

7. Wnioski końcowe

Projektowanie i sterowanie instalacjami przemysłowymi w odlewnictwie związane jest z dużymi kosztami i z dużym współczynnikiem ryzyka. Jest to spowodowane, między innymi, wciąż niedostateczną jakością koniecznych do przeprowadzenia w takiej sytuacji symulacji numerycznych procesu fizycznego. Weryfikacja rezultatów takich symulacji w warunkach przemysłowych jest jednak bardzo trudna i często możliwa jedynie dla globalnych parametrów. Jeszcze mniej przydatne wydają się próby wykorzystania różnego typu korelacji, czy analogii, oparte na poszukiwaniu związków liczb kryterialnych charakteryzujących przepływy. Zaproponowana w tej pracy metoda uwiarygodnienia, czy certyfikacji stosowanych metod i programów numerycznych na podstawie wzorcowych eksperymentów laboratoryjnych stanowi więc próbę uzupełnienia dotychczas praktykowanych w przemyśle metodologii planowania i testowania wprowadzanych rozwiązań technologicznych.

Przedstawione wzorce eksperymentalne bazują na optycznych metodach pomiaru i komputerowej analizie otrzymanych obrazów przepływu. Dzięki wykorzystaniu technik anemometrii i termometrii obrazowej (PIV&T), obok informacji jakościowych, zgromadzono zestawy ilościowych informacji o pełnym polu temperatury i prędkości, istotnie ułatwiając interpretację bardzo złożonych procesów przepływowych. Uzupełnieniem tej informacji są rezultaty dodatkowych badań, ograniczone do wybranych elementów problemu przepływowego, czy nawet do jakościowego opisu obserwowanego zjawiska. Połączenie tych informacji stanowi rezultat, który, zdaniem autorów pracy, może być wykorzystany przez twórców i użytkowników numerycznych programów symulacyjnych.

Opisana w pracy metoda laboratoryjnej certyfikacji symulacji numerycznych wiąże się z drastycznymi ograniczeniami. Zastąpienie złożonej geometrii przemysłowej uproszczonym modelem, zmiana skali problemu i wreszcie zastosowanie zupełnie innych materiałów to główne źródła odstępstw między modelem eksperymentalnym a jego przemysłowym wzorcem. Z drugiej strony wydaje się oczywiste, że symulacja numeryczna procesów fizycznych obserwowanych we wzorcu laboratoryjnym musi wiernie odtworzyć te uproszczone warunki, jeśli miałyby służyć pomocą w dużo bardziej złożonych warunkach przemysłowych. Z tą myślą przygotowano zestawy pomiarów wykonanych dla stosunkowo prostych procesów fizycznych, zawierających jednak elementy istotne dla problematyki odlewniczej. W pracy podjęto też próbę wykorzystania niektórych dostępnych autorom programów numerycznych do symulacji przebiegu prezentowanych eksperymentów laboratoryjnych, ilustrując przy tym trudności jakie często pojawiają się przy tego rodzaju porównaniach.

Informacje dostarczane przez badania eksperymentalne rzadko mają charakter uniwersalny. Nawet gdyby było możliwe zastosowanie w danym eksperymencie wszystkich dostępnych technik pomiarowych, mogą pojawić się niezaprogramowane w doświadczeniu lub niemożliwe do zmierzenia parametry fizyczne danego procesu. Z tego względu nie należy odrzucać *a priori* jednostkowych informacji empirycznych, które być może są obciążone dużym, przypadkowym błędem. Należałoby raczej próbować wnioskować o poprawności symulacji numerycznej przez wielokrotne porównania różnych zestawów danych eksperymentalnych, optymalnie, jeśli są to pomiary uzyskane w różnych warunkach i różnymi metodami. Oczywiście rzadko istnieje możliwość korzystania z dowolnie szerokiej bazy empirycznej. Kierując się powyższą argumentacją, w przedstawionej pracy starano się obok prezentacji tzw. wzorców eksperymentalnych, pozostawić informacje o innych podobnych eksperymentach, w których z różnych powodów nie wszystko przebiegało tak jak było to zaplanowane. Można sobie wyobrazić wykorzystanie tych informacji nie tylko jako wskazówki, pomocnej przy planowaniu przyszłych prac eksperymentalnych, ale też jako danych wejściowych do analizy dokładności i wrażliwości zjawiska na różnego rodzaju efekty uboczne i niedokładności. Traktując „zakłócone” dane empiryczne jako bazę odniesienia można poszukiwać ich odpowiedników numerycznych, weryfikując zarówno wrażliwość samego kodu

numerycznego, jak i jego zdolność do odtworzenia zjawiska na podstawie niepełnej, czy nawet częściowo przekłamanej informacji.

Na bazie uzyskanych w tej pracy doświadczeń można stwierdzić konieczność wprowadzenia systemu certyfikacji wiarygodności przemysłowych symulacji numerycznych. Potwierdzają to wykonane próby uzyskania poprawnych rozwiązań dla wybranych konfiguracji laboratoryjnych. Mimo, że analizowano proste przepływy z powierzchnią swobodną i przemianami fazowymi (krzepnięcie), w prostych geometrycznie modelach, wyniki symulacji numerycznych wykonanych kilkoma dostępnymi programami odlewniczymi poważnie odbiegały od rzeczywistości.

Problematyka walidacji, a następnie certyfikacji symulacji numerycznych jest bardzo szeroka i znacznie wykracza poza zakres tej pracy. Przewodnym celem przeprowadzonych tutaj prac pozostaje raczej zasygnalizowanie problemów i wskazanie możliwych dróg dla opracowania jednoznacznych metod uwiarygodnienia kodów numerycznych. Znaczenie problemu walidacji szczególnie ujawnia się, gdy symulacje komputerowe wykorzystywane są do analizy niezwykle skomplikowanych fizycznie procesów, jakie zachodzą przy produkcji odlewniczej. Wydaje się, że jedyną realną drogą jest podzielenie analizowanego problemu na bloki tematyczne, zaprojektowanie laboratoryjnych wzorców eksperymentalnych odpowiadających zjawiskom fizycznym każdego z takich bloków i przeprowadzenie walidacji symulacji dla każdego z wzorców eksperymentalnych. Taką procedurę próbowano wprowadzić w obecnej pracy, analizując dla rozpatrywanych modeli fragmenty zjawisk fizycznych (zalewanie formy, konwekcja naturalna, krzepnięcie itd). Po pozytywnej walidacji fragmentów zjawiska, połączenie tych zjawisk cząstkowych w jeden eksperyment walidacyjny, niekoniecznie tak dokładny jak te w poszczególnych blokach, powinno zakończyć procedurę walidacyjną. Odniesienie uzyskanych rezultatów do warunków przemysłowych to już następny etap, wymagający określenia z jednej strony koniecznej dokładności odwzorowania zjawisk, z drugiej zaś, zdefiniowania zakresu tolerancji w określeniu parametrów odpowiedzialnych za przebieg procesu (np. danych materiałowych, warunków brzegowych, początkowych itp.).