

II международная  
научно-практическая  
конференция



# Актуальные проблемы и достижения в естественных и математических науках

Сборник научных трудов  
по итогам конференции

г. Самара  
2015 г.

6. Пустовалов В.К., Романов Г.С. Испарение капли в диффузионном режиме под действием мономонхроматического излучения // Квантовая электроника.1977. Т.4 №7. С.84-94.
7. Щукин Е.Р., Кутуков В.Б. О диффузионном испарении капель в поле электромагнитного излучения при произвольных перепадах температуры // ТВТ.1977. Т.15. №2. С.434-436.
8. Силян Н.А., Щукин Е.Р. Об испарении капель тугоплавких веществ в поле электромагнитного излучения // ЖТФ.1980. Т.50. №2. С.380-384.
9. Щукин Е.Р., Малай Н.В., Шулиманова З.Л. Молекулярный теплообмен твердой сферической частицы с газообразной средой// ТВТ. 2013. Том 51,№4, С.552-556.
10. Калинин В.В., Черненко А.С. Высокотемпературный теплообмен и стефановское течение на поверхности предварительно нагретой металлической частицы в холодном воздухе // ТВТ.2009. Т.47.№3. С.438-447.
11. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Изд-во АН СССР. 1958. 91с.
12. Яламов Ю.И., Галоян В.С. Динамика капель в неоднородных вязких средах. Ереван: Луйс.1985. 280 с.
13. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоздат. 1983. 300 с.
14. Смирнов В.Н. Скорость коагуляционного и конденсационного роста частиц аэрозолей // Труды ЦАО. 1969. Вып.2. С.3-106.
15. Kent J.C. Quasi – steady diffusion – controlled droplet evaporation and condensation // Appl.Sci. Res.1973. V.28. Pp. 315-345.
16. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Субботин В.Н. Испарение и конденсация металлов. М.: Атомиздат. 1976. 216 с.
17. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М.: Мир.1976. 631 с.
18. Shchukin E.R. Solution of some non-linear problems in the theory of heating, vaporization and burning of solid particles and drops // In Mathematical Modeling Problems, Methods, Applications. (Edited by Uvarova L.A. et al.) Kluwer Academic, Plenum Publishers, New York, 2001. Pp. 255-267.
19. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. М.: Иностран. лит. 1960. 510 с.
20. Ферцигер Д.Ж., Капер Г.М. Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976. 551 с.
21. Горский В.В., Оленичева А.А. О применимости закона бинарной диффузии к расчету тепло – и массообмена в газовых смесях сложного химического состава // ТВТ.2011. Т.49.№1. С.69-72.
22. Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. О термодиффузии наночастиц в газах // ЖТФ . 2010. Т.80. Вып.8. С.49-52.
23. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1972. 735 с.
24. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 1972. 270 с.
25. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Изд-во стандартов. 1975. 531с.
26. Таблицы физических величин. Справочник. Под редакцией акад. И.К. Кикоина, М.: Атомиздат. 1976. 1008 с.

## ПРИМЕНЕНИЕ 3-D МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ГОРЕНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА НА ПРИМЕРЕ РЕАЛЬНОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ БКЗ-160

**Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х., Ергалиева А.Б.**

Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

Исследования сложных процессов тепломассопереноса, происходящих в высокотемпературных средах, в которых имеют место различные физико-химические процессы, и прежде всего горение являются актуальными на сегодняшний день. Такие исследования имеют большое практическое значение при создании новых технологий рационального и экологически чистого получения энергии. Одной из важнейших задач теории горения является поиск альтернативных путей для разработки новых, наиболее производительных методов интенсификации сжигания топлива. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент - позволяют оптимально решать научные и проектно- конструкторские задачи (совершенствование, проектирование новых котельных агрегатов; модернизация горелочных устройств; разработка систем многоступенчатого горения топлива и т.д.) [1-4].

Для решения уравнений математической модели горения пылеугольного факела был использован метод контрольного объема (МКО). Одним из важных свойств метода контрольного объема является то, что в нем заложено точное интегральное сохранение таких величин, как масса, количество движения и энергия на любой группе контрольных объемов и, следовательно, на всей расчетной области. Это свойство проявляется при любом

числе узловых точек, а не только в предельном случае очень большого их числа. Таким образом, даже решение на грубой сетке удовлетворяет точным интегральным балансам. Вычислительные эксперименты на реальной энергетической установке камеры сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 были проведены с помощью стартового пакета программ FLOREAN[3-4].

Этот пакет программ был использован для основы численных исследований и был дополнен нами новой компьютерной программой GEOM, которая пишется всегда при выборе нового объекта исследования (топочная камера), с учетом геометрии, размеров горелочных устройств, их формы и расположением в пространстве камеры сгорания. В этой компьютерной программе учитываются все характеристики сложного реального физико-химического процесса в выбранном нами объекте исследования и задаются граничные условия для решения выбранной задачи исследования, адекватно отражающие этот процесс.

Математическая модель задачи о горении пылеугольного факела основана на уравнениях динамики сплошных сред.

Уравнение неразрывности, закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_i} = 0$$

Уравнение количества движения:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$$

Уравнение баланса энергии:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Одним из ключевых этапов построения математической модели было использование подхода, предложенного Рейнольдсом. Суть, которого заключается в представлении мгновенных значений параметров потока в виде суммы осредненной величины (например, статистически стационарного течения по времени) и ее пульсационной составляющей. Применяя процедуры осреднения, мы получим новые незамкнутые корреляции (так называемые рейнольдсовы напряжения). Для описания двухфазных течений и течений с горением была принята модель с двумя дифференциальными уравнениями, модель к-ε:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right],$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right],$$

где  $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Модельные константы:  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ .

В настоящей работе проведен вычислительный эксперимент по горению угля в камере сгорания реального промышленного энергетического котла БКЗ-160, Алматинской ТЭЦ-3. Установленная электрическая мощность ТЭЦ-3 – 173 МВт, тепловая – 335,26 Гкал/ч. На ТЭЦ-3 установлено 6 котельных агрегатов БКЗ-160, паропроизводительность каждого из которых 160 т/час. По боковым сторонам топочной камеры расположены 4 блока прямооточных щелевых горелок (по 2 горелки в блоке), направленных по касательной к окружности диаметром 60x4 с шагом 64 мм. Производительность одной горелки по топливу составляет 4 т/ч. Расход вторичного воздуха через горелку составляет  $V=6000 \text{ м}^3/\text{ч}$  при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha=0,38$ . Температура подогрева вторичного воздуха составляет  $t=380^\circ\text{C}$ . Угольная пыль подается в горелки горячим воздухом. Расход воздуха на транспорт пыли на одну горелку составляет  $V=4850 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Коэффициент избытка первичного воздуха составляет  $\alpha=0,3$ . Балансовая температура аэросмеси на выходе из горелки составляет  $t=250^\circ\text{C}$ . Площадь поперечного сечения канала аэросмеси  $F=0,105 \text{ м}^2$ , что обеспечивает скорость аэросмеси на

выходе из горелки  $W_1=25$  м/с. Соотношение скоростей вторичного и первичного воздуха составляет  $W_2/W_1=1,64$ . Коэффициент избытка воздуха в горелках составляет  $\alpha_r = \alpha_1 + \alpha_2 = 0,68$ .

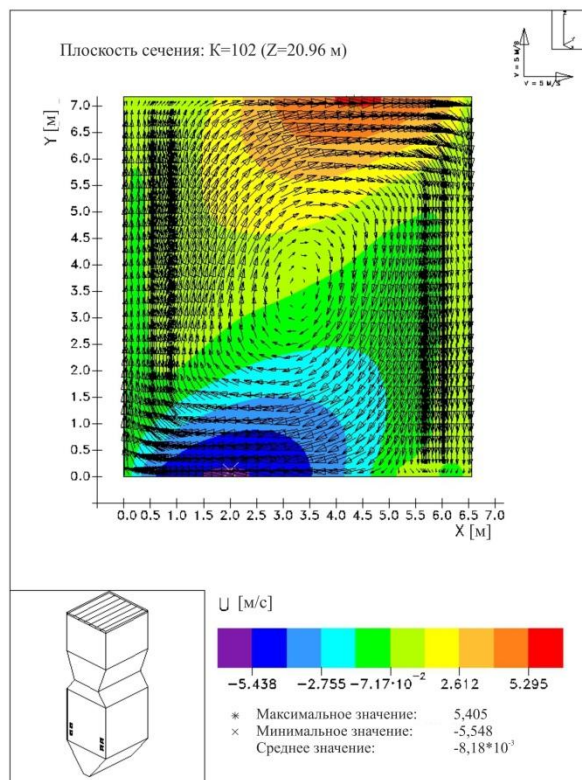
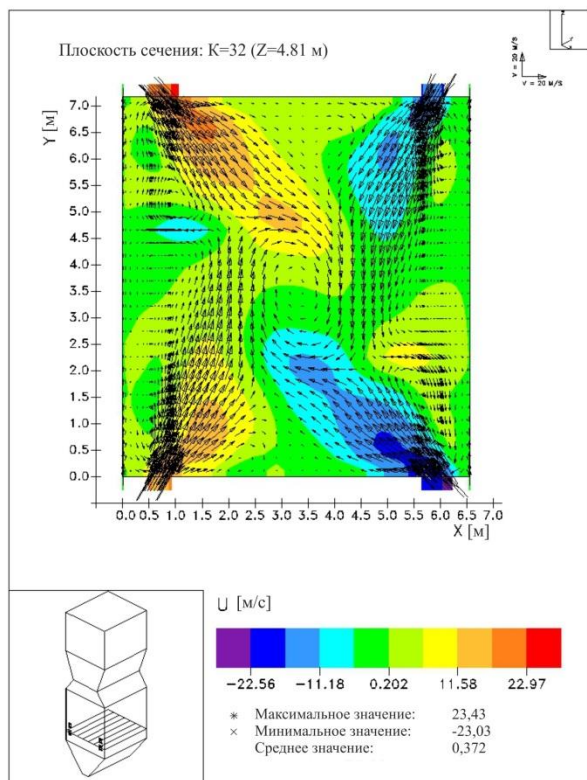


Рис.1. Распределение u-компоненты вектора полной скорости в поперечном сечении нижнего яруса камеры сгорания ( $h=4.81$  м)

Рис.2. Распределение u-компоненты вектора полной скорости на выходе из камеры сгорания ( $h=20.96$  м)

На Рисунках 1-6 представлены распределения компонент полной скорости  $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  в поперечных сечениях камеры сгорания БКЗ-160. Рисунки 1,3,5 показывают распределения компонент полной скорости  $u, v, w$  соответственно в сечениях, которые приходятся на нижний ярус горелок ( $k=32, h=4.81$  м). Рисунки 2,4,6 – на выходе из камеры сгорания ( $k=102, h=20,96$  м).

Длина стрелок-векторов показывает величину компонент скорости, их направление указывает направленность движения всего потока. Подтверждением, смоделированного в данном исследовании, аэродинамики течения потока скорости с тангенциально установленными горелочными устройствами являются труды [5,6,8].



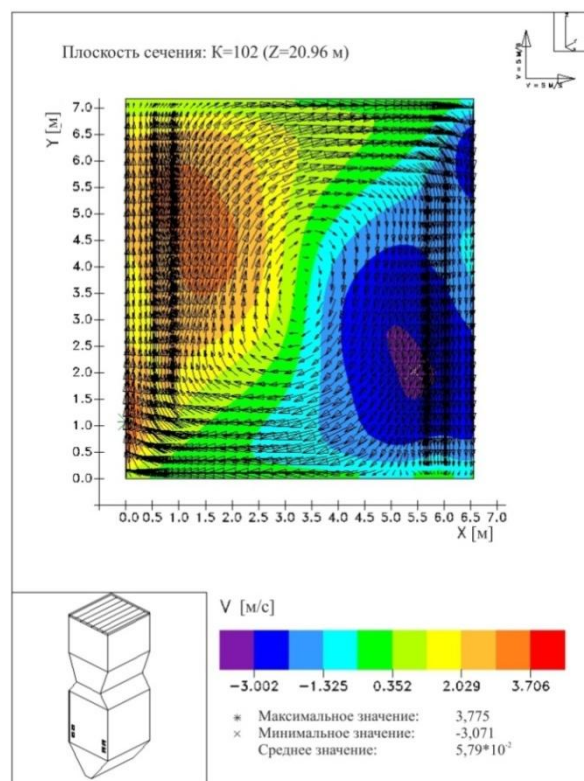
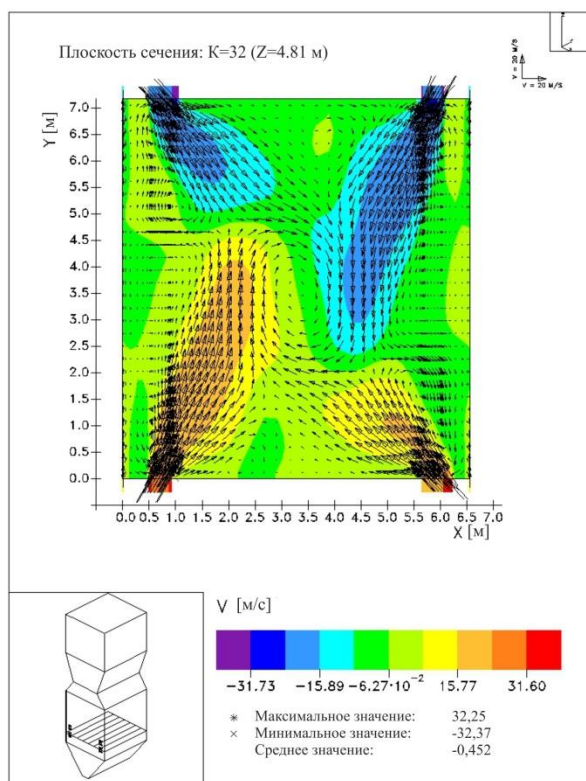


Рис.3. Распределение v-компоненты вектора полной скорости в поперечном сечении нижнего яруса камеры сгорания (h=4.81 м)      Рис.4. Распределение v-компоненты вектора полной скорости на выходе из камеры сгорания (h=20.96 м)

Распределение компонент вектора полной скорости отчетливо складывает картину течения: места расположения горелочных устройств, в какой области, и с какой скоростью происходит завихрение потока. Как видно из Рисунков 1-6 в центральной области камеры сгорания происходит объемное завихрение потока благодаря тангенциально установленным горелкам. Это, несомненно, улучшает процесс горения, снижает мехнедожег топлива, ввиду того, что угольные частицы дольше находятся в горящем потоке. Цветной фон графиков позволяет нам с очень большой точностью указать в выбранной области скорость потока. Как видно из графиков, картины распределения векторов скорости течения в центральной области расположения горелочных устройств отличается от картины распределения на выходе из горелочного устройства. Достижение экстремальных теплофизических и концентрационных характеристик достигается именно в центральной области камеры.

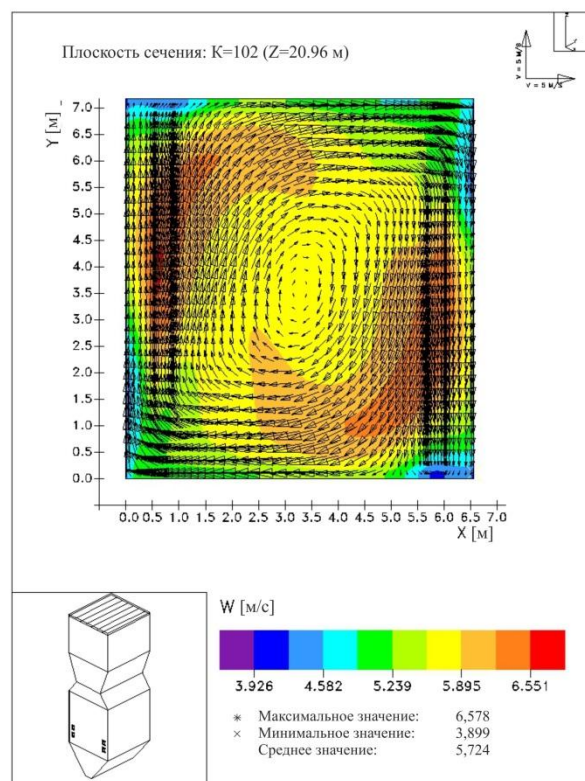
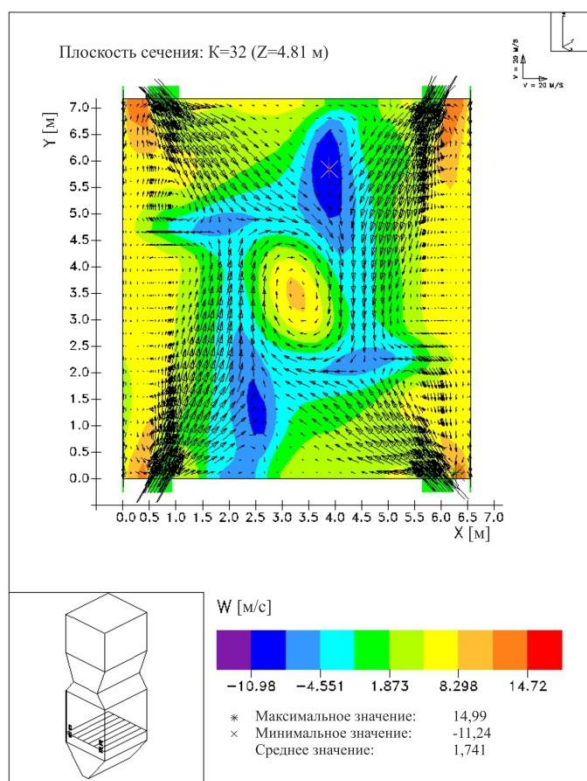


Рис.5. Распределение w-компоненты вектора полной скорости в поперечном сечении нижнего яруса камеры сгорания (h=4.81 м)

Рис.6. Распределение w-компоненты вектора полной скорости на выходе из камеры сгорания (h=20.96 м)

На выходе из камеры сгорания (Рисунок 2,4,6) наблюдается выравнивание поля скоростей, вихревой характер течения ослабевает.

Как видно из Рисунок 7,8, где представлены картины распределения давления по высоте топочной камеры, заметно, что в области нижнего яруса горелок давление сильно отличается от области на выходе из камеры сгорания. Это достаточно логично, учитывая, что в области расположения горелок происходит интенсивное смешение топлива и окислителя. По мере удаления от этой области горелок давление монотонно убывает, что отражает реальное поле давления в топочных камерах промышленных котлов [6,7].

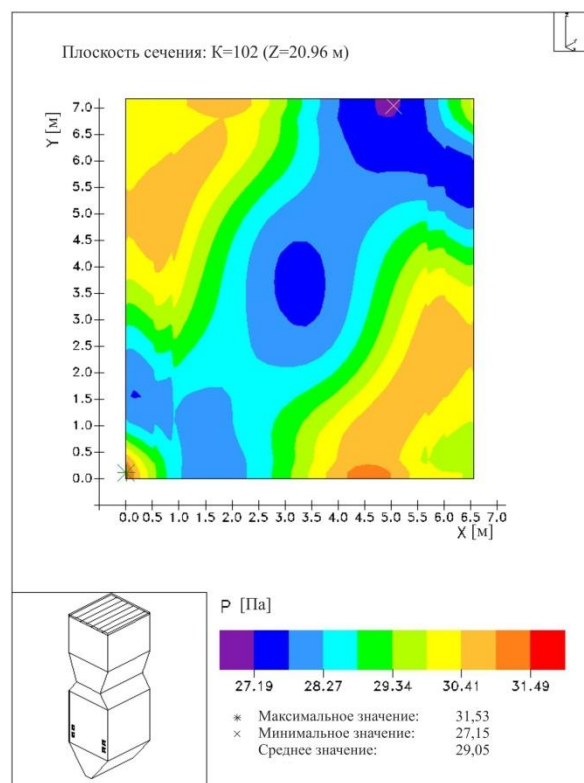
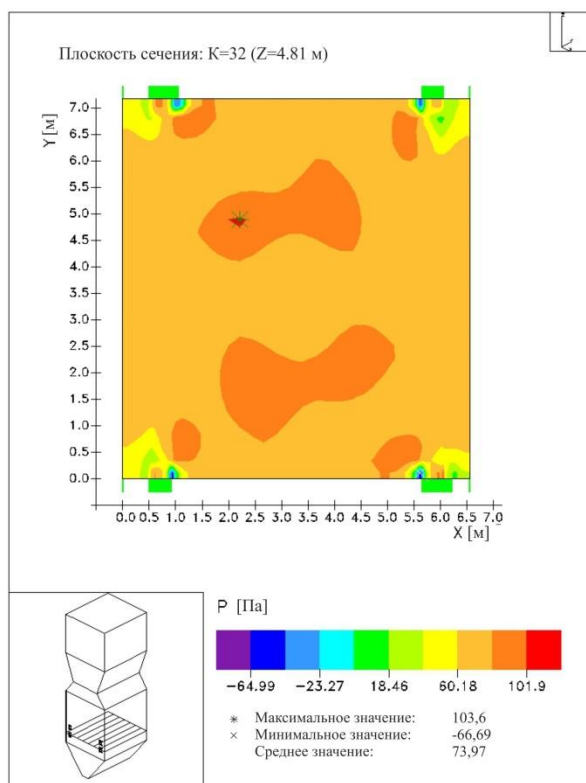


Рис.7. Распределение давления P в поперечном сечении камеры сгорания в зоне горелок (h=4.81 м)

Рис.8. Распределение давления P на выходе из камеры сгорания (h=20.96 м)

Применение 3-D моделирования для решения задачи о горении пылеугольного топлива является неотъемлемой частью современных исследований. В результате данного исследования проведено исследование сложных аэродинамических характеристик в камере сгорания котла БКЗ-160 реального энергетического объекта Алматинская ТЭЦ- 3. В центральной области камеры сгорания наблюдается сильное увеличение давления – это обусловлено максимальными значениями скорости в этой области.

#### Список литературы

- 1 A.S. Askarova, E.I.Karpenko, I.V. Loktionova, V.E.Messerle, A.B.Ustimenko. Optimization of the Combustion of Power-Station Coals Using Plasma Technologies.//Thermal Engineering. Vol.51. – No 6. – 2004. - 488-4 93
- 2 Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR–Verfahrens und der Kohleverbrennung: Fortschritt–Berichte VDI–Verlag. –1992. – Reiche 6, №268. – 158 s.
- 3 Leithner, R. Numerical Simulation. Computational Fluid Dynamics CFD: Course of Lecture. – Braunschweig, 2006. - 52 p.
- 4 Askarova, A.S., Lavrichsheva, Ye.,Leithner, R., Müller, H., Magda, A. Combustion of low-rank coals in furnaces of Kazakhstan Coal-firing Power Plants // VDI Berichte. – 2007. – №1088. – P.497-502.
- 5 Виленский Т.В., Хзмаян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия,1978. – 275 с.
- 6 Хзмаян Д.М. Теория топочных процессов. М.: Энергоатомиздат,1990-352 с.
- 7 Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастанского угля на тепловых электростанциях. – Алматы.: Гылым,1996. – 272
- 8 Устименко Б.П.,Алияров Б.К., Дорошин Г.А., Шишкин А.А.Исследование и реконструкция топки котла ПК-39 под тангенциальную компоновку прямоточных горелок. Научный отчет КазНИИ Энергетики, Алматы. – 1989.- № 0187006172.-80 с.