$$\dot m_p = \begin{cases} 0{,}0056\,\dot Q_c\,z/L, & z < L, \\ 0{,}071\,\dot Q_c^{\,1/3}\,(z - z_0)^{5/3} + 1{,}92\cdot 10^{-3}\,\dot Q_c, & z \ge L, \end{cases} \tag{2.19}$$

gdzie $L = 0{,}235\,\dot{Q}^{2/5} - 1{,}02\,D$ jest średnią wysokością płomienia, $z_0 = 0{,}083\,\dot{Q}^{2/5} - 1{,}02\,D$ pozornym źródłem pióropusza, $\dot{Q}_c = (1-\chi_r)\dot{Q}$ mocą konwekcyjną (χ_r = 0,3), D średnicą zastępczą obrysu pożaru, a z_i średnią granicą w otoczeniu pióropusza (komórki płynu do odległości $r_p + H$ od środka pożaru): w samych komórkach pożaru warstwa jest najgrubsza, bo stamtąd rozpływa się cała masa z pióropusza. Pożar przy ścianie albo w narożu porywa mniej powietrza; program liczy go zasadą obrazu lustrzanego [Karlsson i Quintiere 2000]:

$$\dot{m} = \frac{\dot{m}_p(k\dot{Q},\ \sqrt{k}\ D,\ z)}{k}, \qquad k = 2\ \text{(ściana)},\ 4\ \text{(naroże)}, \tag{2.20}$$

czyli połowa (ćwierć) strumienia pożaru o podwójnej (poczwórnej) mocy i polu. Bok prostokąta opisanego na pożarze jest ścianą, gdy co najmniej połowa komórek tuż za nim to bryła, więc słup przy samochodzie nie zmienia pióropusza. W dalekim polu daje to mnożniki 0,63 i 0,39, a w obszarze płomienia, w którym leży granica warstwy w garażu przy samochodzie 4 MW, 0,82 i 0,68. Do warstwy trafia ciepło $(1-\chi_r)\dot{Q}$ i ciepło wydzielone $\dot{Q}$, a warstwa traci ciepło do stropu

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\frac{h_{ef}(t)}{c_p}\,\theta_u, \qquad \frac{1}{h_{ef}} = \frac{1}{h_c + h_r} + \frac{1}{h_k}, \qquad h_k = \sqrt{\frac{k\rho c}{\pi t}}, \tag{2.21}$$

gdzie $h_c + h_r$ = 15 W/(m²·K) jest współczynnikiem po stronie gazu (wartość startowa do kalibracji), h_k przewodzeniem w stropie betonowym jako półprzestrzeni ($k\rho c$ = 2·10⁶ W²·s/(m⁴·K²), Karlsson i Quintiere 2000, tab. 6.1; wzór szeregowy według Quintiere 2006, wz. 11.17), a t czasem nagrzewania stropu w komórce, liczonym od chwili, w której nad komórką pojawiła się warstwa. Po 10 min h_k = 33 W/(m²·K), a h_{ef} = 10,3 W/(m²·K); po 30 min h_{ef} = 8,3 W/(m²·K). Od etapu r16 strona gazu zależy od prędkości warstwy górnej $\mathbf{u}_s$: $h_c + h_r = \max(15,\ \mathrm{St}\,\rho_u c_p |\mathbf{u}_s|)$ z liczbą Stantona St = 0,0064 dopasowaną do korelacji Coopera dla strumienia podstropowego [Cooper 1982, w postaci CFAST i Coopera i Woodhouse'a 1985] z prędkością strumienia według Alperta; dla 1–8 MW i H = 2,5–6 m zgodność z Cooperem w zakresie r/H = 0,5–2,2 wynosi ±35%, dla 4 MW i 3 m ±10%. Konwekcja wymuszona przeważa przy prędkości warstwy powyżej ok. 2,3 m/s, czyli przy pożarze i w strudze wentylatora strumieniowego. Warstwa traci też ciepło do ścian w kontakcie z nią [Cooper 1983, przepływ przyścienny]:

$$h_w = \frac{k\,\mathrm{Nu}}{h}, \qquad \mathrm{Nu} = \max\left(0{,}48\,\mathrm{Gr}^{1/4},\ 0{,}0184\,\mathrm{Gr}^{2/5}\right), \qquad \mathrm{Gr} = \frac{g\,\theta_u h^3}{T_{\mathrm{zew}}\nu^2}, \tag{2.22}$$

szeregowo z przewodzeniem w ścianie $h_k(t)$; komórka z n_w ścianami bryły (także słupami) traci na m² rzutu $h_w n_w h/\Delta x \cdot \theta_u$. Masa przepływu przyściennego wraca do warstwy (przy granicy jest cieplejsza od warstwy dolnej), więc liczona jest tylko strata ciepła. W modelu bez poziomego mieszania w obrębie warstwy strata ta studzi przede wszystkim komórki przy ścianach.

Wymianę przez granicę warstwy domykają cztery zależności (pakiet 1C). Powietrze warstwy dolnej jest porywane przez granicę ścinaną [Ellison i Turner 1959]:

$$w_e = E(\mathrm{Ri})\,|\Delta\mathbf{u}|, \qquad E = \frac{0{,}08 - 0{,}1\,\mathrm{Ri}}{1 + 5\,\mathrm{Ri}}\ \ (\mathrm{Ri} \le 0{,}8), \qquad \mathrm{Ri} = \frac{g' h}{|\Delta\mathbf{u}|^2}, \tag{2.23}$$

a powyżej Ri = 0,8 E = 0. Powietrze porwane ma temperaturę otoczenia, więc ciepło Θ się nie zmienia, a masa warstwy rośnie o $\rho_a w_e\,dt$ i z powietrzem przechodzi do warstwy górnej sadza warstwy dolnej. Warstwa gorąca i wolna (Ri duże) się nie miesza; strumień wentylatora strumieniowego zwiększa $|\Delta\mathbf{u}|$, obniża Ri i miesza warstwę. Warstwa, która ostygła poniżej θ_d = 3 K, nie ma wyporu i przy ścinaniu oddaje dym warstwie dolnej z prędkością $w_d = (1 - \theta_u/\theta_d)\,w_e$; w powietrzu nieruchomym zostaje pod stropem. Wyciąg bierze z warstwy najwyżej wydatek kratki bez zasysania powietrza spod warstwy [NFPA 92]

$$\dot{V}_{max} = 4{,}16\,\gamma\, d^{5/2}\left(\frac{\theta_u}{T_{\mathrm{zew}}}\right)^{1/2}\ [\mathrm{m}^3/\mathrm{s}], \tag{2.24}$$

gdzie d jest grubością warstwy pod najniższym punktem kratki (od r16: grubość warstwy pod portem minus odległość dolnej krawędzi kratki od stropu, domyślnie 0), a γ = 0,5 dla kratki bliżej ściany niż dwie jej średnice zastępcze albo kratki w ścianie (inaczej 1); resztę wydatku port bierze spod warstwy. Gdy pod kratką brakuje warstwy dolnej, bo słup jest pełny dymu ($h = H$) albo warstwa dolna jest cieńsza od objętości reszty, brakującą objętość port bierze z warstwy górnej, z grubości, która jeszcze została w komórce (od r17). Przepływ uśredniony doprowadza do portu pełny wydatek; bez tej zasady masa warstwy piętrzyła się w komórkach portu, wypór rozpędzał pole ścinania, a warunek kroku (4.14) skracał krok (garaż 101,1 × 67,6 m o wysokości 2,7 m z wyciągiem 183 000 m³/h jedną kratką: 2,0 ms przy 75 s wobec 18–25 ms po poprawce). Warstwa, pod którą zostaje dość warstwy dolnej, liczy się jak wyżej. Port ma liczbę kratek N (dana scenariusza i edytora, domyślnie 1; w G1 suwak „Kratki wyciągu", domyślnie 10 kratek 1,0 × 0,6 m): kratki działają niezależnie, każda o polu A/N, więc granica portu wynosi $N\dot{V}_{max}$, a średnica zastępcza kratki $\sqrt{4A/(N\pi)}$. Kurtyna o głębokości d przepuszcza warstwę jak przelew [Karlsson i Quintiere 2000, wz. 5.31]:

$$q = u\,(h-d)^{+} + \tfrac{2}{3}\,C_d\sqrt{2g\,\theta_u/T_{\mathrm{zew}}}\ \ (h-d)_{+}^{3/2}\ [\mathrm{m}^2/\mathrm{s}], \tag{2.25}$$

z C_d = 0,7 i przepływem średnim u na ścianie kurtyny; przy warstwie grubszej od kurtyny po obu stronach płynie różnica przelewów, a warstwa cieńsza od kurtyny nie przechodzi. Od r16 warstwa dolna niesie pod kurtyną resztę przepływu średniego (sztywny strop): $w_l = (Hu - q)/(H - h_P)$, P komórka pod prąd strumienia warstwy górnej. Strefy cieplne sprowadzają θ_u do swojej temperatury, a w pasach atmosfery warstwa zanika. Z tego stanu program wyznacza pola rzutu: temperatura pod stropem $T = T_{\mathrm{zew}} + \theta_u$ (bez warstwy temperatura otoczenia albo strefy), ciepło wydzielone w słupie $q_V = (Q_u + Q_l)/H$, z którego liczą się sadza i widzialność (punkt 2.10), i dym s proporcjonalny do q_V. W obrysie pożaru temperatura pod stropem nie jest niższa niż strumień nad osią pióropusza z korelacji Alperta (żar na obrazie). Gdy płomień jest dłuższy od wysokości pomieszczenia, rozlewa się pod stropem do promienia $r_f = 0{,}95\,(L - H)$ [Karlsson i Quintiere 2000, wz. 4.41, za Heskestadem i Hamadą], a w tym kole temperatura pod stropem nie jest niższa niż w płomieniu według McCaffreya na drodze płomienia $s = H + r$ od paliwa [Karlsson i Quintiere 2000, wz. 4.29 i tab. 4.1]: $\Delta T = (\kappa/(0{,}9\sqrt{2g}))^2\, x^{2\eta-1}\, T_{\mathrm{zew}}$, $x = s/\dot{Q}^{2/5}$, ok. 850 K w płomieniu ciągłym. Obraz pokazuje tam żar, nie dym. Dla samochodu 4 MW pod stropem 3 m r_f = 0,21 m, czyli w obrysie samochodu; dla pożaru 8 MW na polu 4,5 × 2 m ok. 2 m. Zmiana dotyczy tylko pola temperatury rzutu, nie bilansu warstwy. Prędkość czoła (2.10), obwiednia (2.12) i relaksacja λ_w nie wchodzą wtedy do obliczeń. Rozszerzalność netto (2.13) zastępuje bilans ciepła przy stałym ciśnieniu [Karlsson i Quintiere 2000, wz. 8.34]:

$$\int S\,dV = \frac{\dot{Q}_c - \dot{q}_{strat}}{\rho_0 c_p T_0}: \tag{2.26}$$

w komórkach pożaru źródło objętości z mocy konwekcyjnej $(1-\chi_r)\,\dot{q}'''/(\rho_0 c_p T_0)$, w komórkach warstwy źródło ujemne ze straty ciepła do stropu (2.21) w danym kroku, czyli kurczenie się stygnącego gazu. Obraz, odczyt „Zadymienie" i płaszczyzny z tego stanu opisuje punkt 5.9. Model wyłącza adres z dopiskiem `?warstwa=0` albo przełącznik w opcjach zaawansowanych, a `?warstwa=1` go przywraca; wybór zostaje zapamiętany w przeglądarce. Sprawdzenie modelu opisuje punkt 6.9.

2.8 Głębokość modelu i strumienie

Wszystkie strumienie objętości w programie, podawane w m³/h, przelicza się na strumień na jednostkę głębokości modelu:

$$q = \frac{\dot{V}}{3600\,D} \quad [\mathrm{m^2/s}]. \tag{2.27}$$

W przekroju klatki schodowej o głębokości 1 m wentylator 20 000 m³/h daje więc takie prędkości, jak w otworze drzwi o szerokości ok. 1 m. W rzucie garażu głębokością jest wysokość garażu, a prędkość jest średnią po wysokości. Moc pożaru przelicza się na moc objętościową w komórkach źródła, $\dot{q}''' = \dot{Q}/(AD)$, gdzie A jest polem źródła w płaszczyźnie modelu. W przekroju garażu (G3, G4) pożar jest więc pasem przez całą głębokość modelu, a nie samochodem: wytwarza więcej dymu na jednostkę długości garażu, a wydajności wentylatorów w tych scenariuszach są większe niż w projekcie rzeczywistego garażu.

2.9 Warunki brzegowe

- **Bryła** (ściana, strop, grunt): prędkość normalna do ściany równa zeru. Model nie ma lepkości, więc przy ścianach nie ma warstwy przyściennej ani tarcia. Od r16 opcje do testów (domyślnie wyłączone, tylko procesor): tarcie stropu i posadzki przepływu uśrednionego $-c_f|\mathbf{u}|\mathbf{u}/H$ i lepkość turbulentna Smagorinskiego w poziomie $\nu_t = (C_s\Delta x)^2|S|$.
- **Atmosfera** (komórki otwarte): $P = 0$, czyli ciśnienie hydrostatyczne powietrza zewnętrznego, $T = T_{\mathrm{zew}}$, $s = 0$. Przez granicę z atmosferą powietrze swobodnie wpływa i wypływa.
- **Krawędź obszaru obliczeń**: zamknięta, chyba że skrajne komórki są atmosferą.
- **Ściany z oporem**: drzwi, okna, kratki, klapy, szczeliny i kurtyny w rzucie jako opór miejscowy K na ścianach komórek (punkt 3.1).
- **Porty**: wentylatory kanałowe jako źródła albo upusty objętości w obszarze komórek (punkt 3.6).

2.10 Ciepło wydzielone, sadza i widzialność

W projektowych symulacjach pożaru widzialność jest jednym z głównych kryteriów oceny, dlatego Poligon liczy ją tak samo jak FDS w prostej chemii [McGrattan i in., User's Guide]. W FDS masa sadzy na kilogram spalonego paliwa jest równa współczynnikowi produkcji sadzy Y_s (`SOOT_YIELD`), a masa spalonego paliwa wynika z mocy i ciepła spalania, więc szybkość wytwarzania sadzy wynosi

$$\dot{m}_s''' = Y_s \frac{\dot{q}'''}{\Delta H_c}. \tag{2.28}$$

Sadza nie ma w FDS osobnego równania transportu, tylko płynie z produktami spalania; przy prostej chemii nie osiada i nie łączy się w większe cząstki. Współczynnik ekstynkcji i widzialność są wielkościami lokalnymi w komórce: $K_e = K_m\rho_s$, $S_w = C_w/\max(C_w/S_{\max},\ K_e)$, z K_m = 8700 m²/kg, C_w = 3 (znaki odbijające światło) albo 8 (podświetlane) i $S_{\max}$ = 30 m.

W Poligonie podstawą jest pole q_V [kJ/m³]: ciepło wydzielone przez pożar na jednostkę objętości gazu, w rzucie średnia w słupie od posadzki do stropu. Spełnia ono równanie w postaci zachowawczej

$$\frac{\partial q_V}{\partial t} + \nabla\cdot(\mathbf{w}\,q_V) = \frac{\dot{q}'''}{1000} - \sigma_{\mathrm{wyc}}\,q_V, \tag{2.29}$$

gdzie $\dot{q}'''$ [W/m³] jest mocą objętościową po narastaniu, bez obcięcia do $T_{\max}$ (paliwo się spala, nawet gdy temperatura komórki stoi na ograniczeniu), $\mathbf{w}$ prędkością przenoszenia skalarów (w przekroju prędkość przepływu, w rzucie z prędkością warstwy (2.15)), a σ_{wyc} [1/s] intensywnością wyciągu portu. Gęstość gazu nie jest potrzebna: rozszerzalność gazów pożaru i nawiew ($\nabla\cdot\mathbf{w} > 0$) rozcieńczają q_V przez strumienie, a stygnięcie je zagęszcza. Masa spalonego paliwa w metrze sześciennym to $q_V/\Delta H_c$, więc przy wyświetlaniu i odczycie

$$\rho_s = Y_s \frac{q_V}{\Delta H_c}, \qquad K_e = K_m \rho_s, \qquad S_w = \min\left(S_{\max}, \frac{C_w}{K_e}\right). \tag{2.30}$$

Pole q_V nie zależy od Y_s, ΔH_c, K_m ani C_w, dlatego te wielkości działają na żywo, bez ponownego obliczenia: zmiana suwaka od razu zmienia widzialność. Od r16 kontrolka „Materiał" ustawia razem Y_s i ΔH_c z tablic Tewarsona [Karlsson i Quintiere 2000, tab. 9.2; Quintiere 2006, tab. 2.3]: n-heptan 0,037 i 41 MJ/kg, drewno 0,015 i 12, nylon 0,075 i 27, PMMA 0,022 i 24, polietylen 0,060 i 30,8, polipropylen 0,059 i 38,6, polistyren 0,16 i 27, pianka PU elastyczna 0,23 i 19; domyślny zestaw „zachowawczo" to 0,10 i 25 MJ/kg (4,0 g sadzy na MJ). Ręczna zmiana suwaka przełącza wybór na „Własne". Pole jest przenoszone schematem strumieniowym z zachowaniem ilości (punkt 4.12), bo adwekcja półlagranżowska, która przenosi dym s, nie zachowuje całki skalaru (punkt 4.4). W zamkniętym obszarze całka $\int q_V\,dV$ jest równa ciepłu wydzielonemu przez pożar, $\int \dot{Q}\,dt/1000$, a masa sadzy wynosi $Y_s \int q_V\,dV/\Delta H_c$.

W przekroju o głębokości 1 m pole q_V i widzialność są lokalne, jak w plastrze FDS. Pożar w przekroju jest jednak pasem przez całą głębokość modelu, a pióropusz liniowy porywa powietrze inaczej niż punktowy, więc stężeń sadzy z przekroju garażu nie przenosi się wprost na rzeczywisty budynek (punkt 7.5). W rzucie q_V jest średnią w słupie, a wartość na płaszczyźnie wynikowej, np. 1,8 m nad posadzką, daje profil z dwóch warstw (punkt 5.9), w rzucie bez modelu warstwy profil pionowy z etapu r08 (punkt 5.8).

Współczynnik FDS (r18). Opcja „Współczynnik FDS" w panelu „Opcje zaawansowane" (punkt 8.9), dostępna tylko w rzucie i domyślnie wyłączona, nakłada empiryczną kalibrację widzialności na wynikach FDS:

$$K_e = \alpha_F K_m \rho_s, \qquad \alpha_F = 2, \tag{2.31}$$

we wszystkich przeliczeniach widzialności (w słupie, na płaszczyznach, w odczytach, w obrazie Widzialność i w odczycie „Zadymienie" na płaszczyźnie), a na płaszczyźnie z dwóch warstw także kalibrację profilu (punkt 5.9). Obliczenia przepływu, temperatury, dymu i ciepła wydzielonego zostają bitowo te same, bo K_m wchodzi dopiero do przeliczenia na widzialność; ciemniejsze jest także krycie obrazu „Dym" z modelem warstwy, które wynika z tej samej sadzy. Wartość α_F wyznaczono na 16 garażach z archiwum projektowych symulacji FDS (punkt 6.12). Ma ona interpretację fizyczną: widok w słupie rozkłada dym na całą wysokość, a w FDS po starcie wentylacji dym wypełnia ok. dwóch trzecich wysokości, więc stężenie w części zadymionej jest ok. 1,5–2 razy większe od średniej w słupie. Zakres ważności: garaże jednokondygnacyjne z wentylacją strumieniową i jednym szachtem wyciągowym, wysokość w świetle 2,4–3,7 m, pożar samochodu.

Współczynnik FDS: początek pożaru (r19). Przed startem wyciągu dym w FDS gromadzi się pod stropem, a na 1,8 m widzialność jest jeszcze dobra; widok w słupie rozkłada ten sam dym na całą wysokość. Opcja „Współczynnik FDS: początek pożaru", zależna od Współczynnika FDS i działająca z modelem warstwy, liczy więc do chwili $t_w + 15$ s, gdzie t_w to start wyciągu, widzialność w słupie na płaszczyźnie 1,8 m z dwóch warstw (wzór (5.8)):

$$K_e = \alpha_P K_m Y_s \frac{q_{1,8}}{\Delta H_c}, \qquad \alpha_P = 1, \quad \beta_P = 1, \quad \delta_P = 1{,}5\ \text{m}, \tag{2.32}$$

gdzie $q_{1,8}$ jest stężeniem ciepła wydzielonego na 1,8 m z profilu warstwy o grubości $\beta_P h$ i rozmyciu granicy δ_P; w komórce bez warstwy wartość słupa. Od $t_w + 15$ s obowiązuje wzór (2.31). Program nie ma harmonogramu wentylacji: t_w to chwila, od której model ma pracujący wentylator wyciągowy (wyciąg od początku przebiegu: $t_w = 0$; bez wyciągu faza trwa do końca przebiegu), a raz ustalony start zostaje do resetu. Zmienia się tylko widzialność w widoku „w słupie" (obraz, punkty pomiarowe,

legenda); płaszczyzny wybrane w widoku, obraz „Dym", „Zadymienie" i obliczenia zostają jak przy samym Współczynniku FDS. Parametry pochodzą z kalibracji na tym samym zestawie garaży (punkt 6.13).

3

Modele elementów i urządzeń

Elementy budynku i urządzenia wchodzą do równań na trzy sposoby: jako opór miejscowy na ścianach komórek (drzwi, okna, kratki, klapy, szczeliny, kurtyny w rzucie), jako źródło objętości w obszarze komórek (wentylatory kanałowe) albo jako źródło pędu, ciepła i dymu (wentylatory strumieniowe, pożar). Rozdział opisuje modele wszystkich tych elementów.

3.1 Opory miejscowe

Otwór, przez który powietrze przechodzi ze stratą ciśnienia $\Delta p = K\rho_0 u|u|/2$, jest w modelu ścianą komórki ze współczynnikiem oporu K. Strata działa jak opór rozłożony na długości komórki i jest liczona niejawnie, z linearyzacją Picarda:

$$c_f = \frac{K_f \max(|u_f|,\, u_{\min})}{2\,\Delta x}, \qquad \beta_f = \frac{1}{1 + \Delta t\, c_f}, \qquad u_f = \beta_f\Big(u_f^{*} - \Delta t \frac{P_{\mathrm{nb}} - P_c}{\Delta x}\Big), \tag{3.1}$$

gdzie $u_{\min} = 0{,}05$ m/s, a $|u_f|$ jest prędkością na ścianie z poprzedniego kroku, relaksowaną współczynnikiem 0,5 (bez relaksacji czysty Picard daje przy dużym K drganie o okresie dwóch kroków). Ściana bez oporu ma $\beta_f = 1$, ściana nieaktywna (przy bryle) $\beta_f = 0$. Opór „nieskończony”, czyli otwór całkiem zamknięty, zastępuje się wartością $K = 10^8$: ściana zostaje w równaniu ciśnienia jako bardzo duży opór, a nie znika.

Rzeczywiste otwory przelicza się na K trzema wzorami:

$$K_{\mathrm{otw}} = \frac{1}{C_d^2} - 1, \qquad K_{\mathrm{szcz}} = \left(\frac{A}{C_d\, a}\right)^2, \qquad K_{\mathrm{mod}} = K_{\mathrm{rz}}\left(\frac{A_{\mathrm{mod}}}{A_{\mathrm{rz}}}\right)^2. \tag{3.2}$$

Pierwszy dotyczy otworu o współczynniku wypływu C_d: stratę wylotową strugi (ok. 1) model daje sam, więc odejmuje się ją od $1/C_d^2$; po takim przeliczeniu otwór o $C_d = 0{,}6$ ma w modelu efektywny C_d 0,56–0,59. Klapę dymową klatki opisuje osobny model według powierzchni czynnej (punkt 3.4). Drugi dotyczy szczeliny o polu a w ścianie o polu A (zamknięte drzwi, okno, brama), z $C_d = 0{,}65$. Trzeci przenosi opór otworu o polu rzeczywistym A_{rz} na model, w którym powietrze przechodzi przez inne pole A_{mod} (np. kratka szachtu w rzucie: obwód szachtu razy wysokość garażu).

Od etapu r10 linia oporu może mieć przypisane pole rzeczywistego otworu A. Współczynnik K odnosi się wtedy do tego pola, a program przelicza go przy kompilacji na pole ścian siatki, które otwór zajmuje przy danym kroku siatki:

$$K_f = K\Big(\frac{n\,\Delta x\, D}{A}\Big)^2, \qquad \dot V = A\sqrt{\frac{2\,\Delta p}{\rho_0 K}}, \tag{3.3}$$

gdzie n jest liczbą ścian aktywnych na odcinku, a D głębokością modelu (w rzucie wysokością przestrzeni). Przy równej prędkości na ścianach strumień nie zależy od kroku siatki ani od kąta odcinka. Z tej postaci korzystają otwory w ścianach ukośnych modelu z edytora: otwarte z $K = 2$ i polem otworu, zamknięte z $K = 1$ i polem szczeliny (0,025 m² drzwi, 0,3 m² brama). Otwory w ścianach osiowych przelicza się jak dotąd trzecim wzorem (3.2).

Tabela 3.1. Opory i szczeliny w scenariuszach (na 1 m głębokości przekroju albo na element)

Element	Wartość w modelu
Drzwi otwarte, okno otwarte	K = 0,5; 0,8
Klapa dymowa w dachu klatki, powierzchnia czynna A_a 0,7–2,4 m²	$K = w^2(1/A_a^2 + 1/b^2) - A(w)$, punkt 3.4
Szczelina zamkniętych drzwi do klatki	0,015 m² (drzwi dymoszczelne: 0,0012 m²)
Szczelina zamkniętego okna razem z nawiewnikiem okiennym	0,005 m²
Kratki wentylacji grawitacyjnej lokalu pod stropem, z kanałem poza modelem (od r24)	0,04 m², $K = 1/C_d^2$ przy polu kratek, wzór (3.3)
Klapa upustowa zamknięta	$K = 10^5$ (nieszczelność ok. 0,003 m² na 1 m² klapy)
Kratki szachtów kompensacyjnych w rzutach garaży	K = 35–63 po przeliczeniu wzorem (3.2)
Drzwi do garażu G4 otwarte; zamknięte	K = 2,5; 5000
Otwór w ścianie ukośnej modelu z edytora: otwarty; zamknięty	K = 2 przy polu otworu; K = 1 przy polu szczeliny 0,025 m² (drzwi) albo 0,3 m² (brama), wzór (3.3)

Szczelina drzwi dymoszczelnych odpowiada klasie Sa (PN-EN 13501-2, badanie według PN-EN 1634-3): przeciek do 3 m³/h na metr szczeliny przy 25 Pa. Drzwi modelu 2,0 × 1,0 m mają 6 m obwodu, czyli do 18 m³/h przy 25 Pa, a pole zastępcze $a = \dot{V}/(C_d\sqrt{2\Delta p/\rho_0}\,)$ wynosi ok. 0,0012 m². Model nie zmienia szczelności z temperaturą, więc klasa S200 liczy się tak samo.

Lokale w klatkach K1 i K2 mają od etapu r24 kratkę wentylacji grawitacyjnej pod stropem, przy elewacji (od 0,6 do 0,1 m od wewnętrznego lica ściany elewacyjnej), o polu czynnym 0,04 m². W budynku taka kratka prowadzi kanałem nad dach, a nie na elewację. Kanał nie jest liczony w przekroju: w stropie nad kratką leży obszar atmosfery (ciśnienie zewnętrzne na wysokości kratki), od góry zamknięty oporem $K = 10^8$, więc powietrze i dym, które wpływają do kratki, opuszczają model jak kanałem nad dach. Kratki dają kondygnacji połączenie z zewnątrz kilka razy większe niż szczelina drzwi klatki, dzięki czemu przy nadciśnieniu różnica ciśnień odkłada się na drzwiach klatki, jak w obliczeniach według PN-EN 12101-13. Do etapu r23 to samo pole było doliczone do zamkniętego okna i dym z pożaru wypływał zamkniętym oknem na elewację: w K1 (300 kW na 3. piętrze, średnia z 60–120 s) ok. 615 m³/h wobec ok. 1100 m³/h przy oknie otwartym. Od r24 zamknięte okno lokalu z pożarem przepuszcza 13–18 m³/h, a kratka 617–665 m³/h (siatki 0,15–0,25 m), przy tym samym zadymieniu klatki (64–65% po 120 s). Pożar nie jest kontrolowany tlenem: moc nie zależy od dopływu powietrza, więc zamknięcie okna jej nie zmniejsza.

3.2 Szczeliny w przenoszeniu dymu i ciepła

Ściana z oporem $K \geq 100$ (zamknięte drzwi, okna, bramy, klapy upustowe; bez kurtyn w rzucie) jest **szczeliną**. Otwarte otwory mają K rzędu 0,5–63, zamknięte skrzydła od ok. 2500, więc granica 100 rozdziela je jednoznacznie. Rzut ciśnienia uwzględnia szczelinę jako opór, ale schemat adwekcji (punkt 4.4) bez dodatkowej reguły brałby dym zza drzwi: prędkość na środku komórki jest średnią z prędkości w szczelinie i na drugiej ścianie komórki, a szablon interpolacji obejmuje komórki po obu stronach drzwi. Dlatego przy szczelinach obowiązują trzy reguły.

1. Ślad półlagranżowski skalarów zatrzymuje się tuż przed szczeliną, a interpolacja pomija komórki szablonu leżące za szczeliną względem komórki, w której leży punkt. Reguła działa w komórkach do trzech komórek od szczeliny; dalej adwekcja jest zwykła.

2. Przez szczelinę dym i ciepło przechodzą jawnym strumieniem pod prąd, z prędkością ściany z początku kroku. Komórka c dostaje udział wartości sąsiada z każdej szczeliny, przez którą powietrze do niej wpływa, liczony niejawnie względem samej komórki:

$$\varphi_c' = \frac{\varphi_c + \sum_f Q_f \varphi_{\mathrm{nb}(f)}}{1 + \sum_f Q_f}, \qquad Q_f = \frac{|u_f|\,\Delta t}{\Delta x}, \tag{3.4}$$

   gdzie φ oznacza s albo T. Wynik leży zawsze między wartościami komórki i sąsiadów, a komórka wypływu zachowuje swoją wartość. Ile powietrza przecieka, tyle dymu.

3. Ściana szczeliny zachowuje prędkość z poprzedniego kroku (bez pędu przeniesionego śladem z sąsiednich ścian), a komórki przy szczelinach nie podtrzymują wirowości. W rzucie przez szczelinę nie przenosi dymu ani prędkość czoła warstwy, ani ścinanie, tylko przeciek z rzutu ciśnienia.

3.3 Domykanie otworów

Zamknięcie w jednym kroku otworu, przez który płynie powietrze, zatrzymywałoby cały słup powietrza jak trzaśnięcie zaworem. Rzut ciśnienia dawałby wtedy setki paskali: w K2 przy zamknięciu okna przy pracującym nawiewie ok. 1000 Pa w pierwszym kroku przy ustalonych ok. 80 Pa, w G2 przy zamknięciu kompensacji ok. 480 Pa przy ustalonych ok. 25 Pa. Dlatego ściana, której opór po zmianie geometrii rośnie co najmniej dziesięciokrotnie, dostaje opór narastający logarytmicznie w czasie $\tau_c = 0{,}4$ s:

$$\ln K(t) = \ln K_0 + \frac{t}{\tau_c}\left(\ln K_1 - \ln K_0\right), \qquad 0 \le t \le \tau_c, \quad K_0 \ge 1. \tag{3.5}$$

Komórka, która ma stać się bryłą (klapa w dachu, szacht kompensacyjny, dorysowana ściana), zachowuje na czas domykania poprzedni typ, jej ściany dostają opór narastający do 10^5, a bryła powstaje dopiero potem, gdy przez ściany prawie nic już nie płynie. Otwieranie działa od razu, bo przepływ i tak narasta stopniowo. Szczyt ciśnienia przy domykaniu wynika w dużej mierze z bezwładności hamowanego słupa powietrza, rzędu $\rho L u_0/\tau_c$, i w długim garażu sięga mimo to od kilkudziesięciu do ponad stu paskali.

3.4 Klapa dymowa według powierzchni czynnej

Klapa dymowa w dachu klatki (K1) jest opisana powierzchnią czynną $A_a = C_v A_{\mathrm{geo}}$, jak w doborze klap do klatek schodowych. Wymaganie minimalne z PN-B-02877-4:2025 pkt 4.3: w klatce budynku niskiego i średniowysokiego co najmniej 5% największego rzutu klatki, nie mniej niż 1,0 m², więc przy typowej klatce o rzucie 16–17 m² rozstrzyga wartość 1,0 m² i ona jest wartością domyślną. Suwak zaczyna się od 0,7 m², żeby można było sprawdzić ciśnienia w klatce z klapą mniejszą niż minimum; opis klapy poniżej 1,0 m² podaje, że jest mniejsza niż minimum normowe. W przekroju o głębokości 1 m otwór ma szerokość w równą polu geometrycznemu typowej klapy jednoskrzydłowej o tej powierzchni czynnej (od ok. 105 × 105 cm przy 0,7 m² i 125 × 125 cm przy 1,0 m² do 200 × 200 cm przy 2,3 m², zaokrąglenie do 0,2 m, najwyżej 2,8 m; poniżej klapy 120 × 120 cm pole geometryczne przy C_v tej klapy, 0,681). Opór na linii otworu dobrano tak, żeby różnica ciśnienia statycznego między klatką a otoczeniem wynosiła $\Delta p = \frac{\rho}{2}(Q/A_a)^2$:

$$K = w^2\left(\frac{1}{A_a^2} + \frac{1}{b^2}\right) - A(w), \tag{3.6}$$

gdzie b = 3,0 m jest szerokością klatki w przekroju, a $A(w)$ stratą własną otworu na siatce (1,48 przy 1,0 i 1,2 m, od 1,39 przy 1,4 m do 0,85 przy 2,8 m, z kalibracji). Składnik $1/b^2$ odejmuje ciśnienie dynamiczne dopływu, bo klatka modelu ma w przekroju 3 m², a nie ok. 16 m² jak rzeczywista. Sprawdzenie: przy nawiewie 20 000 A_a m³/h bez pożaru powierzchnia czynna zmierzona w modelu $Q/\sqrt{2\Delta p/\rho}$ zgadza się z nastawą w granicach ±1,5% na siatce 0,2 m (0,7 ⟶ 0,699; 0,8 ⟶ 0,803; 1,0 ⟶ 1,000; 1,6 ⟶ 1,593; 2,0 ⟶ 2,023; 2,4 ⟶ 2,402 m²). Na siatkach 0,25 i 0,15 m otwór obejmuje inną liczbę komórek i różnica sięga −9…+14%. Przy klapie 0,7 m² i nawiewie 50 000 m³/h (krok 12 lekcji K1) wentylator daje ok. 38 000 m³/h, a na zamkniętych drzwiach do klatki jest 100–113 Pa i siła otwarcia ok. 151 N (przy 1,0 m²: 65–80 Pa, ok. 120 N); przy nawiewie 20 000 m³/h 31–34 Pa i ok. 73 N wobec 17–21 Pa i ok. 60 N przy 1,0 m². W domyślnej postaci przekroju z gęstością zmienną (punkt 2.2.2) powierzchnia czynna zostaje zachowana także dla gorącego gazu (punkt 6.7); w postaci z ρ_0 klapa 1,0 m² przy 400 °C działała jak 0,66 m².

3.5 Klapy upustowe sterowane ciśnieniem

Klapa upustowa (K2) otwiera się, gdy różnica ciśnień między jej stronami przekroczy nastawę. Stopień otwarcia x dąży do wartości

$$x^{*} = \min\!\left(1, \max\!\left(0, \frac{\Delta p - p_n}{b}\right)\right), \qquad \frac{dx}{dt} = \frac{x^{*} - x}{\tau_u}, \qquad K = K_z^{\,1-x} K_o^{\,x}, \tag{3.7}$$

gdzie p_n jest nastawą (ciśnienie początku otwarcia), b pasmem otwierania (w K2 6 Pa), $\tau_u = 0{,}5$ s, a opór interpoluje się logarytmicznie między klapą zamkniętą ($K_z = 10^5$) i otwartą ($K_o = 1/0{,}6^2 - 1$). Jawny krok tego równania byłby niestabilny: ciśnienie odpowiada na otwarcie w tym samym kroku, a jego czułość na x sięga setek paskali na pełny skok, więc klapa trzaskałaby co krok. Krok jest więc niejawny, z liniowym modelem odpowiedzi ciśnienia oszacowanym od góry. Zawyżone oszacowanie tylko spowalnia dojście do punktu pracy, bez przeregulowania. Przy regulacji falownikiem nastawa klapy leży 15 Pa powyżej nastawy regulatora, więc klapa zostaje zabezpieczeniem przed przekroczeniem ciśnienia.

3.6 Wentylatory kanałowe

Wentylator kanałowy jest w modelu **portem**: obszarem komórek, do którego kanał spoza modelu dostarcza powietrze (nawiew) albo z którego je odbiera (wyciąg). Wydajność wynika z charakterystyki wentylatora i ciśnienia p uśrednionego po komórkach portu:

$$\dot V = \dot V_{\mathrm{nom}} \sqrt{\max\!\left(0,\ 1 - \frac{p}{\Delta p_{\max}}\right)} \ \text{(nawiew)}, \qquad \dot V = \dot V_{\mathrm{nom}} \sqrt{\max\!\left(0,\ 1 + \frac{p}{\Delta p_{\max}}\right)} \ \text{(wyciąg)}, \tag{3.8}$$

gdzie $\Delta p_{\max}$ jest ciśnieniem zamknięcia: w klatkach 300 Pa dla napowietrzania i 600 Pa dla oddymiania, w edytorze domyślnie 800 Pa dla wyciągu i 600 Pa dla nawiewu. Strumień rozkłada się równo na n komórek portu jako źródło objętości $S = \pm\, q/(n\,\Delta x^2)$ z q według (2.27).

Punkt pracy. Wydajność nie przeskakuje od razu do charakterystyki, tylko w każdym kroku relaksuje się do punktu pracy, czyli przecięcia charakterystyki wentylatora z lokalną charakterystyką instalacji widzianą przez port:

$$\dot V \leftarrow \dot V + 0{,}2\,\left(\dot V_{\mathrm{pp}} - \dot V\right). \tag{3.9}$$

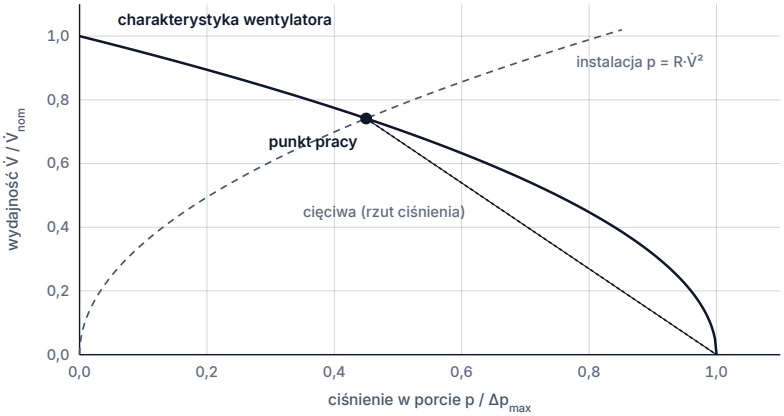
W obszarze połączonym z atmosferą charakterystykę instalacji przybliża przeciek kwadratowy $p = R\dot V^2$, czyli prosta styczna o nachyleniu $2p/\dot V$ w bieżącym punkcie. W strefie zamkniętej odpowiedź ciśnienia na dopływ jest znana z modelu ściśliwości (2.9). Bez tej relaksacji układ o

sztywnej charakterystyce (klatka z zamkniętymi drzwiami i duży wentylator) wpadał w cykl: wydajność i różnica ciśnień skakały co kilka kroków, a ciśnienie przekraczało ciśnienie zamknięcia. Pierwszy krok ze spoczynku jest ograniczony do $1\%\ \dot V_{\mathrm{nom}}$.

Sprzężenie z rzutem ciśnienia. W obszarze połączonym z atmosferą wydajność ustalona przed rzutem jest tylko punktem startowym. Rzut ciśnienia widzi wentylator jako źródło zależne od ciśnienia, liniowe wzdłuż cięciwy charakterystyki od bieżącego punktu $(p_0, \dot V_0)$ do ciśnienia zamknięcia:

$$\dot V(p) = \dot V_0 - \sigma_w G (p - p_0), \qquad G = \frac{\dot V_0}{\max\left(\Delta p_{\max} - \sigma_w p_0,\ 0{,}1\,\Delta p_{\max}\right)}, \tag{3.10}$$

gdzie $\sigma_w = +1$ dla nawiewu i -1 dla wyciągu. Cięciwa leży pod charakterystyką, więc ciśnienie w kroku nie przekracza ciśnienia zamknięcia, a po rzucie wydajność portu jest zgodna z polem prędkości. Bez tego sprzężenia zamknięcie drzwi przy pracującym wentylatorze dawało w pierwszych krokach ciśnienie rzędu kilkunastu kilopaskali. Charakterystyki i cięciwę pokazuje ryc. 3.1.



Ryc. 3.1. Charakterystyka wentylatora nawiewnego (3.8), charakterystyka instalacji z przeciekiem kwadratowym i cięciwa (3.10), wzdłuż której rzut ciśnienia widzi wentylator w jednym kroku.

Nawiew wnosi powietrze o temperaturze nawiewu T_n (domyślnie T_{zew}) bez dymu. W komórkach portu dym i temperatura są wymieniane z szybkością $\sigma = \dot V / (3600\, D\, n\, \Delta x^2)$:

$$s \leftarrow \frac{s}{1 + \sigma \Delta t}, \qquad T \leftarrow \frac{T + \sigma \Delta t\, T_n}{1 + \sigma \Delta t}. \tag{3.11}$$

3.7 Regulacja falownikiem

W systemie różnicowania ciśnień (K2) wentylator może pracować z regulatorem, który utrzymuje różnicę ciśnień Δp między klatką i korytarzem na nastawie Δp_n. Regulator jest typu PI w skali logarytmicznej:

$$e = \tfrac{1}{2} \ln \frac{\Delta p_n}{\Delta p}, \qquad \frac{d \ln \dot V_i}{dt} = \frac{e}{\tau_{\mathrm{PI}}}, \qquad \ln \dot V_{\mathrm{nom}} = \ln \dot V_i + k_p\, e, \tag{3.12}$$

z $\tau_{\mathrm{PI}} = 0{,}5$ s i $k_p = 1{,}5$. Błąd jest ograniczony do przedziału od $-\ln 6$ do $\ln 2{,}5$ (gdy Δp spadnie poniżej 1% nastawy, przyjmuje się $\ln 2{,}5$), wydajność nominalna do $\dot V_{\max}$, a człon całkujący nie spada poniżej $0{,}002\, \dot V_{\max}$. Przy przecieku kwadratowym ($\Delta p \propto \dot V^2$) błąd e jest dokładnie logarytmem stosunku wydajności potrzebnej do bieżącej, więc wzmocnienie pętli nie zależy od punktu pracy: ten sam regulator jest stabilny przy szczelnej klatce (kilkaset m³/h) i przy otwartych drzwiach (pełna wydajność). Po otwarciu drzwi wydajność rośnie do maksimum w 1–2 s, a po zamknięciu różnica ciśnień wraca do ±10% nastawy w kilka sekund, bez drgań i bez przeregulowania w dół.

3.8 Wentylatory strumieniowe i przewoźne

Wentylator strumieniowy jest źródłem pędu o ciągu F w prostokącie o polu A_j, w kierunku jednostkowym $\mathbf{d}$:

$$\mathbf{a}_j = \frac{F}{\rho_0 \, A_j \, D}\,\mathbf{d}, \tag{3.13}$$

dodawane do prędkości na aktywnych ścianach w prostokącie (składowa x na ścianach pionowych, y na poziomych). W rzucie do przepływu uśrednionego trafia udział ψ pędu, a reszta napędza ścinanie warstwy (2.14). W G1 pracuje sześć wentylatorów po 50 N (prostokąty 2,4 × 1,2 m). W G2 wentylator przewoźny straży pożarnej ma prostokąt 1,2 × 1,2 m, ciąg 200 N i $\psi = 1$, a kierunek ustawia się kątem. Ciąg 200 N wynika ze wzoru na strumień swobodny $\dot{V}(x) \approx 0{,}28\, x\sqrt{J/\rho}$ [Ricou, Spalding 1961]: wydajności PPV ok. 33 700 m³/h, typowej dla wentylatora z wirnikiem 420 mm, odpowiada w odległości ok. 2,5 m wydatek pędu $J \approx 200$ N. W modelu przy otwartej kompensacji napływ netto bramą wynosi wtedy ok. 31 600 m³/h, czyli blisko tej wydajności.

3.9 Pożar

Pożar jest prostokątem (w przekroju: plastrem o głębokości modelu) o mocy maksymalnej $\dot{Q}_{\max}$, narastającej z kwadratem czasu od zapłonu:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max}\,\min\!\left(1,\ \left(\frac{t_z + \Delta t/2}{t_g}\right)^2\right), \qquad \dot{q}''' = \frac{\dot{Q}(t)}{A\,D}, \tag{3.14}$$

gdzie t_z jest czasem od zapłonu (włączenie pożaru, przeniesienie i reset liczą go od zera), a t_g czasem narastania: 45 s w klatkach, 60 s w garażach. W badaniach pożarowych samochód osobowy dochodzi do mocy szczytowej zwykle po kilku do kilkunastu minutach; lekcje skracają to do minuty, żeby warstwa narastała na oczach sali. Moc objętościowa ogrzewa gaz według (2.7) do $T_{\max} = 1200$ K, daje źródło objętości (2.6) i dym (2.8). W rzucie z warstwą liczoną w czasie, domyślnym od etapu r15, pożar zasila warstwę pióropuszem (2.19), a źródło objętości wynika z bilansu ciepła (2.26); w rzucie bez modelu warstwy temperaturę warstwy ogranicza dodatkowo obwiednia (2.12).

Pożar wydziela też ciepło do pola q_V (punkt 2.10) i ma dwie nastawy produktów spalania w grupie Pożar każdego scenariusza: współczynnik produkcji sadzy Y_s (0,01–0,25 kg/kg, domyślnie 0,10) i ciepło spalania ΔH_c (10–50 MJ/kg co 0,5, domyślnie 25 MJ/kg). Obie nastawy zachowują wartość przy przechodzeniu między krokami lekcji i działają na żywo. ΔH_c wpływa tylko na sadzę i widzialność, bo moc pożaru jest zadana wprost. Zmiana Y_s przeskalowuje także istniejący dym s o iloraz nowej i starej wartości (s jest liniowe względem Y_s), w obliczeniach i w obrazie, więc dym wygląda tak, jak wyglądałby przy nowej wartości od zapłonu. Dla porównania wartości z podręcznika użytkownika FDS: poliuretan 26,2 MJ/kg przy Y_s = 0,131, drewno 16,4 MJ/kg przy 0,015.

3.10 Kurtyny dymowe w rzucie

W przekroju (G3) kurtyna jest bryłą zwisającą od stropu. W rzucie jest linią ścian o głębokości d. Dla powietrza to opór zwężenia przekroju do $H - d$:

$$K = \max\!\left(0,\ \left(\frac{H}{C_d\,(H-d)}\right)^2 - 1\right), \qquad C_d = 0{,}8. \tag{3.15}$$

Dla dymu i ciepła przenoszonych przez linię kurtyny działa przepuszczalność

$$\tau = b\,\min\!\left(1, \max\!\left(0, \frac{h-d}{h}\right)\right) + (1-b), \qquad b = \min\!\left(1, \frac{\theta}{\theta_{\text{ref}}}\right), \quad h = Hb. \tag{3.16}$$

Gorąca warstwa cieńsza od kurtyny jest zatrzymywana. Ostygły i wymieszany dym (małe b) przechodzi pod kurtyną razem z powietrzem. Przepuszczalność τ działa w rzucie bez modelu warstwy. Z warstwą liczoną w czasie, domyślną od etapu r15, opór zwężenia (3.15) zostaje dla przepływu uśrednionego, warstwę górną przez linię kurtyny przenosi przelew (2.25), a warstwa dolna niesie pod kurtyną resztę przepływu średniego (punkt 2.7.5).

3.11 Przegrody dorysowane i biegi schodów

Użytkownik może w trakcie obliczeń dorysować ścianę albo kurtynę (w rzucie). Ściana jest bryłą o grubości 0,1–1,0 m (przegroda dorysowana z interfejsu ma 0,2 m w rzucie i 0,15 m w przekroju), wystającą o pół grubości poza końce odcinka. Kurtyna ma głębokość od 0,1 m do mniejszej z wartości: 12 m albo wysokość przestrzeni minus 0,1 m. Przegrody wchodzą do geometrii jak drzwi, przez domykanie (punkt 3.3), więc pola obliczeń nie są zerowane. Przegród może być najwyżej 64.

W klatkach K1 i K2 biegi schodów mogą być przeszkodą dla przepływu: bryłą jest dolna część każdego biegu (6 z 9 stopni), a górna część i spoczniki zostają tylko na rysunku. W przekroju dwuwymiarowym oba biegi kondygnacji leżą w jednej płaszczyźnie, więc pełne biegi zamknęłyby klatkę. Opcja jest domyślnie wyłączona: w plastrze 1 m przez klatkę płynie cały wydatek wentylatora, więc opór biegów jest kilkakrotnie zawyżony (przy napowietrzaniu i upuście 50 Pa na górze parter dostawał 130–170 Pa).

3.12 Siła otwarcia drzwi

Siłę potrzebną do otwarcia zamkniętych drzwi przy różnicy ciśnień Δp liczy się z równowagi momentów względem zawiasów: parcie $\Delta p\,A$ działa w połowie szerokości skrzydła, a siła na klamce na ramieniu $W - d$:

$$F = F_{\mathrm{sz}} + \frac{W\,A\,\Delta p}{2\,(W - d)}, \tag{3.17}$$

z $W = 0{,}9$ m, $A = 1{,}8$ m^2, $d = 0{,}075$ m i siłą samozamykacza $F_{\mathrm{sz}} = 40$ N. W K2 program porównuje wynik z kryteriami przyjętymi według PN-EN 12101-13:2022: różnica ciśnień przy zamkniętych drzwiach co najmniej 30 Pa, siła otwarcia do 100 N, prędkość w otwartych drzwiach co najmniej 1 m/s (klasa 1) albo 2 m/s (klasa 2). W garażach ten sam wzór daje próg ok. 61 Pa podciśnienia, przy którym siła dochodzi do 100 N, i ok. 41 Pa nadciśnienia, przy którym samozamykacz przestaje domykać drzwi.

3.13 Człowiek w przekroju

W G4 można postawić człowieka o wzroście $h_c = 1{,}8$ m. Jego stan wynika z umownej dawki $\mathscr{D}$, liczonej w czasie modelu z dymu przy głowie (środek głowy na wysokości $0{,}935\,h_c$), temperatury przy głowie t_g [°C] i temperatury warstwy nad głową T_w:

$$\frac{d\mathscr{D}}{dt} = \frac{\max(0,\ e - 0{,}6)}{20} + \frac{\max(0,\ t_g - 100)}{40 \cdot 20} + \frac{\max\left(0,\ q_r(T_w) - q_r(473{,}15)\right)}{25\,q_r(473{,}15)}, \qquad q_r(T) = \sigma_{\mathrm{SB}}\left(T^4 - 310^4\right), \tag{3.18}$$

gdzie $e = s/s_p$ jest dymem przy głowie odniesionym do progu zadymienia, a q_r strumieniem promieniowania warstwy traktowanej jak ciało czarne ze współczynnikiem widzenia 1; trzeci człon zaczyna działać powyżej 200 °C, granicy temperatury warstwy nad drogami ewakuacji z BS 7346-4:2003 (pkt 6.6.2.4). Od dawki 1 człowiek się dusi, od 2,5 umiera; poza dymem i ciepłem dawka maleje o 0,02 na sekundę. To obraz dydaktyczny pokazujący, dlaczego warstwa musi być wysoko i niezbyt gorąca, a nie model warunków krytycznych ani dawki FED.

Człowiek reaguje w konwencji kreskówkowej. Gdy przeważa ciepło (warstwa nad głową ponad 200 °C albo gorąco przy głowie), wachluje się dłonią przed twarzą coraz szybciej, przy większej dawce oburącz na zmianę, i przebiera nogami jak na rozgrzanym piasku; z głowy pryska pot, przy progu duszenia nad głową unosi się para, bez dymka z tekstem. Przy duszeniu od dymu kaszle: tułów zgina się rytmicznie, dłoń przy ustach, w dymku „khe, khe!". Śmierć to upadek trwający ok. 2,4 s czasu modelu: chwiejba z uginającymi się kolanami, ręce młynkiem i gwiazdki nad głową, potem upadek na plecy z odbiciem od posadzki, nogi i ręce w górę i na koniec drgnięcie nogą. Ruch jest liczony według czasu obrazu, a przy włączonym w systemie ograniczeniu ruchu zostają pozy statyczne.

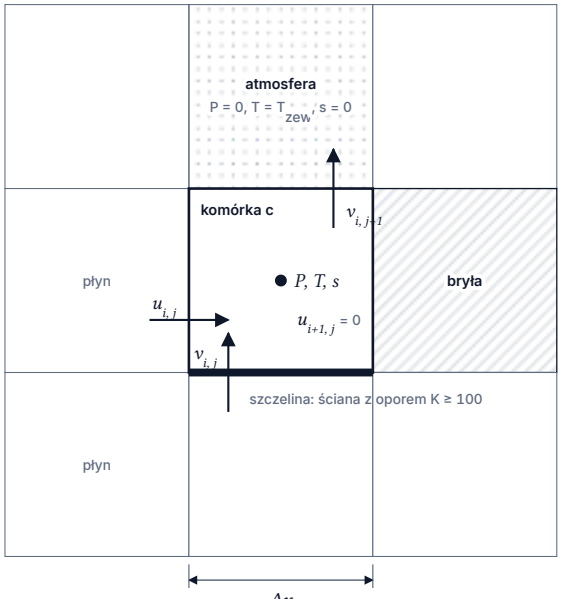
4

Metody numeryczne

Równania z rozdziału 2 rozwiązuje się metodą rzutowania (projekcji) na siatce przesuniętej [Harlow, Welch 1965; Chorin 1968], z adwekcją półlagranżowską [Stam 1999] i rzutem ciśnienia metodą gradientów sprzężonych z wielosiatkowym preconditionerem [McAdams i in. 2010]. Ten zestaw metod jest bezwarunkowo stabilny względem kroku czasu i pozwala liczyć w czasie rzeczywistym na siatkach rzędu kilkudziesięciu tysięcy komórek.

4.1 Siatka przesunięta i typy komórek

Obszar obliczeń dzieli się na kwadratowe komórki o boku Δx. Komórka (i, j), $i \in [0, n_x)$, $j \in [0, n_y)$, ma środek w punkcie $((i + \frac{1}{2})\Delta x, (j + \frac{1}{2})\Delta x)$; oś y biegnie w górę. Ciśnienie, temperatura i dym leżą w środkach komórek, a składowe prędkości na ścianach: $u_{i,j}$ na ścianie pionowej $x = i\,\Delta x$, $v_{i,j}$ na ścianie poziomej $y = j\,\Delta x$ (ryc. 4.1). Taki układ (siatka MAC) wiąże ciśnienie z prędkością bez oscylacji szachownicowych i zapewnia dokładnie spełnioną dyskretną ciągłość w każdej komórce.



Ryc. 4.1. Siatka przesunięta: ciśnienie P, temperatura T i dym s w środkach komórek, prędkości u i v na ścianach. Komórka płynu, bryła (ściana nieaktywna) i atmosfera ($P = 0$), ściana z oporem K jako szczelina.

Komórki mają trzy typy: **płyn**, **bryła** i **atmosfera** (warunek $P = 0$, $T = T_{\text{zew}}$, $s = 0$). Ściana jest aktywna, gdy żadna z dwóch sąsiednich komórek nie jest bryłą i co najmniej jedna jest płynem; prędkość na ścianie nieaktywnej jest równa zeru. Poza siatką leży bryła, chyba że skrajne komórki są atmosferą.

4.2 Kompilacja geometrii

Geometria scenariusza (prostokąty i wielokąty brył, atmosfery i stref, odcinki oporów, wentylatory, pożary, punkty pomiarowe) jest zamieniana na siatkę przy każdej budowie. Komórka należy do kształtu, gdy jej środek leży w kształcie; bryły mają pierwszeństwo przed atmosferą. Linia oporu trafia na najbliższe ściany siatki wzdłuż odcinka. Scenariusze rozmieszczają krawędzie brył i otworów tak, żeby żadna nie wypadała w środku komórki przy żadnym z używanych kroków siatki (na przykład w K1 i K2 na nieparzystych wielokrotnościach 0,05 m, w G4 na $0{,}1k + 0{,}01$ m): rasteryzacja jest wtedy jednoznaczna, a linie oporów mają zawsze jedną najbliższą ścianę.

Przegrody ukośne (od r10). Ściana ukośna z edytora jest wielokątem z osią szczelności. Sam test środka komórki zostawiałby w cienkiej ścianie ukośnej przerwy, przez które komórki płynu po obu stronach ściany stykałyby się bokiem. Dlatego bryła dostaje dodatkowo każdą komórkę, której domknięty kwadrat ma punkt wspólny z osią ściany (tolerancja 10^{-7} m). Kolejne komórki takiego łańcucha łączą się bokami, więc ściana jest szczelna przy każdym kroku siatki i każdym kącie, a na styku ścian łańcuchy obejmują komórkę węzła. Linia oporu, klapa upustowa i pomiar strumienia na odcinku ukośnym trafiają na schodek ścian siatki: w każdym wierszu na ścianę u między dwoma środkami komórek, między którymi przechodzi prosta odcinka, w każdej kolumnie na ścianę v, o ile punkt przecięcia leży na odcinku. Otwór w ścianie ukośnej ma przerwę obliczeniową co najmniej trzech kroków siatki jakości „Szybka", bo łańcuch szczelności zabiera na każdym końcu przerwy najwyżej jedną komórkę, a opór otworu odnosi się do pola rzeczywistego (wzór (3.3)). Scenariusze K1–G4 tych mechanizmów nie używają; ich kompilacja jest taka jak w r09.

Przy kompilacji wyznacza się też składowe spójne płynu (przeszukiwanie po ścianach aktywnych). Składowa bez komórki atmosfery jest strefą zamkniętą z własnym ciśnieniem (2.9), a ściany z oporem $K \geq 100$ stają się szczelinami (punkt 3.2).

4.3 Krok czasu

Krok czasu wynika z warunku CFL:

$$\Delta t = \min\left(\Delta t_{\max},\ \mathrm{CFL}\,\frac{\Delta x}{v_{\max}}\right), \qquad \mathrm{CFL} = 0{,}9, \quad \Delta t_{\max} = 0{,}05\ \mathrm{s}, \tag{4.1}$$

gdzie $v_{\max}$ jest największą prędkością na siatce, w rzucie bez modelu warstwy powiększoną o największą prędkość czoła warstwy i ścinania. W rzucie z modelem warstwy $v_{\max}$ jest największą prędkością samego przepływu uśrednionego, a warstwa liczy się w podkrokach tego kroku (punkt 4.13, wzór (4.15)), po kroku czasu i przed adwekcją prędkości. Metoda jest stabilna także przy CFL powyżej 1; ograniczenie służy dokładności śladu i przenoszenia dymu. Jeden krok obejmuje kolejno:

1. zakończenie domykania otworów z poprzedniego kroku (geometria docelowa, punkt 3.3);
2. prędkości w środkach komórek, w rzucie bez modelu warstwy z prędkością czoła warstwy (2.10) i krokiem pola ścinania (2.14);
3. krok czasu (4.1);
4. adwekcję prędkości i skalarów (punkt 4.4), wymianę dymu oraz ciepła przez szczeliny (3.4) i przenoszenie strumieniowe ciepła wydzielonego q_V (punkt 4.12);
5. siły: wypór w przekroju, wentylatory strumieniowe, wzmocnienie wirowości (punkt 4.5);
6. źródła: narastanie i moc pożaru (ciepło, dym, źródło objętości, ciepło wydzielone q_V), relaksację temperatury, zanik dymu i q_V w pasach atmosfery, usuwanie q_V przez wyciągi, w rzucie bez modelu warstwy stratę ciepła warstwy i obwiednię temperatury, a z modelem warstwy

porywanie, opadanie, pióropusz, stratę ciepła ze źródłem objętości i wyciąg z warstwy (punkt 4.13), porty wentylatorów, klapy upustowe, rampę domykania;

7. rzut ciśnienia i aktualizację prędkości (punkt 4.7), po nim wydajności portów zgodne z nowym polem ciśnienia;
8. warunek w atmosferze: $T = T_{\text{zew}}$, $s = 0$.

Pomiary (rozdział 5) liczy się na żądanie z bieżących pól, zwykle raz na klatkę obrazu.

4.4 Adwekcja półlagranżowska

Nowa wartość wielkości φ w punkcie $\mathbf{x}$ jest wartością starego pola w punkcie, z którego cząstka przypłynęła w czasie Δt:

$$\varphi^{n+1}(\mathbf{x}) = \varphi^{n}\left(\mathbf{x}_p\right), \qquad \mathbf{x}_p = \mathbf{x} - \int_{t}^{t+\Delta t} \mathbf{u}\, d\acute{t}\,. \tag{4.2}$$

Ślad wsteczny liczy się metodą punktu środkowego (RK2) w polu prędkości ze środków komórek, w n pod-krokach nie dłuższych niż pół komórki:

$$n = \min\Big(8,\ \max\Big(1,\ \Big\lceil \frac{2\,(|u| + |v|)\,\Delta t}{\Delta x} \Big\rceil\Big)\Big). \tag{4.3}$$

Gdy kolejny punkt śladu wypada w bryle, ślad zatrzymuje się w ostatnim dobrym punkcie: dym nie przeskakuje przez ścianę o grubości jednej komórki. Ślad skalarów zatrzymuje się też przed szczeliną. Wartość w punkcie końcowym daje interpolacja dwuliniowa z wagami tylko po komórkach niebędących bryłą (wagi normowane do jedności), więc wartości z wnętrza ściany nie mieszają się z płynem. Prędkości na ścianach przenosi ten sam ślad, startujący ze środka ściany. W rzucie dym i temperaturę przenosi prędkość (2.15), a prędkość powietrza jej część uśredniona $\mathbf{u}$.

Adwekcja półlagranżowska ma lepkość numeryczną: wygładza pole i odbiera energię ruchu. Spadek sumy kwadratów prędkości w kroku adwekcji służy jako budżet wzmocnienia wirowości. Korekta MacCormacka [Selle i in. 2008], która zmniejsza tę lepkość, jest w programie dostępna jako opcja, ale we wszystkich jakościach pozostaje wyłączona: z ogranicznikiem i źródłami dymu tworzyła dym (klatka K1, siatka 0,2 m: po 150 s w modelu 3,6 razy więcej dymu, niż wytworzył pożar).

Postać adwekcyjna (4.2) przenosi wartość wzdłuż śladu, ale nie zachowuje całki skalaru po obszarze. Ilość jest zachowana tylko wtedy, gdy pole prędkości przenoszenia spełnia ciągłość, a w rzucie prędkość warstwy (2.15) nie przechodzi przez rzut ciśnienia i ma niezerową rozbieżność. Pomiar w wersji r08, wykonany na polu ciepła wydzielonego przenoszonym jak dym, pokazał: w przekroju o 14% więcej ciepła w gazie, niż wydzielił pożar, na siatce 0,05 m, o 28% na 0,1 m i ok. 160% na 0,2 m; w K1 1,26–1,37 razy więcej; w rzucie przy pożarze 300 kW po 15 s 78 razy za dużo (bez prędkości czoła warstwy 3,5 razy), w G1 21–27 razy. Dym s ma tę cechę od pierwszej wersji programu, a wydajności dymu scenariuszy, dobrane pod obraz, częściowo ją kompensują. Dlatego ciepło wydzielone, z którego liczy się sadzę i widzialność, przenosi schemat strumieniowy (punkt 4.12), a dym s i temperatura zostają przy adwekcji półlagranżowskiej.

4.5 Siły

Wypór (tylko przekrój) działa na aktywnych ścianach poziomych:

$$v_f \leftarrow v_f + \Delta t\, g\, \frac{T_f - T_{\text{zew}}}{T_f}, \qquad T_f = \tfrac{1}{2}\left(T_{\text{dół}} + T_{\text{góra}}\right), \tag{4.4}$$

gdzie komórki atmosfery mają $T = T_{\text{zew}}$. Komórki brył nie biorą udziału, bo ściana przy bryle jest nieaktywna.

Wentylatory strumieniowe dodają $\psi \Delta t\, \mathbf{a}_j$ według (3.13) na aktywnych ścianach w swoim prostokącie.

Wzmocnienie wirowości [Steinhoff, Underhill 1994; Fedkiw i in. 2001] oddaje część wirów wygładzonych przez adwekcję. W komórkach wnętrza (płyn bez sąsiada będącego bryłą albo szczeliną):

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \qquad \mathbf{N} = \frac{\nabla|\omega|}{\left|\nabla|\omega|\right|}, \qquad \mathbf{f}_\omega = \varepsilon \Delta x \left(N_y \omega,\ -N_x \omega \right), \tag{4.5}$$

z $\varepsilon = 0{,}6$, pochodnymi centralnymi z prędkości w środkach komórek sprzed adwekcji i progiem $|\omega| \geq 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$, poniżej którego szum numeryczny nie jest wzmacniany. Siłę przenosi się na ściany jako średnią z dwóch sąsiednich komórek i skaluje tak, by przyrost sumy kwadratów prędkości od niej nie przekroczył połowy spadku w adwekcji tego kroku:

$$\Delta E_\omega \leq 0{,}5\, \Delta E_{\text{adw}}. \tag{4.6}$$

Wzmocnienie oddaje więc tylko część strat numerycznych i nie rozkręca ruchu w zamkniętej przestrzeni bez wymuszenia. Siła działa przed rzutem ciśnienia, więc nie zmienia bilansu objętości.

4.6 Źródła i relaksacja

Człony źródłowe całkuje się dokładnie, przy współczynnikach stałych w obrębie kroku:

$$T \leftarrow T + (T_r - T)\left(1 - e^{-\lambda \Delta t}\right), \qquad s \leftarrow s\, e^{-\lambda_s \Delta t}. \tag{4.7}$$

Pożar ogrzewa komórki źródła mnożnikowo, $T \leftarrow T\left(1 + \Delta t\, \dot{q}''' / (\rho_0 c_p T_0)\right)$, z ograniczeniem do $T_{\max}$, z mnożnikiem mocy (3.14) liczonym w połowie kroku. W przekroju źródło objętości to faktyczny względny przyrost temperatury, $S = \Delta T / (\Delta t\, T)$, po ograniczeniu. Porty dodają swoje źródła, nawiew rozcieńcza dym (3.11), a klapy upustowe i domykanie ustawiają opory ścian na ten krok.

4.7 Rzut ciśnienia

Po adwekcji, siłach i źródłach pole prędkości pośrednie $\mathbf{u}^*$ nie spełnia ciągłości. Rzut wyznacza ciśnienie, którego gradient poprawia prędkość tak, by rozbieżność w każdej komórce płynu była równa źródłu objętości S. Z aktualizacji (3.1) i warunku $\nabla \cdot \mathbf{u} = S$ wynika układ równań dla komórki płynu c:

$$\sum_{f \in c} \beta_f \left(P_c - P_{\text{nb}(f)} \right) = \frac{\Delta x^2}{\Delta t} \left(S_c - \text{div}_c^* \right), \qquad \text{div}_c^* = \frac{1}{\Delta x} \sum_{f \in c} \beta_f u_f^* n_f, \tag{4.8}$$

gdzie $n_f = \pm 1$ jest zwrotem normalnej zewnętrznej ściany. Sąsiad będący atmosferą ma $P = 0$ i wchodzi tylko do przekątnej. Porty sprzężone z rzutem (cięciwa (3.10)) dodają do przekątnej swoich komórek człon proporcjonalny do nachylenia G. Macierz jest symetryczna i dodatnio określona, a dla strefy zamkniętej dodatnio półokreślona z jądrem stałym. W strefie zamkniętej odejmuje się od prawej strony jej średnią (warunek zgodności), ustala się średnie $P = 0$, a niezbilansowany strumień przechodzi do ciśnienia strefy (2.9).

W przekroju, w domyślnej postaci z gęstością zmienną (punkt 2.2.2), współczynniki ścian w (4.8) mnoży się przez stosunek gęstości na ścianie, a aktualizacja prędkości ma postać

$$c_f = \beta_f \gamma_f, \qquad \gamma_f = \frac{2\, T_a T_b}{T_0\, (T_a + T_b)}, \qquad u_f = \beta_f u_f^* - \Delta t\, c_f \frac{P_{\text{nb}} - P_c}{\Delta x}, \tag{4.9}$$

a wypór na ścianach poziomych to $v_f \leftarrow v_f + \Delta t\, g\,(\gamma_f T_0 - T_{\text{zew}})/T_{\text{zew}}$. Prawa strona układu się nie zmienia. Macierz pozostaje symetryczna i dodatnio półokreślona, więc ten sam solver ją rozwiązuje; człon baroklinowy jest zawarty w operatorze o zmiennych współczynnikach [Bell, Marcus 1992; Almgren i in. 1998]. Ta sama gęstość ściany w rzucie ciśnienia i w wyporze zapewnia równowagę hydrostatyczną z dokładnymi gęstościami. Koszt na maszynie bez obciążenia: w K1 „Standard" krok wydłuża się z 4,78 do 5,33 ms (czas na sekundę symulacji +23%), w G4 „Standard" z 4,60 do 4,75 ms przy 27% większej liczbie kroków (łącznie +31%), bo rośnie największa prędkość. Na karcie graficznej koszt kroku się nie zmienia (±2%), a liczba kroków na 90 s rośnie o 6% w K1, 16% w K1 z klapą, 10% w G3 i 23% w G4.

4.7.1 Gradienty sprzężone z preconditionerem wielosiatkowym

Układ (4.8) rozwiązuje metoda gradientów sprzężonych bez jawnego zapisu macierzy, z jednym cyklem V metody wielosiatkowej jako preconditionerem w każdej iteracji (MGPCG):

- **poziom drobny**: siatka regularna, wygładzanie Gaussa–Seidela czerwono-czarne, w przód przed poprawką zgrubną i wstecz po niej (preconditioner symetryczny);
- **poziomy grube**: agregacja 2 × 2 komórek z podziałem agregatów na części spójne (pomieszczenia za szczelnymi drzwiami są osobnymi agregatami), macierze Galerkina w zapisie rzadkim, Gauss–Seidel leksykograficzny w przód i wstecz;
- **poziom najgrubszy** (do ok. 64 niewiadomych): rozkład gęsty, gdy niewiadomych jest najwyżej 128, w przeciwnym razie wiele symetrycznych przebiegów Gaussa–Seidela;
- **nadkorekta** poprawki zgrubnej: 1,8 na poziomie drobnym i 1,5 między poziomami grubymi; dla każdej dodatniej nadkorekty preconditioner pozostaje symetryczny i dodatnio określony;
- **odświeżanie**: współczynniki β_f ścian z oporem zależą od Δt i prędkości, więc poziom drobny przelicza się w każdym kroku, a poziomy grube co 8 kroków (nieaktualny poziom gruby nadal daje poprawny preconditioner);
- **start**: liniowa ekstrapolacja ciśnienia z dwóch poprzednich kroków.

Iteracje kończą się, gdy residuum spełni warunek

$$\|r\|_\infty \le 10^{-5}\,\frac{\Delta x^2}{\Delta t} + 10^{-4}\,\|b\|_\infty, \tag{4.10}$$

albo po osiągnięciu limitu iteracji: 20, 30 i 40 w jakościach „Szybka", „Standard" i „Wysoka", 40 w „Ultra", nigdy więcej niż 40. Pierwszy człon jest progiem bezwzględnym: odpowiada błędowi rozbieżności rzędu 10^{-5} s^{-1}. W testach (punkt 6.2) metoda zmniejsza residuum względne do 10^{-6} od zera w 17–27 iteracjach, także przy ścianach grubości jednej komórki i strefach zamkniętych. W pracy ciągłej, gdy start następuje od ciśnienia z poprzedniego kroku, wystarcza zwykle kilka iteracji: w walidacji r06 średnio 2,1 na krok w G2 i 3,7 w G4.

4.8 Zmiany geometrii w trakcie obliczeń

Kliknięcie drzwi, przestawienie pożaru, zmiana wydajności albo dorysowanie przegrody buduje nową geometrię na tej samej siatce i nakłada ją na bieżące pola bez ich zerowania:

- komórki, które stały się bryłą (po domknięciu), mają zerowe prędkości na ścianach; komórki, które z bryły stały się płynem, dostają temperaturę równą średniej sąsiadów i $s = 0$;
- stany wentylatorów (wydajność, regulator), klap upustowych (stopień otwarcia) i pożarów (zegar narastania) są przenoszone według identyfikatora; zmiana mocy nie zeruje zegara pożaru, zerują go natomiast wyłączenie, przeniesienie i reset;

- rosnące opory domykają się w czasie τ_c (punkt 3.3);
- zmiana kroku siatki (jakości) oznacza nowe pola i pełny reset; reset ustawia spoczynek, $s = 0$ i temperaturę stref cieplnych.

4.9 Obliczenia na karcie graficznej

Ten sam model, łącznie z rzutem ciśnienia o zmiennej gęstości w przekroju, liczy się na procesorze albo na karcie graficznej (WebGPU, kilkadziesiąt kerneli obliczeniowych w WGSL), z tą samą hierarchią wielosiatkową. Na karcie działają operacje na komórkach: adwekcja, przenoszenie strumieniowe q_V, siły, źródła, warstwa w rzucie, ścinanie, obwiednia temperatury, szczeliny, rzut ciśnienia, aktualizacja prędkości i przygotowanie obrazu. Logika sterowania (porty i charakterystyki, regulator falownika, klapy upustowe, domykanie, ciśnienia stref zamkniętych, pomiary) działa po stronie procesora na małych odczytach z karty, opóźnionych najwyżej o jedną ramkę. Każdy błąd karty (brak WebGPU, utrata urządzenia, błąd walidacji) przełącza obliczenia na procesor bez utraty pracy: pola liczą się od nowa, a bieżący krok lekcji jest odtwarzany. Jakość „Ultra” jest dostępna tylko na karcie. Zgodność wyników karty i procesora opisuje punkt 6.3.

Sposób obliczeń wybiera się w pasku dolnym na liście „obliczenia” (Procesor albo Karta graficzna), a przeglądarka zapamiętuje wybór. Od 9 października 2026 r. lista jest zawsze widoczna. Gdy wątek obliczeń nie dostaje karty (przeglądarka bez WebGPU albo bez adaptera), pozycja „Karta graficzna (niedostępna)” jest wyszarzona, liczy procesor, a podpowiedź podaje powód; zapisany wybór karty zostaje, więc w przeglądarce z kartą obliczenia wracają na nią same. Po błędzie karty w trakcie pracy pasek pokazuje wskaźnik „Liczy procesor”, którego kliknięcie ponawia próbę na karcie, a jakość „Ultra” schodzi do „Wysokiej”. W oknie węższym niż 1280 px pasek chowa listy jakości i obliczeń.

4.10 Jakość obliczeń i siatki

Tabela 4.1. Bok komórki siatki według scenariusza i jakości obliczeń

Scenariusz	Szybka	Standard	Wysoka	Ultra (karta)
K1, K2 (przekrój klatki)	0,25 m	0,20 m	0,15 m	0,094 m
G1, G2 (rzut garażu)	0,60 m	0,50 m	0,40 m	0,25 m
G3 (przekrój garażu)	0,10 m	0,08 m	0,06 m	0,0375 m
G4 (przekrój garażu)	0,12 m	0,10 m	0,08 m	0,05 m
E1 (model z edytora)	≤ 25 tys. kom.	≤ 40 tys. kom.	≤ 60 tys. kom.	≤ 250 tys. kom.
Limit iteracji rzutu ciśnienia	20	30	40	40

Krok siatki „Ultra” wynosi domyślnie 0,625 kroku „Wysokiej”. W modelu z edytora krok dobiera się z wielkości modelu tak, by liczba komórek nie przekroczyła celu danej jakości; jest wielokrotnością 0,05 m i wynosi co najmniej 0,10 m, a w „Ultra” co najmniej 0,05 m. Obliczenia startują od jakości „Standard”, a na telefonie (szerokość okna poniżej 640 px) i na urządzeniu, które zgłasza najwyżej cztery wątki procesora, od „Szybkiej”. Przez pierwsze 20 s biegu scenariusza działa automat: gdy faktyczna prędkość obliczeń jest nieprzerwanie przez 5 s mniejsza niż połowa zadanej, jakość schodzi o jeden poziom. Ręczny wybór jakości wyłącza automat do końca scenariusza.

Pasek dolny podaje odczyt obliczeń: wymiar siatki w komórkach, bok komórki w nawiasie, czas jednego kroku i liczbę iteracji rzutu ciśnienia w ostatnim kroku, na przykład „111 × 150 (20 cm) · 4,4 ms · 5 it.”; przy obliczeniach na karcie graficznej z dopiskiem „karta”. Bok komórki podaje się w

centymetrach, z jednym miejscem po przecinku, gdy jest potrzebne (12,5 cm; 9,4 cm w K1 przy jakości „Ultra”). Z tego odczytu widać od razu, ile komórek przypada na otwór albo na grubość warstwy, co ma znaczenie przy ocenie wyników (punkt 7.5).

4.11 Czas rzeczywisty

Prędkość ×1 oznacza czas rzeczywisty, ×2, ×4 i ×8 przyspieszenie. W każdej klatce obrazu wątek obliczeń wykonuje tyle kroków, ile potrzeba, by czas modelu przyrósł o iloczyn prędkości i czasu zegarowego, w budżecie 70% czasu klatki na procesorze (klatka 4–33 ms) albo 85% na karcie (4–50 ms). Gdy budżet się kończy, zaległość przepada: model zwalnia, zamiast zamrażać obraz, a program pokazuje faktyczną prędkość obliczeń. Obraz przenosi dym między klatkami obliczeń ostatnim polem prędkości, więc ruch dymu jest płynny także wtedy, gdy obliczenia dają mniej klatek niż ekran. Od etapu r28 obraz w biegu rysuje się najwyżej około 60 razy na sekundę (na ekranie 120 Hz co druga klatka): obliczenia i tak dają najwyżej około 60 klatek na sekundę, a rysowanie w pełnym tempie ekranu zabierało zintegrowanej karcie graficznej czas obliczeń. Widoki Temperatura i Widzialność pokazują od etapu r23 pola ostatniej klatki obliczeń, bez przewidywania: przewidywanie tych pól cofało obraz przy każdej nowej klatce i w rzucie garażu dawało migotanie w rytmie obliczeń.

Na karcie graficznej (od etapu r21) partię kroków tyknięcia dzieli się na trzy kawałki wysyłane jeden po drugim bez czekania na wynik: karta liczy kawałek, a przeglądarka w tym czasie przygotowuje polecenia następnego. Kawałki mają te same nastawy co jedna partia, więc pola są bitowo takie same. Liczbę kroków na tyknięcie wyznacza czas pracy karty mierzony znacznikami czasu, a budżet pomniejsza się o zmierzony stały narzut tyknięcia (odczyt wyników, przygotowanie poleceń, ramka), więc tyknięcie trwa tyle co dawniej; pola do obrazu karta oddaje raz na tyknięcie. W garażu 101 × 67 m w jakości „Ultra” (536 × 369 po 20 cm, karta AMD Radeon 8060S) faktyczna prędkość przy pełnym obciążeniu wzrosła o ok. 10% (z ×2,09 do ×2,29 w pomiarze przeplatanym), w „Standardzie” o ok. 12%, przy tej samej liczbie ramek obliczeń. Adres z parametrem `?kawalki=2` wydłuża tyknięcie (budżet bez odjęcia narzutu): w „Ultra” +22% przy 18 zamiast 19 ramkach obliczeń na sekundę, w „Standardzie” +39% przy 20 zamiast 26. Karta bez znaczników czasu liczy jedną partią jak dawniej, a `?kawalki=0` przywraca dawną pętlę do porównania. Na laptopie szybkość zależy też od zegara karty, który pod długim obciążeniem waha się nawet dwu- lub trzykrotnie.

4.12 Przenoszenie strumieniowe ciepła wydzielonego

Równanie (2.29) rozwiązuje się metodą objętości skończonych na siatce MAC: q_V leży w środkach komórek, a strumienie na ścianach. Ten sam strumień odejmuje się od jednej komórki i dodaje do sąsiedniej, więc suma $q_V V$ zmienia się tylko przez ściany do atmosfery, źródła, zlewy i obcinanie wartości ujemnych. Przenoszenie odbywa się w tym samym miejscu kroku co adwekcja skalarów, prędkościami z jego początku.

Prędkość na ścianie. W przekroju w jest prędkością MAC na ścianie (u albo v). W rzucie bez modelu warstwy dochodzi część prędkości przenoszenia skalarów, która nie przechodzi przez rzut ciśnienia, czyli ścinanie i prędkość czoła warstwy, uśredniona z dwóch sąsiednich komórek (z modelem warstwy ciepło wydzielone przenoszą obie warstwy, punkt 4.13):

$$w = u_f + \tfrac{1}{2}\,(a_L + a_R), \qquad \mathbf{a} = \Delta\mathbf{u} + \mathbf{v}_f. \tag{4.11}$$

Na ścianie szczeliny ($K \geq 100$) $w = u_f$, czyli sam przeciek z rzutu ciśnienia: prąd czoła i ścinanie nie przechodzą przez zamknięte drzwi. Na ścianie kurtyny w rzucie $w = \tau u_f$, bez członu $\mathbf{a}$, z przepuszczalnością (3.16) liczoną z temperatury komórki pod prąd. Kurtyna zatrzymuje więc prąd

czoła; wariant ze strumieniem $(u_f + a)\,\tau$ odrzucono, bo skok temperatury na kurtynie podtrzymywał prędkość czoła i za kurtyną było więcej ciepła wydzielonego niż bez kurtyny (punkt 6.6). Ściany nieaktywne i ściany przy bryłach mają $w = 0$.

Wartość na ścianie. Daje ją rekonstrukcja MUSCL z ogranicznikiem van Leera [van Leer 1974]. Dla $w \geq 0$ komórką pod prąd U jest komórka po stronie ujemnej, D po dodatniej, a UU sąsiadem U po stronie przeciwnej do D (dla $w < 0$ symetrycznie):

$$r = \frac{q_U - q_{UU}}{q_D - q_U}, \qquad \phi(r) = \frac{r + |r|}{1 + |r|}, \qquad q_f = q_U + \tfrac{1}{2}\,\phi(r)\,(q_D - q_U), \qquad F_f = w q_f, \tag{4.12}$$

z $r = 0$, gdy $|q_D - q_U| \leq 10^{-12}$. Schemat przechodzi do pierwszego rzędu ($\phi = 0$) na ścianach szczelin, gdy UU leży poza siatką albo jest bryłą i gdy ściana między U i UU jest szczeliną. Ogranicznik wybrano w teście dyfuzji numerycznej (punkt 6.6): van Leer rozmywa impuls najmniej i zachowuje jego szczyt.

Podkroki. Dodatniość schematu dwuwymiarowego bez rozszczepienia kierunków wymaga, by suma liczb Couranta komórki nie przekraczała 0,5:

$$C_c = \frac{\Delta t}{\Delta x}\Big(\max(|w_W|, |w_E|) + \max(|w_S|, |w_N|)\Big), \qquad n = \max\Big(1,\ \Big\lceil \frac{\max_c C_c}{0{,}5} \Big\rceil\Big), \qquad \Delta t_k = \frac{\Delta t}{n}, \tag{4.13}$$

liczone w komórkach płynu, z n najwyżej 32. W każdym podkroku wszystkie strumienie liczy się przed aktualizacją, $q_c \leftarrow q_c - (\Delta t_k / \Delta x)\,(F_E - F_W + F_N - F_S)$, a prędkości są stałe.

Źródła i zlewy. Po przenoszeniu: pożar $q_c \leftarrow q_c + \Delta t\,\dot{q}'''\,f/1000$ z mnożnikiem narastania f; port wyciągowy $q_c \leftarrow q_c \max(0,\ 1 - \Delta t\,\sigma)$, gdzie σ jest strumieniem objętości portu na objętość komórki (nawiew nie ma członu, bo rozcieńcza przez strumienie i wnosi $q_V = 0$); zanik w pasach atmosfery $q_c \leftarrow q_c\, e^{-\lambda_s \Delta t}$. W komórkach atmosfery i brył $q_V = 0$, a wartości ujemne i nieliczbowe zastępuje się zerem. Program prowadzi bilans: ciepło wydzielone, odpływ do atmosfery, ciepło usunięte przez wyciągi, zanik, ciepło w komórkach zamienionych w bryłę i przyrost z obcinania wartości ujemnych; z niego pochodzą liczby w punkcie 6.6. Na karcie graficznej schemat jest ten sam, łącznie z podkrokami.

Koszt: na procesorze pole q_V dodaje ok. 0,5–1,2 ms na krok (K1 w jakości „Standard” ok. 4,0–4,8 ms zamiast ok. 4,3 ms przy obciążonej maszynie, G1 6,5–6,8 ms zamiast 5,8–6,3 ms, czyli ok. 10%); na karcie graficznej bez zauważalnej różnicy (G1 „Ultra” 2,13 wobec 2,04 ms, K1 „Ultra” 2,44 wobec 2,56 ms; G1 „Ultra” ok. 15–16 razy szybciej niż czas rzeczywisty na karcie AMD RDNA 3).

4.13 Warstwa liczona w czasie (r14)

Masę warstwy górnej przenosi ten sam schemat strumieniowy co ciepło wydzielone (punkt 4.12): rekonstrukcja MUSCL z ogranicznikiem van Leera, podkroki przy sumie liczb Couranta komórki ponad 0,5, ściany brył bez strumienia. Ciepło Θ i ciepło wydzielone Q_u płyną razem z masą: strumień każdego z nich jest strumieniem masy razy stosunek Θ/M albo Q_u/M z komórki pod prąd, więc temperatura warstwy nie wychodzi poza zakres komórek, z których warstwa przypływa. Ciepło wydzielone w warstwie dolnej przenosi schemat ciepła wydzielonego prędkością warstwy dolnej. Siłę wyporu liczy się jawnie na ścianach między komórkami płynu, a opór niejawnie. Stabilność jawnego wyporu, fali wewnętrznej warstwy i przenoszenia warstw wymaga kroku warstwy

$$\Delta t_l = \min\Big(\mathrm{CFL}\,\frac{\Delta x}{|\mathbf{u}|_{\max} + |\Delta \mathbf{u}|_{\max}},\ 0{,}5\,\frac{\Delta x}{|\mathbf{u}|_{\max} + |\Delta \mathbf{u}|_{\max} + c_{\max}}\Big), \qquad c = \sqrt{g' h\,(1 - h/H)}\,. \tag{4.14}$$

Przed zmianą z 8 października 2026 r. (r17, wieczór) ten warunek ograniczał krok całego układu, czyli także rzut ciśnienia i adwekcję prędkości, choć przepływ uśredniony od pola $\Delta\mathbf{u}$ nie zależy: $\Delta\mathbf{u}$ działa tylko na przenoszenie warstw. Przy szybkim ścinaniu (wentylatory strumieniowe, wypór warstwy

przy pożarze) krok był przez to wyraźnie krótszy niż bez modelu warstwy (w garażu opisanym niżej 10–21 ms wobec 27–35 ms), a koszt kroku prawie ten sam. Teraz krok rozszczepia się na krok przepływu Δt_f według (4.1) z prędkością samego przepływu uśrednionego i podkroki warstwy:

$$n = \min\left(8,\ \left\lceil \frac{\Delta t_f}{\Delta t_l} \right\rceil\right), \qquad \Delta t = \min(\Delta t_f,\ n\,\Delta t_l), \qquad \Delta t_s = \frac{\Delta t}{n}, \tag{4.15}$$

a gdy $\Delta t_l \geq \Delta t_f$, to $n = 1$ i $\Delta t = \Delta t_f$. W każdym podkroku Δt_s liczy się kolejno: pochodne warstwy (grubość, grubość bez obcięcia, nadwyżka temperatury; od drugiego podkroku), pole ścinania (przeniesienie półlagranżowskie, źródło od wentylatorów strumieniowych, wygaszanie λ_Δ), wypór i opór między warstwami (2.18) oraz przenoszenie obu warstw prędkościami ścian z początku kroku. Raz na krok przepływu, z krokiem Δt, działają porywanie, opadanie, pióropusz, strata ciepła ze źródłem objętości, relaksacja, zanik, wyciąg z warstwy i rzut ciśnienia. Model się nie zmienia; przy jednym podkroku krok i wynik są takie jak przed zmianą, $\Delta t = \min(\Delta t_f, \Delta t_l)$. Gdy podkroków potrzeba więcej niż 8, krok przepływu maleje do $8\,\Delta t_l$ i znów wyznacza go warstwa. Na karcie graficznej liczba podkroków zakodowanych w partii kroków jest największą liczbą potrzebną w poprzedniej partii (na starcie 8); podkroki ponad potrzebę danego kroku mają krok zerowy i niczego nie zmieniają. W garażu 101,1 × 67,6 m o wysokości 2,7 m z pożarem 4 MW (karta AMD Radeon 8060S, nastawa ×8) krok w jakości „Wysoka” (siatka 268 × 185 po 40 cm) wzrósł z 10–21 ms do 50 ms przy 3–4 podkrokach, a faktyczna prędkość z ×3,2–×7,4 do ×8,0, przy koszcie kroku 2,8–3,2 ms zamiast 2,9–3,9 ms. W jakości „Ultra” (536 × 369 po 20 cm) rzut z modelem warstwy liczy się ×6,2–×7,9 czasu rzeczywistego (krok 34–44 ms, 5–8 podkroków), a rzut bez niego ×1,9–×3,4 (krok 8–13 ms, ograniczony ścinaniem).

Długość kroku przepływu. Rozszczepienie wydłuża krok przepływu, a z nim krok, w którym raz działają porywanie, pióropusz, strata ciepła i wyciąg z warstwy. Wrażliwość wyniku sprawdzono na tym samym garażu, na procesorze, w jakości „Standard” (wyciąg 183 000 m³/h, nawiew 129 000 m³/h, osiem wentylatorów strumieniowych po 50 N, 240 s). Do ok. 100 s warianty różnią się o 1–2%. W czasie 160–240 s masa warstwy przy kroku przepływu do 0,05 s jest o 8–17% większa niż przy kroku do 0,0125 s, a udział powierzchni z dymem poniżej 1,8 m wynosi 14–17% wobec 10–14%; krok do 0,025 s daje od −5 do +4%, a krok sprzed rozszczepienia (15–25 ms) od −2 do +5%. Granica 2, 4 albo 8 podkroków przy tym samym kroku przepływu daje w G1 ten sam wynik, więc odchyłkę daje długość kroku przepływu, a nie same podkroki. W porównaniu z symulacjami FDS garaży (15 garaży, punkt 6.12) kroki 0,025 s i 0,0125 s dają tę samą zgodność obszaru z widzialnością poniżej 10 m co 0,05 s, dlatego najdłuższy krok 0,05 s zostaje domyślny.

Na karcie graficznej stan warstwy leży w stałej części bufora pól (przechodzi przez zmiany geometrii), a pochodne i strumienie na ścianach w części zmiennej, przydzielanej tylko z włączonym wariantem. Kolejność kerneli w kroku odpowiada procesorowi; pióropusz liczy jedna grupa robocza, pożar po pożarze, bo pożary mogą mieć wspólne komórki. Na ścianie kurtyny prędkość warstwy górnej wynika ze strumienia przelewu (2.25) podzielonego przez grubość warstwy w komórce pod prąd strumienia, bez członu ścinania. Porywanie i opadanie ((2.23)) liczy się po przenoszeniu, przed pióropuszem, w każdej komórce osobno (porwana objętość najwyżej do posadzki, opadanie najwyżej całej warstwy), a udział warstwy w wyciągu każdego portu z grubości i temperatury warstwy pod portem; na karcie liczy go jedna grupa robocza, port po porcie.

5

Pomiary

Odczyty na rysunku, w panelu bilansu i na przebiegu czasowym pochodzą z punktów pomiarowych zdefiniowanych w geometrii scenariusza. Pomiar nie wpływa na obliczenia. Wartości liczy się z bieżących pól, zwykle raz na klatkę obrazu, a przebieg czasowy zapisuje próbki co 0,5 s czasu modelu.

Tabela 5.1. Rodzaje pomiarów

Pomiar	Definicja	Wynik
Obszar	kształt (prostokąt albo wielokąt); komórki płynu, których środek leży w kształcie	zadymienie (udział komórek z $s > s_p$), średnie s, średnia T
Strumień	odcinek osiowy i zwrot normalnej; aktywne ściany siatki na odcinku	strumień objętości [m³/h], średnia prędkość w aktywnej części [m/s]
Różnica ciśnień	dwa punkty	$p_a - p_b$ [Pa]
Wentylator	port	faktyczna wydajność [m³/h]
Strefa	punkt	ciśnienie strefy zamkniętej p_s, poza nią ciśnienie w komórce [Pa]
Sonda	punkt	T, s, p, u, v; w rzucie także prędkość warstwy $\mathbf{u} + \Delta\mathbf{u}$

5.1 Zadymienie

Zadymienie obszaru to udział jego objętości, w której stężenie dymu przekracza próg $s_p = 0{,}15$:

$$Z = \frac{\#\{c \in \Omega :\ s_c > s_p\}}{\#\{c \in \Omega\}}. \tag{5.1}$$

Komórki mają jednakową objętość $\Delta x^2 D$, więc udział komórek jest udziałem objętości. Zadymienie nie maleje, dopóki stężenie w komórkach pozostaje ponad progiem: im gęstszy dym, tym później schodzi poniżej progu, co widać na przykład w G2 po dłuższym paleniu się samochodu. Próg pomiaru jest stały, natomiast suwak kontrastu dymu i przełącznik granicy zadymienia zmieniają tylko obraz.

5.2 Strumienie i prędkości

Strumień przez odcinek jest sumą przepływów przez aktywne ściany siatki na odcinku:

$$\dot{V} = 3600\, D\, \Delta x \sum_{f} u_f n_f \quad [\mathrm{m}^3/\mathrm{h}], \tag{5.2}$$

ze znakiem według zadanej normalnej (dodatni, gdy przepływ biegnie w stronę normalnej). Na odcinku ukośnym (od r10) ściany u niosą składową x prędkości, a ściany v składową y; gdy składowe normalnej mają różne znaki, ściany v liczą się ze znakiem przeciwnym niż ściany u, tak samo na karcie

graficznej. Średnia prędkość to strumień podzielony przez pole aktywnej części odcinka. Gdy przez otwór powietrze płynie w obie strony (brama przy wentylatorze bez otworu wylotowego, klapa bez kompensacji), strumień netto jest bliski zeru, choć wymiana jest duża. Dlatego w G2 brama jest podzielona na osiem odcinków, a odczyt podaje osobno napływ i wypływ.

5.3 Ciśnienia

Ciśnienie w punkcie to $p = \rho_0 P + p_s$ w komórce zawierającej punkt, czyli różnica względem ciśnienia hydrostatycznego powietrza zewnętrznego na tej samej wysokości (2.3). Różnica ciśnień na zamkniętych drzwiach to różnica p w punktach po obu stronach drzwi, a z niej siła otwarcia (3.17). Odczyty „Wewnątrz" i „Zewnątrz" na rysunku pokazują temperatury nastawione w scenariuszu.

5.4 Odczyty w przekroju garażu

W G4 dwa odczyty oblicza się z pól w oknie ±3 m wokół człowieka:

- **wysokość wolna od dymu**: okno dzieli się na 20 poziomych pasów od posadzki do stropu, a wynikiem jest wysokość garażu pomniejszona o zastępczą grubość warstwy dymu, czyli sumę wysokości pasów ważonych ich zadymieniem:

$$Y = H - \sum_{k=1}^{20} Z_k \frac{H}{20}; \tag{5.3}$$

- **temperatura warstwy**: średnia temperatura w górnych 0,3 m pod stropem w tym oknie, porównywana z granicą 200 °C.

Dodatkowo panel podaje wyciąg zmierzony (suma wydajności kratek), nawiew i prędkość napływu w drzwiach z ostrzeżeniem powyżej 1 m/s (BS 7346-4:2003, pkt 6.8.2.13: powietrze uzupełniające pod warstwą wolniej niż 1 m/s).

5.5 Punkty pomiarowe użytkownika

Poza odczytami scenariusza użytkownik może postawić w dowolnym miejscu rysunku punkt pomiarowy jednej z pięciu wielkości: temperatury gazu [°C], ciśnienia względem powietrza zewnętrznego na tej samej wysokości [Pa], tak jak w punkcie 5.3, prędkości przepływu [m/s] z kierunkiem, gęstości dymu s (bez jednostki; próg zadymienia s_p = 0,15) albo widzialności S_w [m] według (2.30). Widzialność poniżej 10 m program podaje z jednym miejscem po przecinku, przy obcięciu jako „≥ 30 m", bez oceny barwą (znaki oceny stawia tylko przy kryteriach normowych). W rzucie temperatura, dym i widzialność w punkcie dotyczą wybranej płaszczyzny wynikowej (punkt 5.8). Wartość pochodzi z pól ramki obliczeń, z komórki zawierającej punkt; punkt postawiony tuż przy ścianie bierze najbliższą komórkę płynu w promieniu jednej komórki, a punkt w bryle jest odrzucany. Prędkość jest prędkością na środku komórki (średnią z prędkości na jej ścianach), więc w otworze o szerokości kilku komórek zależy od położenia punktu w otworze. Siła otwarcia drzwi nie jest wielkością odczytywaną z pola, bo wymaga różnicy ciśnień po obu stronach drzwi; w klatkach jest dostępna jako odczyt dodatkowy przy każdych zamkniętych drzwiach (3.17). Na rysunku mogą być najwyżej 24 punkty pomiarowe; kolejny punkt zastępuje wtedy najstarszy.

5.6 Wybór wartości na rysunku

Odczyty scenariusza można chować i przywracać pojedynczo. Po najechaniu wskaźnikiem na tabliczkę odczytu w jej prawym górnym rogu pojawia się krzyżyk, który chowa odczyt scenariusza albo usuwa punkt pomiarowy użytkownika. Na ekranie dotykowym krzyżyka nie ma, a odczyty chowa się w menu. Menu przy przycisku „Wartości” zawiera:

- przełącznik wszystkich wartości na rysunku;
- listę odczytów scenariusza do zaznaczenia, z pełnymi nazwami;
- odczyty dodatkowe, domyślnie schowane: w K1 i K2 różnicę ciśnień i siłę otwarcia przy każdych zamkniętych drzwiach do klatki, siłę z oceną według kryterium 100 N (PN-EN 12101-13:2022, tab. 1), różnicę ciśnień bez oceny;
- przywrócenie odczytów domyślnych scenariusza;
- listę punktów pomiarowych z usuwaniem i polecenie wskazania nowego punktu dla wybranej wielkości.

Prawy przycisk myszy otwiera na rysunku menu, które pozwala dodać w tym miejscu punkt pomiarowy temperatury, ciśnienia, prędkości, dymu albo widzialności, a nad tabliczką schować odczyt albo usunąć punkt. Wybór odczytów przeglądarka zapamiętuje osobno dla każdego scenariusza. Punkty pomiarowe są wspólne dla rodziny geometrii (K1 i K2 mają wspólne punkty, bo liczą ten sam budynek) i od etapu r27 obowiązują tylko na czas pracy w karcie przeglądarki: przeładowanie strony je zostawia, a każde nowe uruchomienie programu zaczyna od samych odczytów scenariusza, bez punktów. Chowanie odczytów zmienia tylko rysunek. Pomiary, przebieg czasowy i obliczenia zostają bez zmian.

5.7 Obraz pól

Pola z silnika program pokazuje w jednym z pięciu widoków: Dym (domyślny), Temperatura (skala barw z legendą w °C), Ciśnienie (skala rozbieżna w Pa, z wyróżnioną linią zera, czyli płaszczyzną neutralną przy efekcie kominowym), Przepływ (smugi znaczników niesionych polem prędkości i rzadkie strzałki na przygaszonym dymie) i Widzialność (opis niżej). Klawisz V przechodzi kolejno przez widoki, a krok lekcji może ustawić widok wprost. Obraz nie wpływa na obliczenia ani na odczyty.

Dym ma na obrazie rozdzielczość 2–4 razy większą niż siatka obliczeń. Jest przenoszony polem prędkości z obliczeń i dociągany do pola dymu z fizyki, więc detal jest drobniejszy, a rozkład zgodny z obliczeniami. Krycie rośnie z gęstością dymu na obrazie d, czyli wartością pola wysokiej rozdzielczości dociąganego do s:

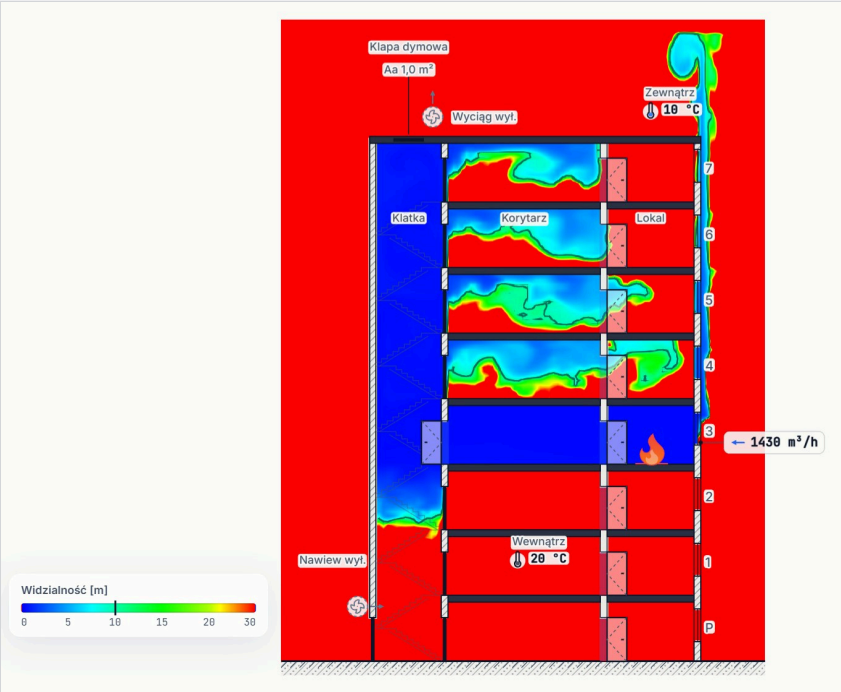
$$\alpha = 1 - e^{-k G_o d}, \tag{5.4}$$

gdzie k = 2,2 (w trybie prezentera 3,0), a G_o jest wzmocnieniem obrazu wybieranym w panelu „Obraz dymu”: ×1, ×2, ×4 albo ×8. Wzmocnienie przyciemnia cienką warstwę dymu na tle rysunku i nie zmienia ani s, ani zadymienia. Przełącznik „Granica” rysuje izolinię $s = s_p$, czyli granicę tego samego zadymienia, które liczą odczyty (punkt 5.1).

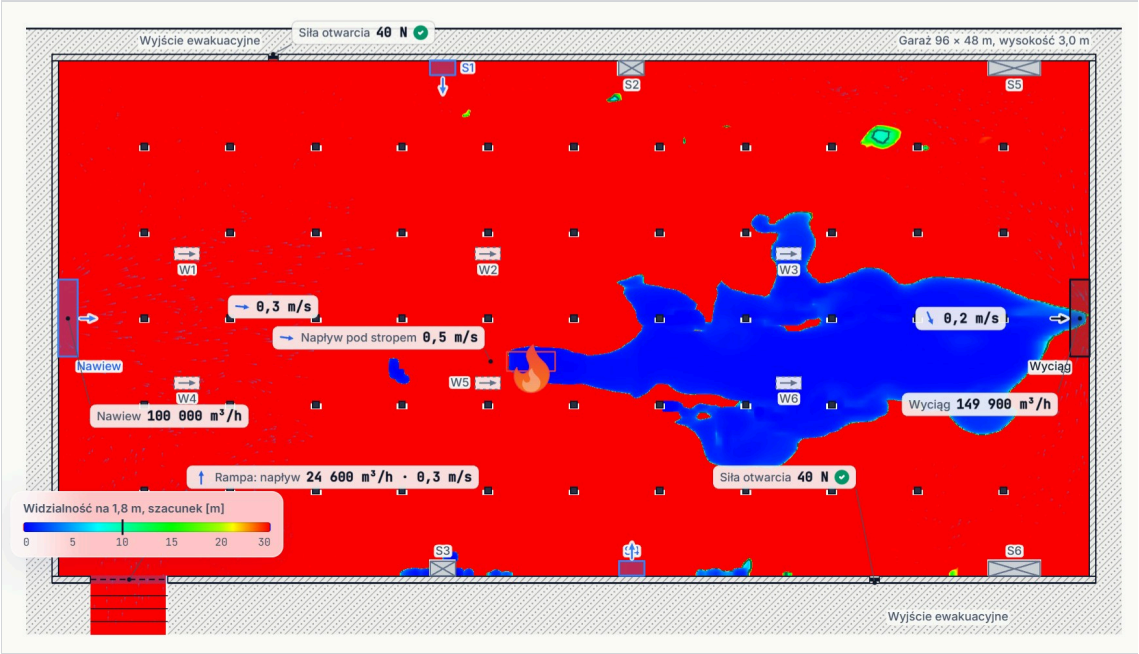
Gorące gazy pozostają na obrazie szare i tylko ciemnieją. Poświata żaru w barwie ciała czarnego pojawia się dopiero od ok. 450 °C i narasta do ok. 750 °C; w rzucie w obrysie pożaru, a gdy płomień jest dłuższy od wysokości pomieszczenia, także w kole, w którym płomień rozlewa się pod stropem (punkt 2.7.5); gorąca warstwa poza nim nie jest płomieniem. Płomień nad źródłem pożaru jest elementem rysunku, nie wynikiem obliczeń. Przełącznik „Płomień na rysunku” w grupie Pożar

wyłącza go we wszystkich scenariuszach: zostaje sam obrys źródła, a poświata żaru, która pokazuje obliczoną temperaturę, nie znika. Wyłączenie płomienia jest ustawieniem widoku: nie zmienia obliczeń ani kroku lekcji, a przeglądarka je zapamiętuje.

Widok Widzialność pokazuje S_w z (2.30) w skali 0–30 m (ryc. 5.1, 5.2). Barwy są takie jak w wynikach FDS (skala tęczowa „Rainbow" programu Smokeview), żeby obraz czytało się jak plaster widzialności z projektu: od niebieskiego przy 0 m (zaciemnienie, #0000FF) przez błękit przy 7,5 m (#00FFFF), zieleń przy 15 m (#00FF00) i żółć przy 22,5 m (#FFFF00) do czerwieni przy 30 m (czyste powietrze, #FF0000), liniowo między węzłami, w obu motywach tak samo. Próg zaznacza izolinia tuszem, bez skoku barwy. Od etapu r23 izolinię wyznacza pole ciepła wydzielonego: $S_w < S_p$ dokładnie wtedy, gdy $q > q_p = C_w/(K/q \cdot S_p)$, a q zmienia się w komórce siatki liniowo, więc linia ma stałą grubość także na ostrym froncie dymu w jakości „Ultra"; wcześniej szerokość liczona z samej widzialności rwała linię na gęstej siatce. Czerwień pokrywa więc całą przestrzeń bez dymu, także powietrze zewnętrzne w modelu (atmosferę wokół budynku w przekroju i kieszenie przy otworach w rzucie), tak jak plaster FDS w obszarze obliczeń. Do etapu r09 skala była ostrzegawcza: pomarańcz poniżej progu, szarość od progu i barwa tła przy 30 m; skalę FDS wprowadzono 5 października 2026 r., bo projektanci i rzeczoznawcy odczytują ją odruchowo. W panelu „Widzialność" w lewym dolnym rogu płótna wybiera się próg izolinii (wyłączona, 5, 10, 15 albo 20 m, domyślnie 10 m) i rodzaj znaków: odbijające światło (C_w = 3) albo podświetlane (C_w = 8). Oba ustawienia dotyczą tylko widoku i przeglądarka je zapamiętuje. Legenda ma tytuł „Widzialność [m]"; w rzucie w słupie „Widzialność, średnia w wysokości [m]", a na wybranej płaszczyźnie np. „Widzialność na 1,8 m, szacunek [m]".



Ryc. 5.1. K1, krok 2 (klatka zadymiona), widok Widzialność, znaki odbijające światło, izolinia 10 m: w klatce i na kondygnacjach powyżej pożaru widzialność poniżej progu.



Ryc. 5.2. G1, krok 2 (sam wyciąg i nawiew), widok Widzialność na płaszczyźnie 1,8 m, obraz z etapu r10 (szacunek z profilu pionowego, w rzucie bez modelu warstwy od etapu r13 dostępny tylko w trybie eksperymentalnym): strefa widzialności poniżej 10 m ciągnie się od pożaru w stronę wyciągu.

5.8 Płaszczyzna wynikowa w rzucie

Od etapu r15 rzut liczy domyślnie warstwę dymu w czasie, a płaszczyzny wynikają z dwóch warstw (punkt 5.9). Ten punkt opisuje rzut bez modelu warstwy (adres z dopiskiem `?warstwa=0`), z profilem pionowym z etapu r08.

Projektowe symulacje FDS garaży ocenia się zwykle na płaszczyznach poziomych: 1,8 m nad posadzką (temperatura i widzialność na drogach ewakuacji) i 1,5 m (dojście ekip ratowniczych). Rzut Poligonu liczy natomiast średnią w słupie od posadzki do stropu: pola q_V i s są średnimi po wysokości, a temperatura jest temperaturą warstwy pod stropem. Program oddziela więc to, co liczy, od tego, co pokazuje. Widoki Dym, Temperatura i Widzialność (oraz Przepływ, na przygaszonym dymie) i punkty pomiarowe w rzucie pokazują domyślnie wartości „w słupie", czyli z pól bez profilu, tak jak w wersjach do r07. To ustawienie jest domyślne od etapu r12, bo wartość na płaszczyźnie pozostaje szacunkiem z profilu pionowego o niekalibrowanym współczynniku χ. Po rozwinięciu kontrolki „Płaszczyzna" strzałką można wybrać płaszczyznę wynikową: 1,8 m, 1,5 m albo 0,2 m pod stropem, a przeglądarka zapamiętuje wybór. W rzucie bez modelu warstwy płaszczyzny są od etapu r13 dostępne tylko w trybie eksperymentalnym, włączanym dopiskiem `?plaszczyzny=1` w adresie programu (tryb zostaje zapamiętany, a `?plaszczyzny=0` go wyłącza). Przy zwykłym wejściu kontrolki nie ma, a wszystkie widoki i punkty pomiarowe pokazują wartości w słupie, także po wczytaniu zapisanych ustawień z inną płaszczyzną. Powodem jest diagnoza z 6 października 2026 r.: profil opisany niżej rysuje dym na wysokości 1,5–1,8 m niefizycznie, bo grubość warstwy wynika w nim z ilorazu dwóch pól przenoszonych różnymi schematami, a nie z bilansu masy warstwy. Do zwykłego wejścia płaszczyzny wróciły w etapie r15 razem z modelem warstwy liczonej w czasie: z nim są dostępne zawsze, bez trybu eksperymentalnego (punkt 5.9). Odczyty scenariuszy (zadymienie, bilans, przebiegi) i tezy lekcji zostają na polach słupa.

Wartość na płaszczyźnie jest szacunkiem z profilu pionowego, oznaczonym tak w legendzie. Głębokość warstwy h wynika z bilansu ciepła słupa przy liniowym profilu w warstwie, $\rho_0 c_p \theta_{\text{strop}}\, h/2 = \chi \bar{q}_V H$:

$$k = \frac{h}{H} = \frac{2\,\chi\,\bar{q}_V}{\rho_0\, c_p\, \theta_{\text{strop}}}, \tag{5.5}$$

gdzie $\bar{q}_V$ jest polem ciepła wydzielonego (średnią w słupie, we wzorze w J/m³), θ_{strop} nadwyżką temperatury warstwy pod stropem nad T_{zew}, a χ udziałem ciepła wydzielonego zatrzymanym w gazie (wartość startowa 0,5, do kalibracji na plastrach FDS). Dla $k \le 1$ warstwa leży od $z_i = H - h$ do stropu, a stężenie i nadwyżka temperatury rosną w niej liniowo od granicy; pod granicą jest czyste powietrze:

$$\frac{c(z)}{\bar{c}} = \frac{2H(z - z_i)}{h^2}, \qquad \frac{\theta(z)}{\theta_{\text{strop}}} = \frac{z - z_i}{h}, \qquad z \ge z_i. \tag{5.6}$$

Dla $k > 1$ dym sięga posadzki i profil przechodzi do jednorodnego: $m = \min(1,\ k - 1)$, $c(z)/\bar{c} = (1 - m)\,2z/H + m$. Profil zachowuje średnią po wysokości i dotyczy jednakowo q_V i s; gęstość gazu przyjmuje się równą ρ_0. Młody, gorący dym (małe $\bar{q}_V$, duże θ_{strop}) tworzy cienką warstwę pod stropem, a stygnący dym sięga coraz niżej i wypełnia całą wysokość. Bez warstwy (nadwyżka temperatury do 0,5 K) albo bez dymu profil jest jednorodny. Płaszczyzna „pod stropem” leży 0,2 m pod stropem.

Profil jest modelem uzupełniającym z jednym parametrem i założonym kształtem. Nie zastępuje rozwiązania warstwowego. Przebiegi kontrolne G1 z 6 października 2026 r. pokazały jego słabości: w promieniu kilku metrów od pożaru warstwa w rzucie nie płynie (przy nadwyżce temperatury ponad 150 K grubość warstwy dla prędkości czoła jest równa wysokości pomieszczenia), połowa obszaru zadymionego w słupie wychodzi na 1,8 m całkowicie czysta, a płaszczyzna 1,8 m w garażu o wysokości 3 m leży przy granicy warstwy, gdzie zmiana grubości warstwy o ok. 0,3 m przełącza widzialność z 30 m na mniej niż 10 m. Plan zastąpienia profilu warstwą liczoną w czasie (rozproszony model dwustrefowy) opisuje dokument „Przewidywane poprawki w Poligonie” w materiałach rozprawy, a sposób sprawdzenia wyników na FDS zeszyt badawczy Poligonu.

5.9 Odczyty z warstwą liczoną w czasie (r14, domyślne od r15)

W wariancie z warstwą liczoną w czasie, domyślnym od etapu r15 (punkt 2.7.5) pola rzutu wynikają z bilansu warstwy: temperatura pod stropem to temperatura warstwy, ciepło wydzielone i widzialność „w słupie” to średnia z obu warstw, a dym s jest proporcjonalny do ciepła wydzielonego w słupie. Prędkość dymu na obrazie to prędkość warstwy górnej.

Obraz „Dym” z warstwą ma krycie z grubości optycznej słupa, tak jak w Smokeview: $1 - e^{-\tau}$, $\tau = KH$, z tej samej sadzy, z której liczy się widzialność; drobna struktura obrazu pochodzi z pola dymu wysokiej rozdzielczości. Odczyt „Zadymienie” obszaru zależy w tym wariancie od płaszczyzny widoku (decyzja autora z 7 października 2026 r.). W słupie i pod stropem jest to udział powierzchni z warstwą grubszą niż 0,1 m. Na płaszczyźnie 1,8 m i 1,5 m jest to udział powierzchni z widzialnością poniżej 10 m na tej płaszczyźnie (znaki odbijające światło, $C = 3$), czyli z ciepłem wydzielonym na płaszczyźnie ponad progiem

$$q^{*} = \frac{C}{S^{*}\, K_m\, Y_s / \Delta H_c}, \tag{5.7}$$

który przy Y_s = 0,10 i ΔH_c = 25 MJ/kg wynosi 8,6 kJ/m³. Granica zadymienia na obrazie leży na tej samej mierze, co odczyt. Odczyt zmienia się od razu po zmianie płaszczyzny, także w pauzie; tezy lekcji sprawdza się w słupie. Płaszczyzny 1,8 m, 1,5 m i 0,2 m pod stropem są w tym wariancie dostępne zawsze, a wartość na płaszczyźnie wynika z dwóch warstw:

$$S(z) = \tfrac{1}{2}\left[1 + \tanh\frac{z - z_i}{\delta/2}\right], \qquad q_V(z) = q_l + (q_u - q_l)\,S(z), \qquad \theta(z) = \theta_u\,S(z), \tag{5.8}$$

gdzie $q_u = Q_u/h$ i $q_l = Q_l/(H-h)$ są stężeniami w warstwie górnej i dolnej, a δ = 0,3 m grubością granicy warstwy (0,1–0,3 m według McCaffreya i Rocketta, do kalibracji na plastrach FDS). Legendy podają wtedy „model warstwy" zamiast „szacunek". W garażu G1 bez wentylacji po ok. 2,5 min warstwa pokrywa ok. 75% powierzchni, a na 1,8 m jest czysto, bo granica warstwy leży na wysokości ok. 2,2–2,5 m.

Z opcją „Współczynnik FDS" (r18, punkt 2.10) profil liczy się dla grubości warstwy βh z β = 0,75 i z rozmyciem granicy δ = 1,5 m, czyli $z_i = H - \min(\beta h,\ H)$ we wzorze (5.8), a widzialność z $\alpha_F K_m$. Szeroka strefa przejściowa przenosi część dymu warstwy na 1,8 m także wtedy, gdy granica leży wyżej, co odpowiada zmierzonej w FDS grubości dymu: zastępcza grubość warstwy z dymu trójwymiarowego FDS wynosi w zestawie kalibracyjnym ok. 1,0 m po 60 s i 2,0 m po 300 s, a grubość warstwy Poligonu 0,6 m i 0,5 m (punkt 6.12). Na tym zestawie zgodność obszaru z widzialnością poniżej 10 m na 1,8 m rośnie z 27% do 53%.

Z opcją „Współczynnik FDS: początek pożaru" (r19, wzór (2.32)) ten sam profil, ale z β = 1, δ = 1,5 m i K_m bez mnożnika, daje widzialność w widoku „w słupie" do startu wyciągu i 15 s po nim; punkty pomiarowe widzialności i legenda („Widzialność na 1,8 m do startu wyciągu") pokazują wtedy tę samą wartość co obraz.

6

Weryfikacja i walidacja

6.1 Pojęcia

Weryfikacja odpowiada na pytanie, czy program poprawnie rozwiązuje przyjęte równania: czy zachowuje bilanse, odtwarza rozwiązania znane z prostych wzorów i nie wytwarza ruchu tam, gdzie nie powinno go być. **Walidacja** odpowiada na pytanie, czy przyjęte równania i modele dobrze opisują rzeczywistość, i wymaga porównania z pomiarami albo z uznanym modelem trójwymiarowym. Poligon ma rozbudowaną weryfikację: testy uruchamiane automatycznie przy każdej zmianie programu, bez obrazu, w środowisku Node. Ma też testy tez lekcji, które sprawdzają, czy w modelu dzieje się to, co opisuje notatka kroku. Walidacja jest częściowa: model warstwy w rzucie porównano z doświadczeniami z książek i z dwoma badaniami w skali naturalnej (punkty 6.9 i 6.14), a widzialność w rzucie garaży z projektowymi symulacjami FDS (punkty 6.12 i 6.13); resztę opisuje punkt 6.15.

6.2 Testy weryfikacyjne fizyki

Tabela 6.1 zestawia testy modelu fizycznego. Kryteria to progi przyjęte w testach. Wyniki z ostatniej kolumny zmierzono na wersji r06, a wynik kalibracji klapy dymowej na wersji r07; testy pola ciepła wydzielonego (r08) zestawia punkt 6.6 (siatka 0,2 m, gdy nie podano inaczej).

Tabela 6.1. Testy weryfikacyjne modelu fizycznego (wybór)

Test	Przypadek	Kryterium	Wynik
Równowaga hydrostatyczna	zamknięte pudło: ciepłe w zimnym otoczeniu i zimne w ciepłym, 30 s	$\lvert\mathbf{u}\rvert_{\max} < 10^{-3}$ m/s	1,0–1,2·10⁻⁵ m/s
Efekt kominowy	szyb 20 m, otwory 1 m na dole i u góry, wewnątrz +20 °C, na zewnątrz −10 °C i +30 °C, 60 s	kierunek ciągu; strumień ±40% wzoru $C_d A_{\mathrm{ef}}\sqrt{2gH\Delta T/T}$ przy $C_d = 0{,}7$	zima ↑ 1,19×, lato ↓ 1,16× wzoru (efektywne C_d 0,83 i 0,81)
Otwór	dwa zbiorniki, różnica ciśnień z nawiewu, otwory 0,4–1,2 m, 3600 i 7200 m³/h	prędkość w osi otworu ±30% wartości $\sqrt{2\Delta p/\rho_0}$; cały nawiew przez otwór ±2%	0,84–0,87 $\sqrt{2\Delta p/\rho_0}$; strumień zgodny co do 0,01%
Opór miejscowy	ściana z K w kanale z nawiewem	strumień ±40% wartości $A\sqrt{2\Delta p/(\rho_0 K)}$	spełnione
Bilans objętości	pomieszczenie z przegrodą, trzy otwory, nawiew 5000 i wyciąg 2000 m³/h	suma strumieni przez otwory równa nawiew minus wyciąg ±2%; $\lvert\nabla\cdot\mathbf{u}\rvert < 10^{-4}$ s⁻¹	błąd względny 4·10⁻⁶; $\lvert\nabla\cdot\mathbf{u}\rvert_{\max}$ = 7,8·10⁻⁶ s⁻¹
Bilans z pożarem	przekrój: pomieszczenie z otworami; rzut: garaż 4 MW, nieszczelna brama, wyciąg 10 000 m³/h	wypływ = nawiew + rozszerzalność; w rzucie wyciąg + wypływ bramą = $\varphi_e\dot{Q}/(\rho_0 c_p T_0)$, bez dryfu	spełnione dla φ_e = 0,35 i 1
Rzut ciśnienia	ściany grubości jednej komórki; strefy zamknięte (macierz osobliwa); garaż ze słupami	residuum względne 10^{-6} od zera w najwyżej 30 iteracjach	27, 27 i 17 iteracji
Strefa zamknięta	garaż bez otworów, wyciąg	szybkość spadku ciśnienia na starcie $-\kappa p_{\mathrm{atm}}\dot{V}/V$; wyciąg spada do zera według charakterystyki; ruch wygasa po zatrzymaniu	spełnione
Wentylatory kanałowe	relaksacja do charakterystyki, rozruch, sztywna i bardzo szczelna instalacja, nawiew 250 000 m³/h do zamkniętego pokoju	punkt pracy bez drgań; ciśnienie nie przekracza ciśnienia zamknięcia; pierwszy krok do 1% $\dot{V}_{\mathrm{nom}}$	spełnione
Regulator falownika	klatka, nastawa 50 Pa, otwieranie i zamykanie drzwi	nastawa przy zamkniętych drzwiach; po otwarciu pełna wydajność w kilka sekund; po zamknięciu ±10% nastawy w ok. 5 s, bez drgań	spełnione
Klapa upustowa	zamknięta klatka, nawiew 20 000 m³/h, nastawa 50 Pa	różnica ciśnień ±20% nastawy bez drgań; zamyka się po otwarciu drzwi; wraca do nastawy w ok. 3 s	spełnione
Klapa według powierzchni czynnej (r07)	K1 bez pożaru, drzwi zamknięte, nawiew $20\,000\,A_a$ m³/h, A_a = 1,0 i 2,0 m²	$A_{a,\mathrm{ef}} = \dot{V}/\sqrt{2\Delta p/\rho_0}$ w granicach ±5% nastawy	±1,5% od 1,0 do 2,4 m² (1,0 → 1,000; 2,0 → 2,023 m²)
Domykanie	drzwi, długi kanał, komórki zamieniane na bryłę i atmosfera na bryłę, kolejne zmiany w trakcie	przepływ wygasa w τ_c bez skoku ciśnienia; otwieranie od razu	spełnione

Test	Przypadek	Kryterium	Wynik
Szczeliny	drzwi $K = 10^8$ przy ścianie 1 i 2 komórek; szczelina K = 2000 przy nawiewie; drzwi zamknięte w trakcie biegu; rzut	za szczelnymi drzwiami czysto; dym przechodzi tylko strumieniem przecieku, masa dymu zachowana	spełnione
Pożar i dym	500 kW na 2 m² w pomieszczeniu 4 × 3 m; drzwi 2 m; temperatura graniczna	średnie $s \approx 1$ po 30 s; gorące gazy górą drzwi, zimne powietrze dołem; $T \le T_{\max}$	spełnione
Narastanie pożaru	krzywa t^2, zegar przy zmianach	dym w czasie narastania ok. 1/3 dymu przy pełnej mocy (całka t^2)	spełnione
Warstwa w rzucie	rozpływ swobodny; z prądem i pod prąd powietrza 0,5 m/s; kurtyny 0,2 i 2,4 m	prędkość czoła rzędu $\mathrm{Fr}\sqrt{g\,h}$ (ok. 1,6 m/s); pod prąd wolniej; przy powietrzu szybszym od czoła warstwa nie idzie pod prąd; głęboka kurtyna zatrzymuje więcej	spełnione
Warstwa przy pożarze	4 MW i 8 MW pod stropem 3 m; narastanie; ugaszenie	temperatura nie wyżej niż obwiednia (2.12); żar tylko w obrysie pożaru; czoło 0,8–1,2 m/s przy pożarze 4 MW; stygnięcie stopniowe	spełnione
Ścinanie warstwy	wentylator strumieniowy w rzucie	podział pędu ψ i $1-\psi$; zanik z λ_Δ; dym w strumieniu szybszy niż powietrze uśrednione	spełnione
Odporność	skrajne pożary, wentylatory i ustawienia, wartości NaN na wejściu, losowe zmiany geometrii w trakcie	brak NaN, obliczenia trwają, wartości spoza zakresu zastąpione domyślnymi	spełnione

Strumień w teście komina jest o 16–19% większy od wartości ze wzoru z $C_d = 0{,}7$, co oznacza, że otwór w ścianie o grubości jednej komórki ma w modelu efektywny współczynnik wypływu ok. 0,81–0,83. Prędkość w osi otworu w teście drugim wynosi 0,84–0,87 wartości teoretycznej, co odpowiada przewężeniu strugi. Oba wyniki mieszczą się w zakresie współczynników wypływu spotykanych dla otworów w przegrodach.

6.3 Zgodność obliczeń na karcie graficznej i na procesorze

Obliczenia na karcie porównuje się z obliczeniami na procesorze dla tych samych przypadków, po 60–120 s czasu modelu w jakości „Standard”: do etapu r07 w Chromium bez okna z programowym adapterem WebGPU (SwiftShader), od etapu r08 także na prawdziwej karcie graficznej w Chrome na PC (AMD RDNA 3; pod Windows SwiftShader nie daje adaptera WebGPU). Kryteria zgodności: udziały zadymienia ±5 punktów procentowych, strumienie ±10%, ciśnienia ±10% albo ±3 Pa, brak wartości NaN.

Kryterium zespołowe (od r08). W przypadkach z przepływem chaotycznym (K1, K1-1, G1, G2-4, G3, G4; za chaotyczny uznaje się przypadek, w którym błąd L1 dymu jednego przebiegu kontrolnego przekracza 5%) wynik karty nie jest porównywany z jednym przebiegiem procesora, tylko z zespołem N przebiegów procesora (domyślnie 8). Członkowie zespołu dostają zaburzenie początkowe temperatury $\pm 0{,}5\cdot10^{-3}$ K i prędkości $\pm 0{,}5\cdot10^{-5}$ m/s, a członkowie parzyści dodatkowo szum prędkości $\pm 0{,}5\cdot10^{-5}$ m/s w każdym kroku. Dla każdej wielkości liczy się średnią z ostatniej trzeciej części przebiegu (próbki co 1 s). Warunek zgodności:

$$\bar{x}_{\text{karta}} \in \left[\min_i \bar{x}_i - m,\ \max_i \bar{x}_i + m\right], \qquad m = \max\left(\frac{1}{2}\left(\max_i \bar{x}_i - \min_i \bar{x}_i\right),\ m_{15.2}\right), \tag{6.1}$$

gdzie $\bar{x}_i$ są średnimi członków zespołu, a $m_{15.2}$ granicą z kryteriów powyżej przy średniej zespołu. Warunek obejmuje wszystkie pomiary scenariusza oraz całki $\int s\,dV$, $\int q_V\,dV$, $\int \theta\,dV$ i udział widzialności poniżej 10 m. Wartości chwilowe i błąd L1 pól mają charakter wyłącznie informacyjny. Przypadki deterministyczne porównuje się jak dotąd. Wynik: 34 z 34 przypadków zgodnych w r08 i 38 z 38 w r09, z rzutem ciśnienia o zmiennej gęstości wyłączonym i włączonym; przypadek z jawnie włączoną korektą MacCormacka jest znaną niezgodnością i nie wchodzi do zestawu. Na granicy zgodności leżą dwa przypadki: w G3 grubość warstwy przy kurtynie mieści się dzięki dolnej granicy marginesu, a w G1 całka dymu na karcie leży ok. 5% poniżej najmniejszego członka zespołu.

Czułość przy kurtynie. W G3 karta rozchodziła się z procesorem wyraźniej niż w pojedynczej kontroli. Diagnoza nie wykazała błędu kodu: karta zasilana stanem procesora przed każdym z 800 kroków odtwarza każdy etap kroku zgodnie z procesorem na poziomie zaokrągleń, a rozjazd zaczyna się po ok. 19–21 s przy dolnej krawędzi kurtyny, w punkcie (13,8; 2,1) m, gdy dochodzi do niej czoło dymu. To miejsce jest niestabilne fizycznie: grubość warstwy dymu przy kurtynie (średnia z 60–90 s) wynosi na procesorze 0,0070 ± 0,0013 m, a przy szumie prędkości w każdym kroku 0,0080 m (10^{-7} m/s), 0,0110 m (10^{-6} m/s) i 0,0318 ± 0,0036 m (10^{-5} m/s); karta daje 0,0329 ± 0,0070 m, czyli zachowuje się jak procesor z ciągłym szumem rzędu 10^{-5} m/s. Pojedynczy przebieg jest więc tylko jedną z możliwych realizacji, a porównania karty z procesorem, podobnie jak Poligonu z FDS, prowadzi się na zespołach przebiegów albo na średnich w czasie. Źródło szumu karty nie zostało ustalone; ten sam kod procesora w Node i w Chrome daje w G3 po 90 s nieco różne wyniki (3249 i 3251 kroków), a w K1 i G1 identyczne.

- **r03**: testy fizyki 16 z 16 i testy zbieżności 3 z 3 zgodne; scenariusze zgodne poza jednym pomiarem lokalnym w G1 (strumień przez bok szachtu S4 po 60 s), którego rozrzut mieści się we wrażliwości samego procesora na zaburzenie prędkości rzędu 10^{-5} m/s. Pomiary lokalne w stanach chaotycznych porównywano wtedy z jednym przebiegiem kontrolnym; od r08 zastąpiło je kryterium zespołowe.
- **r05**: bilans z pożarem, falownik, klapa upustowa, domykanie, K1 (dwa stany), K2 i zmiany geometrii w trakcie biegu K1 i K2 zgodne. Niezgodny był tylko przypadek z jawnie włączoną korektą MacCormacka, tak samo jak przed r05; w aplikacji korekta jest wyłączona.
- **r06**: G2 z wentylatorem przewoźnym i kompensacją B i C (siatka 124 × 145, 1261 kroków) oraz G4 w układzie wzorcowym (siatka 379 × 45, ok. 2160 kroków) zgodne po 60 s we wszystkich pomiarach. Średnia liczba iteracji rzutu ciśnienia na krok: 2,1 w G2 i 3,7 w G4, taka sama na procesorze i na karcie; w G4 udział zadymienia całego garażu 16,9% na procesorze i 16,9% na karcie, wydajność nawiewnika różni się o 1,4 m³/h przy 54 360 m³/h.
- **r08**: pole ciepła wydzielonego q_V na karcie zgodne z procesorem w źródle (różnica $1{,}5\cdot10^{-8}$), a udział komórek z widzialnością poniżej 10 m różni się najwyżej o 2,2 punktu procentowego (G1 1,1, K1 0,5). Bilans w zamkniętym pudle na karcie: $3{,}6\cdot10^{-7}$ w przekroju i $4{,}9\cdot10^{-7}$ w rzucie. Lokalne wartości q_V w przepływach chaotycznych nie powtarzają się jednak między przebiegami: w G1 dwa przebiegi procesora z zaburzeniem prędkości rzędu 10^{-5} m/s różnią się o 40–90% w normie L1, a szczyt q_V na karcie i na procesorze różni się do 2,5 raza. Pole q_V jest 2–10 razy czulsze na takie zaburzenie niż dym s, bo ma mniejszą dyfuzję numeryczną. Wyniki q_V i widzialności porównuje się więc w kryterium zespołowym udziałami, całkami i wartościami uśrednionymi w czasie i w przestrzeni, a nie wartościami chwilowymi w punkcie.
- **r14–r21**: zestaw rozszerzano o przypadki modelu warstwy w rzucie i kolejnych zmian silnika. Wynik: 45 z 45 przypadków zgodnych w r14 (punkt 6.9), 46 z 46 w r15 (z płomieniem pod stropem), 47 z 47 w r16 (z kratką pod stropem i w ścianie), 47 z 48 w r17 (niezgodny jest znany przypadek z jawnie włączoną korektą MacCormacka) i 48 z 48 w r21 (z partią tyknięcia w kawałkach, bitowo zgodną z jedną partią; przypadek MacCormacka poza wynikiem). Po zmianach,

które nie dotykały jąder obliczeń, sprawdzano wybrane przypadki: w r23 10 z 10, w r24 5 z 5 (K1, K1-1, K2 i zmiany geometrii w trakcie biegu K1 i K2).

Wydajność na adapterze programowym nie jest miarodajna, bo karta jest tam emulowana; liczy się zgodność wyników.

6.4 Testy tez lekcji

Każdy scenariusz ma testy, które uruchamiają model bez obrazu i sprawdzają tezy lekcji. Tabela 6.2 podaje wybrane tezy z wynikami w jakości „Standard”.

Tabela 6.2. Wybrane tezy lekcji sprawdzane obliczeniami

Scenariusz	Teza	Wynik („Standard”)
K1	klapa zamknięta: klatka zadymiona po 120 s	zadymienie ponad 30%
K1	klapa i drzwi na parterze otwarte: klatka się oddymia; sama klapa bez kompensacji prawie nie	spadek ponad 50% w 120 s; bez kompensacji poniżej 25%
K1	bez pożaru: zimą ciąg w górę klatki, latem w dół; latem od zapłonu pierwszy dym spływa w dół, po ok. minucie ciąg wraca do góry	spełnione
K1	nawiew mechaniczny ok. 42 000 m³/h przy klapie 1,0 m²: siła otwarcia drzwi do klatki ponad 100 N; klapa 2,0 m²: różnica ciśnień kilka razy mniejsza, siła poniżej 100 N, klatka bez dymu (r07)	klapa 1,0 m²: 65–80 Pa, ok. 120 N; klapa 2,0 m²: 20–28 Pa, ok. 78 N
K2	jedne otwarte drzwi na piętrze pożaru: prędkość co najmniej 1 m/s, klatka czysta	zadymienie klatki poniżej 5%
K2	ewakuacja, drzwi na parterze otwarte: prędkość w drzwiach piętra pożaru spada na granicę kryterium klasy 1; ewakuacja etapowa: znowu ponad kryterium (r09)	krok 4: 1,074 m/s (teza poniżej 1,10 m/s); krok 6: 1,39 m/s
K2	drzwi zamknięte: bez upustu siła otwarcia ponad 100 N, z upustem różnica ciśnień co najmniej 30 Pa i siła do 100 N	spełnione
K2	za mały wentylator (3000 m³/h): dym wchodzi do klatki górą drzwi	prędkość poniżej 0,6 m/s
G1	wentylatory strumieniowe opóźniają dojście dymu do ćwiartki garażu od strony nawiewu, ale przy ok. 0,3 m/s w przekroju go nie zatrzymują (r15, model warstwy)	od zapłonu po 180 s: 32,5% (sam wyciąg i nawiew 33,3%, bez wentylacji 86,0%; r17, podkroki warstwy)
G1	przy pożarze 4 MW warstwa rozpływa się pod stropem także pod prąd, strumieniowe ją hamują, a powietrze płynie do pożaru (r15)	warstwa 1,5 m przed samochodem: −1,80 m/s (bez wentylacji −2,15 m/s; r17); przepływ średni +0,25 m/s (−0,14 m/s; r17)
G1	kompensacja zamknięta: podciśnienie, wyciąg traci wydajność, drzwi ewakuacyjne ponad 100 N	ok. −71 Pa
G1	nadmiar nawiewu przy zamkniętych otworach: nadciśnienie, samozamykacz nie domknie drzwi	ok. +340 Pa
G2	wentylator PSP bez otworu wylotowego: powietrze krąży bramą, garaż się nie przewietrza	bramą +63 500 / −63 100 m³/h; zadymienie 99% → 100% (r16)
G2	kompensacja na końcu ramienia B: część A się oczyszcza, C nie; kompensacja B i C: dym wypychany z całego garażu	szacht B ok. −43 000 m³/h, A 100% → 26%; z B i C cały garaż 63% → 13%, na końcu A 0%, B 9%, C 36% (r17, podkroki warstwy)
G3	wyciąg 160 000 m³/h i kurtyna 0,8 m: strefa sąsiednia czysta; mały wyciąg albo płytka kurtyna: dym przechodzi	0,9 m/s pod kurtyną, strefa sąsiednia do 2%; płytka kurtyna 9,6%
G4	układ wzorcowy 3,8 m (8 MW, 320 000 m³/h, osiem kratek, nawiew wyporowy 85%): warstwa pod stropem	wolne od dymu 3,49 m, warstwa 159 °C (r09, średnie z ostatniej minuty); w postaci z ρ_0 (r06) 3,48–3,59 m, 100–190 °C
G4	nawiew pod stropem albo powietrze tylko drzwiami: warstwa się rozmywa albo załamuje	dym do 1,8 m ok. 40%; drzwiami wolne 0,2–1,2 m

Scenariusz	Teza	Wynik („Standard”)
G4	garaż 3,0 m: warstwa nad głową, cieńsza i gorętsza niż w układzie wzorcowym, blisko 200 °C (r09)	teza: o ponad 10 K gorętsza od wzorcowej i poniżej 215 °C (średnia z ostatniej minuty co 2 s); wynik 183 °C wobec 159 °C
G4	dwie kratki zamiast ośmiu; garaż 3,0 m; garaż 2,6 m: warstwa gorętsza	r09 (średnie z ostatniej minuty): dwie kratki 200–203 °C, 3,0 m 183 °C, 2,6 m 206 °C (teza: 175–235 °C); w postaci z ρ_0 (r06) dwie kratki 3,1 m i ok. 240 °C, 2,6 m wolne ok. 2,2 m, 260–280 °C

6.5 Szczelność przegród

W wersji r05 sprawdzono, ile dymu przechodzi przez zamknięte drzwi (K1, pożar 300 kW na 3. piętrze, drzwi klatki zamknięte, lokale otwarte na korytarz, 240 s). Diagnoza wykazała dwa źródła nadmiernego przecieku: korektę MacCormacka, która przy źródle dymu i ścianach tworzyła masę dymu, oraz przenoszenie skalarów „przez” zamknięte drzwi śladem i interpolacją. Po wprowadzeniu szczelin (punkt 3.2) i wyłączeniu korekty ilość dymu na kondygnacjach bez pożaru wynosi: przy siatce 0,25 m 0,9 jednostki zamiast 3,8, przy 0,2 m 2,0 zamiast 1,6, przy 0,15 m 1,0 zamiast 37. Przy drzwiach i oknach praktycznie szczelnych ($K = 10^8$) dym na innych kondygnacjach spada do zera. Do klatki trafia dokładnie tyle dymu, ile wynika z przecieku w rzucie ciśnienia; na innych piętrach dym pochodzi już tylko z fizycznego przecieku: w ok. jednej trzeciej szczelinami drzwi klatki, w ok. dwóch trzecich oknami z nawiewnikami od pióropusza na elewacji (do etapu r23, gdy kratki lokali były częścią zamkniętego okna; od r24 kratki prowadzą do kanału poza modelem, tabela 3.1, a zamknięte okno lokalu z pożarem przepuszcza ok. 13 m³/h zamiast ok. 615 m³/h). Drzwi dymoszczelne (szczelina 0,0012 m²) zmniejszają ilość dymu w klatce w tych samych warunkach ok. 66 razy (z 5,3 do 0,08 jednostki).

6.6 Ciepło wydzielone, sadza i widzialność

Pole q_V oraz wzory na sadzę i widzialność (punkt 2.10) sprawdzono w wersji r08 testami bilansu, dyfuzji numerycznej i przypadkiem z podręcznika użytkownika FDS (tabela 6.3).

Tabela 6.3. Weryfikacja pola ciepła wydzielonego i widzialności (r08, procesor)

Test	Przypadek	Kryterium	Wynik
Bilans, obszar zamknięty	przekrój; rzut z prędkością czoła do 13,9 m/s, wentylatorem strumieniowym i kurtyną	$\int q_V\,dV = \int \dot{Q}\,dt/1000$ z dokładnością zaokrągleń	odchyłka bilansu $-9{,}3\cdot10^{-9}$; $5{,}1\cdot10^{-8}$
Bilans z odpływem	przekrój z otworem, wyciągiem i atmosferą; rzut z bramą i wyciągiem; K1 i G1	ciepło w gazie + odpływ + wyciąg + zanik = ciepło wydzielone	odchyłka bilansu $8{,}0\cdot10^{-9}$; $2{,}7\cdot10^{-8}$; K1 i G1 najwyżej $7\cdot10^{-8}$
Obcinanie wartości ujemnych	wszystkie przypadki bilansu	przyrost z obcinania pomijalny	0
Przypadek z podręcznika FDS („Beam Detector")	ρ_s = $3{,}585\cdot10^{-5}$ kg/m³	K_e = 0,3119 1/m, $S_w = 3/K_e$ = 9,6 m	spełnione
Kurtyna w rzucie	30 × 15 m, pożar 1,5 MW, 40 s; udział q_V za kurtyną	kurtyna zatrzymuje więcej niż brak kurtyny	bez kurtyny 6,7%; strumień $(u+a)\,\tau$ 12% (odrzucony); $w = \tau u$ 2,8% dla kurtyny 1,0 i 2,5 m

Dyfuzja numeryczna. Prostokątny impuls o szerokości 10 komórek przesunięty o 100 komórek w jednorodnym przepływie przy liczbie Couranta 0,4 (szerokość na starcie σ = 2,87 komórki, szczyt 100) ma po przesunięciu: przy schemacie pierwszego rzędu σ = 8,26 komórki i szczyt 48, z ogranicznikiem minmod 3,17 i 98, z ogranicznikiem van Leera 2,94 i 100. We wszystkich wariantach suma jest zachowana z dokładnością 10^{-6}, bez wartości ujemnych. Stąd wybór ogranicznika van Leera.

Ciepło w scenariuszach. W K1 w czasie 30–120 s od zapłonu w gazie jest 98–87% ciepła wydzielonego przez pożar (reszta wypłynęła z budynku); przy przenoszeniu półlagranżowskim było to 1,26–1,37 razy więcej, niż wydzielił pożar. W G1 po 120 s w gazie jest 51% ciepła wydzielonego, a wyciąg usunął 49% (wcześniej 21–27 razy za dużo). Typowe wartości: w K1 w komórce pożaru 130–630 kJ/m³, mediana w dymie 25–60 kJ/m³, czyli widzialność ok. 3,4–1,4 m; w G1 w komórce pożaru ok. 1400 kJ/m³, mediana w dymie ok. 5 kJ/m³, czyli ok. 17 m. Po 120 s widzialność poniżej 10 m ma 11% komórek G1 (przy przenoszeniu półlagranżowskim 63%) i 23% komórek K1.

Sprawdzono zgodność z definicjami FDS i zachowanie ilości; porównania wartości widzialności z obliczeniami FDS nie przeprowadzono (punkt 6.15).

6.7 Rzut ciśnienia o zmiennej gęstości (r09)

Rzut ciśnienia o zmiennej gęstości (punkt 2.2.2), domyślna postać przekroju od 4 października 2026 r., sprawdzono testami analitycznymi w porównaniu z postacią z ρ_0 (tabela 6.4). W postaci z ρ_0 współczynniki wypływu maleją z temperaturą gazu, w postaci z gęstością zmienną są od niej niezależne, tak jak we wzorach z gęstością gazu.

Tabela 6.4. Testy analityczne rzutu ciśnienia: postać z gęstością odniesienia i z gęstością zmienną

Test	Wielkość	Postać z ρ_0	Gęstość zmienna
Otwór, gaz izotermiczny 20, 200 i 400 °C	$u/\sqrt{2\Delta p/\rho_g}$	0,8697; 0,6846; 0,5740	0,8697; 0,8698; 0,8698
Otwór w stropie gorącego zbiornika, 20, 200 i 400 °C	C_d	0,7928; 0,6254; 0,5261	0,7928; 0,7945; 0,7963
Drzwi z przepływem dwukierunkowym, 200 i 400 °C	C_d wypływu	0,647; 0,553	0,720; 0,725
Słup 600 °C przy −10 °C	$\Delta p/[g\,\Delta z\,(\rho_{\text{zew}}-\rho)]$	0,8977	1,0000
Klapa K1 A_a = 1,0 m², 20, 200 i 400 °C	$Q/\sqrt{2\Delta p/\rho_{\text{gazu}}}$ [m²]	1,001; 0,788; 0,660	1,000; 0,997; 1,000
Klapa K1 A_a = 2,0 m², 20, 200 i 400 °C	jak wyżej	2,023; 1,592; 1,335	2,023; 1,992; 2,000

Przy gęstości zmiennej spełnione są też testy podstawowe: efekt kominowy (strumień 1,235 wzoru z gęstościami zimą i 1,211 latem), równowaga hydrostatyczna ($|\mathbf{u}|_{\max} \le 7{,}6\cdot10^{-5}$ m/s), zbieżność rzutu ciśnienia (27–28 iteracji przy γ od 1,0 do 3,7) i bilans pola ciepła wydzielonego ($1{,}3\cdot10^{-8}$). Klapa według powierzchni czynnej (punkt 3.4) zachowuje kalibrację na gorąco bez przestrajania. Karta graficzna daje w przypadkach analitycznych te same wyniki co procesor z dokładnością $5\cdot10^{-5}$ względnie (otwór 0,86973, 0,86972 i 0,86977; otwór w stropie 0,79283, 0,79450 i 0,79629; słup 0,99997; równowaga hydrostatyczna $|\mathbf{u}|_{\max} \le 2\cdot10^{-5}$ m/s), a walidacja zespołowa (punkt 6.3) daje 38 z 38 przypadków zgodnych. Wpływ na lekcje w jakości „Standard”: w K1 ciąg klapy rośnie z 10 387 do 11 548 m³/h, a w K2 prędkość w drzwiach w kroku 4 z 0,97 do 1,07 m/s; teksty i tezy lekcji K1, K2 i G4 przeliczono do nowych wyników (tabela 6.2, rozdział 8). Średnie zespołów z 60–90 s zmieniają się w K1 dla zadymienia klatki z 0,253 do 0,291, w K1 z otwartą klapą dla strumienia przez klapę z 9787 do 10 910 m³/h, w G3 dla zadymienia najwyższego pasa przy kurtynie po stronie pożaru z 0,044 do 0,012, a w G4 dla strumienia przez otwór drzwiowy z −15 160 do −16 660 m³/h. W przekroju G4 utrzymanie wysokości wolnej 3,3 m wymaga ok. 235 000 m³/h z opcją wobec ok. 217 000 m³/h bez niej, więc opcja nie zmniejsza różnicy między wydajnością w przekroju a wydajnością w rzeczywistym garażu (punkt 7.5).

6.8 Przegrody ukośne (r10)

Oś szczelności, ściany siatki odcinka ukośnego i opór odniesiony do pola (punkt 4.2, wzór (3.3)) sprawdzono trzema rodzajami testów. Romb ze ścian ukośnych z osią szczelności jest szczelny we wszystkich 216 przypadkach: kroki siatki 0,1; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8 i 1,0 m, grubości 0,1; 0,3 i 0,5 m, dziewięć kątów od 5° do 84°; bez osi szczelności ściana 0,1 m przecieka w ponad 20 z 36 przypadków przy krokach 0,4–0,8 m. Model z edytora (garaż 52 × 30 m ze ścianą ukośną i bramą w niej) przy każdej jakości łączy wnętrze z atmosferą tylko przez otwory. Otwór w przegrodzie ukośnej (pole 2,7 m², K = 2, nawiew 20 000 m³/h) daje strumień równy nawiewowi i różnicę ciśnień bliską wartości ze wzoru niezależnie od kroku siatki (tabela 6.5).

Tabela 6.5. Otwór w przegrodzie ukośnej po 40 s (wzór $\Delta p = K\rho_0 v^2/2$ = 5,081 Pa przy $v = \dot{V}/A$)

Krok siatki	Ściany u + v	K_f	Strumień / nawiew	Δp / wzór
0,20 m	14 + 5	28,54	1,0000	1,100
0,25 m	12 + 4	30,25	1,0000	1,087
0,40 m	7 + 3	19,36	1,0000	1,157
0,50 m	6 + 2	22,22	1,0000	1,152
0,60 m	5 + 2	14,22	1,0000	1,288

Bez przeliczenia na pole, z K = 2 wpisanym wprost na ściany schodka, różnica ciśnień byłaby ok. 20 razy mniejsza od wartości ze wzoru. Karta graficzna daje w tym przypadku po 30 s strumień 19 972 m³/h wobec 19 971 m³/h na procesorze i różnicę ciśnień 5,716 Pa wobec 5,715 Pa; łącznie z przypadkami komina, otworu, bilansu i rzutu z pożarem daje to 5 z 5 przypadków zgodnych.

6.9 Warstwa liczona w czasie (r14)

Model warstwy (punkt 2.7.5) sprawdzono testami analitycznymi i porównaniem z modelem strefowym o tej samej fizyce (tabela 6.6). Model strefowy zakłada warstwę jednorodną na całym polu i stałe ciśnienie; w Poligonie warstwa rozpływa się po rzucie, więc różnica pokazuje skutek rozpływu, odpływu i niejednorodności, a nie błąd schematu.

Tabela 6.6. Sprawdzenie warstwy liczonej w czasie (procesor, jakość „Standard”)

Przypadek	Wielkość	Poligon	Odniesienie
Wymiana przez śluzę, kanał 40 m, H = 3 m, θ = 30 K	prędkość czoła	0,798 m/s	0,826 m/s ($0{,}5\sqrt{g' H}$, Benjamin)
Rozpływ z kolumny w środku pudła	zasięg wzdłuż osi / po przekątnej	9,50 m / 9,19 m	równe (czoło kołowe)
Napełnianie pudła 20 × 20 × 3 m, 100 kW, 120 s / 240 s	średnia grubość warstwy	0,528 / 0,887 m	od 0,460 / 0,824 m (model strefowy z tą samą stratą do stropu) do 0,550 / 0,926 m (strefowy z powietrzem porwanym przez granicę, 0,090 / 0,102 m)
To samo	głębokość powietrza porwanego	0,511 / 0,855 m	0,479 / 0,842 m (Zukoski, K&Q 8.41)
To samo, każdy krok	suma źródeł objętości $\sum SV$	$(\dot{Q}_c - \dot{q}_{strat})/(\rho_0 c_p T_0)$ do 10^{-6}	K&Q 8.34
G1 bez wentylacji, 4 MW, 120 s / 300 s / 480 s (pakiet 1A)	średnia granica warstwy	2,70 / 2,29 / 1,98 m	2,70 / 2,24 / 1,85 m (model strefowy)
Hägglund i in. 1985: 5,62 × 5,62 × 5,95 m, 186 kW, 30 / 60 / 90 / 120 / 180 / 240 s	wysokość granicy warstwy	4,12 / 2,20 / 1,08 / 0,45 / 0,48 / 0,00 m	4,2 / 2,2 / 1,1 / 0,6 / 0,4 / 0,3 m (doświadczenie, K&Q rys. 8.10)
Thomas i Hinkley: 100 m², H = 5 m, ognisko 1,5 × 1,5 m	czas opadania granicy do 2,5 / 1,9 / 1,0 m	19,8 / 26,8 / 40,0 s	19,7 / 29,6 / 58,8 s (Drysdale wz. 11.27)
Yamana i Tanaka: hala 720 m², 26,3 m, 1,3 MW, wyciąg 6 m³/s	granica ustalona	2,27 m	3,6 m (doświadczenie, K&Q rys. 8.18)
Pióropusz 100 kW na 10 m; samochód 4 MW w garażu 3 m	mnożnik strumienia przy ścianie / w narożu	0,63 / 0,40; 0,82 / 0,68	0,63 / 0,39 w dalekim polu (obraz lustrzany)
Strop betonowy po 10 min	h_k; h_{ef}	32,6; 10,3 W/(m²·K)	33 W/(m²·K) (K&Q s. 223)
Port 1 m² z 4 kratkami w środku pudła, wydatek $10\,\dot{V}_{max}$	wydatek z warstwy	$4\,\dot{V}_{max}$	kratki niezależne
Pudło 20 × 20 × 3 m, warstwa 1 m, θ = 15 K, 30 s	masa porwana przez granicę	35% masy warstwy z wentylatorem 50 N, 0 bez	porywanie tylko przy ścinaniu
To samo, θ = 0,5 K	sadza w warstwie dolnej	20% z wentylatorem, 0 bez	opadanie tylko przy ścinaniu
Kratka wyciągowa, d = 3 m, ΔT = 16,5 K	wydatek bez zasysania	15,35 m³/s	15,35 m³/s (AtriumCalc 1.1, przykład 4A; NFPA 92)
Kanał 30 × 6 m, 100 kW, kurtyna 0 / 0,2 / 0,5 / 1,0 / 1,5 / 2,5 m, 90 s	udział dymu za kurtyną	0,63 / 0,58 / 0,53 / 0,31 / 0,15 / 0,00	maleje z głębokością kurtyny

Model strefowy nie ma porywania przez granicę warstwy w rozpływie, więc warstwa w Poligonie jest grubsza od strefowej najwyżej o powietrze porwane przez granicę; mniej, bo grubsza warstwa obniża granicę pióropusza i pióropusz porywa mniej. Porywanie działa głównie w czasie rozpływu: po pokryciu pomieszczenia prawie ustaje. Bez porywania przez granicę głębokość powietrza porwanego była o 7–10% mniejsza od rozwiązania Zukoskiego (inna korelacja pióropusza), z nim jest większa o 2–7%. W G1 po 480 s pióropusz dał 5300 kg warstwy, bramą odpłynęło 163 kg, a resztę różnicy wobec modelu strefowego (5660 kg) wyjaśnia grubsza warstwa przy pożarze (1,18 m w promieniu 5 m wobec 1,02 m średnio), która zmniejsza zasysanie. Strata ciepła do stropu decyduje o tempie: bez niej model strefowy schodzi do 1,32 m po 480 s. Karta graficzna daje te same całki masy, ciepła i sadzy warstwy co procesor (w pudle z dokładnością 10^{-6}, w G1 z wentylacją, przypadku chaotycznym, w granicach 2%), a cały zestaw walidacji karty ma 45 z 45 przypadków zgodnych (od 7 października 2026 r. także pożar w narożu z wyciągiem czterech kratek). Domknięcia wymiany przez granicę sprawdza na karcie przypadek z warstwą chłodną, wentylatorem i wyciągiem przy ścianie (różnica pól 10^{-4}); G1 z warstwą jest chaotyczny jak G1 bez niej (różnica przebiegów karty i procesora rośnie od 10^{-6} w pierwszych krokach do 10^{-3} po 50 krokach także bez porywania), więc porównuje się go z zespołem przebiegów procesora. Koszt kroku na procesorze nie rośnie (G1 6,2 ms; domknięcia pakietu 1C dodają ok. 0,2 ms: porywanie 0,085 ms, opadanie 0,081 ms na krok), a na karcie w jakości „Ultra” krok trwa 1,69 ms (11 razy szybciej niż czas rzeczywisty; bez warstwy 16 razy, bo krok czasu ogranicza prędkość fali warstwy).

Porównanie z doświadczeniami z książek (tolerancje ustalone przed pierwszym przebiegiem, bez strojenia modelu): napełnianie pomieszczenia Hägglunda zgadza się w granicach 0,15 m od 60 do 180 s; po 240 s dym w modelu sięga posadzki, a w doświadczeniu zatrzymuje się na 0,3–0,4 m przy otworze przy podłodze, którego zamknięte pudło nie ma. Czasy opadania według wzoru Thomasa i Hinkleya, który nie zależy od mocy, zgadzają się co do rzędu wielkości. W hali Yamany i Tanaki granica ustalona wyszła 2,27 m wobec 3,6 m (−37%), przy pióropuszu w równowadze z wyciągiem (6,30 kg/s wobec 6,16 kg/s). Różnicę tłumaczą dwa założenia: nieznane pole ogniska (pozorne źródło pióropusza Heskestada przy 4 m² leży 0,84 m pod posadzką) i brak strat ciepła do ścian, które w hali o wysokości 26 m mają pole trzy razy większe od stropu. W garażu o wysokości 2,5–3 m ściany w kontakcie z dymem są małe wobec stropu.

6.10 Model warstwy domyślny, płomień pod stropem i profil (r15)

Od etapu r15 testy tez lekcji G1 i G2 liczą rzut z modelem warstwy. Progi bezwzględne z wcześniejszych etapów były strojone na polu dymu *s*, które nie zachowywało ilości dymu, więc tezy o ćwiartce od nawiewu, o warstwie przy pożarze i o ramieniu C w G2 mają progi względne: porównanie wariantów wentylacji albo kroków lekcji (decyzja autora z 7 października 2026 r.). Wyniki są w tabeli 6.2. Testy płomienia rozlanego pod stropem i profilu z dwóch warstw zestawia tabela 6.7.

Tabela 6.7. Płomień pod stropem, profil z dwóch warstw i korelacja Alperta wobec książek (r15)

Przypadek	Wielkość	Poligon	Odniesienie
Pożar 8 MW, D = 3,21 m, strop 3 m	L; r_f; nadwyżka w osi i 2 m od osi	5,28 m; 2,17 m; 808 K i 485 K	Heskestad i Hamada; McCaffrey (płomień przerywany)
Rzut z modelem warstwy, 8 MW na 4,5 × 2 m, po 5 s	nadwyżka 1,75 m i 2,75 m od osi (poza obrysem)	ponad 450 K (płomień); o ponad 100 K mniej (warstwa)	r_f = 2,0 m
McCaffrey i Rockett: pomieszczenie 2,25 m, granica 1,35 m	temperatura na 1,2 m i 1,5 m (δ = 0,3 m)	79 °C i 201 °C	77 °C i 220 °C (K&Q rys. 5.14)
Alpert: 1,5 MW, strop 4 m; 1690 kW, strop 6 m, 7 m od osi	temperatura pod stropem	240, 90, 64 °C; 55 °C	240, 90, 64 °C (Drysdale zad. 4.7); 54 °C (K&Q przykład 4.6)

6.11 Domknięcia planu poprawek (r16)

Etap r16 zamyka w modelu warstwy poprawki P4–P7, P9 i P11 planu poprawek rzutu. Wyniki testów zestawia tabela 6.8.

Tabela 6.8. Strata do stropu i ścian, kratka, kurtyna i opcje testowe (r16)

Przypadek	Wielkość	Poligon	Odniesienie
1–8 MW, H = 2,5–6 m, r/H = 0,5–2,2	St $\rho c_p U_{Alpert}$ wobec h Coopera	±35% (4 MW, 3 m: ±10%; 3 m od osi 16,5 W/(m²·K))	Cooper: 17,2 W/(m²·K) (CFAST wz. 3.108)
Warstwa 1 m, 50 K przy ścianie	h_w; strumień ciepła wobec strumienia masy przepływu przyściennego	4,2 W/(m²·K); różnica 3%	Cooper, NBSIR 83-2730, wz. 1, 4–7
Kratka 0,3 m pod stropem, warstwa 0,6 m; kratka w ścianie	wydatek z warstwy wobec kratki pod stropem	0,177; 0,5	NFPA 92: $(0{,}3/0{,}6)^{5/2}$; γ = 0,5
Kurtyna 1 m, warstwa 1,5 m, u = 0,4 m/s	$h_P w_s + (H - h_P) w_l$	Hu do 10^{-5}	sztywny strop
Hägglund (180 s); Yamana i Tanaka	granica warstwy	0,88 m; 2,29 m	0,4 m; 3,6 m (strata do ścian ograniczona do komórek przy ścianie)
Opcje testowe wyłączone	pola prędkości	bitowo jak bez opcji	domyślnie $C_s = c_f = 0$

6.12 Porównanie z FDS i Współczynnik FDS (r18)

Rzut Poligonu porównano z projektowymi symulacjami FDS 6.10.1 garaży jednokondygnacyjnych z wentylacją strumieniową i jednym szachtem wyciągowym 160–240 tys. m³/h: 16 garaży z 14 projektów, wybranych z archiwum 185 symulacji. Geometrię odtworzono z plików wynikowych FDS (przeszkody po przyciągnięciu do siatki i po wycięciu otworów): ściany, słupy, drzwi i bramy, kurtyny i podciągi, szachty i wentylatory strumieniowe, schodki ukośne jako ściany skośne; wysokość w świetle uśredniono po wnętrzu bez grubości stropów. Zgodność rzutu przegród z FDS wynosi 99,5–

100%. Poligon liczył z tym samym pożarem (powierzchnia i krzywa HRR), tym samym harmonogramem wentylacji i otwierania bram co FDS, w jakości Standard, bez zmian w programie. Porównywano widzialność FDS z plastra na 1,8 m z widzialnością Poligonu w słupie i na 1,8 m, miarą IoU obszaru z widzialnością poniżej 10 m (część wspólna przez sumę obszarów), na mapach co 30 s od 30 do 300 s. Wyniki zestawia tabela 6.9.

Tabela 6.9. Zgodność obszaru z widzialnością poniżej 10 m z FDS na 1,8 m (16 garaży, 160 map)

Widok Poligonu	IoU	Walidacja krzyżowa po projektach
w słupie, bez poprawki	51,1%	–
na 1,8 m z dwóch warstw, bez poprawki	27,3%	–
w słupie, Współczynnik FDS (α_F = 2)	52,6%	56,8%
na 1,8 m, Współczynnik FDS (α_F = 2, β = 0,75, δ = 1,5 m)	53,1%	57,4%

Walidacja krzyżowa: współczynniki dobrane bez danego projektu i sprawdzone na nim, uśrednione po projektach. W oknie do 600 s (15 garaży, w słupie z α_F = 2) zgodność rośnie z fazą wentylacji: przed jej włączeniem 37%, przy wyciągu i nawiewie 62%, przy wentylatorach strumieniowych do 450 s 61%, w 450–600 s 70%, a udział powierzchni z widzialnością poniżej 10 m wynosi wtedy 33,0% w obu programach. Przegląd 44 wariantów nastaw i stałych modelu warstwy nie poprawił zgodności o więcej niż 0,8 punktu; granicą jest rozpływ dymu w poziomie i budowa dwuwarstwowego modelu warstwy (warstwa w Poligonie 2–4 razy cieńsza niż zastępcza grubość dymu w FDS). Wśród nastaw był krok czasu: kroki 0,025 s i 0,0125 s dają tę samą zgodność co 0,05 s, więc najdłuższy krok 0,05 s zostaje domyślny, choć w dużym garażu z edytora zatrzymuje w warstwie o 8–17% więcej dymu niż krok 0,0125 s (punkt 4.13). Test `tests/model/wspolczynnik-fds.test.ts` sprawdza, że z opcją obliczenia G1 są bitowo te same co bez niej, a widzialność dwa razy mniejsza.

6.13 Faza pożaru we Współczynniku FDS (r19)

Po poprawce odtworzenia geometrii czterech garaży (drzwi przechodzące przez strop do pasa powietrza pod otworem do atmosfery i strop przycięty do cienkiej płyty na granicy domeny dawały w odtworzeniu fałszywe otwory do atmosfery) porównanie przeliczono na 16 garażach w oknie do 600 s (320 map co 30 s). Fazy: przed wentylacją do startu wyciągu i 15 s po nim (start wyciągu w FDS 60–120 s, 55 map), dalej wyciąg i nawiew, wentylatory strumieniowe do 450 s i 450–600 s. Warianty ustalono przed liczeniem; wyniki zestawia tabela 6.10.

Tabela 6.10. Zgodność obszaru z widzialnością poniżej 10 m z FDS na 1,8 m według fazy (16 garaży, 320 map)

Widzialność Poligonu	Przed wentylacją	Praca wentylacji	30–300 s
w słupie, α_F = 2 (r18)	37,3%	65,0%	52,4%
w słupie, α = 1 przed wyciągiem, 2 po	39,1%	65,0%	53,4%
1,8 m (α 1, β 1, δ 1,5 m) przed wyciągiem, słup α_F = 2 po (r19)	41,3%	65,0%	54,2%
jak wyżej, płaszczyzna dopasowana tylko do początku	43,9% (41,3% w walidacji krzyżowej)	65,0%	54,9%
lokalnie płaszczyzna albo słup według stanu warstwy	41,3%	64,4%	54,1%

Płaszczyzna przed startem wyciągu poprawia początek pożaru o 4 punkty bez straty w fazie pracy wentylacji. Dopasowanie parametrów płaszczyzny do samego początku nie przenosi się na projekty niewidziane, więc opcja używa parametrów kalibracji płaszczyzny z całego okna. W fazie przed wentylacją zgodność zostaje najniższa (41%): dym pod stropem rozpływa się w FDS szybciej i szerzej niż warstwa Poligonu. Testy `tests/model/faza-fds.test.ts` i `tests/app/faza-fds.test.ts` sprawdzają zgodność wzoru z wariantem kalibracji, granicę fazy i przełączanie w trakcie przebiegu.

6.14 Pierwsze porównanie z pomiarami pełnoskalowymi (krok K2)

11 października 2026 r. rzut z modelem warstwy (stan programu r19, parametry domyślne, program bez zmian) porównano z pomiarami w skali naturalnej: z próbami w hali w Gandawie [Deckers i in. 2013] i z testem 3 w garażu podziemnym w Tokio z 1966 r. [Hinkley 1970]. Kryteria zapisano przed pierwszym przebiegiem, a odchylenie poza kryterium traktuje się jako hipotezę do sprawdzenia, nie jako powód zmiany programu. Hala w Gandawie ma wymiary 28,6 × 30 m i wysokość 2,7 m, otwarty front, wyciąg 4 × 50 000 m³/h przy tylnej ścianie, tacę 3 × 1,5 m i dwa wentylatory strumieniowe po 45 N; porównywano temperaturę warstwy z termoparami w osi ok. 5 cm pod stropem (średnia z 600–900 s, siatka 0,25 m) i długość cofki dymu pod prąd napływu. W Tokio porównywano zasięg czoła warstwy w korytarzu garażu z dwoma ramionami (wysokość 3,0 m, 0,43 MW, bez wentylacji, siatka 0,5 m). Wyniki zestawia tabela 6.11.

Tabela 6.11. Rzut z modelem warstwy wobec pomiarów pełnoskalowych (stan r19)

Przypadek	Wielkość	Poligon	Pomiar, kryterium
Gandawa bez strumieniowych, 0,5 / 1,25 / 4 MW, strop betonowy	RMS profilu temperatury w osi	0,31 / 0,21 / 0,12	kryterium ≤ 0,15
To samo	długość cofki	2,6 / 7,1 / 23,6 m	13,3 / 17,5 / 22,0 m; kryterium ±2 m (±3 m przy 4 MW) spełnione tylko przy 4 MW
Gandawa, strop izolowany jak w doświadczeniu (5 cm wełny mineralnej)	cofka; RMS profilu przy 0,5 / 1,25 MW	0,5 MW 5,1 m, przy 1,25 i 4 MW dym dochodzi do wlotu; 0,24 / 0,17	13,3 m; przy 1,25 i 4 MW dym dochodzi do frontu hali
Gandawa ze strumieniowymi, 0,5 / 4 MW	największa zmiana temperatury w osi przed tacą	42,4 / 18,5 K	7,0 / 25,0 K; kryterium przy 0,5 MW 20 K niespełnione
Tokio, test 3, po 2 / 4 / 6 / 8 / 10 min	zasięg czoła warstwy	35 / 47 / 54 / 64 / 67 m	37 / 60 / 75 / 78 / 88 m (od −6 do −28%); kryterium ±20% spełnione w 2 z 5 chwil
Tokio, ok. 12 m od pożaru	przyrost temperatury warstwy; grubość warstwy	48,7–81,5 K; 0,73–1,43 m	18,5–33,8 K pod stropem; 1,0–1,5 m

Przy dużej mocy cofka zgadza się z pomiarem, przy małej warstwa zatrzymuje się za blisko pożaru; o długości cofki przy 0,5 i 1,25 MW decyduje głównie strata ciepła do stropu, a strop w doświadczeniu był izolowany. Wpływ wentylatorów strumieniowych przy małej mocy jest w modelu kilka razy za duży, czoło w korytarzu jest o 20–28% wolniejsze od pomiaru po 4–10 min i zatrzymuje się na skręcie, a warstwa blisko pożaru w wąskim korytarzu jest ponad dwa razy za gorąca. Przy 4 MW i silnym wyciągu wynik pojedynczego przebiegu zależy od siatki (na siatce 0,20 m przepływ jest nieustalony),

więc porównania przy dużej mocy wymagają co najmniej dwóch siatek albo zespołu przebiegów. Zmiany sprawdzone na kopii silnika, czyli próg opadania dymu θ_d, przenoszenie różnicy prędkości warstw prędkościami samych warstw i oddawanie pędu strug warstwie, w której leży wylot wentylatora, nie spełniły reguły ustalonej przed przebiegami: zysk wobec pomiarów dawał stratę zgodności z FDS albo odwrotnie. Żadna z nich nie weszła do programu; hipotezy i wyniki prowadzi zeszyt badawczy Poligonu.

6.15 Zakres niezwalidowany

Poza zakresem weryfikacji pozostają:

- **porównanie z doświadczeniem**: model warstwy porównano z doświadczeniami napełniania z książek (punkt 6.9) i z dwoma badaniami w skali naturalnej, w hali w Gandawie i w garażu w Tokio (punkt 6.14), z wynikiem częściowo zgodnym; przekroju klatek schodowych (K1, K2) i przekrojów garaży (G3, G4) nie porównywano z pomiarami;
- **porównanie z modelem trójwymiarowym**: rzut garaży z wentylacją strumieniową porównano z 16 symulacjami FDS w zakresie widzialności na 1,8 m (punkt 6.12); planowane jest zestawienie wybranych przypadków z FDS (ciąg kominowy w klatce, kurtyna w przekroju garażu, utrzymanie warstwy w G4) w zakresie strumieni, wysokości warstwy i temperatur, a także porównanie rankingu wariantów na zakończonych projektach z symulacjami FDS; wielkości, metryki zgodności i podział przypadków na strojenie i sprawdzenie opisuje zeszyt badawczy Poligonu, w którym każdy współczynnik dobrany w modelu ma osobny wpis z hipotezą do sprawdzenia;
- **parametry dobrane**: wydajność dymu Y i stała G_s, liczba Froude'a i temperatura odniesienia warstwy w rzucie, rozszerzalność netto φ_e, udział pędu ψ i zanik ścinania λ_Δ, strata ciepła warstwy λ_w, szybkości relaksacji stref cieplnych; w warstwie liczonej w czasie strona gazu straty do stropu $h_c + h_r$, χ_r, opory C_i i c_f, promień otoczenia pióropusza, grubość granicy δ, próg opadania θ_d i liczba kratek wyciągu w G1; ich wartości wynikają z prostych wzorów i ze strojenia zachowania modelu, a nie z kalibracji na pomiarach;
- **krok czasu w rzucie z modelem warstwy**: przy kroku przepływu 0,05 s masa warstwy w dużym garażu z edytora jest po ok. 150 s o 8–17% większa niż przy 0,0125 s; wobec FDS różnica kroku nie zmienia zgodności obszaru z widzialnością poniżej 10 m (punkt 4.13), a z pomiarami jej nie porównywano;
- **zasysanie spod warstwy przy kratce punktowej**: przekrój go nie odwzorowuje, bo kratka jest w nim szczeliną przez całą głębokość modelu; w badaniu wysokiego lobby kratki rozproszone i skupione przy tej samej wydajności dały tę samą warstwę (punkt 7.5);
- **dym** s jako stężenie względne przenoszone niezachowawczo (punkt 4.4), z wydajnościami dobranymi pod obraz;
- **widzialność** liczona według definicji FDS z ciepła wydzielonego, porównana z obliczeniami FDS tylko w garażach z wentylacją strumieniową (punkt 6.12), a Współczynnik FDS skalibrowano na wynikach FDS, nie na pomiarach; sama symulacja FDS ma dla zaciemnienia dymem współczynnik obciążenia 1,27 (zawyża średnio o 27%) i względny rozrzut 0,71 według podręcznika walidacji FDS, a w rzucie widzialność na płaszczyźnie wynikowej wynika z dwóch warstw ze strefą przejściową do kalibracji;
- **model człowieka**, który jest obrazem dydaktycznym, a nie oceną warunków krytycznych.

Wyniki Poligonu traktuje się więc jako porównanie wariantów i wskazanie mechanizmów, a decyzje projektowe opiera się na obliczeniach i symulacjach opisanych w rozdziale 7.

7

Prototypowanie wentylacji pożarowej

7.1 Miejsce Poligonu w procesie projektowym

Projektowanie układu wentylacji pożarowej zaczyna się od decyzji jakościowych: gdzie umieścić wyciąg, skąd doprowadzić powietrze uzupełniające, czy wystarczy kompensacja grawitacyjna, w którą stronę mają pchać wentylatory strumieniowe, gdzie ustawić kurtyny. Te decyzje przesądzają o wyniku, a popełnionych tu błędów nie da się potem łatwo naprawić samą wydajnością wentylatorów. Pełna symulacja trójwymiarowa (np. FDS) odpowiada na nie dokładnie, ale każdy wariant to godziny przygotowania i obliczeń. Poligon wypełnia lukę między szkicem a symulacją:

1. **szkic** układu w edytorze Poligonu, kilka minut;
2. **przesiew wariantów** w czasie rzeczywistym: położenie wyciągów i kompensacji, wydajności, wentylatory strumieniowe, kurtyny, różne miejsca pożaru;
3. **wybór** jednego do trzech wariantów, które rokują;
4. **symulacja trójwymiarowa** wybranych wariantów z pełnym scenariuszem pożarowym i kryteriami oceny;
5. **projekt**, ekspertyza albo uzgodnienie na podstawie symulacji i przepisów.

Poligon nie zastępuje kroku czwartego. Skraca go: do symulacji trafiają układy, w których drogi przepływu są już przemyślane, a wydajności i otwory mają sensowny rząd wielkości.

7.2 Edytor modeli

W edytorze (zakładka „Edytor”) rysuje się rzut przestrzeni o stałej wysokości. Ściany zachowują się jak klocki: odcinek rysuje się przeciągnięciem, końce przyciągają się do siatki, do końców i osi innych ścian, a zamknięty obrys wyznacza wnętrze. Przycisk „Orto” na pasku nad rysunkiem (klawisz F8) decyduje o kierunku rysowania: w trybie Orto (domyślnym) ściany są poziome albo pionowe, a po jego wyłączeniu biegną pod dowolnym kątem i przyciągają się do kątów co 15°, z linią pomocniczą. Przytrzymany Shift odwraca tryb na czas jednego ruchu, jak w programach CAD. Pasek stanu podaje współrzędne, długość i kąt rysowanej ściany. Przycisk „Wyczyść rzut” (gumka na tym samym pasku, Shift+Delete) usuwa wszystkie elementy jednym krokiem historii, więc Ctrl+Z przywraca model; wysokość, temperatura zewnętrzna, siatka i podkład zostają. Elementy i ich zakresy podaje tabela 7.1.

Tabela 7.1. Elementy edytora: wartości domyślne i zakresy

Element	Domyślnie	Zakres i uwagi
Przestrzeń	wysokość 3 m, 20 °C na zewnątrz, siatka przyciągania 0,5 m	wysokość 2,2–15 m; −20...+35 °C; siatka 0,25 / 0,5 / 1 m
Ściana	grubość 0,3 m	grubość 0,1–1,2 m, długość 0,5–400 m; pozioma, pionowa albo ukośna (bez trybu Orto); przesuwanie, obrót o 90°, usuwanie
Otwór w ścianie	drzwi 0,9 m, brama 6 m, otwór 2 m	szerokość 0,6–20 m; otwarty albo zamknięty (szczelina); do atmosfery; w ścianie ukośnej przerwa obliczeniowa co najmniej 3 kroki siatki jakości „Szybka”
Szacht wyciągowy	2 × 4 m, 100 000 m³/h, 800 Pa, 1 kratka	wydajność 0–400 000 m³/h, ciśnienie zamknięcia 100–2000 Pa; liczba kratek 1–30, kratki w ścianie szachtu (γ = 0,5) albo pod stropem, dolna krawędź kratki 0–2 m pod stropem (punkt 2.7.5)
Szacht nawiewny	2 × 4 m, 60 000 m³/h, 600 Pa	jak wyżej; nawiew powietrzem zewnętrznym
Szacht kompensacyjny	2,4 × 1,4 m	otwór do atmosfery na obwodzie szachtu, z oporem kratki
Wentylator strumieniowy	2,4 × 1,2 m, 50 N	ciąg 0–200 N, kierunek wzdłuż jednej z osi rzutu (co 90°)
Słup, siatka słupów	bok 0,6 m, rozstaw 8 m	bok 0,2–2 m, rozstaw 3–16 m
Kurtyna dymowa	głębokość 0,8 m	0,1–14,5 m; w obliczeniach najwyżej wysokość przestrzeni minus 0,2 m
Pożar	4,5 × 1,8 m, 4 MW, narastanie 60 s	moc 0,1–30 MW, narastanie 0–900 s, Y_s 0,01–0,25 kg/kg

Węzły. Koniec ściany wskazany kursorem narzędzia „Zaznacz” staje się węzłem z uchwytem. W trybie Orto przeciągnięty węzeł przesuwa się w poziomie albo w pionie (według większej składowej ruchu), a ściany rozciągają się jak klocki: równoległe do ruchu się wydłużają, prostopadłe przesuwają się w całości, a ukośne zmieniają tylko przeciągany koniec. Po wyłączeniu trybu Orto węzeł można przenieść w dowolne miejsce razem z końcami wszystkich ścian zbiegających się w tym punkcie; ściany stają się wtedy ukośne. Węzeł przyciąga się wtedy do końców innych ścian, do wierzchołków podkładu, do osi ścian i do kątów co 15° od drugiego końca ściany. Otwory w zmienianej ścianie zostają tam, gdzie były na rysunku (rzut środka na nową oś). Połączona ściana ukośna przesuwa się prostopadle do własnej osi, a końce ścian dołączonych ślizgają się po swoich osiach, więc ich kierunki się nie zmieniają. Długość ściany ukośnej ustawia się w panelu tak jak osiowej; panel podaje też jej kąt.

Ściany ukośne w obliczeniach. Bryła ściany ukośnej jest wielokątem z osią szczelności (punkt 4.2), więc ściana jest szczelna przy każdej jakości siatki. Drzwi, bramy i otwory w ścianie ukośnej mają przerwę obliczeniową co najmniej trzech kroków jakości „Szybka” i opór odniesiony do pola rzeczywistego (wzór (3.3)), a na rysunku są obrócone wzdłuż ściany. Analiza obrysu (wnętrze, kieszenie przy otworach, bryła na zewnątrz) zagęszcza przy ścianie ukośnej siatkę pomocniczą do połowy grubości ściany, w granicach 5–15 cm, żeby wnętrze nie łączyło się z obszarem zewnętrznym przez schodek. Narożniki z udziałem ściany ukośnej rysuje się z cięciem ukośnym (jedna spoina od narożnika wewnętrznego do zewnętrznego), narożniki ścian osiowych tak jak dotąd. Kurtyny dymowe zostają poziome albo pionowe.

Podkład. Sekcja „Podkład” wczytuje rzut z pliku DXF (przyciskiem albo przeciągnięciem pliku na rysunek) jako tło do obrysowania przegród. Podkład nie wchodzi do obliczeń ani do pliku modelu; przeglądarka przechowuje go, dopóki nie zostanie usunięty. Czytane są linie, polilinie (także z łukami i w postaci R12), łuki, okręgi, elipsy, splajny, wypełnienia SOLID i TRACE oraz wstawienia bloków z przesunięciem, skalą, obrotem i szykiem. Teksty, wymiary, kreskowania, punkty i bryły 3D są pomijane. Jednostkę rysunku (mm, cm albo m) program odczytuje z nagłówka pliku, a gdy jej tam nie ma, szacuje ją z wielkości rzutu; w panelu można ją zmienić. Lewy dolny narożnik rysunku (z pominięciem pojedynczych obiektów leżących daleko od rzutu) trafia w lewy dolny narożnik obrysu modelu albo w początek układu. W panelu ustawia się widoczność, krycie, obrót wokół tego narożnika i warstwy (warstwy wyłączone w pliku są domyślnie ukryte). Tryb „Przesuń” pozwala przeciągnąć podkład: chwycony w wierzchołku i puszczony na końcu albo na osi ściany dokładnie zgrywa oba punkty. Końce linii widocznych warstw przyciągają rysowane ściany i węzły. Plik DWG trzeba najpierw zapisać w programie CAD jako DXF (dowolna wersja), bo przeglądarka nie czyta formatu DWG.

Bieżący model zapisuje się automatycznie w przeglądarce, a do pliku JSON można go wyeksportować (import wczytuje go z powrotem). Przycisk „Zapisz” pod nazwą modelu (Ctrl+S) zapisuje model jako projekt pod nazwą tematu, razem z podkładem DXF; projekt o tej samej nazwie zostaje zastąpiony, o czym okno uprzedza. Lista „Projekty” w pasku górnym, obok znaku programu, pokazuje zapisane projekty od ostatnio zapisanego: kliknięcie otwiera edytor z wczytanym układem (Ctrl+Z przywraca poprzedni model), kosz usuwa projekt po potwierdzeniu. Projekty leżą w pamięci tej przeglądarki; kopią na dysk jest eksport do pliku. Gotowe szablony: garaż ze słupami 60 × 30 m (wyciąg, nawiew, rampa, cztery wentylatory strumieniowe), garaż w kształcie litery L (wyciąg na końcu jednego ramienia, rampa na końcu drugiego), pusta hala 40 × 24 m o wysokości 8 m (bramy i pożar, bez wentylacji). Edytor sprawdza model przed obliczeniami i opisuje problemy przy elementach: brak ścian, niezamknięty obrys, kilka oddzielnych przestrzeni, brak wyciągu albo dopływu powietrza, pożar, szacht albo wentylator poza wnętrzem, otwory i ściany węższe od kroku siatki.

Przycisk „Symuluj” przenosi model do scenariusza E1. Piaskownica otrzymuje kontrolki odpowiadające elementom modelu: wydajności i stany wentylatorów, otwarcie otworów i szachtów, moc i miejsce pożaru, Y_s. Panel bilansu podaje wyciąg i nawiew, kompensację naturalną (strumienie przez otwory zewnętrzne i szachty kompensacyjne), przyrost objętości od pożaru oraz ciśnienie w strefie z oceną drzwi: siła otwarcia ponad 100 N przy podciśnieniu albo drzwi, których samozamykacz nie domknie przy nadciśnieniu. Przebieg pokazuje zadymienie w czasie. Ściany i kurtyny dorysowane na żywo w symulacji wracają do modelu edytora jednym krokiem historii.

Zamiana nawiewu i wyciągu. Przycisk ze strzałkami w obie strony na pasku nad rysunkiem (klawisz X) zamienia role wentylacji mechanicznej: każdy szacht wyciągowy staje się nawiewnym, a każdy nawiewny wyciągowym. Położenie, wymiary, wydajność i ciśnienie zamknięcia zostają przy szachcie, ustawienia kratek wyciągu również (wracają przy zamianie z powrotem), szachty kompensacyjne się nie zmieniają, a wentylatory strumieniowe obracają się o 180°, żeby dalej prowadziły dym do wyciągu. Zamiana jest jednym krokiem historii: Ctrl+Z albo ponowne X przywraca układ wyjściowy. W symulacji modelu ten sam przycisk „Zamień” jest w pasku górnym: model w edytorze zmienia się tak samo, a obliczenia ruszają od zapłonu z tymi samymi nastawami piaskownicy (wydajności przy tych samych szachtach, otwarcia, pożar w tym samym miejscu, przegrody dorysowane), więc oba kierunki przepływu w strefie dymowej porównuje się przy tych samych warunkach.

7.3 Procedura przesiewu wariantów

1. **Obrys i otwory.** Narysuj strefę dymową w rzucie: ściany zewnętrzne, ściany oddzielenia, wjazdy, bramy i drzwi do atmosfery w stanie, jaki mają w scenariuszu pożaru (otwarte, zamknięte jako szczeliny). Ustaw wysokość i temperaturę zewnętrzną. Słupy dodaj, gdy ich rozstaw jest porównywalny z szerokością strumieni wentylatorów.
2. **Pożar.** Postaw pożar tam, gdzie układ ma najtrudniejsze zadanie: w ślepym końcu, w narożniku, przed wentylatorami strumieniowymi po stronie ssania, daleko od wyciągu. Każde z tych położeń sprawdź osobno.
3. **Wariant bez wentylacji.** Uruchom sam pożar. Zobacz, jak szybko i w którą stronę rozpływa się warstwa oraz którymi otworami uchodzą gazy. To punkt odniesienia dla wariantów z wentylacją.
4. **Wyciąg i powietrze uzupełniające.** Dodaj wyciągi i drogi powietrza. Sprawdź w panelu bilansu, czy wyciąg osiąga wydajność nominalną, czy kompensacja daje dość powietrza, jakie jest ciśnienie w strefie (próg siły 100 N na drzwiach przy ok. 61 Pa podciśnienia, próg domykania przy ok. 41 Pa nadciśnienia) i czy przez bramę powietrze wpływa, a nie wypływa.
5. **Prowadzenie dymu.** Dodaj wentylatory strumieniowe albo kurtyny. Sprawdź, czy dym jest pchany do wyciągu bez zawracania, czy nie powstają strefy martwe i czy warstwa nie cofa się pod prąd (prędkość powietrza a prędkość czoła).
6. **Warianty.** Przestawiaj kompensację (szukaj zwarcia z wyciągiem), odwracaj kierunek przepływu przyciskiem „Zamień” (nawiew w miejscu wyciągu i odwrotnie), zmieniaj wydajności o ±25%, dorysowuj ściany i kurtyny w trakcie biegu. Każdy obiecujący wariant zapisz jako projekt pod opisową nazwą tematu, a ważne warianty także do pliku JSON.
7. **Zestawienie.** Porównaj warianty według tych samych wielkości i w tym samym czasie od zapłonu: zadymienie strefy i jej części, wydajności zmierzone, kompensacja, ciśnienie strefy, kierunek przepływu w otworach.
8. **Wybór do symulacji.** Do symulacji trójwymiarowej przekaż jeden do trzech wariantów, które rokują w każdym położeniu pożaru, z uzasadnieniem odrzucenia pozostałych.

7.4 Co model oddaje wiarygodnie

Poligon dobrze odpowiada na pytania o topologię i bilans przepływu, bo wynikają one wprost z ciągłości i z równania ciśnienia:

- skąd i dokąd płynie powietrze, gdzie są strefy martwe i drogi na skróty;
- bilans objętości: wyciąg, nawiew, kompensacja, rozszerzalność gazów, a w strefie zamkniętej ciśnienie i dławienie wyciągu;
- zwarcie kompensacji z wyciągiem, gdy powietrze uzupełniające wpada do wyciągu, zamiast przepłukać strefę;
- kierunek i zasięg działania wentylatorów strumieniowych oraz przewoźnych, łącznie z krążeniem powietrza przy braku otworu wylotowego;
- cofanie się warstwy pod prąd powietrza, gdy prędkość powietrza jest mniejsza od prędkości czoła warstwy;
- w przekroju: efekt kominowy, płaszczyzna neutralna, rozwarstwienie, wpływ wysokości pomieszczenia i sposobu doprowadzenia powietrza na warstwę dymu.

7.5 Pułapki modelu dwuwymiarowego

- **Rzut uśrednia po wysokości.** Strumień podstropowy i przepływ przy posadzce są w rzucie jedną prędkością przepływu uśrednionego, a warstwa górna i dolna różnią się tylko prędkością ścinania. Model warstwy, domyślny od etapu r15, liczy w każdej komórce rzutu grubość warstwy i wysokość jej granicy, ale jako dwie jednorodne warstwy, bez profilu temperatury i dymu w pionie poza strefą przejściową, z której liczy się wartości na płaszczyznach. Warstwa Poligonu jest w garażach z wentylacją strumieniową 2–4 razy cieńsza od zastępczej grubości dymu w FDS (punkt 6.12). Pionową budowę warstwy pokazuje przekrój (jak G3 i G4).
- **Przekrój to plaster.** Pożar w przekroju jest pasem przez całą głębokość modelu, więc wytwarza więcej dymu na metr długości niż samochód, a wydajności potrzebne w przekroju garażu są większe niż w projekcie. Liczb z przekroju nie przenosi się wprost na projekt.
- **Bez tarcia przy ścianach.** Model nie ma lepkości, więc strumienie wentylatorów i warstwa nie hamują przy ścianach i słupach tak jak w rzeczywistości; zasięg strumieni bywa większy. Tarcie stropu i posadzki oraz lepkość Smagorinskiego są od r16 opcjami testowymi, domyślnie wyłączonymi, do porównania strug z FDS.
- **Rozdzielczość.** Otwór węższy niż dwie, trzy komórki jest odwzorowany zgrubnie, a ściana ma grubość co najmniej jednej komórki. Wąskie szczeliny i przejścia sprawdzaj w jakości „Wysoka” albo „Ultra”.
- **Parametry dobrane.** Prędkość czoła warstwy, rozszerzalność netto i podział pędu wentylatorów strumieniowych w rzucie są dobrane, a nie zmierzone (punkt 6.15). Wynik leżący blisko granicy (np. warstwa, która ledwie cofa się pod prąd) wymaga potwierdzenia symulacją trójwymiarową.
- **Widzialność.** Widzialność liczy się według definicji FDS, ale w przekroju garażu pożar jest pasem przez głębokość modelu, który porywa więcej powietrza na metr długości niż samochód, a w rzucie wartość na płaszczyźnie 1,8 m wynika z dwóch warstw ze strefą przejściową (punkt 5.9), a w garażu o wysokości 3 m płaszczyzna 1,8 m leży blisko granicy warstwy, więc wynik na niej zależy od grubości warstwy i szerokości strefy przejściowej. Opcja „Współczynnik FDS” poprawia zgodność obszaru z widzialnością poniżej 10 m z FDS w garażach z wentylacją strumieniową, ale jest kalibracją empiryczną o podanym zakresie ważności, a nie modelem fizycznym (punkt 2.10). Porównuj warianty na podstawie udziału obszaru z widzialnością poniżej progu i położenia strefy, a nie wartości w jednym punkcie: lokalne wartości w przepływie chaotycznym zmieniają się między przebiegami.
- **Punkty wywiewne.** Kratka wyciągowa w przekroju jest szczeliną przez całą głębokość modelu, więc przekrój nie odwzorowuje zasysania powietrza spod warstwy przy kratce punktowej. W badaniu wysokiego lobby (14 m, 11 przebiegów, ta sama wydajność) dwie duże kratki dały warstwę na tej samej albo większej wysokości co dziesięć rozproszonych (wysokość wolna od dymu 11,1–12,4 m wobec 10,7–12,6 m), choć w budynku według BS 7346-4 przekraczałyby strumień krytyczny 6,7 raza. Skutek liczby kratek w przekroju, np. w lekcji G4, dotyczy więc kratek o szerokości szczeliny przez całą głębokość modelu, a nie kratek punktowych. Liczbę i rozstaw punktów wywiewnych sprawdza się rachunkiem (BS 7346-4, zał. F, wz. F.9–F.11; NFPA 92, kl. 5.6.3), a nie przekrojem Poligonu. W rzucie z modelem warstwy strumień brany z warstwy ogranicza wzór (2.24) z liczbą kratek portu.
- **Czego model nie ma.** Wiatru na elewacjach, tryskaczy, czujek i logiki sterowania, promieniowania gazu, stygnięcia warstwy innego niż relaksacja (w warstwie liczonej w czasie: strata do stropu i ścian z korelacji, z przewodzeniem w przegrodzie jako półprzestrzeni), przewodzenia ciepła w przegrodach poza tą stratą, toksyczności (CO, CO_2, dawki FED), zależności mocy pożaru od dopływu tlenu, przechodzenia pożaru na kolejne samochody, ruchu drzwi i ludzi, dynamiki uruchamiania instalacji poza narastaniem pożaru i domykaniem otworów.

- **Czas.** Porównuj warianty w tym samym czasie od zapłonu i po ustaleniu się przepływu. Pożary w lekcjach narastają do pełnej mocy w ok. minutę, szybciej niż samochód w badaniach.

7.6 Przejście do symulacji trójwymiarowej

Z wariantu wybranego w Poligonie do modelu trójwymiarowego przenosi się:

- geometrię: obrys, wysokości, otwory i ich stany w scenariuszu pożaru, przegrody i kurtyny;
- położenia i wydajności wyciągów i nawiewów, a gdy pracują przy dużym oporze, także ich charakterystyki;
- położenie i pole kompensacji;
- wentylatory strumieniowe: położenia, kierunki, ciągi;
- położenia pożaru, które okazały się najtrudniejsze.

Do porównania widzialności współczynnik produkcji sadzy i ciepło spalania ustawia się w Poligonie tak samo jak w pliku wejściowym FDS. W symulacji trójwymiarowej wyznacza się na nowo wszystko, czego Poligon nie modeluje albo modeluje w uproszczeniu: krzywą mocy pożaru według przyjętego scenariusza, produkcję sadzy i gazów, wysokość i temperaturę warstwy, widzialność i warunki na drogach ewakuacji i dojścia ekip ratowniczych. Siatkę dobiera się przy tym do wielkości pożaru i do wymiarów otworów. Wydajności z przekroju garażu (punkt 7.5) trzeba przeliczyć na nowo.

8

Scenariusze szkoleniowe

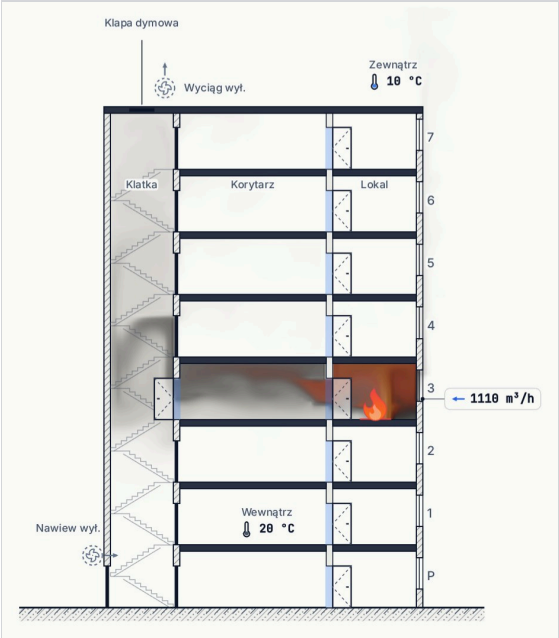
Scenariusz łączy geometrię budynku, kontrolki piaskownicy i lekcję: ciąg kroków, z których każdy ustawia parametry, opcjonalnie zeruje pola i wykonuje rozbieg (obliczenia przyspieszone do chwili, od której krok ma sens, np. do rozwiniętego pożaru). Notatka kroku kończy się zdaniem „Patrz na…", które wskazuje, gdzie na rysunku widać tezę kroku. Kontrolki trwałe (np. współczynnik produkcji sadzy, drzwi dymoszczelne, przegrody dorysowane na żywo) zachowują swój stan przy przechodzeniu między krokami. Własne stany prowadzący zapisuje w sekcji „Moje ustawienia". Tezy lekcji sprawdzane są testami obliczeniowymi (punkt 6.4).

8.1 K1. Klatka schodowa: klapa dymowa

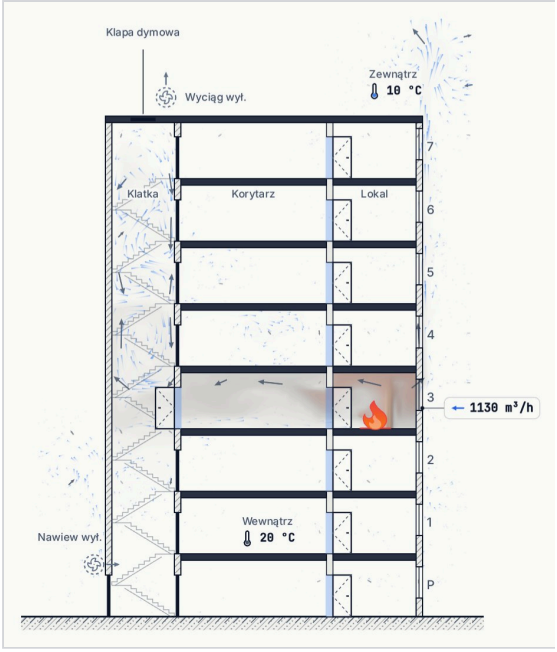
Model. Przekrój pionowy przez klatkę schodową, korytarze i lokale budynku o ośmiu poziomach (parter i siedem pięter) po 3,0 m, ze stropami 0,3 m. Od lewej: powietrze zewnętrzne (pas 4 m), ściana klatki z drzwiami wyjściowymi na parterze, klatka szerokości 3,0 m, ściana z drzwiami do korytarzy (2,0 m), korytarz 7 m, drzwi lokalu, lokal 4 m z oknem (parapet 0,9 m, okno 1,5 m) i, od etapu r24, z kratką wentylacji grawitacyjnej pod stropem przy elewacji, prowadzącą kanałem poza model (punkt 3.1), elewacja, powietrze zewnętrzne. Pod parterem grunt, nad dachem 5 m powietrza i klapa dymowa nad klatką o powierzchni czynnej od 0,7 m² (poniżej minimum normowego, do sprawdzania ciśnień) do 2,4 m², domyślnie 1,0 m² (minimum normowe) (punkt 3.4). Głębokość modelu 1 m. Pożar w lokalu na wybranej kondygnacji (domyślnie 3. piętro, 300 kW na 1 m głębokości), narastanie 45 s.

Sterowanie. Klapa i jej powierzchnia czynna, kompensacja dołem (brak, drzwi wyjściowe, nawiew mechaniczny), odprowadzenie górą (klapa albo wentylator wyciągowy), drzwi do klatki na każdej kondygnacji (kliknięciem w rysunek), okna, temperatura zewnętrzna od −20 do +35 °C i wewnętrzna, moc i kondygnacja pożaru, drzwi dymoszczelne, biegi schodów jako przeszkoda.

Lekcja. 1. Pożar na 3. piętrze. 2. Klatka zadymiona. 3. Drzwi na 6. i 1. piętrze. 4. Klapa bez kompensacji. 5. Kompensacja: drzwi na parterze. 6. Zima: −10 °C. 7. Lato: +30 °C. 8. Nawiew mechaniczny zamiast drzwi. 9. Wentylator wyciągowy zamiast klapy. 10. Lato, początek pożaru: ciąg odwrócony. 11. Biegi schodów: droga dymu. 12. Nawiew i za mała klapa: nawiew ok. 42 000 m³/h przy klapie 1,0 m² podnosi ciśnienie na zamkniętych drzwiach do 65–80 Pa, siła otwarcia ok. 120 N. 13. Większa klapa, 2,0 m²: przy podobnym nawiewie 20–28 Pa i ok. 78 N. Przed wprowadzeniem powierzchni czynnej (r07) klapa modelu miała efektywnie ok. 0,7 m², poniżej minimum normowego, dlatego liczby w krokach 7, 8 i 10 przeliczono na nowo. Od r09, w postaci przekroju z gęstością zmienną: w kroku 2 zadymienie klatki ok. 55%, w kroku 3 przez drzwi 6. piętra ok. 1200 m³/h, w kroku 7 (lato) zadymienie ok. 15–20%, w kroku 8 ok. 20 Pa i ok. 60 N na zamkniętych drzwiach.



Ryc. 8.1. K1, krok 2: pożar na 3. piętrze, klapa zamknięta, dym wypełnia klatkę od góry.



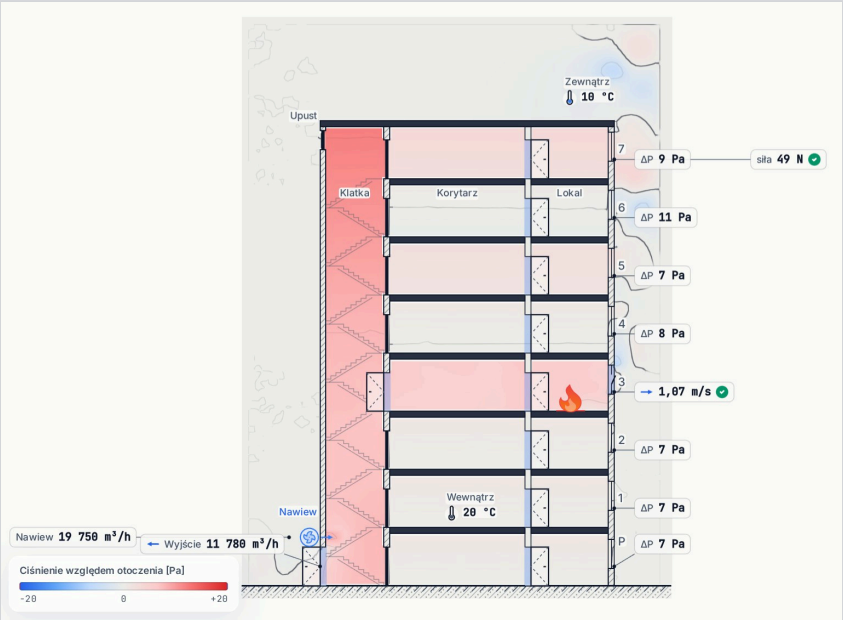
Ryc. 8.2. K1, krok 5, widok przepływu: klapa i drzwi na parterze otwarte, ciąg przez klatkę.

8.2 K2. Klatka schodowa: nadciśnienie

Model. Ten sam budynek. Wentylator napowietrzający tłoczy powietrze do klatki na dole (opcjonalnie drugi punkt w połowie wysokości). Upust nadmiarowy jest klapą upustową w ścianie klatki na ostatniej kondygnacji, sterowaną ciśnieniem (punkt 3.5); regulacja falownikiem utrzymuje nastawę różnicy ciśnień (punkt 3.7); upust z kondygnacji pożaru odbywa się przez okno lokalu.

Przyrządy. Przy drzwiach do klatki: różnica ciśnień na zamkniętych drzwiach, prędkość w otwartych drzwiach i siła otwarcia (3.17), z oceną według kryteriów: różnica ciśnień co najmniej 30 Pa, siła do 100 N, prędkość co najmniej 1 m/s albo 2 m/s (przełącznik klasy). Ocena jest pokazana znakiem, nie tylko barwą.

Lekcja. 1. Drzwi zamknięte, bez upustu. 2. Upust nadmiarowy. 3. Pożar na 3. piętrze. 4. Ewakuacja: drzwi na parterze: prędkość w drzwiach piętra pożaru spada na granicę kryterium klasy 1 (ok. 1,1 m/s). 5. Drzwi otwarte na kolejnych piętrach. 6. Ewakuacja etapowa: ok. 1,4 m/s. 7. Za mały wentylator. Liczby w krokach podano według postaci przekroju z gęstością zmienną (od r09).



Ryc. 8.3. K2, krok 4, widok ciśnienia: nadciśnienie w klatce względem powietrza zewnętrznego i korytarzy.

8.3 Porównanie dwóch klatek

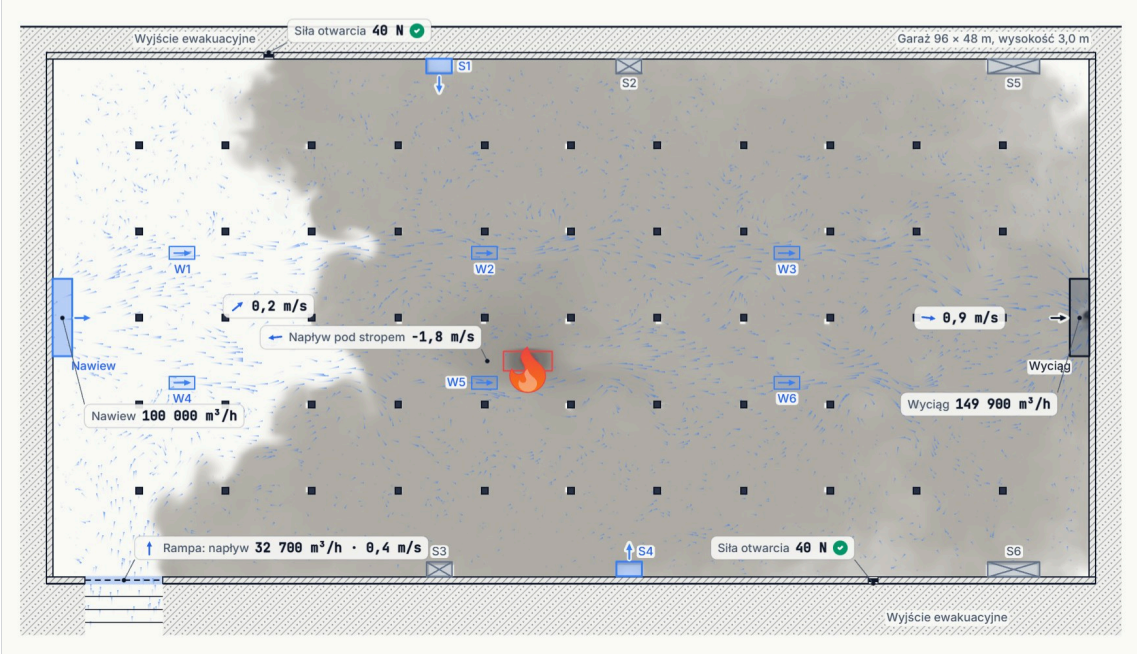
W K1 i K2 ekran można podzielić na dwie klatki liczone jednocześnie, każda z własnymi obliczeniami i nastawami (np. oddymianie grawitacyjne klapą z drzwiami na parterze w połowie A i nawiew mechaniczny w połowie B, albo klapa w A i nadciśnienie w B). Obie połowy mają ten sam budynek, wspólny bieg, prędkość, jakość obliczeń i widok; czas obliczeń jest wyrównywany (szybsza połowa czeka na wolniejszą, gdy różnica przekroczy 1 s), a start „od zapłonu” obejmuje obie. Punkty pomiarowe użytkownika (punkt 5.5) są wspólne dla obu połówek, a przebieg połowy B jest rysowany na wykresie połowy A, gdy obie liczą ten sam scenariusz.

Porównanie włącza się przyciskiem „Porównaj” w pasku górnym (okno o szerokości co najmniej 1024 px). Połowa B ma własny stan, własne obliczenia (osobny wątek albo karta graficzna) i własne płótno; jej nagłówek pozwala wybrać scenariusz K1 albo K2, stan z kroku lekcji albo z zapisanych ustawień, skopiować nastawy połowy A („Jak w A”) i uruchomić obie połowy od zapłonu. Przy starcie połowa B przejmuje scenariusz i krok połowy A, a krok A jest liczony od nowa, więc obie połowy wykonują rozbieg równolegle; zmiana nastaw w piaskownicy A uruchamia obie od zapłonu z nastawami A. Wyrównanie czasu działa tak: gdy różnica czasu obliczeń między połówkami przekroczy 1 s, szybsza czeka, aż różnica spadnie do 0,25 s, najwyżej przez 6 s; różnica ponad 20 s (rozbieg kroku w jednej połowie) jest zamierzona i nie jest wyrównywana. Połowy nie wymieniają danych obliczeń: każda liczy swój model niezależnie, a wspólne są bieg, czas i ustawienia widoku.

8.4 G1. Garaż: wentylacja strumieniowa

Model. Rzut garażu podziemnego 96 × 48 m o wysokości 3,0 m. Nawiew z lewej (100 000 m³/h), wyciąg z prawej (150 000 m³/h), dwa rzędy po trzy wentylatory strumieniowe po 50 N skierowane na wyciąg, szachty kompensacyjne S1–S4 w połowie ścian dłuższych oraz S5 i S6 przy wyciągu (lekcja o zwarciu), rampa wjazdowa z bramą w lewym dolnym narożniku. Pożar samochodu 4 MW, narastanie 60 s. W rzucie temperatura oznacza temperaturę warstwy pod stropem (punkt 2.7).

Lekcja. 1. Wentylacja wyłączona. 2. Sam wyciąg i nawiew. 3. Wentylatory strumieniowe. 4. Zamknięta kompensacja. 5. Kompensacja przy wyciągu (zwarcie). 6. Pożar przed wentylatorami (po stronie ssania). 7. Nadmiar nawiewu.



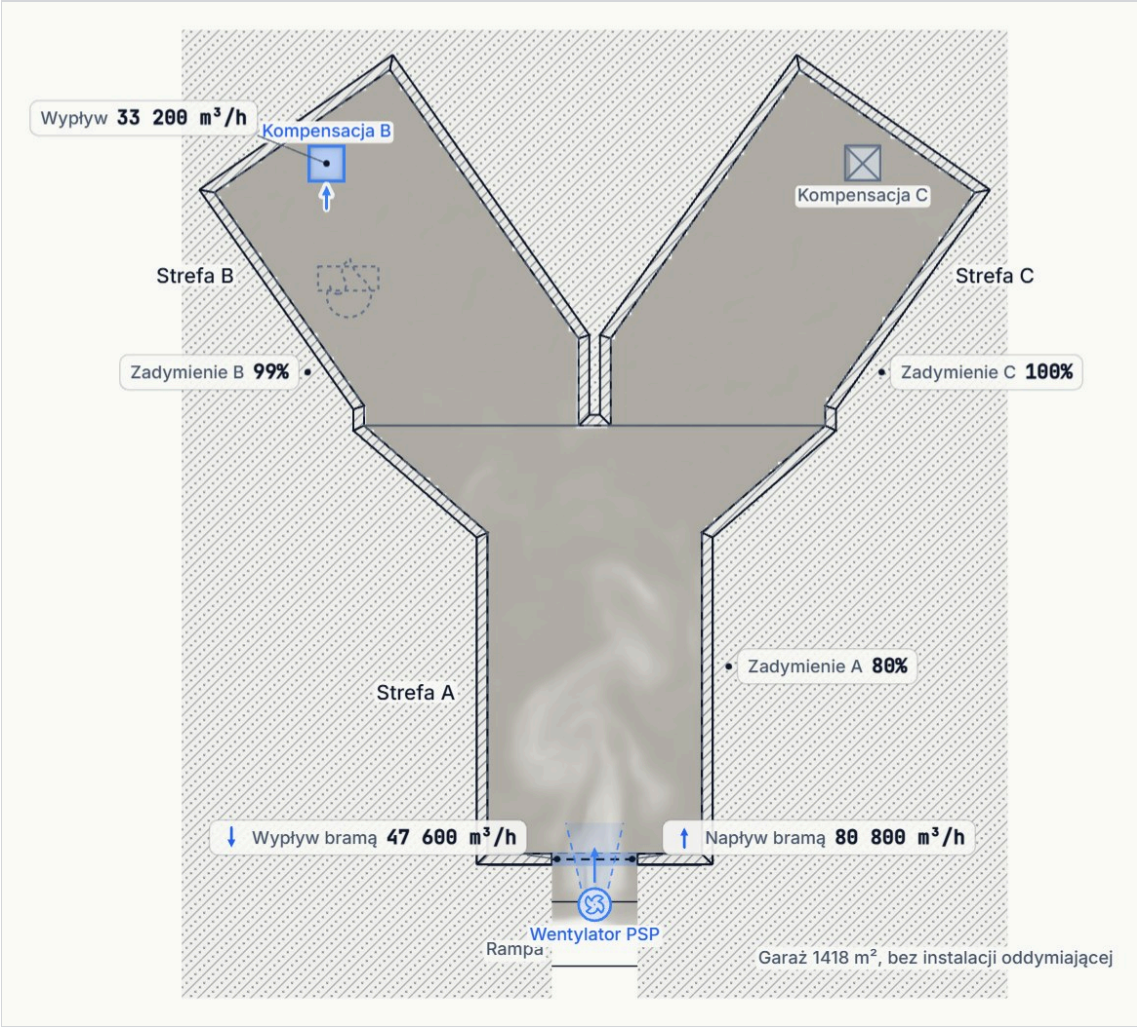
Ryc. 8.4. G1, krok 3: wentylatory strumieniowe prowadzą warstwę od pożaru do wyciągu i opóźniają dojście dymu do ćwiartki od nawiewu.

8.5 G2. Garaż do 1500 m²: oddymianie przez wjazd

Podstawa. Projekt rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (wersja z 6 sierpnia 2026 r.), § 289 ust. 4: instalacja wentylacji oddymiającej uruchamiana systemem wykrywania dymu jest wymagana w strefie garażu, która nie ma bezpośredniego wjazdu lub wyjazdu umożliwiającego ekipom ratowniczym usuwanie dymu na zewnątrz albo ma powierzchnię ponad 1500 m². Lekcja pokazuje, kiedy wjazd naprawdę to umożliwia.

Model. Rzut garażu w kształcie litery Y o powierzchni 1418 m²: ramiona szerokości 16 m, ramię A długości 24 m z węzłem 8 m, ramiona B i C po 4 + 22 m; rampa 6,4 × 10 m przed bramą; bez kurtyn i bez wentylacji mechanicznej. Kompensacja grawitacyjna: szachty 2,4 × 2,4 m w osiach ramion B i C, ok. 3 m od ścian końcowych, domyślnie zamknięte. Wentylator przewoźny straży pożarnej (punkt 3.8) można przeciągnąć w dowolne miejsce garażu i rampy, a kliknięciem obrócić o 45°. Pożar 4 MW w ramieniu B. Przepływ przez bramę jest mierzony w ośmiu odcinkach, osobno napływ i wypływ.

Lekcja. 1. Garaż do 1500 m² bez instalacji (pożar przez 2 min). 2. Wentylator PSP, kompensacja zamknięta. 3. Kompensacja na końcu B. 4. Kompensacja na końcu B i C. 5. Sama kompensacja, bez wentylatora. Wniosek: wentylator przewoźny przewietrza garaż tylko wtedy, gdy po drugiej stronie są otwory wylotowe; bez nich powietrze krąży bramą tam i z powrotem, a dym się rozchodzi.



Ryc. 8.5. G2, krok 3: wentylator na rampie i otwarta kompensacja na końcu ramienia B; dym wypychany z części A, ramię C bez zmian.

8.6 G3. Garaż: kurtyna dymowa

Model. Przekrój pionowy przez granicę stref dymowych garażu: 24 m długości, 3,0 m wysokości, głębokość modelu 18 m (szerokość strefy jak ramię garażu Y). Strefa pożaru 14 m z wyciągiem przy stropie przy ścianie (160 000 m³/h) i pożarem samochodu 4 MW na posadzce 6 m od ściany, kurtyna od stropu (domyślnie 0,8 m), strefa sąsiednia 10 m. Dopływ z prawej: otworem do dalszej części garażu albo nawiewem mechanicznym w strefie sąsiedniej (wtedy strefa pożaru ma własny otwór przy posadzce).

Lekcja. 1. Warstwa pod stropem. 2. Wyciąg w strefie pożaru. 3. Płytka kurtyna. 4. Mały wyciąg, dym się cofa. 5. Nawiew w strefie sąsiedniej. 6. Za mały dopływ. 7. Belki pod stropem.



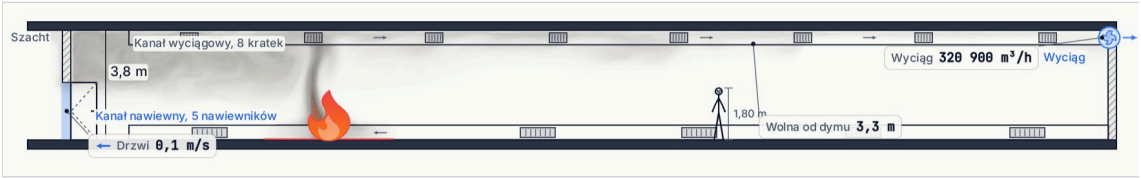
Ryc. 8.6. G3, krok 2: wyciąg w strefie pożaru, powietrze płynie pod kurtyną w stronę pożaru, strefa sąsiednia czysta.

8.7 G4. Garaż: kanał oddymiający

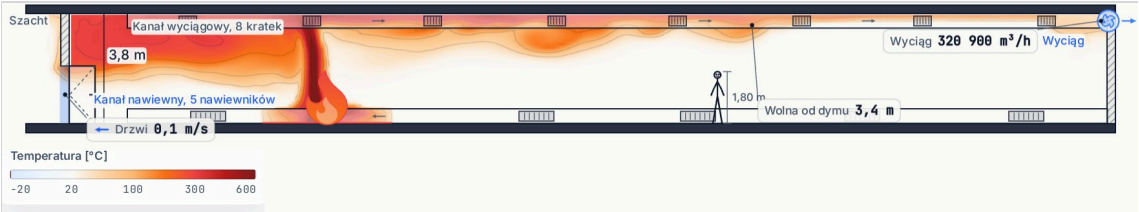
Źródła. prNBN S 21-208-2:2012, pkt 5.1.2 (wysokość wolna od dymu co najmniej 3,5 m bez tryskaczy, 2,5 m z tryskaczami; wymóg ma ograniczyć temperaturę warstwy do 200 °C) i pkt 5.1.3 (warstwa co najmniej 0,3 m pod stropem): stąd wysokość wzorcowa 3,8 m. BS 7346-7:2013 (pożar obliczeniowy samochodu: 8 MW bez tryskaczy, 4 MW z tryskaczami; garaż z warstwą dymu według BS 7346-4). BS 7346-4:2003: pkt 6.6.2.4 (warstwa nad drogami ewakuacji do 200 °C), 6.8.2.13 (powietrze uzupełniające co najmniej 1 m pod warstwą albo wolniej niż 1 m/s), 6.8.2.16 (bez stref martwych), zał. F.6 (liczba punktów wyciągu bez zasysania powietrza spod warstwy).

Model. Przekrój przez długość garażu 36 m, głębokość 18 m, wysokość z suwaka 2,2–5,0 m. Kanał wyciągowy 0,5 m pod stropem na długości 34 m z kratkami (2, 4 albo 8) jako portami wyciągowymi, każda z równą częścią wydajności. Nawiew do wyboru: wyporowy z kanału przy posadzce (sześć nawiewników bez pędu, 85% wyciągu, pomijane w promieniu 3,5 m od pożaru), pod stropem ze strumieniami 5 m/s na przemian w lewo i w prawo, tylko drzwiami (2 m) albo brak (drzwi zamknięte). Pożar 8 MW, samochód 4,5 m, narastanie 60 s. Wyciąg wzorcowy 320 000 m³/h dobrano na modelu; ponieważ pożar w przekroju jest pasem przez całą głębokość 18 m, wydajności są większe niż w projekcie rzeczywistego garażu. W piaskownicy można postawić człowieka 1,80 m (punkt 3.13).

Lekcja. 1. Garaż 3,8 m, układ wzorcowy. 2. Nawiew pod stropem. 3. Powietrze tylko drzwiami. 4. Dwie kratki zamiast ośmiu: ta sama wydajność rozdzielona na dwie kratki, z których każda zasysa także powietrze spod warstwy; warstwa grubieje i nagrzewa się do ok. 200 °C, granicy BS 7346-4. 5. Garaż 3,0 m: warstwa wciąż wisi nad głową, ale jest cieńsza i gorętsza, w tym modelu blisko 200 °C; zapas do granicy promieniowania warstwy jest już niewielki, a w niższym garażu znika. 6. Typowy polski garaż 2,6 m. Kratka w przekroju jest szczeliną przez całą głębokość modelu, więc krok 4 pokazuje skutek skupienia wyciągu w dwóch takich szczelinach; zasysania powietrza spod warstwy przy kratce punktowej przekrój nie odwzorowuje (punkt 7.5).



Ryc. 8.7. G4, krok 1, 200 s od zapłonu: układ wzorcowy utrzymuje warstwę pod stropem; człowiek stoi w czystym powietrzu.



Ryc. 8.8. G4, krok 1, widok temperatury: gorąca warstwa pod stropem, chłodne powietrze nawiewu przy posadzce.



Ryc. 8.9. G4, krok 6: garaż 2,6 m przy tym samym układzie; wysokość wolna od dymu spada do ok. 2,4 m, warstwa leży tuż nad głową.

Wyniki. W domyślnej postaci przekroju z gęstością zmienną (od r09), w jakości „Standard", ze średnich z ostatniej minuty i z oknem pomiaru przy człowieku w położeniu domyślnym (24 m na osi modelu, ok. 13 m od osi pożaru): układ wzorcowy 3,8 m utrzymuje warstwę stabilnie, wysokość wolna od dymu wynosi 3,49 m, warstwa ma 159 °C, a przy głowie jest czyste powietrze; w garażu 3,0 m warstwa ma 183 °C, w garażu 2,6 m 206 °C (w tym modelu około granicy 200 °C z BS 7346-4), a przy dwóch kratkach zamiast ośmiu 200–203 °C. Pozostałe liczby pochodzą z postaci z ρ_0 (r06, po 240–300 s). Pożar 4 MW przy wyciągu 160 000 m³/h daje 3,56–3,70 m przy ok. 110 °C. Bez nawiewu wyporowego (jeden otwór przy posadzce, napływ 1,1–1,9 m/s) warstwa schodzi do 1,0–2,4 m nawet przy 250 000 m³/h. Nawiew pod stropem rozmywa warstwę (dym do wysokości 1,8 m ok. 40% wobec ok. 7% w układzie wzorcowym), powietrze doprowadzane tylko drzwiami ją załamuje, a przy zamkniętych drzwiach wyciąg dławi się do ok. 92 000 m³/h. Dwie kratki zamiast ośmiu dają warstwę grubszą i gorętszą (3,1 m, ok. 240–250 °C). Garaż 3,0 m: wolne ok. 2,6 m przy 240–260 °C; garaż 2,6 m: wolne ok. 2,2–2,3 m przy 236–281 °C. Wniosek lekcji: utrzymanie warstwy wymaga wysokiego garażu, dużej wydajności, wielu punktów wyciągu i wolnego nawiewu pod warstwą; w niskim garażu warstwa jest za gorąca i za blisko ludzi, dlatego w niskich garażach stosuje się wentylację strumieniową, która nie utrzymuje warstwy, tylko wypycha dym w jedną stronę.

8.8 E1. Model z edytora

Scenariusz E1 liczy model narysowany w edytorze (rozdział 7). Kontrolki, wartości domyślne i opis kroku powstają z elementów modelu, a krok siatki wynika z jego wielkości (tabela 4.1). Piaskownica E1 ma zakresy szersze niż pola edytora, liczone od wartości w modelu: wydajność wentylatora do większej z wartości 250 000 m³/h i dwukrotności wydajności z modelu, moc pożaru od 0,5 MW do większej z wartości 20 MW i dwukrotności mocy z modelu; ma też kontrolkę „Materiał" i ciepło spalania. E1 nie ma lekcji ani sekcji „Moje ustawienia": warianty zapisuje się w edytorze jako projekty pod nazwą tematu (od etapu r17) albo w pliku JSON. Przycisk „Zamień" w pasku górnym zamienia nawiew z wyciągiem w modelu i uruchamia obliczenia od zapłonu z tymi samymi nastawami piaskownicy (punkt 7.2).

8.9 Opcje zaawansowane

Panel „Opcje zaawansowane" (od r17) służy do szukania przyczyny zachowania symulacji. Jest we wszystkich scenariuszach, w dwóch miejscach na wspólnym stanie: jako zwinięta grupa na końcu piaskownicy w kolumnie lekcji i jako zakładka „Zaawansowane" w szufladzie, z liczbą opcji o stanie

innym niż domyślny przy nazwie zakładki.

Krok czasu. Panel podaje bieżący krok czasu, ograniczenie, które go wyznaczyło, i prędkości w mianownikach warunków (4.1) i (4.14). Ograniczeniem jest górna granica kroku (przepływ spokojny), warunek Couranta z prędkością przepływu (w rzucie bez modelu warstwy także czoła warstwy i ścinania), w rzucie z modelem warstwy brak podkroków warstwy (potrzeba ich więcej niż 8, więc krok przepływu maleje do ośmiu kroków warstwy, wzór (4.15)) albo dolny próg 0,1 ms, gdy obliczenia nie nadążają za prędkością (zwykle niestabilność). W przekroju panel pokazuje prędkość przepływu, w rzucie z modelem warstwy także ścinanie i falę, a bez modelu warstwy ścinanie i czoło. W rzucie z modelem warstwy (od podkroków warstwy w r17) panel podaje też liczbę i długość podkroków warstwy (wiersz „podkroki warstwy $n \times \Delta t_s$"), a przy ograniczeniu przez przepływ dopisek „warstwa w podkrokach". Opis pochodzi z obliczeń na procesorze i na karcie graficznej. Krótszy krok to mniej sekund modelu na sekundę zegara; gdy budżet klatki się wyczerpie, wyższe nastawy prędkości dają tę samą szybkość (punkt 4.11).

Przełączniki. Na żywo, bez zerowania pól, można wyłączyć: model warstwy dymu w rzucie (rzut jak do r13, to samo co adres z `?warstwa=0`, wybór zapamiętany w przeglądarce), ścinanie warstwy przez wentylatory strumieniowe w rzucie (cały pęd trafia do przepływu uśrednionego, $\psi = 1$), wzmacnianie wirów (współczynnik 0) i gęstość zmienną w przekroju (przybliżenie Boussinesqa). W rzucie panel ma też opcję „Współczynnik FDS" (r18), domyślnie wyłączoną, która nakłada kalibrację widzialności na wynikach FDS bez zmiany obliczeń (punkt 2.10, wzór (2.31)). Pod nim opcja „Współczynnik FDS: początek pożaru" (r19, domyślnie wyłączona, wyszarzona bez Współczynnika FDS): do startu wyciągu i 15 s po nim widzialność w słupie z płaszczyzny 1,8 m (wzór (2.32)). Panel pokazuje tylko opcje działające w trybie scenariusza, a przycisk „Przywróć domyślne" przywraca stan domyślny każdej opcji (składniki modelu włączone, obie opcje Współczynnika FDS wyłączone). Opcje nie zmieniają kroku lekcji, adresu ani „Moich ustawień"; porównanie dwóch klatek dostaje w obu połowach te same opcje. Opcje inne niż model warstwy obowiązują do przeładowania strony. Przy wszystkich opcjach włączonych panel nie zmienia obliczeń.

Prezentacja (r26). Pod opcjami modelu panel ma sekcję „Prezentacja" z przełącznikiem „Hasła F&K Consulting Engineers", domyślnie wyłączonym i niezależnym od przycisku „Przywróć domyślne". Włączony zamienia podpis znaku firmy w prawym rogu paska na nagłówek „Wykonujemy:" i pod nim krótkie hasła usług firmy, zmieniane co 6 s; w trybie prezentera, w którym pasek jest schowany, i w oknie węższym niż 1920 px (od r29; wcześniej 1680 px), w którym pasek pokazuje sam znak, to samo hasło stoi w prawym górnym rogu rysunku. Obliczenia, lekcje i odczyty się nie zmieniają; wybór przeglądarka pamięta.

9

Przepisy, normy i literatura

Pozycje, na które powołują się program i ten podręcznik. Przy normach podano zakres, w jakim zostały użyte w lekcjach; program nie sprawdza zgodności projektu z normą.

Przepisy

Projekt rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, wersja z 6 sierpnia 2026 r., § 289 ust. 4 (scenariusz G2: garaż do 1500 m² z bezpośrednim wjazdem).

Normy

PN-EN 12101-13:2022, systemy różnicowania ciśnień (scenariusz K2: różnica ciśnień, siła otwarcia drzwi, prędkość w otwartych drzwiach).

PN-EN 13501-2 i PN-EN 1634-3, klasyfikacja ogniowa i badanie dymoszczelności drzwi (klasa Sa: drzwi dymoszczelne w K1 i K2).

PN-B-02877-4:2025, pkt 4.3 i 4.4 (scenariusz K1: najmniejsza powierzchnia czynna klap dymowych w klatce schodowej).

BS 7346-4:2003, systemy oddymiania z warstwą dymu przy ustalonym pożarze obliczeniowym (scenariusz G4: temperatura warstwy, powietrze uzupełniające, punkty wyciągu; człowiek w G4; zał. F: liczba punktów wywiewnych bez zasysania powietrza spod warstwy).

BS 7346-7:2013, systemy kontroli dymu i ciepła w garażach zamkniętych (scenariusz G4: pożar obliczeniowy samochodu).

prNBN S 21-208-2:2012, oddymianie garaży zamkniętych (scenariusz G4: wysokość wolna od dymu i położenie warstwy).

NFPA 92, *Standard for Smoke Control Systems*, 2012 Edition, kl. 5.6.3 (wydatek kratki wyciągowej bez zasysania powietrza spod warstwy w modelu warstwy w rzucie; liczba punktów wywiewnych).

ANSI/AMCA 240, badania wentylatorów nadciśnieniowych do wentylacji taktycznej (wydajność PPV wentylatora straży pożarnej w G2).

Metody numeryczne

Harlow F.H., Welch J.E. (1965). Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface. *Physics of Fluids* 8(12), 2182–2189.

Chorin A.J. (1968). Numerical solution of the Navier–Stokes equations. *Mathematics of Computation* 22(104), 745–762.

Stam J. (1999). Stable fluids. *Proceedings of SIGGRAPH 99*, 121–128.

Fedkiw R., Stam J., Jensen H.W. (2001). Visual simulation of smoke. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, 15–22.

Steinhoff J., Underhill D. (1994). Modification of the Euler equations for “vorticity confinement”: application to the computation of interacting vortex rings. *Physics of Fluids* 6(8), 2738–2744.

McAdams A., Sifakis E., Teran J. (2010). A parallel multigrid Poisson solver for fluids simulation on large grids. *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 65–74.

van Leer B. (1974). Towards the ultimate conservative difference scheme. II. Monotonicity and conservation combined in a second-order scheme. *Journal of Computational Physics* 14(4), 361–370.

Selle A., Fedkiw R., Kim B., Liu Y., Rossignac J. (2008). An unconditionally stable MacCormack method. *Journal of Scientific Computing* 35(2–3), 350–371.

Pożar, dym i przepływy

Karlsson B., Quintiere J.G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press, Boca Raton.

Drysdale D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*, wyd. 3. Wiley, Chichester.

Quintiere J.G. (2006). *Fundamentals of Fire Phenomena*. Wiley, Chichester.

Bell J.B., Marcus D.L. (1992). A second-order projection method for variable-density flows. *Journal of Computational Physics* 101(2), 334–348.

Almgren A.S., Bell J.B., Colella P., Howell L.H., Welcome M.L. (1998). A conservative adaptive projection method for the variable density incompressible Navier–Stokes equations. *Journal of Computational Physics* 142(1), 1–46.

Rehm R.G., Baum H.R. (1978). The equations of motion for thermally driven, buoyant flows. *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 83(3), 297–308.

Alpert R.L. (1972). Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors. *Fire Technology* 8(3), 181–195.

Benjamin T.B. (1968). Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics* 31(2), 209–248.

Ricou F.P., Spalding D.B. (1961). Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets. *Journal of Fluid Mechanics* 11(1), 21–32.

Ellison T.H., Turner J.S. (1959). Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics* 6, 423–448.

McCaffrey B.J. (1979). *Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results*. NBSIR 79-1910, National Bureau of Standards, Center for Fire Research, Washington.

Cooper L.Y. (1982). Heat transfer from a buoyant plume to an unconfined ceiling. *Journal of Heat Transfer* 104, 446–451.

Cooper L.Y. (1983). *On the Significance of a Wall Effect in Enclosures with Growing Fires*. NBSIR 83-2730, National Bureau of Standards, Center for Fire Research, Washington.

Cooper L.Y., Woodhouse A. (1985). *The Buoyant Plume-Driven Adiabatic Ceiling Temperature Revisited*. NBSIR 85-3134, National Bureau of Standards, Center for Fire Research, Gaithersburg.

CFAST, Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1026r1, National Institute of Standards and Technology (wymiana ciepła strumienia podstropowego ze stropem).

Heskestad G., Hamada T. (1993). Ceiling jets of strong fire plumes. *Fire Safety Journal* 21, 69–82.

McGrattan K. i in. *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide*, NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology.

McGrattan K. i in. *Fire Dynamics Simulator, User's Guide*, NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology (sadza w prostej chemii, widzialność i współczynnik ekstynkcji, wysokość warstwy; kod źródłowy FDS, gałąź główna, stan z 1 października 2026 r.).

McGrattan K. i in. *Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 3: Validation*, NIST Special Publication 1018-3, National Institute of Standards and Technology (niepewność zaciemnienia dymem).

Bugaj G. (2015). Wentylacja nadciśnieniowa, cz. 1 i 2. *Przegląd Pożarniczy*.

AtriumCalc 1.1 (Klote), ASHRAE (program obliczeń oddymiania atriów; przykład 4A użyty do sprawdzenia wydatku kratki).

Doświadczenia i badania w skali naturalnej

Yamana T., Tanaka T. (1985). Smoke Control in Large Scale Spaces (Part 2: Smoke Control Experiments In A Large Scale Space). *Fire Science and Technology* 5(1), 41–54.

Hinkley P.L. (1970). *The Flow of Hot Gases Along an Enclosed Shopping Mall: A Tentative Theory*. Fire Research Note No. 807, Joint Fire Research Organization, Fire Research Station, Borehamwood (test 3, Tokio 1966).

Deckers X., Haga S., Sette B., Merci B. (2013). Smoke control in case of fire in a large car park: Full-scale experiments. *Fire Safety Journal* 57, 11–21.

Załącznik A

Stałe i nastawy domyślne

Wartości według kodu programu w etapie rozwojowym r29. W ostatniej kolumnie podano nazwę stałej albo pola w programie, żeby każdą wartość dało się odnaleźć w źródłach.

Tabela A.1. Stałe fizyczne, nastawy modelu i parametry numeryczne

Wielkość	Wartość	W programie
Gęstość odniesienia ρ_0	1,2 kg/m³	`RHO0`
Ciepło właściwe c_p	1005 J/(kg·K)	`CP`
Przyspieszenie ziemskie g	9,81 m/s²	`GRAV`
Temperatura odniesienia T_0	293,15 K	`T0`
Ciśnienie atmosferyczne; wykładnik izentropy	101 325 Pa; 1,4	`P_ATM`, `KAPPA`
Rozszerzalność $1/(\rho_0 c_p T_0)$	2,83·10⁻⁶ m³/J	`EXPANSION`
Wzmocnienie produkcji dymu G_s	0,3	`SMOKE_GAIN`
Próg zadymienia s_p	0,15	`smokeThreshold`
Temperatura graniczna; dolna	1200 K; 150 K	`Tmax`, `T_MIN`
Warunek CFL; najdłuższy krok	0,9; 0,05 s	`cfl`, `dtMax`
Najkrótszy krok czasu (dolny próg, opis kroku w panelu)	0,1 ms	`DT_MIN`, `DT_FLOOR`
Wzmocnienie wirowości ε; próg $\lvert\omega\rvert$; budżet	0,6; 10⁻³ s⁻¹; 0,5	`vorticity`, `VORTICITY_MIN`, `VORTICITY_BUDGET`
Linearyzacja oporu: $u_{\min}$; relaksacja $\lvert u\rvert$	0,05 m/s; 0,5	`LOSS_U_MIN`, `LOSS_U_RELAX`
Największy opór; próg szczeliny	$K = 10^8$; $K \geq 100$	`LOSS_K_MAX`, `LEAK_K_MIN`
Rzut ciśnienia: tolerancja bezwzględna; względna	$10^{-5}\ \Delta x^2/\Delta t$; 10⁻⁴	`PRESSURE_TOL_ABS`, `PRESSURE_TOL_REL`
Iteracje rzutu: Szybka, Standard, Wysoka, Ultra; limit	20, 30, 40, 40; 40	`QUALITY_ITERS`, `PRESSURE_MAX_ITERS`
Nadkorekta wielosiatkowa: drobna; gruba	1,8; 1,5	`omega`, `omegaDeep`
Odświeżanie poziomów grubych	co 8 kroków	`COARSE_REFRESH`
Szczeliny w budynku K1, K2: drzwi; drzwi dymoszczelne; okno z nawiewnikiem; kratki lokalu (od r24 pod stropem, z kanałem poza modelem); C_d	0,015; 0,0012; 0,005; 0,04 m²; 0,65	`PRZECIEKI`, `SZCZELINA_DYMOSZCZELNA`, `KRATKA`
Kratka lokalu K1, K2 (r24): położenie od wewnętrznego lica ściany elewacyjnej; opór kratki; zamknięcie kanału od góry	0,6–0,1 m; $K = 1/C_d^2 \approx$ 2,37 przy polu 0,04 m²; $K = 10^8$	`KRATKA`, `geometriaKratki`
Klapa dymowa K1: A_a; szerokość otworu najwyżej; szerokość klatki b	0,7–2,4 m² co 0,1 (domyślnie 1,0, minimum normowe); 2,8 m; 3,0 m	`KLAPA_AA`, `KLAPA_SZER_MAX`, `WYMIARY.klatka`
Klapa dymowa K1: strata własna otworu $A(w)$ przy w = 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8 m (r20)	1,48; 1,48; 1,39; 1,36; 1,25; 1,21; 1,05; 1,01; 0,86; 0,85	`KLAPA_STRATA_MODELU`
Relaksacja wydajności portu; rozruch	0,2 na krok; 1% $\dot{V}_{\text{nom}}$	`PORT_RELAX`, `PROBE`
Regulator falownika: τ_{PI}; k_p; ograniczenia błędu; minimum	0,5 s; 1,5; ln 2,5 i −ln 6; 0,002 $\dot{V}_{\max}$	`REG_TAU`, `REG_KP`, `REG_UP`, `REG_DOWN`, `REG_QMIN`
Klapa upustowa: stała czasowa; pasmo w K2	0,5 s; 6 Pa	`RELIEF_TAU`, `UPUST.pasmo`
Domykanie: czas; krotność wzrostu oporu; opór bryły	0,4 s; 10; 10^5	`CLOSE_TIME`, `CLOSE_RATIO`, `CLOSE_K_SOLID`

Wielkość	Wartość	W programie
Rzut: θ_{ref}; Fr (garaże); próg czoła	150 K; 0,7 (0,35); 0,02 H na komórkę	`layerThetaRef`, `layerFroude`, `LAYER_GRAD_MIN`
Rzut: strata ciepła warstwy λ_w; rozszerzalność netto φ_e	0,015 s^{-1}; 0,35	`layerHeatLoss`, `planExpansion`
Rzut: udział pędu ψ (G2); zanik ścinania λ_Δ	0,4 (1,0); 0,02 s^{-1}	`jetShare`, `shearDecay`
Obwiednia Alperta: współczynniki; granica stref; temperatura poza pożarem	16,9 i 5,38; 0,18 H; 700 K	`ALPERT`, `T_POZA`
Relaksacja temperatury: wnętrze; powietrze zewnętrzne; zanik dymu na zewnątrz	ok. 1/60 s^{-1}; 0,2 s^{-1}; 0,1 s^{-1}	strefy cieplne scenariuszy (`ATMOSFERA` w garażach i edytorze, `RELAKS` w G4)
Narastanie pożaru: klatki; garaże	45 s; 60 s	`NARASTANIE_POZARU`, `NARASTANIE_SAMOCHODU`
Siła otwarcia drzwi: W, A, d, F_{sz}	0,9 m; 1,8 m^2; 0,075 m; 40 N	`DRZWI_SILA`
Człowiek: duszenie; śmierć; powrót do siebie	dawka 1; 2,5; 0,02 s^{-1}	`DAWKA_DUSZENIA`, `DAWKA_SMIERCI`, `ODPOCZYNEK`
Automat jakości: okno; trwanie; próg	20 s; 5 s; 0,5 prędkości zadanej	`OPCJE_AUTOMATU`
Rzut ciśnienia o zmiennej gęstości (przekrój)	włączony (domyślnie od r09)	`variableDensity`
Sadza: Y_s domyślnie i zakres; ΔH_c domyślnie i zakres	0,10 (0,01–0,25) kg/kg; 25 (10–50) MJ/kg	`SOOT_DEFAULTS`, `SADZA`, `CIEPLO_SPALANIA`
Widzialność: K_m; C_w odbijające, podświetlane; $S_{\max}$; próg izolinii	8700 m^2/kg; 3, 8; 30 m; 10 m	`SOOT_DEFAULTS`
Współczynnik FDS (r18, opcja domyślnie wyłączona): α_F; β; δ na płaszczyźnie	2; 0,75; 1,5 m	`FDS_FACTOR`, `FDS_FACTOR_KEY`
Współczynnik FDS, początek pożaru (r19, opcja zależna, domyślnie wyłączona): granica fazy; płaszczyzna; α_P; β_P; δ_P	start wyciągu + 15 s; 1,8 m; 1; 1; 1,5 m	`FDS_PHASE`
Przenoszenie q_V: ogranicznik; suma liczb Couranta; najwięcej podkroków	van Leer; 0,5; 32	`LIMITER_VAN_LEER`, `COURANT_MAX`, `SUBSTEPS_MAX`
Profil rzutu: χ; wysokość ewakuacyjna; pod stropem; najmniejsza nadwyżka temperatury	0,5; 1,8 m; 0,2 m; 0,5 K	`PLAN_PLANE`
Widzialność: barwy skali przy 0; 7,5; 15; 22,5 i 30 m (skala FDS, od r10)	#0000FF, #00FFFF, #00FF00, #FFFF00, #FF0000	`VIS_FDS`
Ściana ukośna: przerwa obliczeniowa otworu; krok zagęszczenia obrysu; tolerancja osi szczelności	3 kroki jakości „Szybka”; połowa grubości, 0,05–0,15 m; 10^{-7} m	`PRZERWA_SKOSNA`, `krokSkosu`, `SEAL_EPS`
Edytor bez trybu Orto: krok kątów; tolerancja przyciągania do kąta	15°; 2,5°	`KROK_KATA`, `TOL_KATA`
Warstwa liczona w czasie (r14): przełącznik; rzut bez modelu	włączony (od r15); adres `?warstwa=0`	`layerModel`, `LAYER_MODEL_KEY`

Wielkość	Wartość	W programie
Strata do stropu: liczba Stantona (r16); ściany: k, ν, Nu laminarny i turbulentny (Cooper)	0,0064; 0,026 W/(m·K), 1,5·10⁻⁵ m²/s, $0{,}48\cdot \mathrm{Gr}^{1/4}$, $0{,}0184\cdot \mathrm{Gr}^{2/5}$	`LAYER.ceiling.stanton`, `LAYER.wall`
Kratka wyciągu (r16): γ kratki w ścianie; dolna krawędź pod stropem (edytor)	0,5; 0–2 m (domyślnie 0)	`LAYER.plughole.gammaWall`, `FanDef.grilleDrop`, `Szacht.kratkiScienne`, `Szacht.kratkaPodStropem`
Opcje testowe rzutu (r16): C_s; c_f	0; 0 (wyłączone)	`smagorinsky`, `planFriction`
Płomień pod stropem: $r_f/(L-H)$; strefy McCaffreya: granice x; κ	0,95; 0,08 i 0,2; 6,8, 1,9 i 1,1	`LAYER.flame`, `ceilingFlameExcess`
Warstwa: χ_r; najmniejsza masa warstwy	0,3; 10⁻³ kg/m²	`LAYER`
Warstwa: strata do stropu, strona gazu $h_c + h_r$; $k\rho c$ stropu (beton)	15 W/(m²·K); 2·10⁶ W²·s/(m⁴·K²) (h_{ef} = 10,3 W/(m²·K) po 10 min)	`LAYER.ceiling`, `ceilingHeatTransfer`
Warstwa: źródło objętości pożaru; obraz lustrzany pióropusza	$1-\chi_r$ z ujemnym źródłem ze straty do stropu; k = 1, 2 (ściana), 4 (naroże)	`planFireExpansion`, `fireMirrorCount`
Warstwa: grubość granicy δ na płaszczyźnie; zadymienie w słupie i pod stropem od grubości warstwy	0,3 m; 0,1 m	`PLAN_PLANE.layerDelta`, `LAYER.smokyDepth`
Warstwa: zadymienie na 1,8 i 1,5 m: widzialność; C	poniżej 10 m; 3 (znaki odbijające)	`ZADYMIENIE`
Warstwa: liczba kratek wyciągu (G1; edytor)	10 (suwak 1–30); 1 (pole 1–30)	`KRATKI_G1`, `Szacht.kratki`
Warstwa: porywanie $E=(a-b\,\mathrm{Ri})/(1+c\,\mathrm{Ri})$; Ri graniczne	a = 0,08; b = 0,1; c = 5; 0,8	`LAYER.entrainment`
Warstwa: próg opadania dymu bez wyporu θ_d	3 K (do kalibracji)	`LAYER.descent`
Warstwa: wydatek kratki bez zasysania; γ przy ścianie (bliżej niż $2D_i$)	4,16; 0,5 (dalej 1)	`LAYER.plughole`
Warstwa: współczynnik przelewu pod kurtyną C_d	0,7	`LAYER.weir`
Warstwa: opór C_i; c_f; liczba Couranta fali; otoczenie pióropusza	0,002; 0,004; 0,5; do $r_p + H$	`LAYER_DRAG`, `LAYER_CFL`, `plumeRing`
Warstwa: najwięcej podkroków warstwy w kroku przepływu (r17)	8	`LAYER_SUB_MAX`
Budżet obliczeń na klatkę: procesor; karta	70% (4–33 ms); 85% (4–50 ms)	`budgetFraction`, `GPU_BUDGET_FRACTION`
Karta: kawałki partii tyknięcia (r21)	3 (ze znacznikami czasu karty; bez nich i przy domykaniu 1)	`KAWALKI`
Karta: tryb kawałków w adresie (r21): pętla sprzed r21; domyślny; dłuższe tyknięcie	`?kawalki=0`; `?kawalki=1`; `?kawalki=2` (wybór zapamiętany w przeglądarce)	`GPU_CHUNKS_KEY`, `GPU_LONG_TICK_KEY`

Wielkość	Wartość	W programie
Obraz w biegu: najkrótszy odstęp między rysowaniami (r28; ekran 120 Hz: 60 rysowań na sekundę, 60 Hz bez zmian, pauza bez ograniczenia)	1000/60 – 1000/240 ms ≈ 12,5 ms	`MIN_ODSTEP_KLATKI_MS`
Punkty pomiarowe użytkownika: najwięcej na rysunku (nowy punkt ponad limit wypiera najstarszy); pamięć (r27)	24; na czas pracy w karcie przeglądarki	`MAKS_SOND`
Hasła F&K w trybie prezentacji (r26, próg okna od r29): liczba haseł; zmiana co; szerokość okna, od której hasło stoi w pasku	9; 6 s; 1920 px	`HASLA_FK`, `ZMIANA_HASLA_MS`