

Было предложено несколько методов для смягчения эффектов накопления ретроградного конденсата. Они могут быть сгруппированы в три различных подхода. Первый подход заключается в сохранении пластового давления выше давления точки росы методом закачки газа (природный газ, углекислый газ, чистый метан, азот). Второй метод состоит в мобилизации конденсата вблизи ствола скважины, с тем чтобы он истекал к скважине с газом. Для реализации такого метода могут быть использованы изменение смачиваемости или уменьшение межфазного натяжения. Последний подход приводит к уменьшению снижения давления, что увеличивает время достижения давления начала конденсации при гидравлическом разрыве пласта или бурении горизонтальных скважин.

В Северном месторождении (Катар) применяется метод горизонтальных скважин для снижения накопления конденсата. Коэффициент продуктивности и время достижения давления начала конденсации представлены на рис. 3 [3].

Заключение. Несколько методов были предложены для смягчения последствий накопления конденсата, многие из них имеют свои недостатки, когда применяются на практике. Например: закачка газа показывает лучшие результаты по сравнению с другими, однако требуется большое количество природного газа. Гидравлический разрыв пласта и горизонтальные скважины не экономичны и могут только отодвинуть время достижения давления точки росы, но не могут полностью предотвратить накопление. Таким образом, накопление ретроградного конденсата в пласте очень серьезно влияет на продуктивность скважин. Изучение характеристик коллектора, свойств пластового флюида очень важно для выбора оптимальных методов борьбы с накоплением конденсата.

#### Литература

1. LiFan, Billy W. Harris, Alexander Shandrygin. Understanding Gas-Condensate Reservoirs. // Melbourne, Australia – 2006. – С. 14.
2. Разработка месторождений природных газов / Р.М Тер-Сакисов // М.: ОАО "Издательство "Недра". – 1999. – С. 257.
3. Pathak P., Fidra Y., Avida H., Kahar Z., and Agnew Mark. The Arun Gas Field in Indonesia: Resource Management of a Mature Field. – 2004. – С. 57.

### СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЯ КАПЕЛЬ ВОДЫ В УСЛОВИЯХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВОДЯНЫХ ЗАВЕС НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.А. Дмитриенко

Научный руководитель профессор П.А. Стрижак

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет г. Томск, Россия*

Самым взрыво- и пожароопасным направлением народного хозяйства считается нефтеперерабатывающая промышленность, объектам которой являются резервуарные парки, железнодорожные сливные и наливные эстакады, насосные системы, обеспечивающие транспортировку нефти и нефтепродуктов. Аварийные ситуации, возникающие на различных стадиях жизненного цикла оборудования, являются причиной значительного материального ущерба в зоне пожара, наносят ущерб окружающей природной среде, а также могут угрожать здоровью и жизни людей.

Одним из наиболее опасных факторов пожара является тепловое излучение [1]. Действие теплового излучения проявляется в воспламенении окружающих горючих материалов и возникновении новых очагов пламени, что, в свою очередь, способствует быстрому распространению зоны пожара.

Среди имеющихся средств защиты систем автоматического водяного пожаротушения от теплового излучения следует особо выделить водяные завесы (распыленные водяные струи), использование которых позволяет ослабить лучистый тепловой поток [2–4]. Одной из проблем применения водяной завесы является нарушение ее целостности под влиянием таких факторов как столкновение капель в процессе их падения, испарение капель под воздействием теплового излучения. В результате теоретических [5, 6] и экспериментальных [7, 8] исследований установлены минимальные размеры, количество капель тушащей жидкости (воды) и расстояния между ними, достаточные для активного поглощения энергии пожара.

Представляет интерес анализ закономерностей столкновения двух капель в потоке высокотемпературных газов с использованием панорамных оптических методов «трассерной» визуализации (PIV [9] и IPI [10]), кросскорреляционного комплекса и средств высокоскоростной (до  $10^5$  кадров в секунду) видеорегистрации. Цель настоящей работы – статистический анализ последствий столкновения двух капель воды в потоке высокотемпературных газов с использованием панорамных оптических методов «трассерной» визуализации. При проведении экспериментов использовался экспериментальный стенд (рис. 1) с комплексом регистрационной аппаратуры: видеокамера (формат изображения  $1024 \times 1024$  пикселей, частота до  $10^5$  кадров в секунду); кросскорреляционная камера (формат изображения  $2048 \times 2048$  пикселей; двойной импульсный твердотельный лазер (длина волны  $532 \cdot 10^{-9}$  м, длительность импульса до 12 нс, частота повторений не более 15 Гц); синхронизирующий процессор (дискретизация сигналов менее 10 нс).

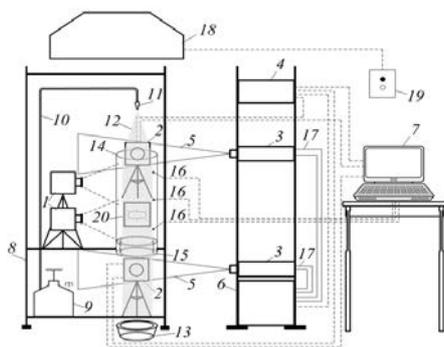


Рис.1 Схема экспериментального стенда:

1 – высокоскоростные видеокамеры; 2 – кросскорреляционные камеры; 3 – двойной твердотельный импульсный лазер; 4 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера; 5 – лазерный «нож»; 6 – генератор лазерного излучения; 7 – ПК; 8 – штатив; 9 – емкость с водой; 10 – канал подачи воды; 11 – форсуночное устройство; 12 – капли воды; 13 – ловитель; 14 – цилиндр из кварцевого стекла; 15 – полый цилиндр, во внутреннее пространство которого залита горячая жидкость; 16 – термопары; 17 – канал движения охлаждающей жидкости лазера; 18 – нагнетательная система; 19 – пульт включения/отключения нагнетательной системы; 20 – прожектор

При проведении экспериментов производилась регистрация изображений капель воды в процессе их движения через высокотемпературные продукты сгорания керосина в полый цилиндр высотой 1 м, внутренним и внешним диаметрами – 0,2 м и 0,206 м, выполненном из жаростойкого светопрозрачного стекла. Температура продуктов сгорания в экспериментах составляла  $1070 \pm 30$  К. Измерения проводились тремя хромель-алюмелевыми термопарами (диапазон измеряемых температур –273–1373 К, погрешность  $\pm 3.3$  К). Начальная температура вводимых в газовую среду капель воды поддерживалась около 300 К с использованием нагревательных камер. Исследования проводились для капель полидисперсного водяного потока. Их начальные размеры (радиусы) варьировались в диапазоне  $0,1 \leq r_m \leq 0,25$  мм. Относительная объемная концентрация поддерживалась  $0,001-0,0012$  м<sup>3</sup> капель жидкости на 1 м<sup>3</sup> газа. Размеры  $r_m$  и скорости перемещения  $u_m$  капель измерялись с использованием методов «Interferometric Particle Imaging» (IPI) и «Particle Image Velocimetry» (PIV). В результате статистического анализа полученных экспериментальных данных установлено, что после столкновения возможны три варианта дальнейшего развития процесса: коагуляция и движение объединенной капли; капли сливаются, но затем конгломерат распадается на две капли с близкими начальными размерами; дробление на несколько (от 3 до 10) мелких капель. Исследования в широком диапазоне изменения размеров капель и скоростей их движения показали статистику последствий столкновений двух капель в рассматриваемых условиях. При любых значениях  $r_m$  и  $u_m$  происходили коагуляция, дробление или распад капель. Но частоты появления каждого из этих событий достаточно существенно отличались. На рис. 2 представлены значения критериев  $P_1$  (коагуляция),  $P_2$  (разлет) и  $P_3$  (дробление), характеризующих частоту проявления одного из трех вариантов последствий столкновений двух капель при различных размерах ( $0,1 \leq r_m \leq 0,25$  мм) и скоростях ( $1 \leq u_m \leq 10$  м/с).

Значения  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  вычислялись по формулам:

$$P_1 = N_1 / (N_1 + N_2 + N_3), P_2 = N_2 / (N_1 + N_2 + N_3), P_3 = N_3 / (N_1 + N_2 + N_3),$$

где  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  – число столкновений, в результате которых реализуется, соответственно, первый, второй и третий варианты последствий.

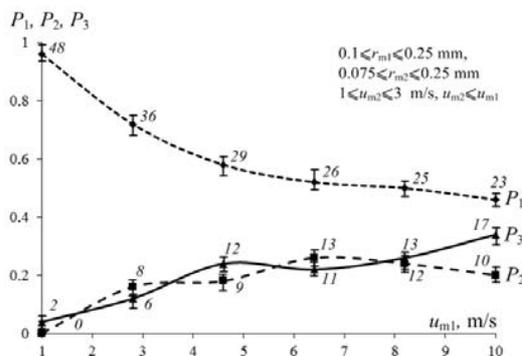


Рис.2 Статистический анализ последствий столкновений двух капель воды при их движении в высокотемпературном газовом потоке

Полученные зависимости (рис. 2) иллюстрируют влияние разности скоростей сталкивающихся капель в потоке газов на последствия столкновений. Можно отметить, что при малых ( $u_m < 3$  м/с) и сопоставимых скоростях перемещения капель наибольшая частота последствий столкновений соответствует коагуляции. Данная закономерность наблюдается для широкого диапазона изменения размеров капель –  $0.1 \leq r_m \leq 0.25$  мм. С ростом разности скоростей движения сталкивающихся капель существенно возрастают  $P_2$  и  $P_3$  (рис. 2). При этом можно отметить в целом сопоставимые значения этих критериев. Выделенный эффект иллюстрирует, что при росте разности скоростей капель частота столкновений с дроблением или разлетом последних существенно увеличивается. Полученные значения критериев  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  могут быть использованы в качестве оценочных при выборе параметров работы оборудования при реализации не только полидисперсного пожаротушения, но и большой группы технологий с газопарокапельными высокотемпературными потоками (термическая очистка жидкостей, газопарокапельные теплоносители).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-39-00003).

#### Литература

1. Виноградов А. Г. Расчет коэффициентов пропускания сферических капель воды для типовых спектров теплового излучения при пожаре / А. Г. Виноградов // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер. : Машинобудування. – 2013. – № 2. – С. 108 – 115.
2. Ravigururajan T.S. A Model for Attenuation of Fire Radiation Through Water Droplets / T.S. Ravigururajan, M.R. Beltan // Fire Safety J., 1989. – Vol. 15. – P. 171–181.
3. Coppalle A. Fire protection: water curtains/ A. Coppalle, D. Nedelka, B. Bauer // Fire Safety J., 1993. – Vol. 20. – P. 241–55.
4. Yang W. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression / W. Yang, T. Parker, H. Ladouceur, R. Kee // Fire Safety J., 2004. – Vol. 39. – P. 41–66.
5. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 5. – С. 74–78.
6. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer in the Process of Movement of Water Drops in a High-temperature Gas Medium // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2013. – V. 86. – № 1. – P. 62–68.
7. Volkov R.S., Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental study of the change in the mass of water droplets in their motion through high-temperature combustion products // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2013. – V. 86. – № 6. – P. 1413–1418.
8. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The Motion of a Manifold of Finely Dispersed Liquid Droplets in the Counter flow of High Temperature Gases // Technical Physics Letters. – 2014. – V. 40. – № 6. – P. 499–502.
9. J. Westerweel, Fundamentals of digital particle image velocimetry // Meas. Sci. and Technol. – 1997. – V. 8. – P. 1379–1392.
10. C. Willert, Assessment of camera models for use in planar velocimetry calibration // Exp. Fluids. – 2006. – V. 41. – P. 135–143.

### МЕТОД ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОТОКОВ В ПРОЦЕССЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Донг Ван Хоанг

Научный руководитель профессор В.Л. Сергеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

В настоящее время в нефтегазодобывающих компаниях в связи внедрением новых ресурсосберегающих технологий и усложнением структуры геологической компоненты геолого-технического комплекса разработки, наличием маломощных пластов со сложной неоднородной структурой, выполняется большой объем бурения и ввода в разработку горизонтальных скважин, что требует и совершенствования технологий мониторинга и управления разработкой месторождений [1].

Отметим, что наиболее информативным источником исходной информации для мониторинга разработки месторождений, определения фильтрационно-емкостных свойств и энергетического состояния нефтяных пластов являются нестационарные гидродинамические исследования скважин (ГДИС) по кривой восстановлений давления (КВД). В общем, процесс интерпретации результатов ГДИ горизонтальных скважин состоит в решении задачи диагностики выделения потоков и решении обратной задачи идентификации по определению фильтрационных параметров пласта и скважины с использованием соответствующей выделенному потоку модели пластовой системы. Наиболее распространенным способом выделения потоков, реализованным в ряде отечественных и зарубежных программ интерпретации ГДИС, является графо-аналитический метод анализа производной от забойного давления. Например, для радиального потока тангенс угла наклона касательной производной от забойного давления  $\Delta p_r' = dp_r / d \lg(t)$  в координатах  $\lg(\Delta p_r') - \lg(t)$  равен нулю, а для линейного потока 0,5 [1–3].

В последние годы в связи с внедрением телеметрических систем, позволяющих осуществлять мониторинг гидродинамических параметров и управлять работой скважин в режиме реального времени, требуются соответствующие методы оперативной диагностики потоков в процессе проведения ГДИС. В данных условиях использование традиционного графо-аналитического метода диагностики потоков, основанного на