



Согласно «Концепции развития водородной энергетики в Российской Федерации» одной из первоочередных задач развития водородной энергетики является создание низкоуглеродных технологий производства водорода. Принимая во внимание высокую воспламеняемость и пожаровзрывоопасность водорода, важным аспектом является обеспечение безопасности на объектах водородной энергетики. В целях минимизации рисков аварийных ситуаций, адекватной оценки тяжести их последствий, оптимизации технологических процессов и для проведения детерминистского анализа безопасности объектов водородной энергетики разрабатываются специальные программные средства (далее – ПС), в частности, ПС АТЭК-ВЭ, разработанное на платформе АТЭК [1] и предназначенное для консервативного моделирования аварийных сценариев, описывающих выбросы пожаровзрывоопасных веществ и их последствия на объектах водородной энергетики. В программном средстве реализован набор моделей, основанных как на стандартных методиках, так и на подходах, описанных в опубликованных рецензированных статьях и научно-технических отчетах (Рисунок 1).

В 2018 году была введена процедура обязательной аттестации программных средств, реализующих расчетные модели процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии [2]. Поэтому для решения задач, связанных с количественной оценкой риска развития аварийных ситуаций, должны использоваться только такие подходы, которые успешно прошли процедуру валидации, заключающуюся в сравнении параметров реальных экспериментов с результатами их математического моделирования.

Для подтверждения возможности применения ПС АТЭК-ВЭ была проведена валидация моделей пожара-струи и огненного шара, реализованных в разрабатываемом программном средстве. Модели валидировались на экспериментальных данных, опубликованных в открытых источниках.

Цель работы — валидация инженерных моделей пожара-струи и огненного шара для оценки поражающих факторов при выбросе и горении смесей водород-воздух.



Рисунок 1 — Логика разработки ПС АТЭК-ВЭ

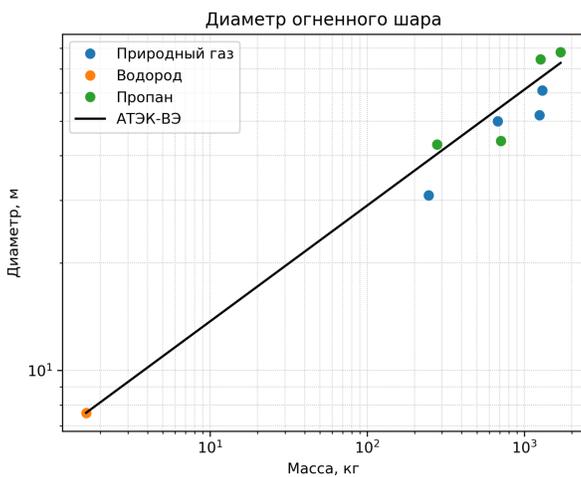


Рисунок 3 — Сравнение расчетных и экспериментальных значений диаметра огненного шара

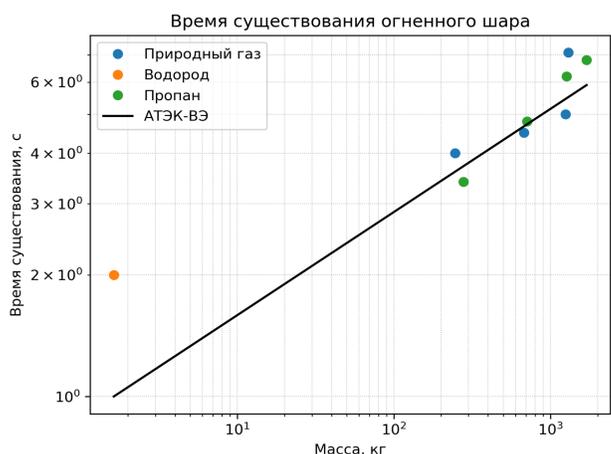


Рисунок 4 — Сравнение расчетных и экспериментальных значений времени существования огненного шара

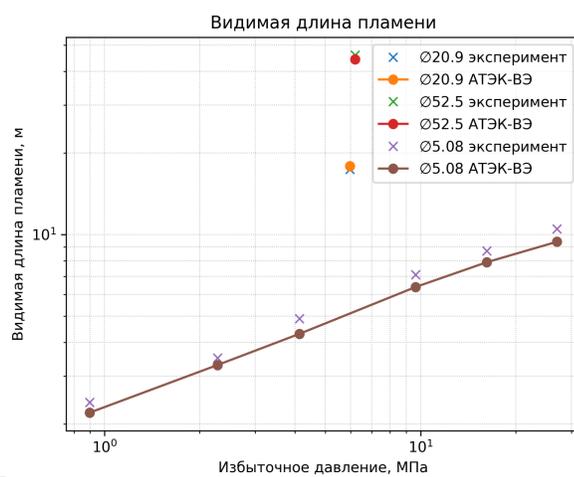


Рисунок 6 — Зависимость видимой длины пламени от избыточного давления, сравнение расчетных и экспериментальных данных (1) — диаметр отверстия 52,5 мм; (2) — диаметр отверстия 20,9 мм; o — диаметр отверстия 5,08 мм

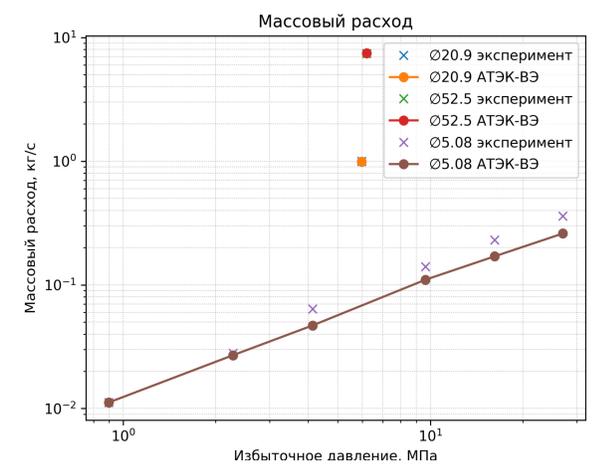


Рисунок 7 — Зависимость массового расхода от избыточного давления, сравнение расчетных и экспериментальных данных (1) — диаметр отверстия 52,5 мм; (2) — диаметр отверстия 20,9 мм; o — диаметр отверстия 5,08 мм

Заключение

Показано хорошее согласие результатов расчета с данными соответствующих экспериментов. В целом, можно отметить, что для модели огненного шара наименьшее относительное отклонение диаметра огненного шара получено для экспериментов с водородом (0,1 %), наибольшее — для экспериментов с природным газом (17,25 %), для параметра «время существования огненного шара» — 8,85 % для экспериментов с пропаном и 50 % для экспериментов с водородом соответственно. Что касается модели пожара-струи, то наименьшее относительное отклонение видимой длины пламени и массового расхода получены для больших диаметров отверстий (20,9 и 52,5 мм). Кроме того, наблюдается рост значения относительного отклонения обоих параметров пропорционально росту избыточного давления в емкости.

По результатам работы были составлены матрицы верификации для описанных моделей, которые будут расширены данными, полученными с помощью экспериментальной базы РФЯЦ-ВНИИТФ. Матрицы верификации будут использованы в верификационном отчете ПС АТЭК-ВЭ для прохождения процедуры аттестации.

Список использованной литературы

1. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ. Программная платформа и среда моделирования АТЭК. Версия 3.0 (Платформа АТЭК 3.0) / РФЯЦ-ВНИИТФ. Макеева И.Р., Соколов В.П. [и др.]. — 2022 - № 2022610062.О
2. О внесении изменений в статью 26 Федерального закона «Об использовании атомной энергии» и признании утратившим силу отдельных положений законодательных актов российской Федерации: федер. закон от 23 мая 2018 г. № 118-ФЗ. URL: <http://docs.cntd.ru/document/557485199> (дата обращения: 03.07.2018).
3. Betteridge, S. Large scale pressurized LNG BLEVE experiments [Text] / S. Betteridge, L. Phillips // Symposium series. — 2015. — № 160.
4. Ekoto, I. W. Updated jet flame radiation modeling with buoyancy corrections [Text] / I.W. Ekoto, A.J. Ruggles, L.W. Creitz, J. X. Li // International Journal of Hydrogen Energy. — 2014. — Vol. 39. — P. 20570 – 20577.
5. Shefer, R. W. Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames [Text] / R. W. Shefer, W. G. Houf, T. C. Williams, B. Bourne, J. Colton // International Journal of Hydrogen Energy. — 2007. — Vol. 32. — P. 2081 – 2093.



Рисунок 2 — Реализация огненного шара спустя 3 секунды после зажигания облака горючей смеси (заполнение 37 %, 67 % и 69 % соответственно) [3]

Инженерная модель пожара-струи описывает термическое воздействие горячей струи газа без учета плавучести. Реализованная модель позволяет определять видимую длину пламени и рассчитывать массовый расход и время полного истечения для выходного отверстия заданного диаметра, а также оценивать поля потенциального риска термического поражения в результате воздействия горячей струи в течение заданного промежутка времени.



Рисунок 5 — Изображение горячей струи в разные моменты времени

Модель пожара-струи была валидирована на основе экспериментальных значений видимой длины пламени и массового расхода для трех разных диаметров отверстий: 52,5, 20,9 и 5,08 мм (Рисунок 5). Сравнение результатов моделирования с данными, полученными экспериментально (Рисунки 6 и 7), показало, что среднее относительное отклонение видимой длины пламени для диаметра отверстия 52,5 мм составило 3,5 %, массового расхода — 0,7 %, для диаметра отверстия 20,9 мм — 2,6 % и 1 % соответственно [4]. Для экспериментов, проводимых при диаметре отверстия 5,08 мм, среднее относительное отклонение видимой длины пламени составило 9,5 %, а массового расхода — 18,8 % [5].